پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال دوم، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۲
صص. ۱۵٤-۱۳۳

برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب در حوضهٔ آبخیز رودخانهٔ زال با استفاده از روش‌های پسیاک، پسیاک اصلاح‌شده و GIS

عقیل مددی * ـ دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی
شهرام نیک‌پور ـ کارشناس ارشد جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۰/۱۵ تأیید نهایی: ۱۳۹۲/۰۳/۱۳

چکیده

حوضهٔ آبخیز رودخانهٔ زال در جنوب شهرستان خلخال و جنوب استان اردبیل واقع شده است و یکی از زیرحوضه‌های حوضهٔ آبریز رودخانهٔ قزل‌اوزن است. هدف پژوهش پیش رو، ارزیابی و مقایسهٔ فرسایش خاک و حجم رسوب تولیدی حوضهٔ آبخیز رودخانهٔ زال با استفاده از مدل‌های پسیاک و پسیاک اصلاح‌شده (ام. پسیاک) است. در این پژوهش با تفکیک حوضه به چهار زیرحوضهٔ لرد، زال، کلبندرود و دره‌چای، میزان فرسایش خاک و تولید رسوب کل حوزهٔ آبخیز و زیرحوضه‌های آن با استفاده از روش‌های پسیاک و پسیاک اصلاح شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی نشان داد که در مدل پسیاک کل حوضهٔ آبخیز و زیرحوضه‌های کلبندرود، دره‌چای و لرد، از نظر شدت فرسایش، در کلاس و شدت رسوب‌دهی متوسط و زیرحوضهٔ زال در کلاس و شدت رسوب‌دهی زیاد قرار دارند. رسوب ویژه به‌وسیلهٔ مدل پسیاک در کل حوضه ۳۸۸/٦، زیرحوضهٔ زال ۵۲۰/۹، زیرحوضهٔ کلبندرود ٤۰۹/۸، زیرحوضهٔ دره‌چای ۳۵۷/۱ و زیرحوضهٔ لرد ۳۱۱/۱ متر مکعب در کیلومتر مربع در سال برآورد شده است، در حالی‌که در مدل ام. پسیاک کل حوضهٔ آبخیز و زیرحوضه‌های کلبندرود، دره‌چای و لرد، از نظر شدت رسوب‌دهی، در کلاس و شدت رسوب‌دهی کم و زیرحوضهٔ زال در کلاس و شدت رسوب‌دهی متوسط قرار گرفت و رسوب ویژه در کل حوضه ۱۹۵/۱، زیرحوضهٔ زال ۲٦۳/۱، زیرحوضهٔ کلبندرود ۲۰٦، زیرحوضهٔ دره‌چای ۱۷۹ و زیرحوضهٔ لرد ۱۵۵/۵ متر مکعب در کیلومتر مربع در سال برآورد شد.

کلیدواژه‌ها: فرسایش خاک، حوضهٔ زال، پسیاک، پسیاک اصلاح‌شده، سیستم اطلاعات جغرافیایی.

---

* نویسنده مسئول: ۰۹۱۴۳۵۳۳۰۲۶ E-mail:aghil48madadi@yahoo.com

مقدمه

فرسایش خاک عبارت است از فرسودگی و از بین رفتن مداوم خاک سطح زمین (انتقال یا حرکت آن از نقطه‌ای به نقطهٔ دیگر در سطح زمین)، به‌وسیلهٔ آب یا باد (کردوانی، ۱۳۸۷: ۹۷). در حوضهٔ آبخیز رودخانهٔ زال، وجود عواملی چون سازندهای سست، لغزش‌خیز بودن منطقه، توپوگرافی خشن و اختلاف ارتفاع‌های زیاد مناطق کوهستانی مرتفع با مناطق کم‌ارتفاع‌تر، چرای مفرط و کاهش پوشش گیاهی، تخریب جنگل‌ها برای ایجاد مزارع کشاورزی، ساخت جاده‌ها و مصارف سوخت، شخم‌زنی‌های نامناسب و نادرست روستاییان منطقه در جهت شیب و بهره‌برداری بیش‌ازحد کشاورزان منطقه از توان خاک برای کشاورزی، زمینهٔ فرسایش خاک را فراهم کرده است. با توجه به موارد گفته‌شده در بالا، برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب در حوضهٔ آبخیز رودخانهٔ زال از اهمیت زیادی برخوردار است. بنابراین در این پژوهش تلاش خواهد شد با استفاده از روش پسیاک و پسیاک اصلاح‌شده (ام پسیاک)[1]، میزان فرسایش حوضه محاسبه شود.

در ارتباط با مدل‌های پسیاک و ام. پسیاک، مطالعاتی بدین شرح انجام گرفته است. زنگنهٔ اسدی و همکاران (۱۳۸۸) فرسایش آبی حوضهٔ آبریز سراب سفیدونایی را با روش پسیاک مورد ارزیابی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که سازند گورپی و واحد مارن، نسبت به دیگر سازندها رسوب‌دهی بالاتری دارند. جداری عیوضی و جوکار سرهنگی (۱۳۸۰) میزان فرسایش و تولید رسوب را در حوزهٔ آبخیز بوجان با روش واحدهای ژئومورفولوژی و پسیاک بررسی کردند و به این نتیجه رسیده‌اند که ارزیابی فرسایش با روش مذکور در واحدهای ژئومورفولوژی، ثابت می‌کند که این روش از سرعت و دقت عمل بیشتری در تشخیص مهم‌ترین عوامل فرسایش و بحرانی‌ترین نواحی از نظر تولید رسوب در سطح منطقه برخوردار است. رینارد و استون (۱۹۸۲) مدل ام. پسیاک را با مدل‌های فلکسمن[2] ـ رینارد، ایی. پی. ام. و USLE[3] اصلاح‌شده مقایسه کرده و نتیجه گرفتند که مدل پسیاک اصلاح‌شده، بیشترین هماهنگی را با اندازه‌گیری‌های کمّی داشته است. تاجبخش و معماریان (۲۰۰۳) در زیرحوضهٔ کردیان با استفاده از مدل ام. پسیاک و GIS، به ارزیابی فرسایش و رسوب پرداختند. نام‌بردگان ابتدا حوضه را به نوزده واحد کاری تقسیم کرده و سپس در هر واحد، نُه عامل مؤثر در روش پسیاک را برآورد کردند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد که کل حوضه از نظر تولید رسوب به سه کلاس متوسط، نسبتاً زیاد و زیاد طبقه‌بندی می‌شود. آل شیخ و همکاران (۱۳۸۳) تولید رسوب در حوزهٔ آبخیز چیخواب را با روش پسیاک اصلاح‌شده و سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی (GIS) مطالعه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که حوضه از نظر کلاس‌های فرسایشی و شدت رسوب‌دهی، به چهار کلاس کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تفکیک می‌شود و کل حوزه در کلاس فرسایشی زیاد قرار می‌گیرد. داوری و همکاران (۱۳۸۴) میزان تولید رسوب حوضهٔ آبخیز نوژیان در جنوب شرقی خرم‌آباد را با استفاده از مدل ام. پسیاک بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که نسبت مقدار رسوب برآورد شده با استفاده از مدل ام. پسیاک به آمار رسوب اندازه‌گیری شده، ۰/۶۰۲ برابر است. سلیمانی و بیات (۱۳۸۴) به مطالعهٔ فرسایش با استفاده از مدل ام. پسیاک و داده‌های ماهواره‌ای در زیرحوضهٔ سفیدآب هراز پرداختند. نتیجهٔ این پژوهش نشان داد

1. Psiac &M Psiac
2. Flaxman
3. Universal Soil Loss Equation

اختلاف اندکی بین نتایج حاصل از داده‌های ماهواره‌ای و آمار ایستگاه هیدرومتری وجود دارد. دیونت[1] و همکارانش (۲۰۰۵) میزان فرسایش خاک در مخازن سدها را در اسپانیا با روش‌های نیمه‌کمّی مطالعه کردند و به این نتیجه رسیده‌اند که این روش‌ها و به‌ویژه روش پسیاک، نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهند. عسگری و همکاران (۱۳۸۵) فرسایش خاک حوضهٔ سد ایلام را از نظر کمّی و کیفی با روش ام. پسیاک در محیط GIS برآورد کردند و از نظر شدت رسوب‌دهی حوضه را به سه کلاس کم، متوسط و زیاد تفکیک کردند. دیونت و همکارانش (۲۰۰۶) با روش‌های متفاوت به پیش‌بینی تولید رسوب حوضه‌ها در محیط‌های مدیترانه پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مدل FSM و پسیاک، بهتر از روش‌های دیگر در این مناطق به پیش‌بینی می‌پردازد. مددی (۱۳۸۷) تولید رسوب در حوضهٔ یدی بولوک‌چای در استان اردبیل را با روش‌های پسیاک و ام. پسیاک مطالعه کرد و نشان داد که نتایج حاصل از روش ام. پسیاک به واقعیت نزدیکتر است. یاوری و همکاران (۲۰۱۰) زیرحوضهٔ جنگان (حوضهٔ کارون) را با روش پسیاک اصلاح‌شده مورد بررسی قرار دادند و میزان تولید رسوب را ۴۲۰۲۳ مترمکعب در سال برآورد کردند.

