



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی

سال پانزدهم، شماره‌ی ۴۹
بهار ۱۳۹۴، صفحات ۲۵۷-۲۳۷

اسدالله حجازی^۱
محمد رضا نیکجو^۲
محدثه اصفهانی^۳

برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب حوضه آبریز بکر آباد ورزقان با استفاده از مدل MPSIAC در محیط GIS

تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۹/۱۶

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۱/۰۳

چکیده

هرساله هزاران تن خاک از سطح اراضی جنگلی، مرتعی و کشاورزی به وسیله اشکال مختلف فرسایش از دسترس خارج شده و با انباشت در مناطق مستعد رسوب‌گذاری سبب وارد آمدن خسارت‌های قابل ملاحظه‌ای می‌شود. برای مدیریت مناطق فرسوده و مهار این پدیده لازم است پهنه‌های تحت فرسایش و یا تولید رسوب شناسایی و مقادیر خاک فرسوده برآورد شود تا از این طریق علاوه بر تعیین مناطق آسیب‌پذیر و بحرانی، اقدامات حفاظتی متناسب جهت کاهش و یا کند کردن روند فرسایش صورت گیرد. لازمه این امر دسترسی به ابزارها و تکنیک‌های مناسب و استفاده از روش یا مدل برآورد فرسایش با دقت بالا و کارایی مورد قبول می‌باشد. برای نیل به این هدف از مدل

E-mail: S_hejazi@tabrizu.ac.ir

E-mail: Nikjoo1347@tabrizu.ac.ir

E-mail: mohadese.esfehani@yahoo.com

۱- استادیار گروه ژئومورفولوژی دانشگاه تبریز.

۲- استادیار گروه ژئومورفولوژی دانشگاه تبریز.

۳- کارشناس ارشد ژئومورفولوژی دانشگاه تبریز.

تجربی MPSIAC استفاده شده است. این مدل در ایران در محیط‌های جغرافیایی مختلف مورد استفاده قرار گرفته و به علت کمی بودن و استفاده از پارامترهای متعدد نتایج قابل قبول و رضایت بخشی را نسبت به سایر مدل‌های تجربی ارائه داده است.

در این روش نه عامل محیطی شامل زمین‌شناسی، خاک، آب و هوا، رواناب، شیب، پوشش زمین، کاربری اراضی، فرسایش سطحی و رودخانه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس با ارزش گذاری کمی هر پارامتر، میزان فرسایش و رسوب محاسبه می‌شود. در این پژوهش جهت برآورد رسوب و فرسایش حوضه آبریز بکرآباد، کلیه داده‌های عوامل نه گانه مدل به روش اسنادی و نیز بررسی‌های میدانی استخراج و لایه‌های مورد نیاز آن در محیط نرم‌افزاری GIS تهیه شدند. پس از تشکیل بانک‌های اطلاعاتی، ارزش گذاری کمی و وزندهی به هر کدام از لایه‌ها بر اساس استانداردهای تعریف شده در مدل، نقشه نهایی پهنه بندی فرسایش و رسوب حوضه استخراج گردید. مقایسه مقادیر رسوب برآوردی و نقشه پهنه‌های حساس به فرسایش حوضه با مقادیر مشاهداتی و نیز وضعیت میدانی حوضه نشان می‌دهد که خوشبختانه حوضه از نظر مقادیر فرسایشی در وضعیت حادی نبوده و روند توسعه آن در صورت مدیریت درست قابل جلوگیری است. در ضمن در بین عوامل فرسایشی حوضه، عامل وضعیت فرسایش سطحی، شیب و خصوصیات خاک از مهم‌ترین فاکتورهای موثر بر بروز انواع فرسایش می‌باشند.

کلید واژه‌ها: فرسایش خاک، تولید رسوب، مدل MPSIAC، سامانه اطلاعات جغرافیایی، حوضه آبریز بکرآباد.

مقدمه

خاک به عنوان ارزشمندترین منبع طبیعی هر کشوری همواره با تهدیدی جدی بنام فرسایش مواجه بوده است. فرسایش خاک به دلیل تاثیرات شگرفی که بر اقتصاد و محیط‌زیست طبیعی و انسانی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌گذارد به عنوان یک مشکل جهانی مطرح شده است به همین دلیل لازم است عوامل تأثیرگذار بر روی آن شناسایی و متناسب با آن عملیات پیشگیرانه و حفاظتی لازم صورت گیرد (Schwab, et.al 1993: 85). با توجه به این‌که اغلب مکان‌های جغرافیایی به لحاظ تفاوت در ساختار ژئومورفولوژیکی آن، در مقابل عوامل فرسایش به‌طور یکسان آسیب‌پذیر نیستند، بنابراین اولین قدم در مقابله با پدیده فرسایش و مبارزه با آن، شناسایی و پهنه‌بندی مناطق آسیب‌پذیر و تعیین مقادیر کمی تولید فرسایش و رسوب خواهد بود. برای دستیابی به این امر، محققان روش‌های تجربی متعددی ابداع کرده‌اند که هر کدام دارای قابلیت‌ها و محدودیت‌های خاصی

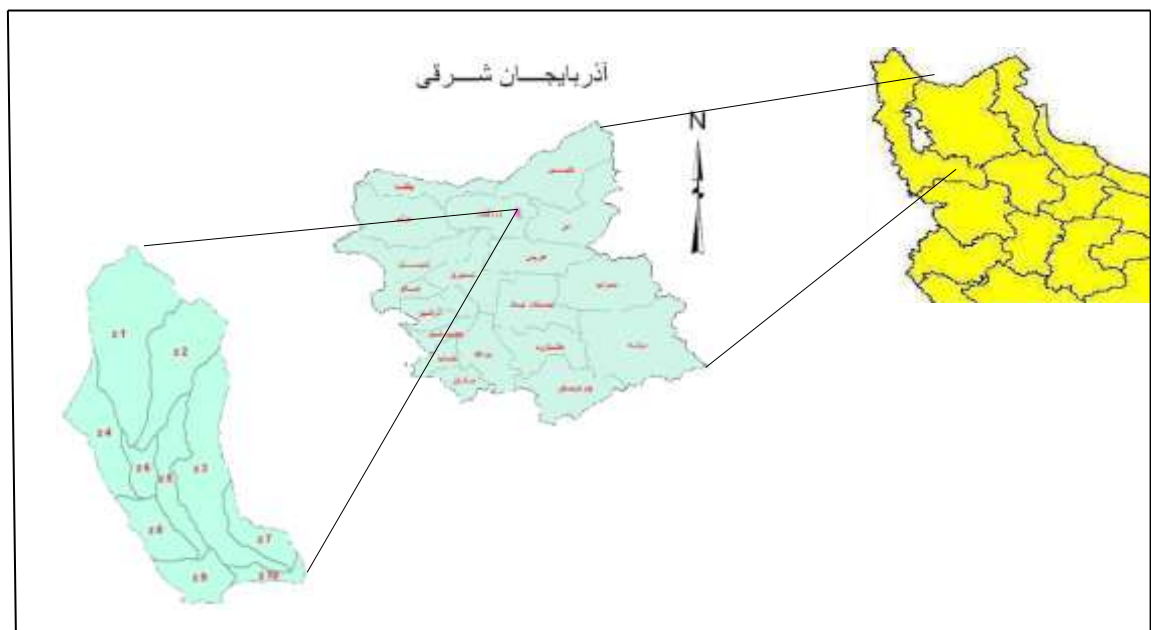
می‌باشند. یکی از کاربردی‌ترین روش‌های کمی که توانایی آن در بر آورد دقیق‌تر تولید رسوب در حوضه‌های آبریز ایران مورد ارزیابی قرار گرفته، مدل تجربی MPSIAC می‌باشد.

روش پسیاک برای اولین بار در سال ۱۹۶۸ میلادی توسط شرکت عمران و منابع آب آمریکا برای بررسی وضعیت فرسایش و برآورد رسوب در حوضه‌های بدون آمار در مناطق نیمه‌خشک ایالات غربی این کشور ارائه شد (رفاهی، ۱۳۸۲: ۲۸۴). در این مدل ۹ فاکتور زمین‌شناسی سطحی، خاک، آب و هوا، رواناب، پستی و بلندی، پوشش زمین، کاربری اراضی، فرسایش سطحی و فرسایش رودخانه‌ای مورد محاسبه قرار می‌گیرند (احمدی، ۱۳۷۸: ۵۸۲). این روش در ایران، برای اولین بار در سال ۱۳۵۲ در حوضه آبخیز سد دز استفاده شد. سپس توسط محققانی چون باقرزاده کریمی (۱۳۷۲)، نیک جو (۱۳۷۳)، پاک‌پرور (۱۳۷۴)، شاه کریمی (۱۳۸۱)، شیخ حسنی (۱۳۷۴)، سرخوش (۱۳۷۵)، بیات (۱۳۷۸)، عسگری و همکاران (۱۳۸۷)، اعظمی (۱۳۸۱)، احمدزاده (۱۳۸۴)، علیزاده‌گرچی (۱۳۸۵) به‌کار گرفته شده و نتایج رضایت‌بخشی را در برداشته است.