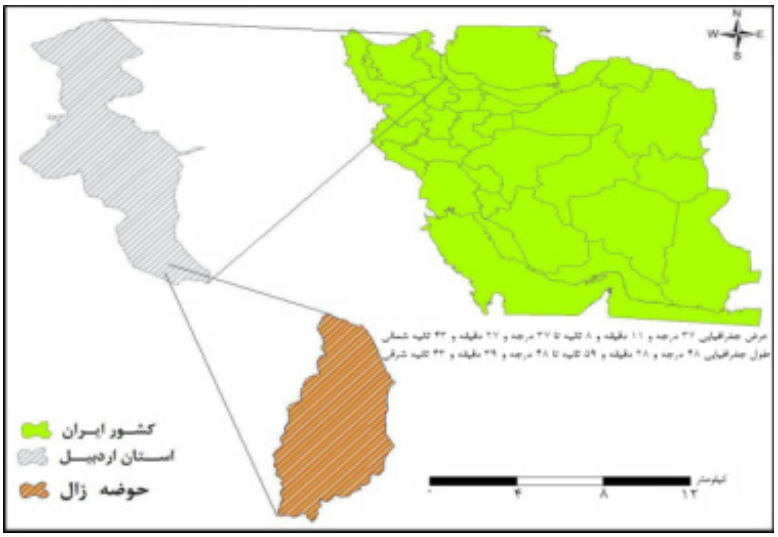
تامن[2] و همکارانش (۲۰۱۱) به برآورد خطر رسوب مخازن در شمال اتیوپی با استفاده از روش تجربی و نیمه‌کمّی پرداختند. فارلن[3] و همکارانش (۲۰۱۲) گزینه‌های مدیریتی را برای کاهش رواناب و تولید رسوب در جنوب شرقی فرانسه با استفاده از روش شبیه‌سازی هیدرولوژی و فرسایش (مدل رودخانه)[4] مورد مطالعه قرار دادند. محققان ابتدا منطقه را به دو قسمت A و B تقسیم کرده و میزان تولید رسوب را ۳۵۵ تن در قسمت A و ۲۴۱ تن در قسمت B برآورد کردند. آنها درنهایت دریافتند که این روش برای اراضی کشاورزی نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. قضاوی و همکارانش (۱۳۹۱) سه روش ایی. پی. ام.، پسیاک و پسیاک اصلاح‌شده را مقایسه کردند. نتایج حاصل از مقایسهٔ روش‌ها نشان داد که روش پسیاک برای برآورد میزان فرسایش و تولید رسوب سالانه در شرایط طبیعی و خاکی حوضهٔ مطالعاتی، نسبت به دو روش دیگر مناسب‌تر است. محمدی‌ها و همکارانش (۲۰۱۲) تولید رسوب در حوضهٔ ایوانکی را با استفاده از مدل اف. اس. ام و ام. پسیاک مطالعه کرده و نشان دادند که میزان رسوب‌زایی برای مدل FSM برابر ۰/۹۱ تن در هکتار در سال و برای مدل ام. پسیاک، به‌میزان ۳/۲۱ تن در هکتار در سال برای کل حوضه است. درنهایت ارقام برآورد شده با میزان بار رسوبی محاسباتی بیست‌ودوسالهٔ اخیر ایستگاه رسوب‌سنجی ایوانکی (یعنی ۰/۹۳ تن در هکتار در سال) مقایسه و مشخص شد، مدل FSM نسبت به ام. پسیاک، نتیجهٔ نزدیکتری به برآورد رسوب از ایستگاه رسوب‌سنجی نشان می‌دهد.

همان‌طوری که مطالعات بیان‌شده و دیگر کارهای انجام‌گرفته در ایران و جهان ـ که آوردن همهٔ موارد در اینجا امکان‌پذیر نیست ـ نشان می‌دهند، روش پسیاک و پسیاک اصلاح‌شده، نسبت به روش‌های دیگر در مناطق خشک و نیمه‌خشک، جواب قابل قبول‌تری به‌دست می‌دهند و با رسوب واقعی در طبیعت همخوانی دارند. علاوه‌بر این، چون منطقهٔ مطالعاتی نیز در منطقهٔ نیمه‌خشک قرار گرفته است (البته دلایل بیشتر در قسمت مواد و روش‌ها ارائه شده است)، بنابراین از این روش استفاده شده است.

1. Devente
2. Tamene
3. Furlan
4. STREAM model

موقعیت جغرافیایی منطقه

حوضهٔ آبخیز رودخانهٔ زال در جنوب استان اردبیل و شهرستان خلخال، یکی از زیرحوضه‌های حوضهٔ آبریز رودخانهٔ قزل‌اوزن و دریای خزر در شمال غربی ایران است که در عرض جغرافیایی با مختصات ۳۷ درجه و ۱۱ دقیقه و ۸ ثانیه تا ۳۷ درجه و ۲۷ دقیقه و ۴۳ ثانیهٔ شمالی و طول ۴۸ درجه و ۲۸ دقیقه و ۵۹ ثانیه تا ۴۸ درجه و ۳۹ دقیقه و ۴۳ ثانیهٔ شرقی واقع شده است (شکل ۱). مساحت حوضه ۲۹۹ کیلومتر مربع و ارتفاع متوسط آن ۱۸۸۹ متر است. بلندترین نقطهٔ حوضه قلهٔ آق‌داغ با ارتفاع ۳۳۲۲ و کم‌ارتفاع‌ترین قسمت آن در محل مصب حوضه ۶۰۰ متر ارتفاع دارد و رودخانهٔ زال مهم‌ترین زهکش حوضه، ۴۷ کیلومتر طول دارد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضهٔ آبخیز رودخانهٔ زال

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از روش مشاهده‌ای و بازدیدهای میدانی برای مشاهدهٔ انواع فرسایش، انطباق نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی و کاربری اراضی استفاده شده است. از روش کتابخانه‌ای برای مطالعهٔ پیشینه و ادبیات پژوهش استفاده شده است. همچنین به‌دلیل عدم وجود آمار و اطلاعات در مورد فرسایش خاک حوضهٔ آبخیز رودخانهٔ زال، از روش‌های تجربی پسیاک و ام. پسیاک برای برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب حوضهٔ آبخیز رودخانهٔ زال و زیرحوضه‌های آن استفاده شده است. در این روش نُه عامل مؤثر در فرسایش خاک مورد بررسی قرار می‌گیرد. دلایل چندی سبب شد تا از این روش در پژوهش حاضر استفاده شود که به شرح زیر هستند:

الف) این روش برای محاسبهٔ شدت فرسایش خاک و تولید رسوب برای مناطق خشک و نیمه‌خشک ارائه شده است (مقیمی و محمودی، ۱۳۸۳: ۱۶۷).

ب) در مقایسه با روش‌های تجربی دیگر، بیشترین عامل مؤثر در فرسایش خاک را در نظر گرفته است. بنابراین می‌تواند بهتر از روش‌های دیگر جواب بدهد (رفاهی، ۱۳۷۵: ۲۳۴).

ج) نتایج حاصل از به‌کار گیری مدل پسیاک در بررسی تولید رسوب نشان داده که اختلاف بین بار رسوبی برآوردی از این روش با میزان مشاهده‌ای کم است.

د) روش پسیاک یکی از فراگیرترین روش‌های تجربی برآورد رسوب در ایران است (یاوری و همکاران، ۲۰۱۰: ۱).

نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ و زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، نقشهٔ خاک، عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای مواد مورد استفاده در پژوهش هستند. همچنین از نرم‌افزار ArcGis برای رسم نقشه استفاده شده است.

یافته‌های پژوهش

برای محاسبهٔ فرسایش خاک و تولید رسوب، حوضهٔ آبخیز رودخانهٔ زال به چهار زیرحوضه (با نام‌های زال، کلبندرود، دره‌چای و لرد) تقسیم شد. سپس به هریک از عوامل نُه‌گانهٔ مؤثر در فرسایش خاک، امتیازی داده شد و نقشه‌های مربوط به آنها رسم و جداول تهیه شدند. در زیر به بررسی بیشتر این عوامل پرداخته شده است.

زمین‌شناسی سطحی

حوزهٔ آبخیز رودخانهٔ زال از نظر زمین‌ساختی، بخشی از واحد ساختمانی آذربایجان شمرده می‌شود. به نظر می‌رسد که این حوضه از نظر ساختمانی فعال بوده و هنوز به آرامش کامل نرسیده است؛ دلیل این امر وجود گسل‌هایی است که در قسمت‌های مختلف حوضه دیده می‌شوند.

یکی از عوامل مؤثر در ارزیابی فرسایش خاک و تولید رسوب در روش‌های پسیاک و ام. پسیاک، عامل زمین‌شناسی سطحی است. بیشترین سطح حوضه (در حدود ۲۵ درصد از وسعت کل حوضه) از گدازه‌های آندزیتی همراه با توف‌ها و سنگ آهک نازک تشکیل شده که در مدل ام. پسیاک، حساسیتی متوسط در برابر فرسایش دارند. از سازندهای گستردهٔ دیگر در سطح حوضه، گدازه‌های آندزیتی و تراکی آندزیتی همراه با توف‌های بین لایه‌ای و با حساسیت کم در برابر فرسایش، رسوب‌های قرمز همراه با رنگ خاکستریِ مایل به سبز و اغلب گچ‌مانند و نواری و نیز، سنگ آهک‌های سیلتی تا ماسه‌ای نومولیت‌دار و شیل‌های خاکستری تا سیاه با فرسایش‌پذیری زیاد هستند. از سازندهای کم‌وسعت حوضه، سازندهای کوارتزیت سفید تا خاکستری همراه با سیلتستون، شیل و توف با حساسیت‌پذیری متوسط در برابر فرسایش، برش یا کنگلومرای آهکی با حساسیت‌پذیری متوسط در برابر فرسایش و ماسه‌سنگ آهکی با فرسایش‌پذیری بالا هستند. با استفاده از درجه‌های صفر تا ده در روش پسیاک، امتیاز عامل زمین‌شناسی سطحی کل حوضه و زیرحوضه‌های آن در روش ام. پسیاک، از رابطهٔ ۱ به‌دست آمده است (جدول ۱).

$$X_1 = Y_1$$ رابطه ۱)

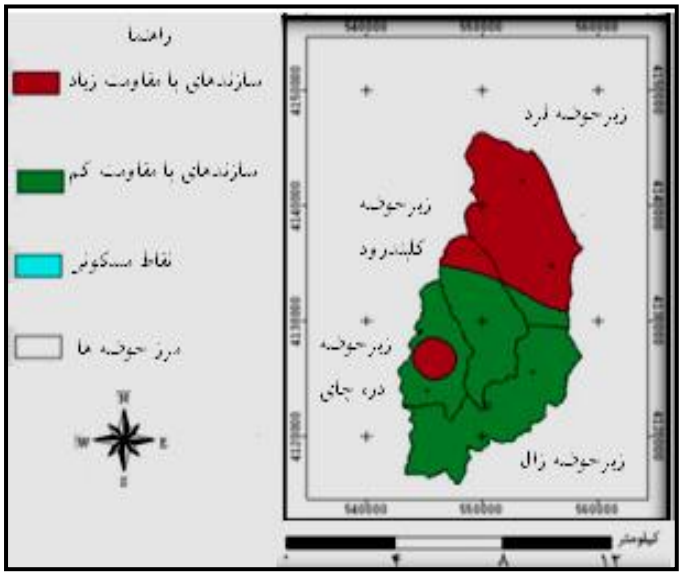
که در آن، X_1: امتیاز عامل زمین‌شناسی سطحی و Y_1: شاخص فرسایش زمین‌شناسی سطحی است.