امروزه با در نظر گرفتن تنوع گسترده عوامل موثر شناسایی شده در فرآیند فرسایش از یک سو، نیاز به تجزیه و تحلیل‌های گوناگون و ضرورت دستیابی سریع و دقیق به اطلاعات از طرف دیگر و نیز در اختیار داشتن تصاویر ماهواره‌ای و نیز داده‌های زمینی این امکان فراهم شده است که با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و تشکیل پایگاه داده‌ها در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی و تحلیل آن‌ها، کلیه پارامترهای کمی مورد نیاز در مدل‌های فرسایشی از جمله مدل MPSIAC استخراج شوند (Ledemza, 2004: 23).

حوضه آبریز بکرآباد در استان آذربایجان شرقی به دلیل کوچک بودن سطح توپوگرافیک و نیز نبود ایستگاه‌های هواشناسی، هیدرومتری و رسوب سنجی، فاقد هر گونه آمار و اطلاعات مربوط به فرسایش و رسوب و نیز پیشینه مطالعاتی در این زمینه است فلذا به عنوان محدوده مطالعاتی انتخاب شده است.

این پژوهش به دنبال پاسخگویی به این سوالات اساسی است که آیا حوضه مطالعاتی از پهنه‌های فرسایشی متفاوتی برخوردار است؟ توزیع پهنه‌ها در سطح حوضه به چه شکلی است و میزان رسوب‌زایی هر کدام از پهنه‌ها چه مقدار می‌باشد؟ در محدوده مطالعاتی با پژوهش‌های انجام یافته و با تکیه بر قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی، لایه‌های تشکیل شده تحلیل و سپس نقشه نهایی فرسایش ترسیم گردیده است. قطعاً شناسایی پهنه‌های فرسایشی و برآورد فرسایش و رسوب در آن، برنامه‌ریزان و مدیران زیست‌محیطی را قادر خواهد ساخت تا با استفاده از اطلاعات به‌دست آمده، زمین را به‌صورت بهینه مدیریت کرده و با توجه به پتانسیل تولیدی آن مورد استفاده حداکثری قرار داد.



شکل ۱: موقعیت حوضه بکرآباد در کشور و استان آذربایجان شرقی

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز بکرآباد با مساحتی برابر $44/50$ کیلومترمربع در شمال شرق شهرستان ورزقان، در استان آذربایجان شرقی با مختصات جغرافیایی $38^{\circ} 33' 28''$ تا $38^{\circ} 39' 46''$ عرض شرقی و $46^{\circ} 38' 45''$ تا $46^{\circ} 44' 47''$ طول شرقی و حداکثر ارتفاع این حوضه 2582 متر در محدوده شمال حوضه و حداقل ارتفاع آن 1737 متر در جنوب حوضه واقع شده است، میانگین وزنی ارتفاع در این حوضه $2052/84$ متر است و شیب متوسط وزنی حوضه نیز $21/55$ درصد می‌باشد و بیشترین مساحت حوضه یعنی $44/94$ درصد از آن در محدوده شیب $30-12$ درصد قرار گرفته است. مقدار بارش سالانه حوضه 424 میلی‌متر، حداکثر بارش در اردیبهشت‌ماه با $86/6$ میلی‌متر و حداقل آن 11 میلی‌متر در مردادماه اتفاق می‌افتد. میانگین درجه حرارت سالانه حوضه $6/6$ درجه سانتی‌گراد، میانگین حداقل سالانه $1/8$ و حداکثر آن $12/7$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. از نظر کاربری اراضی $19/53$ درصد از اراضی حوضه به مرتع، $0/75$ درصد به زراعت آبی، $60/83$ درصد به زراعت دیم، $0/63$ درصد به اراضی مسکونی، $2/23$ درصد به اراضی باغی، $15/6$ درصد به اراضی مرتعی تبدیل شده به زراعت دیم و $0/43$ درصد به اراضی سنگلاخی و برونزدهای سنگی اختصاص یافته است. آبراه‌های اصلی حوضه با جهت کلی شمال به جنوب نزولات جوی را جمع‌آوری می‌کنند. شکل حوضه بر اساس معیارهای سنجش شکل، از نوع کشیده و طرح

شبکه آبراهه‌ای آن از نوع شاخه درختی است. واحدهای ژئومورفولوژیکی حوضه شامل کوهستان، تپه ماهورها و دشت سیلابی می‌باشند که تپه ماهورها بخش عمده‌ای از سطح حوضه را پوشانده است.

مواد و روش‌ها

روش به‌کارگرفته شده در تحقیق حاضر از نوع تحلیلی-توصیفی است که با توجه به اهداف اصلی از منابع متعدد اسنادی، مشاهداتی و میدانی در آن استفاده شده است. هم‌چنین برای دست‌یابی به مستندات تحقیق از تکنولوژی‌های سنجش از دور و GIS استفاده شده است. داده‌های مشاهداتی جمع‌آوری شده در محیط GIS تجمیع و پس از تشکیل بانک اطلاعاتی تخصصی این مطالعه، داده‌ها در فرمت رستری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. برای مدل‌سازی فرایند فرسایش در حوضه تحت مطالعه از روش تجربی "پسیاک" اصلاح‌شده استفاده گردید.

مواد مورد استفاده

- نقشه‌های توپوگرافی منطقه به مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ سازمان جغرافیایی جهت تهیه نقشه‌های موضوعی و پایه.
- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور جهت تعیین وضعیت سازندهای منطقه و تهیه نقشه سنگ شناسی.
- عکس‌های هوایی ۱:۵۵۰۰۰ و تصاویرسنجندهٔ ETM+ لندست جهت تهیه نقشه پوشش گیاهی، وضعیت کاربری اراضی و وضعیت فعلی فرسایش.
- داده‌های هواشناسی و هیدرومتری ایستگاه‌های مجاور منطقه مطالعاتی جهت تعیین وضعیت آب و هواشناسی و هیدرومتری آب‌های سطحی.
- پلات گذاری ۱×۱ متر مربعی جهت ترانسکت گذاری و تعیین نوع و تراکم پوشش گیاهی و درصد فاکتورهای زمین مثل درصد خاک لخت و ..
- استفاده از بسته‌های نرم‌افزاری GIS چون GIS/ARC و نیز نرم‌افزارهای آماری چون Spss، Hyfa، Excel جهت تجزیه و تحلیل اطلاعات، تهیه نقشه‌های پایه، تعیین دبی رواناب و رگبارش‌ها با دوره‌های بازگشت مختلف.
- جهت اجرای مراحل مختلف تحقیق ابتدا حوضه مورد مطالعه به ده واحد کاری یا زیرحوضه تقسیم شد سپس داده‌های مربوط به عوامل نه‌گانه مدل (جدول شماره ۱)، با استفاده از کلیه اطلاعات جمع‌آوری شده از طریق عملیات میدانی، داده‌های جانبی و تصاویر ماهواره‌ای در محیط GIS پیاده شد. عملیات زمین مرجع نمودن و

رقومی سازی لایه‌ها با استفاده از نرم‌افزار GIS در محیط ARC MAP، صورت گرفت و متناسب با شدت و ضعف هر عامل، امتیازی به آن تعلق یافت. در نهایت بر اساس امتیاز نهایی به‌دست آمده میزان فرسایش و رسوب حوضه برآورد و نقشه‌ی پهنه‌بندی فرسایش حوضه تهیه گردید.

جدول ۱- عوامل موثر در فرسایش خاک و تولید رسوب در روش MPSIAC

عوامل موثر در فرسایش	معادله پارامترها	توصیف پارامترهای مدل
زمین‌شناسی سطحی	$Y_1 = X_1$	یه حساسیت سنگ‌ها در مقابل فرسایش امتیازی بین صفر تا ده در نظر گرفته می‌شود
خاک	$X_2 = 16.67 K$	K ضریب قابلیت فرسایش پذیری خاک است
آب و هوا	$X_3 = 0.2 P_2$	P2 نشان‌دهنده شدت بارش ۶ ساعته با دوره برگشت دو ساله بر حسب میلی‌متر است
رواناب	$X_4 = 0.006R + 10QP$	R معرف ارتفاع آب جاری سالانه بر حسب میلی‌متر است و QP نشان‌دهنده دبی ویژه پیک بر حسب مترمکعب بر ثانیه در هر کیلومتر مربع می‌باشد
توپوگرافی	$X_5 = 0.33 S$	S حرف معرف شیب متوسط حوضه بر حسب درصد است
پوشش زمین	$X_6 = 0.2P_b$	Pb نشان‌دهنده درصد اراضی لخت و فاقد پوشش گیاهی می‌باشد
کاربری اراضی	$X_7 = 20 - 0.2P_c$	Pc معرف مقدار تاج پوشش بر حسب درصد می‌باشد
وضعیت فعلی فرسایش در سطح حوضه آبریز	$X_8 = 0.25 S.S.F.$	S.S.F. نماینگر امتیاز عامل سطحی خاک می‌باشد که با استفاده از روش اداره مدیریت اراضی BLM ایالات متحده آمریکا به دست می‌آید
فرسایش رودخانه‌ای و حمل رسوب	$X_9 = 1.67 S.S.F.g$	S.S.F.g نشان‌دهنده نمره نهایی فرسایش خندقی در روش BLM می‌باشد

بر مبنای عوامل فرسایشی مدل تجربی MPSIAC، هریک از عوامل نه‌گانه به‌عنوان متغیرهای فرسایشی حوضه، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و به شرح زیر ارزش‌گذاری شده است:

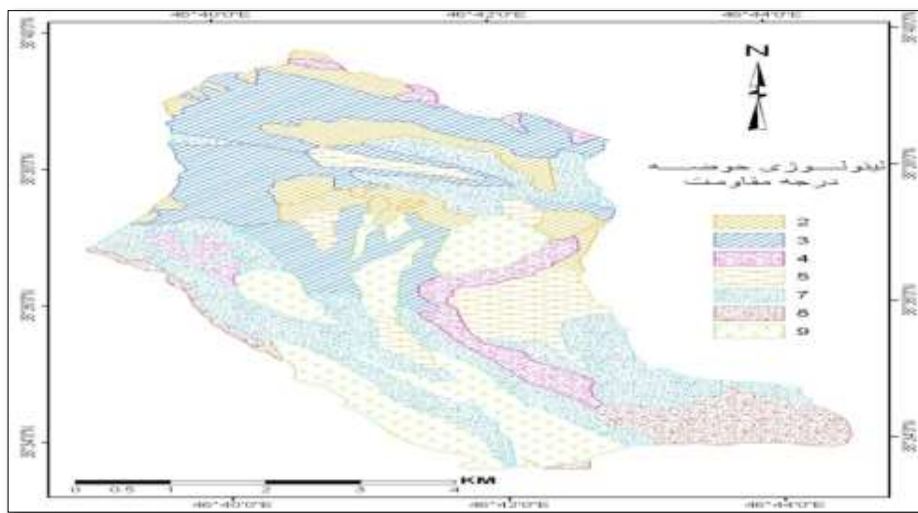
عامل زمین‌شناسی سطحی یکی از عوامل تاثیرگذار در فرسایش خاک و تولید رسوب در روش MPSIAC عامل زمین‌شناسی است. امتیاز این عامل بر اساس نوع سنگ، سختی، شکستگی و هوازدگی تعیین می‌شود. سنگ‌های با جنس سخت و مقاوم دارای پتانسیل تولید رسوب کم بوده، درحالی‌که سنگ‌های سست سهم بیش‌تری در تولید رسوب بر عهده دارند. در روش MPSIAC جهت برآورد امتیاز عامل زمین‌شناسی سطحی در تولید رسوب از رابطه $Y_1 = X_1$ استفاده می‌گردد که در آن: Y_1 معرف امتیاز عامل زمین‌شناسی سطحی در تولید رسوب بوده و X_1 شاخص فرسایش زمین‌شناسی سطحی است (رفاهی، ۱۳۸۲: ۲۸۹). دامنه امتیاز این عامل بین صفر تا ۱۰ در

نظر گرفته می‌شود. بدین معنی که هر چه سنگ از مقاومت بیش‌تری در برابر فرسایش برخوردار باشد امتیاز کم‌تری به آن تعلق می‌گیرد. نحوه برآورد امتیاز عامل زمین‌شناسی سطحی در تولید رسوب براساس محاسبه میانگین وزنی مساحت تحت اشغال هر سنگ و امتیاز مربوطه بر مبنای جدول شماره (۲) استوار است.

جدول ۲- طبقه‌بندی سنگ‌ها بر اساس سختی آن‌ها (فیض‌نیا، ۱۳۷۴)

ردیف	درجه	نوع سنگ‌ها	ضریب سختی
I	سخت‌ترین سنگ‌ها	سخت‌ترین و متراکم‌ترین کوارتزیت‌ها و بازالت‌ها، سنگ‌های دیگر به‌طور استثنایی سخت	۲۰
II	سنگ‌های بسیار سخت	سنگ‌های گرانیتی خیلی سخت، کوارتز پورفیری، کوارتزیت‌های با سختی کم‌تر از انواع بالا، شیبست‌های سخت، سخت‌ترین ماسه‌سنگ‌ها و سنگ‌های آهکی	۱۵
III	سنگ‌های خیلی سخت	گرانیت متراکم، ماسه‌سنگ‌ها و سنگ‌های آهکی خیلی سخت، رگه‌های حاوی کوارتزیت، کنگلو مرای سخت و کانسارهای آهن خیلی سخت	۱۰
III a	سنگ‌های سخت	سنگ‌های آهکی سخت، گرانیت‌های ضعیف، ماسه‌سنگ‌های سخت، مرمر سخت، دولومیت و پیریت	۸
IV	سنگ‌های به مقدار کافی سخت	ماسه‌سنگ معمولی و سنگ‌های آهن دار	۶
IV a	سنگ‌های نسبتاً سخت	شیل‌های ماسه‌ای و ماسه‌سنگ‌های رسی متورق	۵
V	سنگ‌های با سختی متوسط	شیل‌های رسی سخت، سنگ‌های آهکی، ماسه‌سنگ ضعیف و کنگلومرای نرم	۴

امتیاز عامل زمین‌شناسی مدل اصلاح‌شده پسیاک در حوضه بکرآباد ۵/۵۹ می‌باشد (جدول ۳). شکل ۲ نقشه درجه مقاومت سنگ‌ها را نسبت به فرسایش در حوضه آبریز بکرآباد نشان می‌دهد.

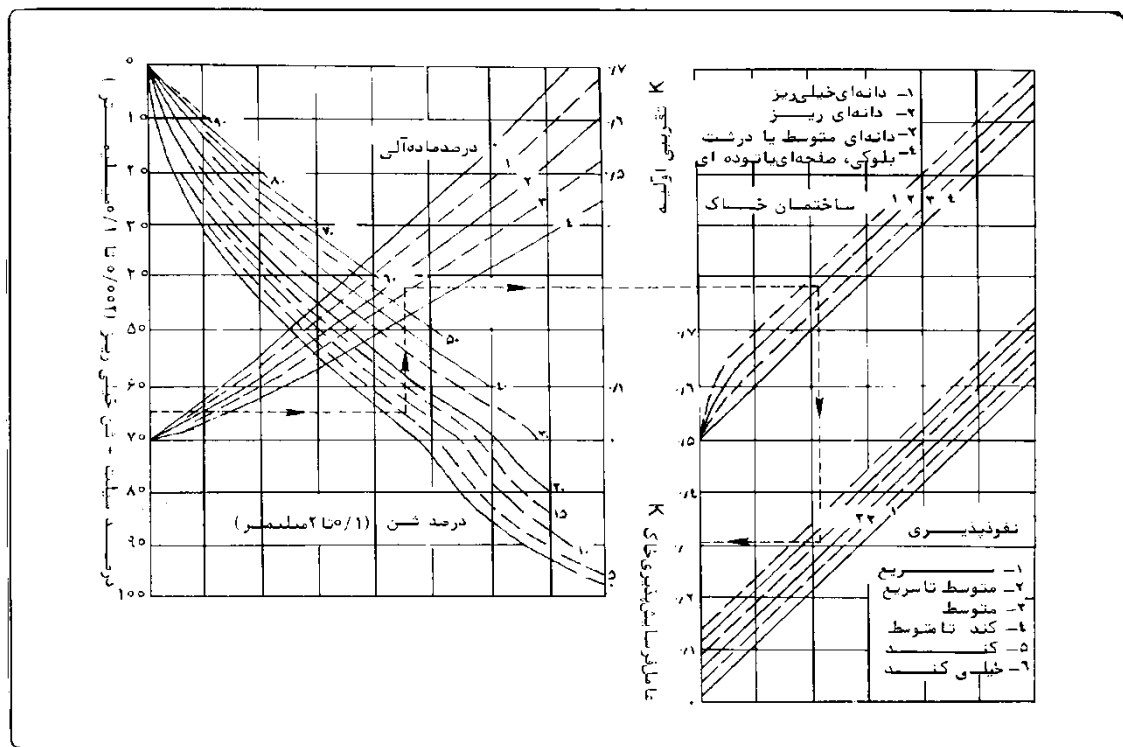


شکل ۲: نقشه مقاومت سنگ‌ها به فرسایش در حوضه آبریز بکرآباد

عامل خاک

امتیاز فاکتور خاک برای هر یک از واحدهای کاری مورد مطالعه از طریق رابطه $X_2=16/67K$ محاسبه می‌گردد که در آن X_2 امتیاز عامل رسوب‌دهی خاک و K ضریب فرسایش‌پذیری خاک در فرمول جهانی فرسایش می‌باشد. برای تعیین مقدار K ، با استفاده از مطالعات خاک‌شناسی حوضه و شناسنامه‌های پروفیلی، مقادیر ۵ فاکتور فیزیکی خاک شامل: درصد لای + شن بسیار نرم و ریز، درصد شن، درصد مواد آلی، ساختمان خاک و قابلیت نفوذپذیری استخراج می‌گردد.