زیرحوضهٔ زال به‌دلیل داشتن سازندهای سست، فرسایش‌پذیرترین زیرحوضه و زیرحوضهٔ لرد به‌دلیل داشتن سازندهای مقاوم و سخت، کم‌فرسایش‌پذیرترین زیرحوضه به‌شمار می‌رود. همچنین با توجه به گسترهٔ سازندهای

زمین‌شناسی سست در زیرحوضهٔ کلبندرود نسبت به زیرحوضهٔ دره‌چای، امتیاز عامل زمین‌شناسی زیرحوضهٔ کلبندرود بیشتر از زیرحوضهٔ لرد شده است (شکل ۲).

جدول ۱. امتیاز عامل زمین‌شناسی

نام حوضه	امتیاز عامل زمین‌شناسی سطحی
کلبندرود	۶/۱
لرد	۵/۳
دره‌چای	۵/۸
زال	۶/۵
کل حوضه	۵/۹*



شکل۲ . نقشهٔ امتیاز عامل زمین‌شناسی حوضه و زیرحوضه‌ها

عامل خاک

یکی دیگر از عوامل فرسایش خاک و تولید رسوب در روش‌های پسیاک و ام. پسیاک، عامل خاک است (رفاهی، ۱۳۸۸: ۲۹۱). خاک‌های حوضهٔ زال براساس تقسیم‌بندی فائو، در مناطق کوهستانی لیتوسول و ریگوسول بسیار کم‌عمق تا کم‌عمق همراه با سنگ‌ریزه و مستعد برای فرسایش است و در تراس‌ها و حاشیهٔ رودخانهٔ قزل اوزن، خاک‌ها از لیتوسول نیمه‌عمیق تا کم‌عمق و در بعضی جاها، خاک‌های نیمه‌تکامل‌یافته است (مؤسسهٔ تحقیقات خاک و آب، ۱۳۷۳). در روش ام. پسیاک با استفاده از درجه‌های صفر تا ده، عامل خاک از رابطهٔ ۲ تعیین می شود (جدول ۲).

رابطه ۲) $X_2 = 16.67K$

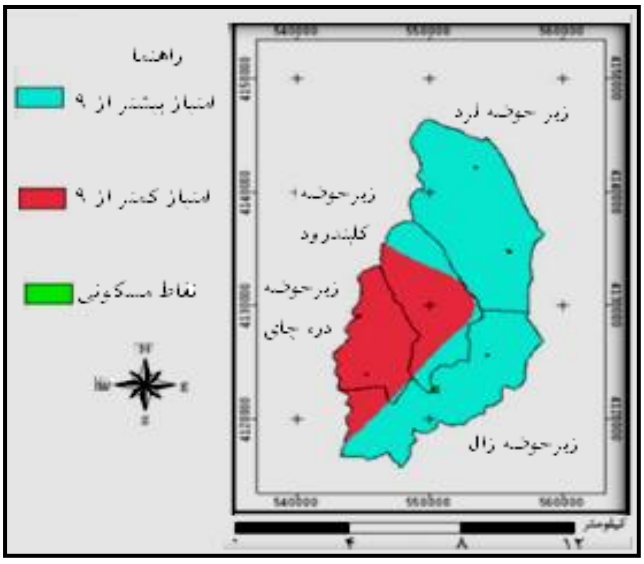
که در این رابطه، X_2: امتیاز رسوب‌دهی خاک در روش پسیاک و K: عامل فرسایش‌پذیری خاک در فرمول جهانی فرسایش است.

جدول ۲. ضریب رسوب‌دهی و امتیاز عامل خاک

نام حوضه	ضریب رسوب‌دهی	امتیاز عامل خاک
کلبندرود	۰/۵۸	۹/۷
لرد	۰/۵۳	۸/۸
دره‌چای	۰/۵۶	۹/۳
زال	۰/۵۹	۹/۹
کل حوضه	۰/۵۶	۹/۴

* در تعیین امتیاز عوامل نه‌گانهٔ مدل پسیاک در حوضه، میانگین وزنی امتیازهای زیرحوضه‌ها در نظر گرفته شده است.

گفتنی است، همان‌طوری که جدول ۲ نیز نشان می‌دهد، امتیاز خاک در زیرحوضهٔ لرد ۸/۸ (کمتر از ۹) و در دیگر زیرحوضه‌ها از ۹/۳ تا ۹/۷ به‌دست‌آمده است. درواقع دلیل امتیاز بالاتر زیرحوضه‌های زال، لرد و کلبندرود، نفوذپذیری کمتر خاک و شیب بیشتر آنها نسبت به زیرحوضهٔ دره‌چای است (شکل ۳).

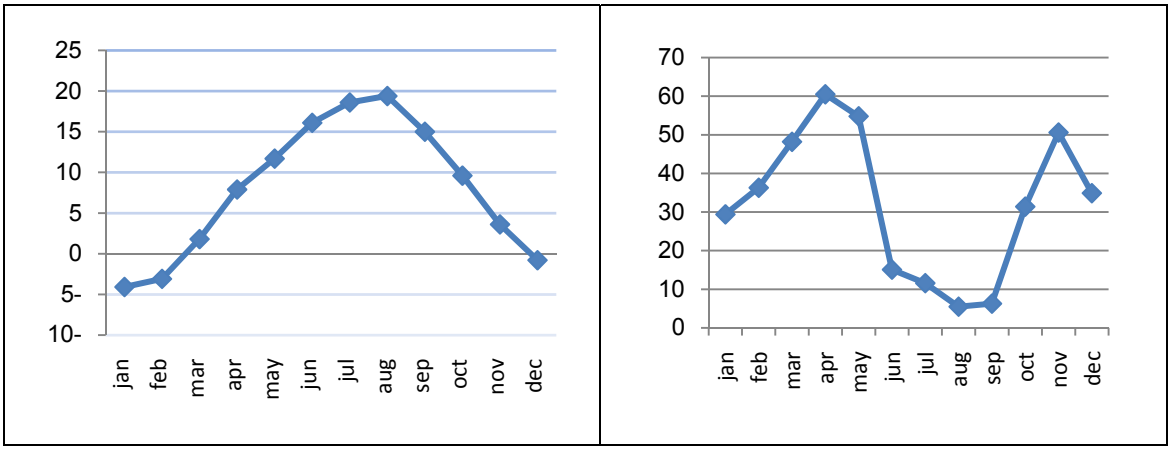


شکل ۳. نقشهٔ امتیاز عامل خاک حوضه و زیرحوضه‌ها

عامل آب‌وهوا

برای بررسی آب‌وهوای حوضه از داده‌های نوزده‌سالهٔ ایستگاه سینوپتیک خلخال (۱۹۸۷ تا ۲۰۰۵) استفاده شده است. میانگین بارندگی سالانه در طول این دوره، ۳۸۴/۶ میلی‌متر است. بیشترین میزان بارش در ماه فروردین (۶۰/۵ میلی‌متر) و کمترین میزان بارش در مرداد ماه (۵/۵ میلی‌متر) گزارش شده است. توزیع فصلی بارش حاکی از آن است که به‌ترتیب، فصل بهار ۱۳۰/۴ میلی‌متر، زمستان ۱۲۳/۹ میلی‌متر، پاییز ۱۱۶/۹ و تابستان ۲۳/۴ میلی‌متر از بارش سالانه را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۴). با توجه به کوهستانی بودن حوضه در فصل سرد، بیشتر بارش‌ها به‌صورت برف است.

میانگین دمای سالانه ۸ درجه سانتی‌گراد است. مرداد، گرم‌ترین ماه سال با دمای ۱۹/۴ درجهٔ سانتی‌گراد و دی، سردترین ماه سال با دمای ۴/۱- درجهٔ سانتی‌گراد است (شکل ۵). به‌علاوه در همین مدت، میانگین تعداد روزهای یخبندان ۱۵۳/۳ روز بوده که بیشترین آن مربوط به سال ۱۹۹۲ با ۱۸۱ روز و کمترین آن مربوط به سال ۲۰۰۲ با ۱۳۴ روز بوده است (سازمان هواشناسی کشور). به‌طور کلی بر اساس طبقه‌بندی دمارتن، حوضهٔ آبخیز رودخانهٔ زال در قلمرو آب‌وهوای مدیترانه‌ای (با ضریب خشکی ۲۱/۴) قرار دارد.



شکل ٤. پراکندگی بارش ماهانه در منطقه **شکل ۵. پراکنش دمای ماهانه در منطقه**

آب‌وهوا یکی از مهم‌ترین عوامل به‌وجود آورندهٔ فرسایش آبی هر منطقه بوده که هم روی پدیدهٔ خاک‌زایی و هم روی وضع پوشش گیاهی آن منطقه تأثیر دارد (رفاهی، ۱۳۸۸: ۲۹۳). از دسته عناصر اقلیمی مؤثر بر فرسایش آبی، می‌توان از بارش و دما نام برد. قرارگیری بخشی از کوه‌های آق‌داغ در قلمرو اقلیمی مجاور یخچالی، موجب شده است تا به‌واسطهٔ ذخیره‌سازی برف بیشتر، از یک سو زمینهٔ شست‌وشوی خاک دامنه‌ها و از سوی دیگر، زمینهٔ طغیان رودخانه‌ها به‌ویژه در فصل بهار و فرسایش در حواشی رودخانه‌ها فراهم شود. همچنین شرایط جغرافیایی منطقه و وجود ناهمواری‌های نسبتاً بلند منطقه، شرایط را برای ریزش‌های جوی، به‌ویژه در فصول زمستان و بهار فراهم می‌آورند. برای به‌دست آوردن امتیاز عامل آب‌وهوای حوضهٔ آبخیز رودخانهٔ زال و زیرحوضه‌های آن در روش ام. پسیاک از رابطهٔ ۳ (مددی، ۱۳۸۷: ۱۲۸ به نقل از رفاهی، ۱۳۸۸) استفاده شده است (جدول ۳).

$$X_3 = 0.2P_2$$ رابطه ۳)

که در این رابطه، X_3: امتیاز عامل آب‌وهوا و P_2 : مقدار بارندگی شش‌ساعته با دورهٔ برگشت دوساله برحسب میلی‌متر است. همچنین حدّاکثر بارندگی شش‌ساعته با دورهٔ برگشت دوساله از رابطهٔ ۴ به‌دست آمده است.