مقادیر چهار پارامتر اول عبارتند از مقادیر متوسط هر یک در قشر سطحی خاک تا عمق ۲۰-۱۵ سانتی‌متری و مقدار پارامتر قابلیت نفوذپذیری، در تمام نیمرخ خاک اندازه‌گیری می‌شود. با در دست داشتن مقادیر بالا و با استفاده از نمودار شکل (۳)، مقدار K محاسبه می‌شود.



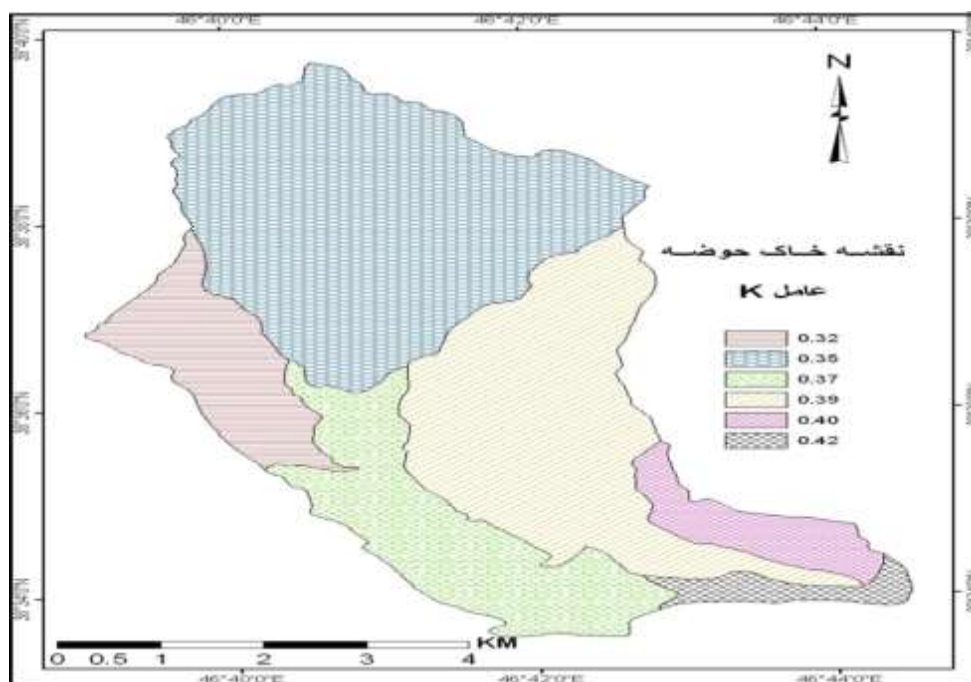
شکل ۳: نمودار تعیین مقدار K یا عامل فرسایش‌پذیری خاک

پس از تعیین مقدار K در هر یک از واحدهای خاک حوضه، میانگین وزنی آن در هر یک از واحدهای کاری و برحسب مساحت تحت اشغال هر واحد خاک، محاسبه می‌شود و در نهایت با ضرب مقادیر K به دست آمده در عدد $۱۶/۶۷$ مقدار عددی عامل خاک برای هر واحد کاری مشخص می‌شود. طبق محاسبات انجام گرفته عامل خاک

در مدل اصلاح شده پسیاک در حوضه بکرآباد ۶/۱۱ به دست آمده است (جدول ۳). شکل ۴ پراکنش ضریب فرسایش خاک را در سطح حوضه نشان می دهد.

جدول ۳- مشخصات هیدرولوژیکی حوضه ی مورد مطالعه برحسب زیرحوضه

پارامترها زیرحوضه	مساحت حوضه (km ²)	دبی پیک ویژه (m ³ /s/km ²)	دبی پیک سیلاب (m ³ /s)	ارتفاع رواناب (mm)	امتیاز عامل رواناب
z 1	۱۰/۸۱۷	۰/۱۴	۱/۵۱	۲۰۱/۱	۲/۶
z 2	۶/۴۹	۰/۱۲	۰/۷۸	۲۰۷/۵	۱/۴۴
z 3	۸/۶۶۵	۰/۰۵۱	۰/۴۴	۱۴۸/۷	۱/۴۰
z 4	۴/۳۸۱	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۱۷۵	۱۴۲/۶	۰/۸۵
z 5	۳/۵۱۱	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۱۷۶	۱۳۰/۵	۰/۷۸
z 6	۱/۵۵۴	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۷۸	۱۲۰/۳	۰/۷۲
z 7	۲/۳۱۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲۳۱	۱۱۱/۵	۰/۶۷
z 8	۲/۸۳۷	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۱۱۳	۱۱۰/۲	۰/۶۶
z 9	۲/۷۸۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲۷۸	۱۱۵/۳	۰/۷۰
z 10	۱/۱۴۶	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۶۸۸	۱۱۶/۲	۰/۷۰
کل حوضه	۴۴/۵۰	۰/۰۳	۱/۳۳۵	۱۴۰/۳	۱/۱۴



شکل ۴: نقشه پراکنش ضریب فرسایش خاک (K) در حوضه آبریز بکرآباد

عامل آب‌وهوا

عامل آب‌وهوا در هریک از واحدهای کاری از طریق رابطه‌ی $X_3=0.2P_2$ تعیین شده است که در آن امتیاز عامل آب‌وهوا و P_2 مقدار بارندگی ۶ساعته با دوره بازگشت ۲ سال برحسب میلی‌متر می‌باشد. طبق محاسبات، بر روی داده‌های هواشناسی ایستگاه اهر میزان بارندگی ۶ساعته با دوره بازگشت دوساله برای حوضه بکرآباد حدود $29/5$ میلی‌متر می‌باشد که با قرار دادن آن در رابطه‌ی فوق امتیاز عامل آب‌وهوا $5/9$ تعیین شده است (جدول ۳).

عامل رواناب

برای برآورد عامل رواناب، لازم است دو فاکتور ارتفاع رواناب و دبی پیک ویژه سیلاب سالانه هر یک از واحدهای کاری محاسبه گردد. امتیاز عامل رواناب از رابطه زیر به دست می‌آید..

$$X_4=0.2(0.03 R + 50QP)=0/006R+10QP$$

که در آن :

X_4 - امتیاز عامل رواناب، R - ارتفاع رواناب برحسب میلی‌متر و Qp - دبی ویژه پیک برحسب مترمکعب بر ثانیه در هر کیلومترمربع می‌باشد.