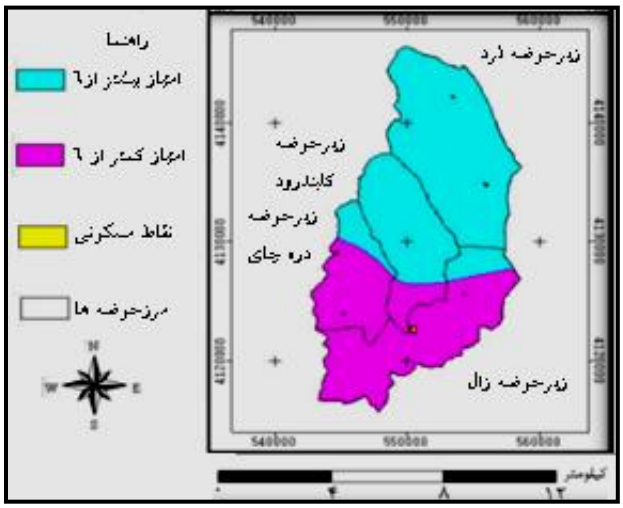
$$P_6 = 0.437\ P_{24} + 8.93$$ رابطه ۴)

در رابطهٔ ۴؛ نماد P_6 حدّاکثر بارندگی شش‌ساعته با دورهٔ برگشت معیّن برحسب میلی‌متر و نماد P_{24} حدّاکثر بارندگی بیست‌وچهارساعته با دورهٔ برگشت معیّن برحسب میلی‌متر است.

جدول۳. حداکثر بارندگی شش‌ساعته و امتیاز عامل آب‌وهوا

نام حوضه	حداکثر بارندگی شش ساعته به میلی‌متر	امتیاز عامل آب‌وهوا
کلبندرود	۳۵/۱	۷
لرد	۳۲/۹	۶/۵
دره‌چای	۳۰/۷	۶/۱
زال	۲۸/۵	۵/۷
کل حوضه	۳۱/۸	۶/۳

امتیاز این عامل در زیرحوضهٔ کلبندرود با توجه به قرارگیری در دامنه‌های بادگیر کوه‌های آق‌داغ و نیز ارتفاع زیاد منطقه، بیشتر از زیرحوضه‌های دیگر حوضه است؛ در حالی‌که در زیرحوضهٔ زال به‌واسطهٔ ارتفاع کم آن، در بیشتر قسمت‌ها امتیاز عامل آب‌وهوا کمتر است. علاوه‌براین در زیرحوضهٔ لرد، امتیاز این عامل به‌دلیل ارتفاع زیادتر منطقه نسبت به زیرحوضهٔ دره‌چای بیشتر است (شکل ۶).



شکل ٦. نقشهٔ امتیاز عامل آب‌وهوای حوضه و زیرحوضه‌ها

عامل هرزآب یا رواناب

یکی دیگر از عوامل مؤثر در فرسایش خاک و تولید رسوب در روش‌های پسیاک و ام. پسیاک، عامل هرزآب یا رواناب است. یکی از عوامل مهم در کاهش شدت نفوذ آب در خاک و درنتیجه افزایش رواناب، رطوبت قبلی خاک است. در مواقعی که خاک مرطوب باشد، توان نفوذدهی آب به حداقل رسیده و رواناب سطحی افزایش می‌یابد (مهدوی، ۱۳۸۸: ۱۵۶). تراکم زیاد شبکهٔ آبراهه‌ها، حاکی از رواناب سریع و سیلاب‌های ناگهانی است (شنگ، ۱۳۷۶: ۲۶۰). امتیاز عامل رواناب حوضهٔ آبخیز رودخانهٔ زال و زیرحوضه‌های آن با استفاده از درجه‌های صفر تا ده در روش پسیاک و میانگین بارندگی سالانهٔ ایستگاه سینوپتیک خلخال (۳۸۴/۶ میلی‌متر) طی دورهٔ آماری نوزده‌سالهٔ (۱۹۸۷ تا ۲۰۰۵) سازمان هواشناسی کشور و رابطهٔ ۵ محاسبه شده است (جدول ۴).

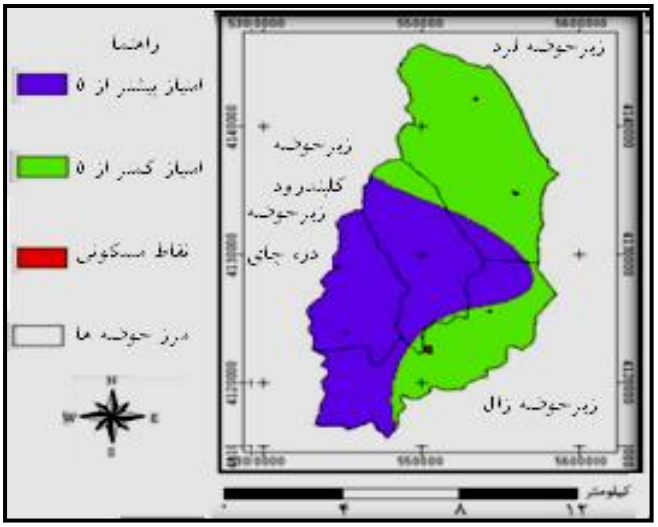
رابطه ۵) $X_4 = 0.2\ (0.03R + 50Q_P) = 0.006R + 10Q_P$

که در آن، X_4 : امتیاز عامل رواناب در روش پسیاک؛ R: ارتفاع رواناب سالانه برحسب میلی‌متـر و Q_P: دبـی ویـژهٔ پیک برحسب مترمکعب بر ثانیه در کیلومترمربع است.

جدول ٤. امتیاز عامل رواناب حوضه و زیرحوضه‌ها

نام حوضه	رواناب (mm)	دبی ویژه $(m^3/s.km^2)$	امتیاز روان آب
کلبندرود	۳۷۵/۳۳	۰/۳۵	۵/۲
لرد	۳۷۵/۳۳	۰/۳۱	۴/۷
دره‌چای	۳۷۵/۳۳	۰/۳۸	۵/۴
زال	۳۷۵/۳۳	۰/۳۲	۴/۹
کل حوضه	۳۷۵/۳۳	۰/۳۴	۴/۱

در زیرحوضهٔ دره‌چای، به‌واسطهٔ وسعت کمتر نسبت به دیگر زیرحوضه‌ها، فراوانی شعبه‌هـای آبراهـه‌ای، سـازندهای زمین‌شناسی نسبتاً مقاوم‌تر و غیره، امتیاز این عامل بیشتر و در زیرحوضهٔ لرد به‌واسطهٔ وسعت بیشتر و پراکنـده‌تـر بـودن شعبه‌های آبراهه‌ها، امتیاز این عامل کمتر از دیگر زیرحوضه‌هاست. همچنین شرایط مـذکور بـرای امتیـاز عامـل روانـاب زیرحوضه‌های کلبندرود و زال صدق می‌کند (شکل ۷).



شکل ۷. نقشهٔ امتیاز عامل رواناب حوضه و زیرحوضه‌ها

عامل پستی و بلندی

بررسی دامنه‌های ارتفاعات حوزهٔ زال نشان می‌دهد که این حوضه دارای دامنه‌های ساده و مرکب است. نمونهٔ دامنه‌هـای سادهٔ مستقیم در قسمت‌هایی از جنوب شرقی و شرق حوضه دیده می‌شوند. یکی دیگر از دامنه‌های ساده، دامنـه‌هـای بـا شیب محدب است. برای نمونه، در جنوب حوزهٔ آبخیز رودخانهٔ زال و در جنوب مدار ۳۷ درجه و ۱۵ دقیقهٔ عرض شـمالی،

به خوبی دامنه‌های با شیب محدب دیده می‌شود. از دیگر انواع دامنه‌های ساده، دامنه‌های مقعر هستند. نمونهٔ بارز این نوع دامنه‌ها را می‌توان در قسمت‌های غربی و جنوب غربی حوضه دید. علاوه‌بر این در بخش‌هایی از حوضه، دامنه‌های مرکب دیده می‌شود. برای نمونه با بررسی ارتفاعات جنوب و جنوب شرقی حوزهٔ آبخیز، به دامنه‌هایی برخورد می‌کنیم که شیب آنها دارای تغییر حالت‌های مختلفی است؛ یعنی گاهی شیب آنها تند، گاهی ملایم و دوباره تند می‌شود.

حوزهٔ آبخیز رودخانهٔ زال در مناطق کوهستانی دارای پرتگاه‌های مختلفی است. ازجمله این پرتگاه‌ها، پرتگاه‌های صخره‌ای است که به‌وفور در ارتفاعات دیده می‌شود. برای نمونه، در جنوب شرقی حوضه و منطقهٔ کرنق، پرتگاه‌هایی وجود دارند که به‌صورت عمودی بر قسمت‌های پایین‌دست خود تسلط دارند. از دیگر پرتگاه‌های حوضه، می‌توان به پرتگاه‌های گسلی اشاره کرد. برای نمونه، پرتگاه‌های گسلی که در قسمت شمال غربی حوضه با روند شمال غربی ـ جنوب شرقی به موازات رشته‌کوه آق‌داغ به‌وجود آمده‌اند. علاوه‌بر این در حواشی رودخانه‌ها، پرتگاه‌های رودخانه‌ای به چشم می‌خورد و انواع مختلفی از دره‌ها دیده می‌شوند. دره‌های وی شکل (V) و عمیق، مربوط به ناهمواری‌های جوان، سنگ‌های سخت و مناطق کوهستانی هستند، نمونهٔ بارز آنها در جنوب شرقی حوضهٔ کرنق واقع شده است. دره‌های کفه‌دار در قسمت‌های شرقی حوضه و دره‌های تشتکی‌شکل در بخش‌های کم‌ارتفاع‌تر دیده می‌شوند. نمونهٔ این نوع دره‌ها را در قسمت‌های جنوبی برندق می‌توان دید. در قسمت‌های پست رودخانهٔ زال، تراس‌های آبرفتی متعددی مشاهده می‌شود. برای نمونه، می‌توان به تراس‌های آبرفتی حاشیهٔ رودخانه‌های لرد، میان‌رودان و غیره اشاره کرد. رودخانهٔ زال در قسمتی از مسیر جنوبی خود با ایجاد پیچ‌وخم‌های متعدد، حالت مئاندری پیدا می‌کند. این پیچان‌رود که با پایین‌رفتگی مشخص و عمیق، در سنگ و دره‌های عمیق دیده می‌شود، پیچان‌رودهای محاط یا دره‌ای را ایجاد کرده است. به‌طور کلی ضریب ناهمواری برای حوضهٔ زال ۰/۰۵ به‌دست آمده است[۱]. گفتنی است هرچه مقدار ضریب مذکور کمتر باشد، فرسایش و رسوب حوضه هم کمتر است (ملکی و مسیبی، ۱۳۸۹: ۱۴۵). به‌طور کلی از نظر ژئومورفولوژی، سیستم مورفوژنز پریگلاسیر (به‌دلیل حاکمیت یخبندان در فصل زمستان و بالا بودن درجه حرارت در تابستان) در منطقه حاکم است و اشکال و پدیده‌های ژئومورفولوژی این سیستم دیده می‌شود.