برای برآورد دبی پیک سیلاب سالانه هر یک از واحدهای کاری از معادله دیکن استفاده می‌شود.

$$Q=C \times A^{0.75}$$

که در آن :

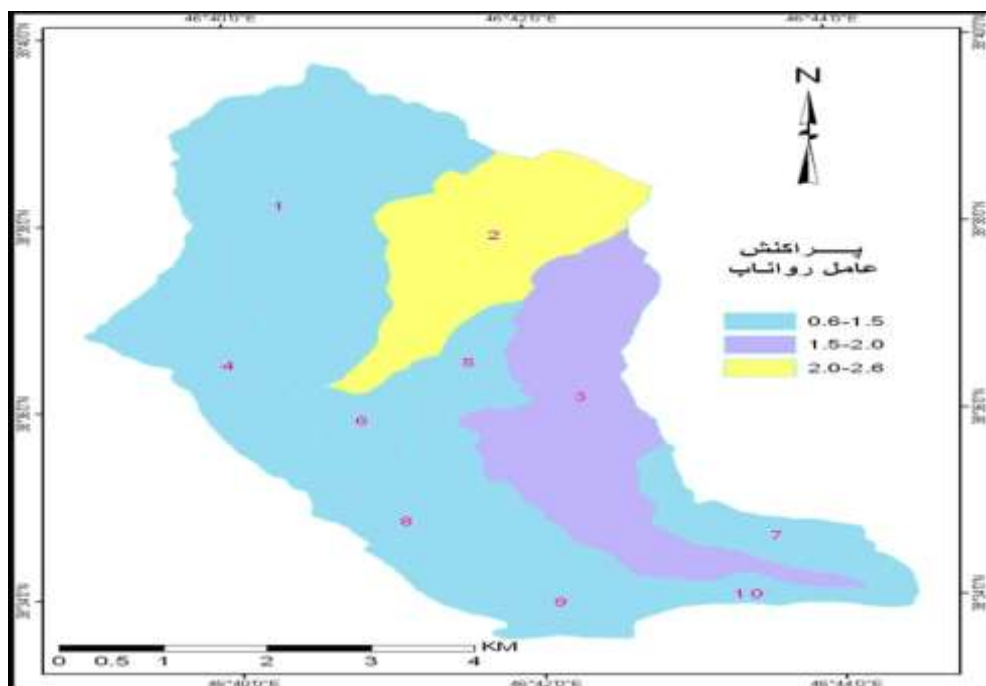
Q : دبی پیک سیلاب سالانه بر حسب مترمکعب بر ثانیه

A : مساحت حوضه به کیلومترمربع

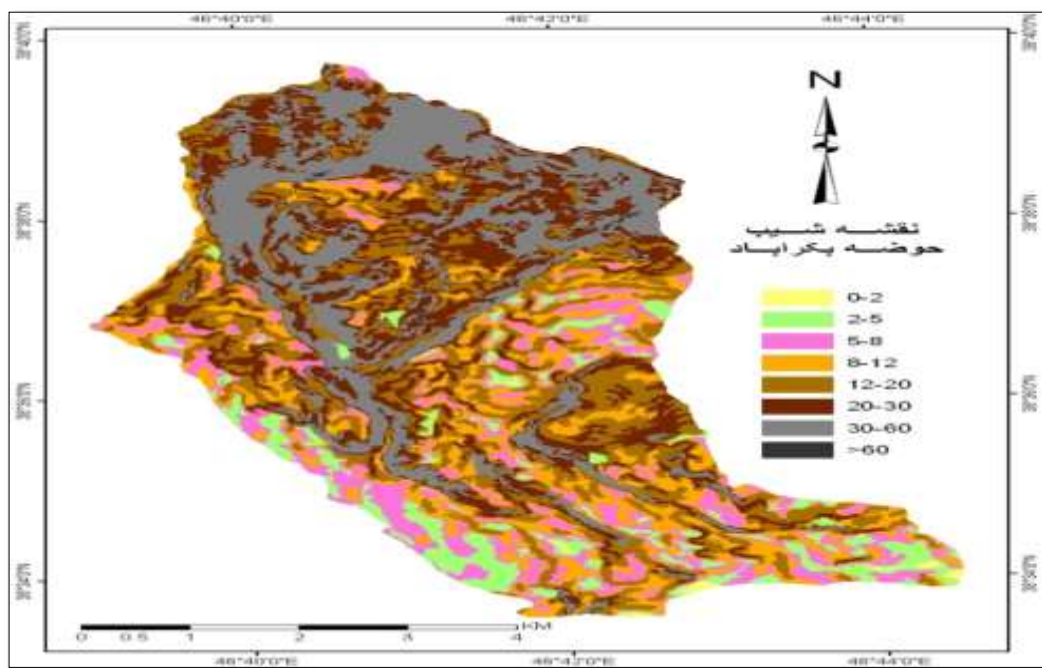
C : ضریب معادله است که از روی آمار ایستگاه‌های هیدرومتری و بر اساس آمار دبی پیک لحظه‌ای سیلاب قابل محاسبه است.

برای به دست آوردن دبی پیک ویژه سیلاب برای هر یک از واحدهای کاری، ابتدا با استفاده از مطالعات ویژگی‌های جریانات سطحی حوضه و آمار ایستگاه‌های هیدرومتری، میانگین دبی‌های پیک لحظه‌ای سیلاب حوضه مورد مطالعه محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از معادله دیکن و جایگذاری مقادیر متغیرها در معادله، ضریب معادله محاسبه شده و با دخالت دادن مساحت واحدهای کاری، دبی پیک ویژه سالانه به دست می‌آید. در نهایت با جای‌گذاری داده‌ها در فرمول امتیاز عامل رواناب مورد محاسبه قرار می‌گیرد. نتایج محاسبات در جدول ۲ و چگونگی توزیع عامل رواناب در سطح حوضه در شکل ۵ نمایش داده شده است. با استفاده از ارقام جدول

عامل رواناب حوضه ۱/۱۴ به دست آمده است که نشان دهندهی تأثیرگذاری اندک این عامل در فرسایش منطقه می باشد.



شکل ۵: نقشه پراکنش عامل رواناب حوضه آبریز بکرآباد



شکل ۶: نقشه شیب حوضه آبریز بکرآباد

عامل پستی و بلندی

در روش MPSIAC برای تعیین امتیاز عامل توپوگرافی از رابطه زیر استفاده می‌شود: $X_3 = 0.33 s$ که در آن :

X_3 = امتیاز عامل توپوگرافی و s = شیب متوسط بر حسب درصد می‌باشد (رفاهی، ۱۳۷۵).

جهت برآورد دقیق این عامل از نقشه شیب کلاسه‌بندی شده حوضه مورد مطالعه استفاده شده است (شکل ۶). با دخالت دادن مساحت‌های تحت پوشش کلاس‌های شیب، متوسط وزنی شیب در واحدهای کاری محاسبه و نهایت امتیاز عامل به دست می‌آید. نتایج محاسبات در جدول ۳ نشان داده شده است.

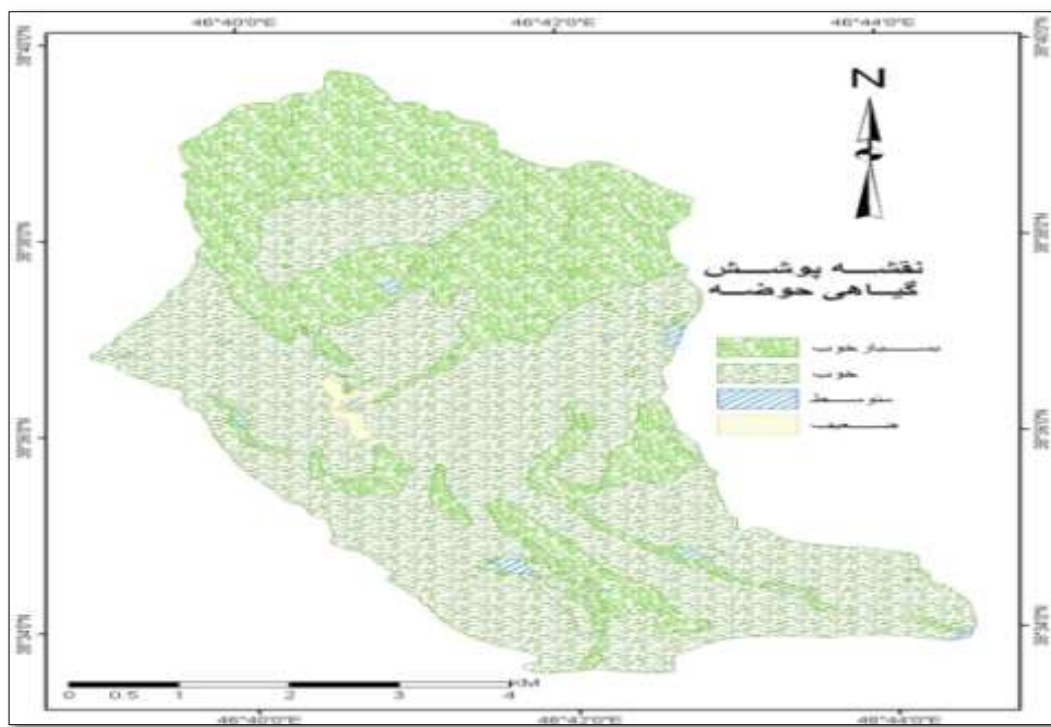
عامل پوشش زمین

برای تعیین امتیاز عامل پوشش زمین در مدل MPSIAC از رابطه زیر استفاده می‌کنند:

$$X_6 = 0.2 pb$$

که در آن: X_6 = امتیاز عامل پوشش زمین و pb - درصد اراضی لخت و فاقد پوشش می‌باشد (رفاهی، ۱۳۸۰: ۲۹۷).