یکی از عوامل مؤثر در فرسایش خاک و تولید رسوب در هر حوضهٔ آبخیز، پستی و بلندی یا توپوگرافی است که معمولاً با شاخص شیب سنجیده می‌شود (رفاهی، ۱۳۸۸: ۲۹۵). شیب یکی از خصوصیت‌های مهم زمین است که نقش اساسی در شکل‌گیری رواناب‌ها دارد (جاسپرسینگ، ۱۳۸۲: ۸۲). افزایش شیب موجب می‌شود سرعت و حرکت هرزآب سطحی زیاد و مدت زمان تماس آب با خاک و درنتیجه نفوذ آب در خاک کم شود و همچنین موجب می‌شود که خاک بیشتر و سریع‌تر فرسایش یابد (باقرنژاد، ۱۳۸۶: ۷۵). با استفاده از درجه‌های صفر تا بیست در روش پسیاک، امتیاز عامل توپوگرافی در روش ام. پسیاک، از رابطهٔ ۶ تعیین شده است (جدول ۵).

$$X_5 = 0.33\ S$$ رابطه ۶)

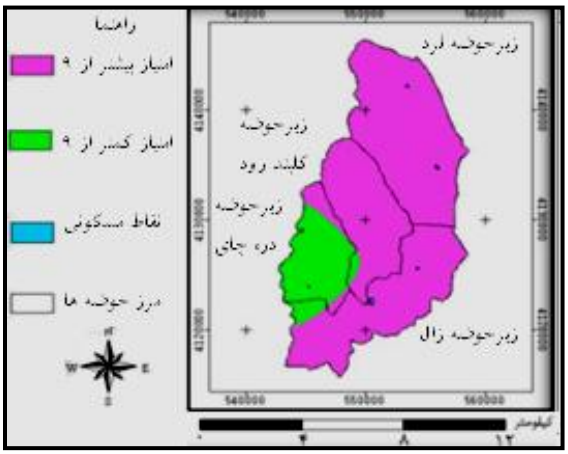
در این رابطه، X_5 : درجهٔ رسوب‌دهی و S: شیب متوسط برحسب درصد است.

۱. فرمول ضریب ناهمواری $Rh = \frac{H_{max} - H_{min}}{L}$ (منبع: ملکی و مسیبی، ۱۳۸۹: ۱۴۵)

جدول ۵. شیب متوسط و امتیاز عامل توپوگرافی

نام حوضه	شیب متوسط بر حسب درصد	امتیاز توپوگرافی
کلبندرود	۳۲/۹	۱۰/۸
لرد	۲۸/۱	۹/۲
دره‌چای	۲۲/۶	۷/۴
زال	۳۲/۹	۱۰/۸
کل حوضه	۲۹/۱	۹/۷

در زیرحوضه‌های زال و کلبندرود، به‌دلیل شیب زیادتر ناهمواری‌ها امتیاز عامل خاک بیشتر، ولی در زیرحوضه‌های لرد و دره‌چای با توجه به شیب کمتر ناهمواری‌ها، امتیاز عامل مذکور کمتر می‌شود (شکل ۸).



شکل۸. نقشهٔ امتیاز عامل پستی و بلندی حوضه و زیرحوضه‌ها

عامل پوشش زمین

منظور از پوشش زمین، هرگونه پوششی است که خاک را در مقابل عوامل فرساینده مانند ضربهٔ قطرات باران، رواناب و باد حفاظت کند (رفاهی، ۱۳۸۸: ۲۹۷). برای عامل پوشش زمین درجه رسوب‌دهی بین ۱۰- (برای اراضی با پوشش گیاهی خوب، لاشبرگ و پوشش سنگی) تا ۱۰ در نظر گرفته شده است (رفاهی، ۱۳۸۸: ۲۹۷). در روش ام. پسیاک، برای تعیین امتیاز عامل پوشش زمین، از رابطهٔ ۷ استفاده می‌شود (جدول ۶).

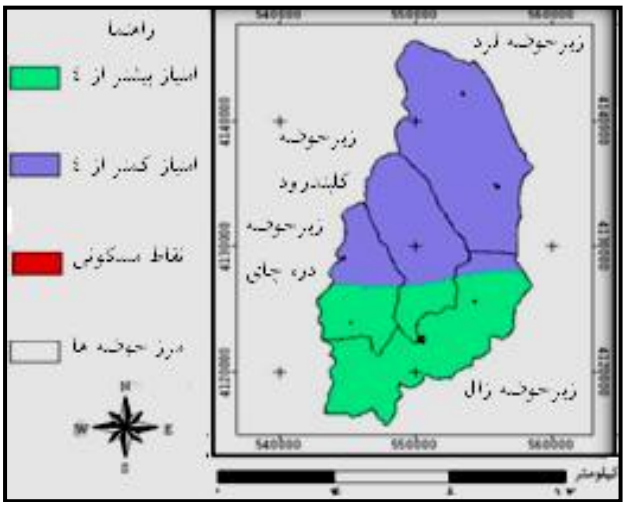
رابطه ۷) $X_6 = 0.2Pb$

که در آن، X_6 : امتیاز عامل پوشش زمین و Pb درصد اراضی لخت و فاقد پوشش است.

جدول ٦. درصد اراضی لخت و امتیاز عامل پوشش زمین

نام حوضه	درصد اراضی لخت	امتیاز عامل پوشش زمین
کلبندرود	۱۹	۳/۸
لرد	۱۵	۳
دره‌چای	۲۱	۴/۳
زال	۲۷	۵/۴
کل حوضه	۲۰/۵	۴/۱

در زیرحوضه‌های زال و دره‌چای با توجه به درصد بیشتر پوشش اراضی لخت، امتیاز این عامل بیشتر از زیرحوضه‌های کلبندرود و به‌ویژه لرد است؛ زیرا اراضی لخت زیرحوضه‌های کلبندرود و لرد درصد کمتری را اشغال کرده است (شکل ۹).



شکل ۹. نقشهٔ امتیاز عامل پوشش زمین حوضه و زیرحوضه‌ها

عامل کاربری اراضی

یکی دیگر از عوامل مؤثر در ارزیابی فرسایش خاک و تولید رسوب در روش‌های پسیاک و ام. پسیاک، عامل کاربری اراضی است. درجهٔ رسوب‌دهی این عامل به‌دلیل اثرات کاهشی و افزایشی آن بین ۱۰- و۱۰+ تغییر می‌کند. برای تعیین امتیاز عامل کاربری، معمولاً دو معیار عملیات کشاورزی در سطح حوضهٔ آبخیز و دیگری، وضعیت چرای دام مورد ارزیابی قرار می گیرد. چنانچه در سطح حوضهٔ آبخیز پوشیده از گیاهان انبوه، فعالیت‌های کشاورزی معمول نبوده و سطح آن کمتر مورد تعلیف دام قرار گیرد، نقش عامل فوق در میزان فرسایش خاک و تولید رسوب منفی بوده و از میزان فرسایش خاک و تولید رسوب عوامل دیگر می‌کاهد که در این صورت برای این عامل در روش پسیاک نمرهٔ ۱۰- منظور می‌شود؛ ولی برعکس چنانچه در بیش از نیمی از سطح یک حوضهٔ آبخیز، عملیات کشاورزی بدون رعایت اصول حفاظت آب و خاک صورت گیرد یا چرای سنگینی اعمال شود، نقش عامل فوق در ایجاد فرسایش خاک و تولید رسوب مثبت بوده و باعث فرسایش و تولید رسوب می‌شود. در این حالت برای این عامل در روش PSIAC نمرهٔ ۱۰+ منظور می‌شود (رفاهی، ۱۳۸۸: ۲۹۹). برای تعیین عامل کاربری اراضی در مدل ام. پسیاک از رابطهٔ ۸ استفاده می‌شود (جدول ۷).

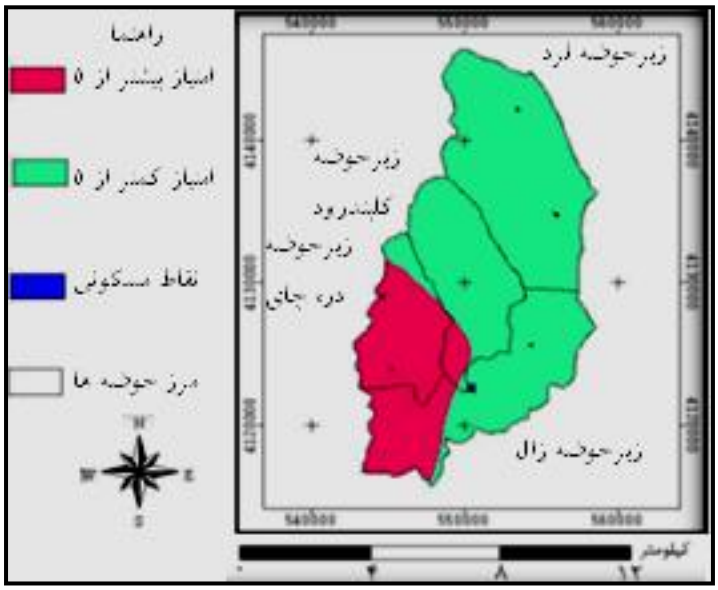
$$X_7 = 20 - 0.2PC$$ رابطه ۸)

که در این رابطه، X_7: امتیاز عامل کاربری اراضی و PC : مقدار تاج پوشش برحسب درصد است.

با توجه به این عامل، در زیرحوضه‌های دره‌چای و زال، به‌واسطهٔ درصد تاج پوشش کمتر، امتیاز نحوهٔ استفاده از زمین بیشتر از زیرحوضه‌های لرد و کلبندرود است که درصد تاج پوشش بیشتری دارند (شکل۱۰).

جدول ۷. تاج پوشش و امتیاز عامل نحوهٔ استفاده از زمین

نام حوضه	امتیاز عامل سطحی خاک (S.S.F)	امتیاز عامل وضعیت فرسایش
کلبندرود	۳۱	۹
لرد	۲۸	۸/۲
دره‌چای	۳۴/۲	۹/۸
زال	۴۲	۱۲/۵
کل حوضه	۳۳/۸	۹/۸



شکل ۱۰. نقشهٔ امتیاز استفاده از زمین

عامل وضعیت فرسایش در سطح حوضهٔ آبخیز

برای بررسی نقش عامل فوق در تولید رسوب، فرسایش سطحی موجود در حوضهٔ آبخیز مانند فرسایش بارانی، فرسایش ورقه‌ای، فرسایش شیاری و فرسایش خندقی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (به‌جز فرسایش موجود در آبراهه‌ها). با استفاده از درجه‌های صفر تاا ۲۵ روش پسیاک، امتیاز عامل وضعیت فعلی فرسایش در روش ام. پسیاک از رابطهٔ شماره ۹ (رفاهی، ۱۳۸۸: ۳۰۱) حاصل می‌شود (جدول۸).

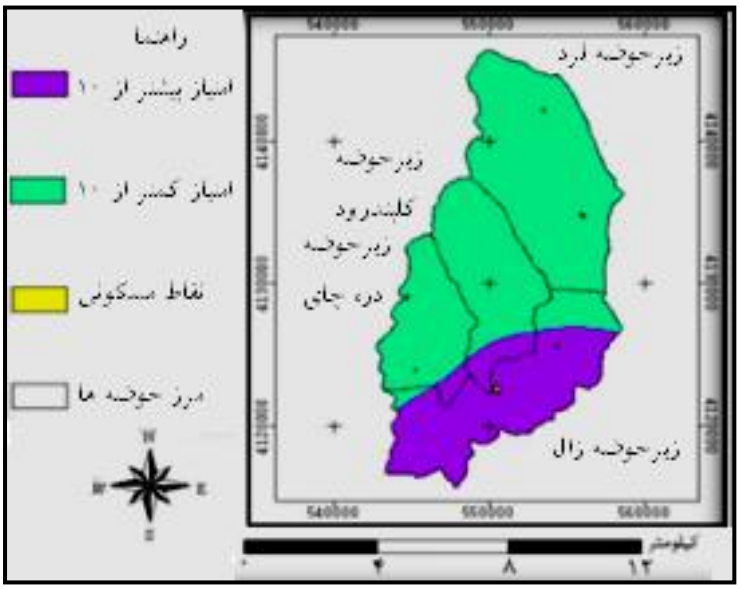
رابطه ۹) $X_8 = 0.25\ \mathrm{S.S.F}$

که در این رابطه، X_8: امتیاز عامل وضعیت فعلی فرسایش و S. S. F: امتیاز عامل سطحی خاک است که با استفاده از روش پیشنهادی سازمان مدیریت اراضی آمریکا به‌دست می‌آید.

جدول ۸. امتیاز عامل سطحی خاک و امتیاز عامل وضعیت فرسایش

نام حوضه	درصد تاج پوشش	امتیاز نحوهٔ استفاده از زمین
کلبندرود	۸۰	۴
لرد	۷۹	۴/۲
دره‌چای	۷۳	۵/۴
زال	۷۷	۴/۶
کل حوضه	۷۷/۲	۴/۵

علت بالا و پایین بودن امتیاز این عامل در هر یک از زیرحوضه‌ها، ناشی از امتیاز عامل سطحی خاک (S.S.F.) است که در زیرحوضهٔ زال بیشترین و در زیرحوضهٔ لرد کمترین امتیاز را داشته است (شکل۱۱).



شکل ۱۱. نقشهٔ امتیاز وضع فرسایش در سطح حوضه و زیرحوضه‌ها

عامل فرسایش رودخانه‌ای (آبراهه‌ای) و انتقال رسوب[1]

بررسی شبکهٔ آبها در این حوضه، نشان می‌دهد که شعبه‌های فرعی آبها در مناطق شمالی، پرآب‌تر و دائمی‌تر از شعبه‌های فرعی مناطق دیگر حوضه هستند. این در حالی است که تراکم شبکهٔ آبها در قسمت‌های غربی و جنوبی حوضه، بیشتر از قسمت‌های دیگر آن است که به‌احتمال ناشی از نفوذ ناپذیری سنگ بستر زمین‌های این مناطق است. مقدار شیب آبراههٔ اصلی حوضه ۴/۰۷ گزارش شده است. تراکم زهکشی حوضه، ۱/۸۳ کیلومتر در هر کیلومتر مربع از حوضه است که می‌تواند ناشی از عواملی چون: شیب زیاد حوضه، مقاومت زیاد سنگ‌ها، نفوذپذیری کم بعضی سنگ‌ها و عواملی مانند اینها باشد. چنین تراکمی در حوضه، زمان تمرکز را کاهش می‌دهد و خطر وقوع سیلاب‌ها را، به‌ویژه در

1. Channel erosion and sediment transport

حاشیهٔ رودخانه‌ها و محل‌های سیل‌گیر حوضه افزایش می‌دهد. نسبت انشعاب حوزهٔ آبخیز رودخانهٔ زال ۴/۷ به‌دست آمده است، رقم ۴/۷ نشان می‌دهد که حوضهٔ مذکور، حوضه‌ای معمولی است؛ چرا که نسبت انشعاب در حوضه‌های معمولی بین ۳ تا ۵ است. هرچه این نسبت کوچکتر باشد، نمایان‌گر این مطلب است که منحنی تغییرات دبی سیل نسبت به زمان هیدروگراف سیل، در مقایسه با حوضه‌های دیگر دارای نقطهٔ اوج تیزتر خواهد بود (علیزاده، ۱۳۹۰: ۴۸۷). نسبت انشعاب زیرحوضهٔ لرد ۴/۵ ، زیرحوضهٔ زال ۴، زیرحوضهٔ دره‌چای ۴/۲ و در زیرحوضهٔ کلبندرود ۳/۹ است.

نتیجهٔ تخریب و شسته‌شدن دیوارهٔ آبراهه‌ها، فرسایش رودخانه‌ای و انتقال رسوب است. عامل فرسایش رودخانه‌ای، آخرین عامل مؤثر در فرسایش خاک و تولید رسوب در روش‌های پسیاک و ام. پسیاک است که در این عامل دو پدیدهٔ فرسایش کناره‌ای و حمل رسوب توسط سیلاب، مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. (رفاهی، ۱۳۸۸: ۳۰۱). با استفاده از درجه‌های صفر تا ۲۵ در روش پسیاک، برای به‌دست‌آوردن امتیاز عامل فرسایش رودخانه‌ای و انتقال رسوب در روش ام. پسیاک از رابطهٔ ۱۰ استفاده می‌شود (جدول ۹).

$$X_9 = 1.67\ SSF.g$$ رابطه ۱۰)

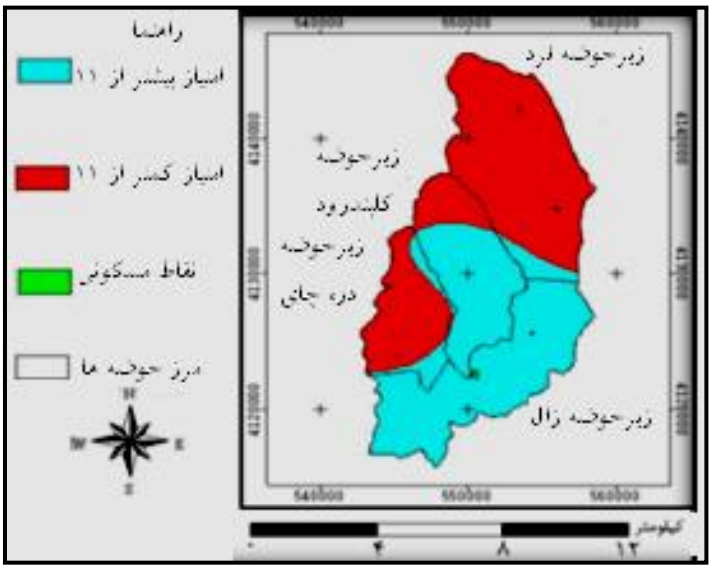
که در آن، X_9: امتیاز عامل فرسایش رودخانه‌ای و $SSF.g$: نمرهٔ نهایی فرسایش خندقی عامل سطحی خاک در روش بلم[1] است.

جدول ۹. امتیاز فرسایش خندقی (SSF.g) در مدل بلم و امتیاز عامل فرسایش رودخانه‌ای

نام حوضه	امتیاز نهایی فرسایش خندقی (SSF.g) در مدل BLM	امتیاز عامل فرسایش رودخانه‌ای
کلبندرود	۷	۱۱/۶
لرد	۵	۸/۳
دره‌چای	۶	۱۰
زال	۸	۱۳/۳
کل حوضه	۶/۵	۱۰/۸

در زیرحوضهٔ زال با توجه به گسترهٔ بیشتر سازندهای زمین‌شناسی سست فرسایش‌پذیر و جریان‌یابی رودخانهٔ زال در میان ناهمواری‌های پرشیب قسمت‌های جنوب غربی حوضه و نیز برخورداری از شرایط ویژهٔ طغیان رودخانه‌ای، امتیاز عامل فرسایش رودخانه‌ای بیشتر از زیرحوضه‌های دیگر است. همچنین در زیرحوضهٔ کلبندرود، به واسطهٔ شیب زیاد ناهمواری‌ها، وجود پهنه‌های سست زمین‌شناسی، شدت بارندگی‌ها و مواردی مانند آنها، امتیاز این عامل بالاتر از زیرحوضه‌های دره‌چای و لرد است. در زیرحوضهٔ دره‌چای، به‌واسطهٔ شیب کمتر و در زیرحوضهٔ لرد به‌واسطهٔ جریان کمتر شعب آبراهه‌ها در سطحی گسترده‌تر از بقیهٔ زیرحوضه‌ها، امتیاز عامل فرسایش رودخانه‌ای کمتر از زیرحوضه‌های دیگر است (شکل ۱۲).