برای تعیین عامل پوشش زمین (پوشش گیاهی، لاشبرگ و پوشش سنگی) ابتدا نقشه پوشش گیاهی حوضه تهیه شد (شکل ۷). سپس با استفاده از این نقشه و نیز داده‌های موجود امتیاز عامل در هر یک از واحدهای کاری محاسبه شد. طبق محاسبات انجام‌شده امتیاز عامل پوشش زمین در کل حوضه $4/50$ می‌باشد (جدول ۴).



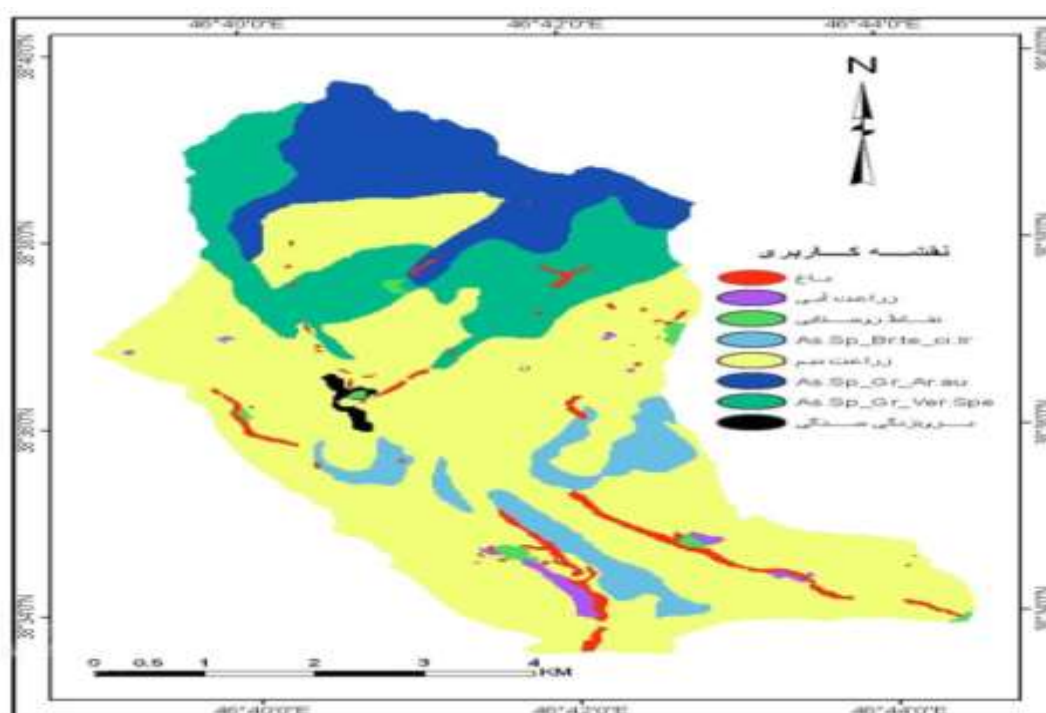
شکل ۷: نقشه‌ی پوشش گیاهی حوضه آبریز بکرآباد

جدول ۴- امتیاز عوامل نه‌گانه در واحدهای هیدرولوژیک حوضه آبریز بکرآباد

عامل زیرحوضه	زمین‌شناسی سطحی	خاک	آب‌وهوا	رواناب	توپوگرافی	پوشش زمین	کاربری اراضی	فرسایش سطحی	فرسایش رودخانه‌ای	مجموع امتیازات
z 1	۳/۱۴	۵/۸۱	۵/۱۴	۲/۶	۱۰/۵۶	۶/۱۳	۱۰/۴۷	۱۵/۸۳	۹/۰۳	۶۸/۷۱
z 2	۳/۴۳	۵/۸۶	۵/۱۶	۱/۴۴	۱۰/۵۶	۶/۳۰	۱۰/۵۷	۱۵/۲۱	۸/۷۹	۶۷/۳۲
z 3	۶/۶۲	۶/۵۶	۵/۶۶	۱/۴	۵/۲۱	۳/۶۱	۷/۴۰	۱۳/۴	۹/۱۶	۵۹/۰۲
z 4	۶/۴۱	۵/۳	۵/۴	۰/۸۶	۵/۱۶	۳/۰۶	۶/۲۵	۱۴/۰۹	۸/۵۱	۵۵/۰۴
z 5	۶/۸۱	۶/۵۵	۵/۴	۰/۷	۵/۰۲	۳/۷۶	۷/۵۸	۱۲/۸۵	۸/۳۱	۵۶/۹۸
z 6	۷/۲۲	۶/۲۳	۵/۲۶	۰/۹	۸/۷	۴/۵۲	۸/۱۴	۱۳/۶۳	۸/۸۶	۶۳/۴۶
z 7	۷/۷۳	۶/۶۸	۵/۲۲	۰/۶۷	۴/۴۱	۲/۹۸	۵/۹۹	۱۳/۶۱	۹/۸۶	۵۷/۱۵
z 8	۷/۵۳	۶/۲	۵/۳	۱/۲	۴	۲/۸۷	۶/۳۳	۱۲/۲۲	۸/۳۵	۵۴
z 9	۸/۰۹	۶/۱۳	۵/۲۶	۱/۶۱	۳/۷۶	۳/۳۹	۷	۱۱/۹۹	۸/۳۵	۵۵/۵۸
z 10	۸/۷۲	۶/۹۷	۵/۵۸	۱/۹	۲/۲۳	۲/۹۰	۶/۲۱	۱۲/۵	۶/۷۷	۵۳/۷۸
کل حوضه	۵/۵۹	۶/۱۱	۵/۹	۱/۱۴	۷/۱۱	۴/۵۰	۸/۳۴	۱۴/۱۱	۸/۸۱	۶۱/۶۱
عامل زیرحوضه	زمین‌شناسی سطحی	خاک	آب‌وهوا	رواناب	توپوگرافی	پوشش زمین	کاربری اراضی	فرسایش سطحی	فرسایش رودخانه‌ای	مجموع امتیازات
z 1	۳/۱۴	۵/۸۱	۵/۱۴	۲/۶	۱۰/۵۶	۶/۱۳	۱۰/۴۷	۱۵/۸۳	۹/۰۳	۶۸/۷۱
z 2	۳/۴۳	۵/۸۶	۵/۱۶	۱/۴۴	۱۰/۵۶	۶/۳۰	۱۰/۵۷	۱۵/۲۱	۸/۷۹	۶۷/۳۲
z 3	۶/۶۲	۶/۵۶	۵/۶۶	۱/۴	۵/۲۱	۳/۶۱	۷/۴۰	۱۳/۴	۹/۱۶	۵۹/۰۲
z 4	۶/۴۱	۵/۳	۵/۴	۰/۸۶	۵/۱۶	۳/۰۶	۶/۲۵	۱۴/۰۹	۸/۵۱	۵۵/۰۴
z 5	۶/۸۱	۶/۵۵	۵/۴	۰/۷	۵/۰۲	۳/۷۶	۷/۵۸	۱۲/۸۵	۸/۳۱	۵۶/۹۸
z 6	۷/۲۲	۶/۲۳	۵/۲۶	۰/۹	۸/۷	۴/۵۲	۸/۱۴	۱۳/۶۳	۸/۸۶	۶۳/۴۶
z 7	۷/۷۳	۶/۶۸	۵/۲۲	۰/۶۷	۴/۴۱	۲/۹۸	۵/۹۹	۱۳/۶۱	۹/۸۶	۵۷/۱۵
z 8	۷/۵۳	۶/۲	۵/۳	۱/۲	۴	۲/۸۷	۶/۳۳	۱۲/۲۲	۸/۳۵	۵۴
z 9	۸/۰۹	۶/۱۳	۵/۲۶	۱/۶۱	۳/۷۶	۳/۳۹	۷	۱۱/۹۹	۸/۳۵	۵۵/۵۸
z 10	۸/۷۲	۶/۹۷	۵/۵۸	۱/۹	۲/۲۳	۲/۹۰	۶/۲۱	۱۲/۵	۶/۷۷	۵۳/۷۸
کل حوضه	۵/۵۹	۶/۱۱	۵/۹	۱/۱۴	۷/۱۱	۴/۵۰	۸/۳۴	۱۴/۱۱	۸/۸۱	۶۱/۶۱

عامل کاربری اراضی

برای تعیین امتیاز عامل کاربری اراضی از رابطه $X_7 = 20 - 0.2PB$ استفاده می‌شود که در آن X_7 امتیاز درجه رسوب-دهی عامل کاربری اراضی و PB مقدار تاج پوشش گیاهی برحسب درصد می‌باشد. برای تعیین درصد پوشش گیاهی حوضه ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی، نقشه‌های توپوگرافی و بازدیدهای میدانی، نقشه کاربری اراضی تهیه شد. سپس با بهره‌گیری از مطالعات پوشش گیاهی و نیز نتایج ترانسکت گذاری در سطح حوضه امتیاز کاربری اراضی در واحدهای کاری حوضه به‌دست آمده است (جدول ۳). شکل شماره (۸) پهنه‌بندی کاربری اراضی را در سطح حوضه نشان می‌دهد.