1. BLM



شکل۱۲. نقشهٔ امتیاز عامل فرسایش رودخانه‌ای

برآورد تولید رسوب در حوضهٔ آبخیز رودخانهٔ زال

پس از تعیین امتیاز هر نُه عامل مؤثر در مدل پسیاک (جدول ۱۰)، این نتیجه به‌دست آمد که در ارزیابی فرسایش خاک و تولید رسوب حوضهٔ آبخیز رودخانهٔ زال، از بین عوامل نه‌گانه، عامل فرسایش رودخانه‌ای با امتیاز ۱۰/۸ در اولویت اول و عامل پوشش زمین با ۴/۱ در اولویت آخر قرار دارد و سایر عوامل شامل، وضعیت فعلی فرسایش، توپوگرافی، خاک، آب‌وهوا، زمین‌شناسی سطحی، رواناب و کاربری اراضی، به‌ترتیب با امتیازهای (۹/۸، ۹/۵، ۹/۴، ۶/۳، ۵/۹، ۵، ۴/۵ در اولویت‌های سوم تا هشتم قرار دارند. برای تعیین میزان رسوب‌زایی در هر یک از اجزای واحد اراضی از جدول ۱۱ استفاده می‌شود.

جدول۱۰. مجموع امتیازهای عوامل نه‌گانهٔ فرسایش در مدل ام. پسیاک در حوضه و زیر حوضه‌ها

ردیف	عامل مؤثر در فرسایش در مدل ام.پسیاک	زیرحوضهٔ زال	زیرحوضهٔ کلبندرود	زیرحوضهٔ دره‌چای	زیرحوضهٔ لرد	حوضهٔ زال
۱	زمین‌شناسی	۶/۵	۶/۱	۵/۸	۵/۲	۵/۹
۲	خاک	۹/۹	۹/۳	۸/۸	۹/۷	۹/۴
۳	آب‌وهوا	۵/۷	۷	۶/۱	۶/۵	۶/۳
۴	رواناب	۴/۹	۵/۲	۵/۴	۴/۷	۵
۵	توپورافی	۱۰/۸	۱۰/۸	۷/۴	۹/۲	۹/۵
۶	پوشش زمین	۵/۴	۳/۸	۴/۲	۳	۴/۱
۷	کاربری اراضی	۴/۶	۴	۵/۴	۴/۲	۴/۵
۸	انواع فرسایش	۱۲/۵	۹	۹/۸	۸/۲	۹/۸
۹	فرسایش رودخانه‌ای	۱۳/۳	۱۱/۶	۱۰	۸/۳	۱۰/۸
۱۰	مجموع امتیاز	۷۳/۶	۶۶/۸	۶۲/۹	۵۹	۶۵/۳

جدول ۱۱. تعیین میزان تولید رسوب سالانه و کلاس رسوب‌دهی فرسایش خاک در مدل پسیاک

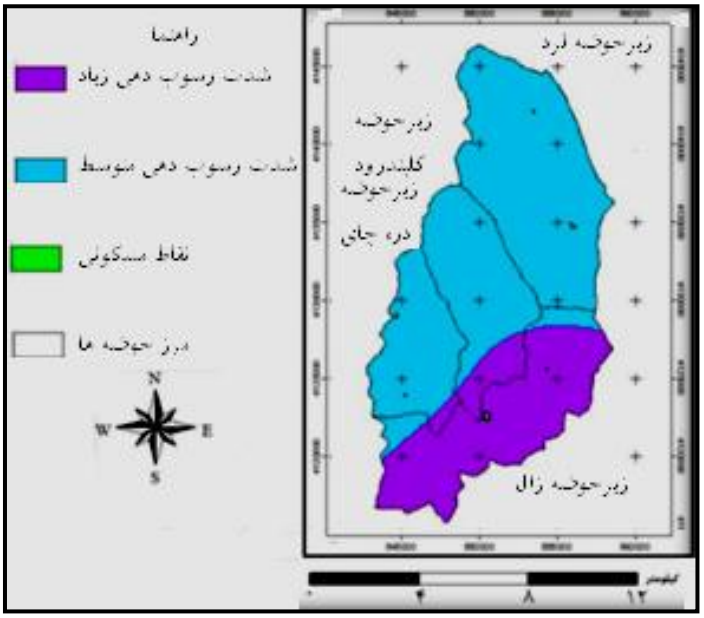
کلاس رسوب‌دهی و فرسایش	شدت رسوب‌دهی	تولید رسوب سالانه (متر مکعب در کیلومتر مربع)	نمرات نشان‌دهندهٔ شدت رسوب‌دهی
V	خیلی زیاد	>۱۴۲۹	>۱۰۰
IV	زیاد	۱۴۲۹ – ۴۷۶	۱۰۰ – ۷۵
III	متوسط	۴۷۶ – ۲۳۸	۷۵ – ۵۰
II	کم	۲۳۸ – ۹۵	۵۰ – ۲۵
I	خیلی کم	<۹۵	۲۵ – ۰

برای دقت بیشتر و کم‌کردن خطا در برآورد تولید رسوب از رابطهٔ ۱۱ $Qs = 38.77e^{0/0353R}$ استفاده می‌شود.

رابطه ۱۱) $$Q_s = 38.77e^{0.0353R}$$

در رابطهٔ ۱۱، نماد Qs: میزان رسوب‌دهی سالانه برحسب متر مکعب در کیلومتر مربع؛ R: درجهٔ رسوب‌دهی، یعنی مجموع امتیازهای عوامل نه‌گانهٔ مدل پسیاک و e: لگاریتم پایهٔ نپرین برابر با ۲/۷۱۸۲۸۱۸۲۸ است.

بر اساس رابطهٔ۱۱، میزان رسوب‌دهی سالانه در کل حوضهٔ آبخیز رودخانهٔ زال ۳۸۸/۶ و زیرحوضه‌های زال ۵۲۰/۹، کلبندرود ۴۰۹/۸، دره‌چای ۳۵۷/۱ و لرد ۳۱۱/۱ متر مکعب در کیلومتر مربع در سال برآورد شده است (جدول ۱۲). براساس جدول ۱۱ و رابطهٔ مذکور، حوزهٔ آبخیز رودخانهٔ زال و زیرحوضه‌های کلبندرود، دره‌چای و لرد، از نظر فرسایش و تولید رسوب در کلاس رسوب‌دهی III قرار می‌گیرند که شدت رسوب‌دهی در آنها متوسط است؛ این در حالی است که زیرحوضهٔ زال در کلاس رسوب‌دهی IV و شدت رسوب‌دهی زیاد قرار می‌گیرد (شکل ۱۳).



شکل ۱۳. نقشهٔ شدت رسوب‌دهی در مدل پسیاک

استفاده از رابطهٔ ۱۱ برای محاسبهٔ میزان رسوب، در اغلب شرایط میزان رسوب را بیش از میزان مشاهده شده برآورد می‌کند. بر این اساس جانسون و گمبهارت با بررسی داده‌های لیفست ـ که از مقایسهٔ رسوب‌دهی مشاهده‌ای و درجهٔ رسوب‌دهی، یعنی R حوضه‌های مختلف حاصل شده بود ـ ضرایب این رابطه را اصلاح کرده و رابطهٔ جدیدی ارائه دادند (رابطهٔ ۱۲).

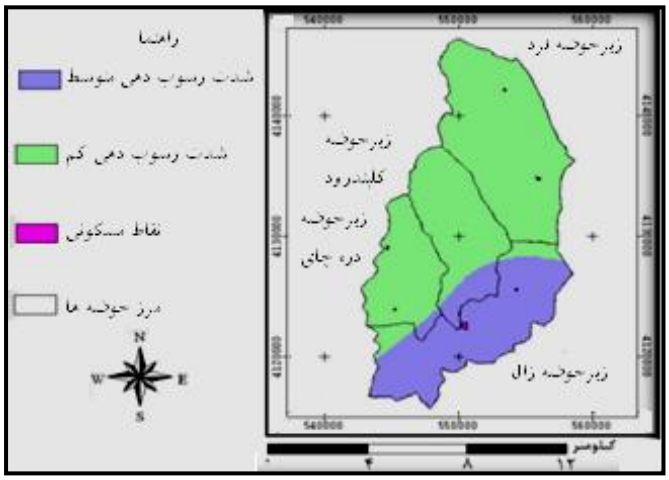
$$Q_s = 0.253e^{0.036\,R}$$ رابطه ۱۲)

در این رابطه، Q_s: میزان تولید رسوب برحسب تن در هکتار و R: درجهٔ رسوب‌دهی یا مجموع نمره‌های عوامل نه‌گانهٔ مؤثر در فرسایش خاک در مدل ام. پسیاک است (رفاهی، ۱۳۸۸: ۳۰۳). بر اساس رابطهٔ فوق، میزان رسوب‌دهی سالانه در کل حوضهٔ آبخیز رودخانهٔ زال ۱۹۵/۱ و زیرحوضه‌های زال ۲۶۳/۱، کلبندرود ۲۰۶، دره‌چای ۱۷۹ و لرد ۱۵۵/۵ مترمکعب درکیلومترمربع در سال برآورد شده است (جدول ۱۲).

جدول۱۲. تعیین میزان رسوب و کلاس فرسایش در حوضه و زیرحوضه‌ها

عنوان	زیرحوضهٔ زال	زیرحوضهٔ لرد	زیرحوضهٔ دره‌چای	زیرحوضهٔ کلبندرود	حوضهٔ زال
مساحت حوضه (Km^2)	۸۵/۳۸۰	۶۱/۹۳۳	۴۵/۶۳۵	۱۰۵/۷۸۵	۲۹۸/۷
رسوب ویژه ($m^3/km^2/y$) در مدل پسیاک	۵۲۰/۹	۴۰۹/۸	۳۵۷/۱	۳۱۱/۱	۳۸۸/۶
رسوب ویژه ($m^3/km^2/y$) در مدل ام.پسیاک	۲۶۳/۱	۲۰۶	۱۷۹	۱۵۵/۵	۱۹۵/۱
رسوب ویژه ($ton/km^2/y$) در مدل پسیاک	۷۲۹/۲	۵۷۳/۷	۴۹۹/۹	۴۳۵/۵	۵۴۴
رسوب ویژه ($ton/km^2/y$) در مدل ام.پسیاک	۳۸۶/۳	۲۸۸/۴	۲۵۰/۶	۲۱۷/۷	۲۷۳/۱
بار رسوبی (ton/y) در مدل پسیاک	۶۲۲۰۰/۷	۳۵۵۱۲	۲۲۷۹۵/۴	۴۶۰۳۲/۳	۱۶۲۴۹۲/۸
بار رسوبی (ton/y) در مدل ام.پسیاک	۳۱۴۱۵/۹	۱۷۸۵۱/۹	۱۱۴۲۷/۳	۲۳۰۱۰/۸	۸۱۵۷۴/۹
رسوب ویژه (t/ha) در مدل پسیاک	۷/۲	۵/۷	۴/۹	۴/۳	۵/۴
رسوب ویژه (t/ha) در مدل ام.پسیاک	۳/۶	۲/۸	۲/۵	۲/۱	۲/۷
شدت رسوب‌دهی در مدل پسیاک	زیاد	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
شدت رسوب‌دهی در مدل ام.پسیاک	متوسط	کم	کم	کم	کم
کلاس رسوب‌دهی در مدل پسیاک	IV	III	III	III	III
کلاس رسوب‌دهی در مدل ام.پسیاک	III	II	II	II	II

بر اساس رابطهٔ اخیر کل حوضهٔ آبخیز رودخانهٔ زال و زیرحوضه‌های کلبندرود، دره‌چای و لرد، درکلاس رسوب‌دهی II قرارمی‌گیرند که شدت فرسایش و رسوب‌دهی در آنها کم است. این در حالی است که زیرحوضهٔ زال در کلاس رسوب‌دهی III و شدت رسوب‌دهی متوسط قرار می‌گیرد (شکل ۱۴). در این زمینه میزان چگالی یا وزن مخصوص رسوب‌ها را علیزاده مقدار ۱/۴ پیشنهاد می‌کند.