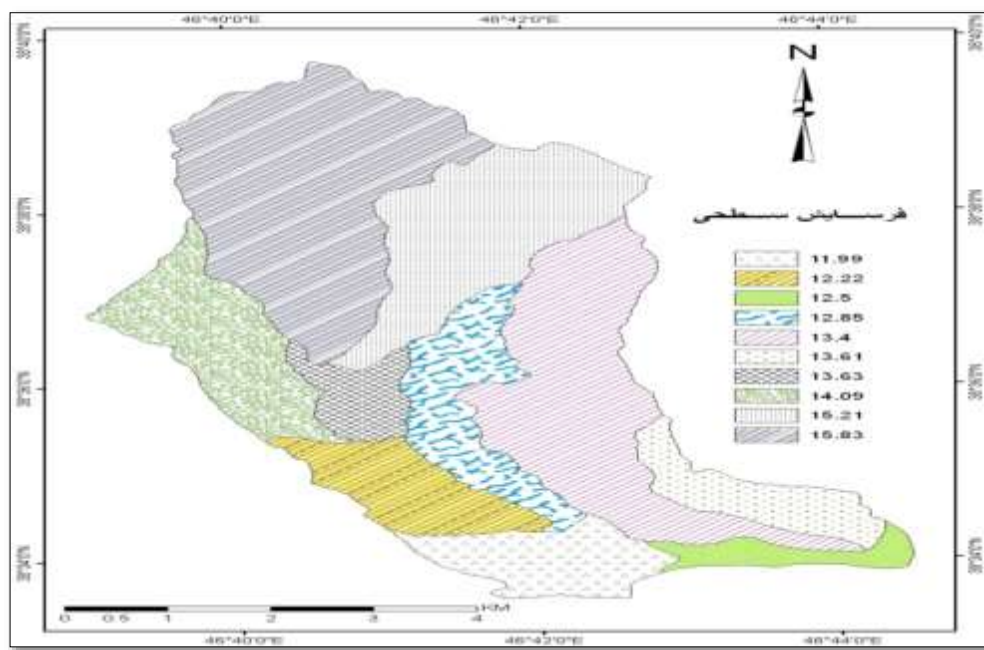


شکل ۸: نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز بکرآباد

عامل وضعیت فرسایش فعلی در سطح حوضه

برای تعیین امتیاز فرسایش سطحی حوضه در مدل اصلاح‌شده پسیاک از رابطه $X_8 = 0.25SSF$ استفاده می‌شود که در آن X_8 امتیاز عامل وضعیت فعلی فرسایش و SSF امتیاز عامل سطحی خاک است که با استفاده از روش $B.L.M$ به‌دست می‌آید. در این روش برای تعیین SSF از هفت عامل حرکت توده‌ای، پوشش لاشیرگ، پوشش سنگی سطح زمین، قطعات سنگی تحکیم یافته، شیارهای سطحی، فرم آبراهه‌ها و توسعه فرسایش خندقی استفاده

می‌گردد. با مراجعه به هر یک از واحدهای کاری و مقایسه وضع موجود با این شرایط تعریف‌شده در جداول استاندارد پارامترهای هفت گانه، اقدام به ارزش‌گذاری عددی هر فاکتور می‌شود سپس جمع نهایی پارامترهای هفت گانه به عدد ۰/۲۵ ضرب می‌شود. نتیجه به‌دست آمده امتیاز این فاکتورها در جدول ۳ و پراکنش فرسایش سطحی در حوضه در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹: نقشه پراکنش فرسایش سطحی حوضه آبریز بکرآباد

عامل فرسایش رودخانه‌ای

آخرین عامل در برآورد فرسایش خاک مدل MPSIAC فرسایش رودخانه‌ای و انتقال رسوب می‌باشد که نتیجه شستشو، زیربری و تخریب دیواره‌ای آبراهه توسط جریان آب می‌باشد برای تعیین امتیاز عامل فرسایش رودخانه‌ای از رابطه $X_9 = 1.67SSF.g$ استفاده می‌شود که در آن X_9 امتیاز عامل فرسایش رودخانه‌ای و $SSF.g$ امتیاز نهایی پارامتر فرسایش خندقی در عامل وضعیت فرسایش فعلی در روش BLM می‌باشد. امتیاز عامل فرسایش رودخانه‌ای برای کل حوضه ۸/۸۱ محاسبه شده و امتیاز سایر واحدهای کاری در جدول ۳ ارائه شده است.

برای این منظور از رابطه بین درجه رسوب‌دهی و میزان تولید رسوب به فرم زیر استفاده شده است:

$$Q_s = 38/77e^{0/0353R}$$

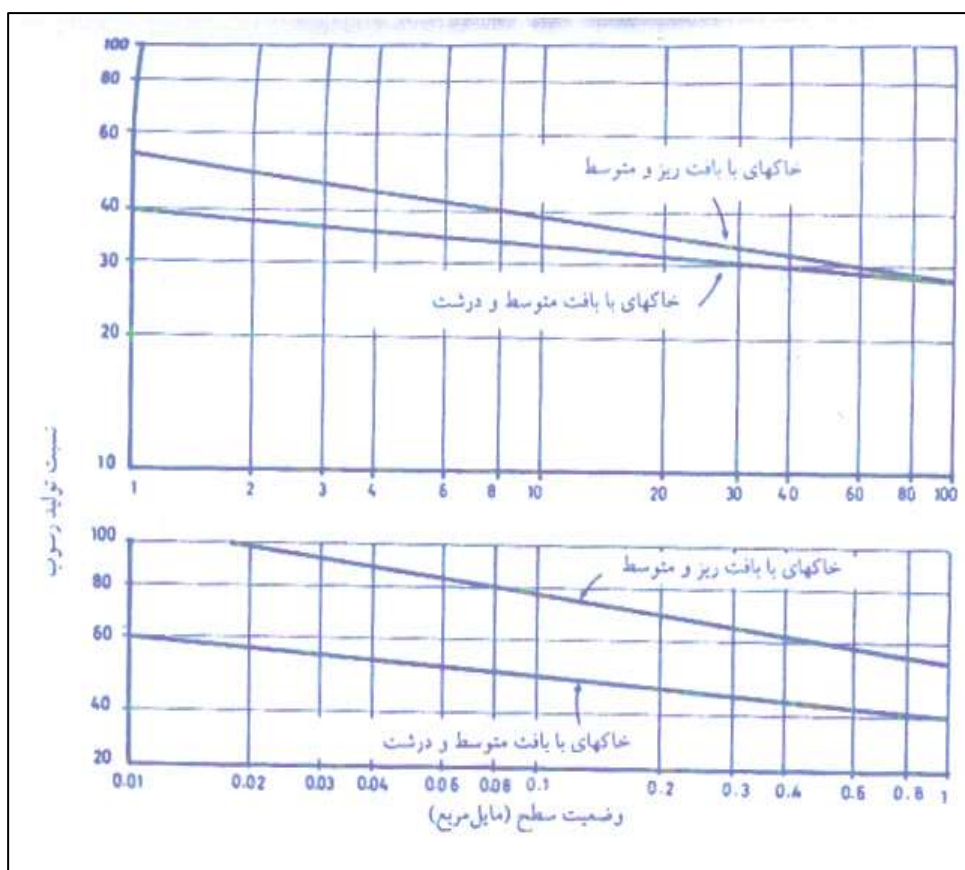
در رابطه فوق Q_s - میزان رسوب‌دهی سالانه بر حسب مترمکعب در کیلومترمربع (مجموع بار معلق و بار بستر) و R - درجه رسوب‌دهی (مجموع امتیازات عوامل نه گانه) می‌باشد.

در مدل MPSIAC رابطه فوق با درجه همبستگی $r = 0/9964$ از نظر آزمون آماری در سطح یک درصد معنی‌دار می‌باشد.