شکل ١٤. نقشهٔ شدت رسوب‌دهی در مدل ام. پسیاک

مقایسهٔ دو روش پسیاک و ام. پسیاک نشان می‌دهد که در کل حوضهٔ زال و زیرحوضه‌های آن، میزان رسوب‌دهی سالانه در مدل پسیاک کمابیش دو برابر میزان رسوب‌دهی سالانه در روش پسیاک اصلاح‌شده است. همچنین کلاس‌های رسوب‌دهی در روش پسیاک در حوضهٔ مورد مطالعه، یک مرتبه بالاتر از کلاس‌های رسوب‌دهی در روش پسیاک اصلاح‌شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. مشاهدات میدانی از منطقهٔ مطالعاتی، حاکی از آن است که اعداد به‌دست آمده در روش پسیاک، اغراق‌آمیز به نظر می‌رسد، بنابراین اعداد محاسبه شده با روش پسیاک اصلاح‌شده نزدیک به واقعیت است.

منابع

آل شیخ، ع. ا.، نوروزی، ع.ا.، جعفری، م. ر. (۱۳۸۳). **مدل‌سازی فرسایش خاک و تولید رسوب در حوزهٔ آبخیز چیخواب با استفاده از روش پسیاک اصلاح‌شده و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)**، مجلهٔ تحقیقات جغرافیایی، سال نوزدهم، شماره ۳ (پیاپی ۷۴)، صص. ۱۹۲– ۱۷۸.

باقرنژاد، م. (۱۳۸۶). **خاک‌های ایران و جهان**، چاپ دوم، انتشارات مرکز نشر، دانشگاه شیراز.

جاسپرسینگ، اس.اس.د. (۱۳۸۲). **جغرافیای کشاورزی**، ترجمهٔ سیاوش دهقانیان، عوض کوچکی، علی کلاهی اهری، چاپ سوم، مشهد: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.

جداری عیوضی، ج.؛ جوکار سرهنگی، ع. (۱۳۸۰). **کارایی واحدهای ژئومورفولوژی در ارزیابی فرسایش و رسوب حوضهٔ آبخیز بوجان**، پژوهش‌های جغرافیایی، سال سی و سوم، شمارهٔ ۴۰، صص ۹۱–۷۳.

داوری، م.؛ بهرامی، ح.؛ قدوسی، ج.؛ طهماسبی‌پور، ن. (۱۳۸۵). **استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی در برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب حوضهٔ آبخیز نوژیان (جنوب شرقی خرم‌آباد)**، فصلنامهٔ مدرس علوم انسانی، دورهٔ ۱، شمارهٔ ۲، صص. ۱۲۲-۱۰۳.

رفاهی، ح. (۱۳۷۵). **فرسایش آبی و کنترل آن**، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

رفاهی، ح. (۱۳۸۸). **فرسایش آبی و کنترل آن**، چاپ ششم، تهران: مؤسسهٔ انتشارات و چاپ دانشگاه تهران.

زنگنه اسدی، م. ع.؛ سدیدی، ج.؛ کوشانفر، ع. (۱۳۸۸). **ارزیابی فرسایش آبی حوضهٔ آبریز سراب سفید ونایی بروجرد با استفاده از مدل PSIAC**، فصلنامهٔ جغرافیایی چشم‌انداز زاگرس، سال اول، شمارهٔ ۲، صص. ۶۴- ۵۵.

سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، **نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ کلور، هشتجین، برندق و گلجه.**

سازمان زمین‌شناسی کشور، **نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ هشتجین و ماسوله.**

سازمان هواشناسی کشور، **آمار و داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک خلخال.**

سلیمانی، ک.؛ بیات، ف. (۱۳۸۴). **به‌کارگیری داده‌های ماهواره‌ای در ارزیابی فرسایش و رسوب با استفاده از مدل MPSIAC در زیرحوضهٔ سفیدآب هراز**، مجلهٔ تحقیقات جغرافیایی، شماره ۱، پیاپی ۷۶، صص. ۱۲۲- ۱۰۷.

شنگ، تی. سی. (۱۳۷۶). **راهنمای آبخیزداری مطالعات و برنامه‌ریزی حوزه‌های آبخیز**، ترجمهٔ علی نجفی‌نژاد، چاپ اول، گرگان: انتشارات دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی.

عسکری، ش.؛ ثروتی، م. ر.؛ جعفری، م. ر. (۱۳۸۵). **برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب حوضهٔ سد ایلام با استفاده از مدل MPSIAC**، پژوهش‌های جغرافیایی، سال چهلم، شمارهٔ ۶۴، صص. ۳۵-۲۹.

علیزاده، ا. (۱۳۹۰). **اصول هیدرولوژی کاربردی**، چاپ سی و یکم، مشهد: دانشگاه امام رضا(ع).

قضاوی، ر.؛ عباسعلی، و.؛ مقامی، ی.؛ عبدی، ژ.؛ شرفی، س. (۱۳۹۱). **مقایسهٔ مدل‌های EPM، MPSIAC و PSIAC در برآورد فرسایش و رسوب با استفاده از GIS**، جغرافیا و توسعه، تابستان ۹۱، شماره پیاپی ۲۷، صص. ۱۲۶-۱۱۷.

کردوانی، پ. (۱۳۸۷). **حفاظت خاک**، چاپ نهم، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

محمدی‌ها، ش.؛ پیروان، ح. ر.؛ موسوی حرمی، س. ر.؛ فیض‌نیا، س و بیات، ر. (۲۰۱۲). **بررسی میزان فرسایش و تولید رسوب حوزهٔ آبخیز ایوانکی با استفاده از مدل‌های MPSIAC، FSM و ایستگاه رسوب سنجی**، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، جلد ۲۷، دوره ۳، شماره ۴۵، صص. ۴۸-۳۱.

مددی، ع. (۱۳۸۷). **برآورد میزان تولید رسوب در حوضهٔ یدی بولوک چای در استان اردبیل با استفاده از روش PSIAC و MPSIAC، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر**، مجلهٔ علمی ـ پژوهشی فضای جغرافیایی، سال هشتم، شماره ۲۲، صص. ۱۴۴- ۱۱۹.

مقیمی، ا.؛ محمودی، ف. (۱۳۸۳). **روش تحقیق در جغرافیای طبیعی(ژئومورفولوژی)**، تهران: نشر قومس.

ملکی، م.؛ مسیبی، م. (۱۳۸۹). **کارتوگرافی حوزه‌های آبخیز**، چاپ اول، قم: انتشارات حضرت عباس(ع).

مهدوی، م. (۱۳۸۸). **هیدرولوژی کاربردی(جلد دوم)**، چاپ ششم، تهران: مؤسسهٔ انتشارات دانشگاه تهران.

مؤسسهٔ تحقیقات خاک و آب. (۱۳۷۳). **نقشهٔ مطالعات ارزیابی منابع و قابلیت اراضی استان آذربایجان شرقی و استان اردبیل**، وزارت کشاورزی.

Devente, J., Poesen, J. & Verstraeten, G., 2005, **the Application of Semi-quantitative Methods and Reservoir Sedimentation Rates for the Prediction of Basin Sediment Yield in Spain**, Journal of Hydrology, Vol. 305, No. 1, PP. 63-86.

Devente,J., Poesen, J., Bazzoffi, P., Van Rompaey, A. & Verstraeten, G. (2006). **Predicting Catchment Sediment Yield in Mediterranean Environments: the Importance of Sediment Sources and Connectivity in Italian Drainage Basins**, Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 31, No. 8, PP. 1017-1034.

Furlan, A., Poussin, J.C., Mailhol, J.C., Le Bissonnais, Y. & Gumiere, S. J., 2012, **Designing Management Options to Reduce Surface Runoff and Sediment Yield with Farmers: An Experiment in South-western France**, Journal of Environmental Management, Vol. 96, No. 1, PP. 74-85.

Renard, K.G., Ston, J. J., 1982, **Sediment Yield from Small Semiarid Range Land Water Sheds.** USDA- SEA-ARM, Western series- No. 26, 129-144.

Tajbakhsh, M., Meamarian, H., 2003, **The Sediment Yeild Potential Estimation of Friabad and Kordian Urban Watershed Using M PSIAC Model in the GIS Framework,** Map Asia 2003, 2nd Annual Asian Conference, Malaysia, Kuala Lumpur.

Tamene, L., Abegaz, A., Aynekulu, E., Woldearegay, K., Vlek, P.L., 2011, **Estimating Sediment Yield Risk of Reservoirs in Northern Ethiopia Using Expert Knowledge and Semi-quantitative Approaches,** Lakes & Reservoirs: Research and Management, Vol.16, No. 4, PP. 293-305.

Yavari, Sh., Khodabakhsh, S., Mohseni, H. & Rezai, Kh., 2010, **Sediment- yield Estimation, by M-PSIAC Method in a GIS Environment,Case Study: Jonaghn River Sub Basin (Karun Basin),** The International Applied Geological Congress, Department of Geology, Islamic Azad University - Mashad Branch, Iran, PP.795-799.