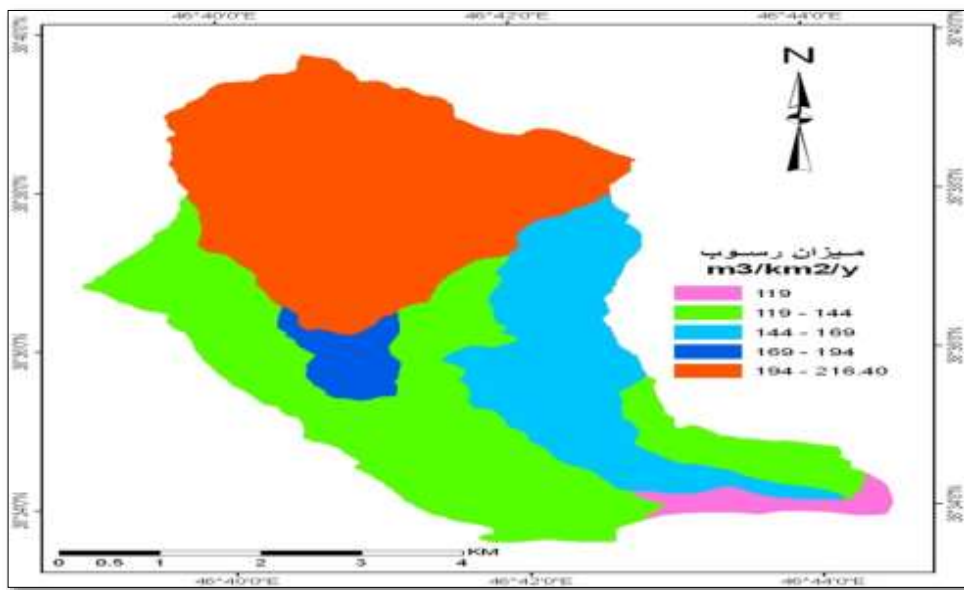
هم‌چنین جهت برآورد فرسایش ویژه از روی میزان رسوب‌دهی برآورد شده، از نمودار شکل ۱۰ که نسبت تحویل رسوب (S.D.R) را بر حسب مساحت حوضه و بافت نشان می‌دهد استفاده شده است.

با استفاده از این نمودار نسبت تحویل رسوب (S.D.R) برای هر کدام از زیر حوضه‌ها به دست آمده و با در دست داشتن S.D.R، مقدار فرسایش ناخالص هر زیر حوضه با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است.

$$\text{فرسایش ویژه} = \frac{\text{رسوب}}{S.D.R}$$



شکل ۱۰: نمودار نسبت تحویل رسوب



شکل ۱۱: نقشه‌ی میزان رسوب در حوضه آبریز بکرآباد

جدول ۵- مقادیر رسوب و فرسایش در واحدهای کاری حوضه آبریز بکرآباد

مقدار فرسایش ویژه (ton/h/y)	مقدار رسوب ویژه (ton/h/y)	مقدار رسوب ویژه (m ³ /km ² /y)	مساحت (Km ²)	پارامتر زیرحوضه
۵/۲۸	۳/۲۵	۲۱۶/۴۰	۱۰/۸۲	z 1
۴/۶۸	۳/۰۹	۲۰۶/۰۳	۶/۴۹	z 2
۳/۶۳	۲/۳۱	۱۵۳/۷۱	۸/۶۷	z 3
۲/۸۷	۲/۰۰	۱۳۳/۵۶	۴/۳۷	z 4
۲/۹۷	۲/۱۵	۱۴۳/۰۳	۳/۵۱	z 5
۳/۲۳	۲/۶۱	۱۷۴/۱۷	۱/۵۵	z 6
۲/۸۲	۲/۱۶	۱۴۳/۸۹	۲/۳۲	z 7
۲/۴۹	۱/۸۵	۱۲۳/۴۱	۲/۸۴	z 8
۲/۵۹	۱/۹۳	۱۲۸/۶۱	۲/۷۸	z 9
۲/۱۲	۱/۷۹	۱۱۹/۴۶	۱/۱۵	z 10
۳/۲۶	۲/۳۱	۱۵۴/۲۲	۴۴/۵۰	کل حوضه

باید در نظر داشت که میزان فرسایش خاک و تولید رسوب محاسبه شده در روش MPSIAC مجموع رسوبدهی هر واحد کاری مورد نظر می‌باشد، زیرا در این روش مجموع فرسایش خاک و رسوب زایی هر واحد تحت عنوان بار رسوب^۱ نامیده می‌شود که عبارت از مجموع بار معلق و بار بستر می‌باشد. با در دست داشتن وزن مخصوص

متوسط رسوبات معلق و بار بستر به میزان ۱۵۰۰ کیلوگرم در هر متر مکعب، وزن رسوبات سالانه هر زیر حوضه برحسب تن در کیلومتر مربع و در هکتار برآورد شده است (جدول ۵). سرانجام با استفاده از داده‌های جدول مذکور نقشه‌ی پراکنش کلاس‌های تولید رسوب در حوضه ترسیم شده است (شکل ۱۱).

یافته‌ها و بحث

در مدل MPSIAC به منظور برآورد فرسایش و رسوب، شرایط محیطی حوضه مدنظر قرار می‌گیرد. بنابراین شرایط محیطی حاکم بر حوضه با تأثیرات متفاوت خود در فرسایش و تولید رسوب حوضه، نقش خود را به صورت ارزش‌های عددی متفاوت در مدل ارائه می‌نمایند. از طرفی نتیجه به‌دست آمده را نمی‌توان به مفهوم رد یا تایید مدل MPSIAC قلمداد نمود، زیرا این مدل در کشوری با شرایط اقلیمی و ویژگی‌های زمین محیطی متفاوت ابداع شده است. مطالعه فرسایش و میزان رسوب حوضه آبریز بکرآباد با اهداف تعیین اشکال عمده فرسایش در منطقه، بررسی علل ایجاد فرسایش و تولید رسوب در حوضه، برآورد میزان فرسایش و رسوب‌دهی در هر زیر حوضه براساس روش تجربی MPSIAC و اولویت‌بندی زیر حوضه‌ها از لحاظ میزان فرسایش و رسوب انجام شده است که عامل وضعیت فرسایش در سطح حوضه (فرسایش سطحی)، خصوصیات خاک و شیب مهم‌ترین فاکتورهای موثر در بروز انواع فرسایش در این حوضه هستند. با توجه به میزان فرسایش در هر زیر حوضه اولویت کنترل فرسایش و تولید رسوب در زیرحوضه Z1 و Z2 بیش‌تر از سایر زیرحوضه‌ها می‌باشد. بیش‌ترین فرسایش در زیرحوضه Z1 می‌باشد که عامل اصلی آن عامل فرسایش سطحی و سپس شیب می‌باشد که با عامل اصلی در فرسایش کل حوضه مطابقت دارد و از طرفی در زیرحوضه Z10 میزان فرسایش کم‌تر صورت می‌گیرد که عامل تاثیرگذار در فرسایش این زیرحوضه نیز عامل فرسایش سطحی می‌باشد. بنابراین با توجه به جدول شماره ۳ عامل فرسایش سطحی در کل حوضه دارای امتیاز بالایی می‌باشد. عوامل فرسایش رودخانه‌ای، زمین‌شناسی و آب‌وهوا به‌طور عمده تاثیر متوسط و عوامل کاربری اراضی، پوشش زمین و رواناب تاثیر کم در بروز فرسایش در این حوضه دارند.

به‌طور کلی از ارزیابی به عمل آمده در مورد وضعیت فرسایش در سطح حوضه می‌توان نتیجه گرفت که حوضه بکرآباد با مجموع نمرات ۶۱/۶۱ و رسوب ویژه ۱۵۴/۲۲ مترمکعب در کیلومترمربع در سال در کلاس فرسایشی کم قرار دارد.

با توجه به مطالعات انجام‌شده و امتیازات محاسباتی در زیر حوضه‌ها، برای کنترل رسوب در سطح حوضه ابتدا باید برنامه‌ریزی‌های حفاظتی از زیر حوضه‌های Z1 و Z2 آغاز گردد. نتایج نهایی مطالعه حاضر موید کارآمدی

به‌کارگیری توام مدل‌های فرسایشی و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) در برآورد فرسایش خاک است. بنابراین از این فناوری‌ها می‌توان برای حوضه‌های مشابه نیز استفاده کرد.

منابع

- احمدزاده، حسن (۱۳۸۴)، «مدل‌سازی فرسایش و رسوب حوضه آبریز قلعه‌چای عجب‌شیر با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در محیط GIS»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه تبریز.
- احمدی، حسن (۱۳۷۸)، «ژئومورفولوژی کاربردی»، ج ۱ (فرسایش آبی)، تهران، انتشارات دانشگاه تهران.
- اعظمی، ایاد (۱۳۸۱)، «تعیین روش مناسب برآورد بار معلق رسوبی در حوضه سد ایلام»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد تهران.
- باقرزاده کریمی، مسعود (۱۳۷۲)، «بررسی کارایی مدل‌های برآورد فرسایش و رسوب و تکنیک‌های سنجش از دور و GIS در مطالعات فرسایش خاک»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس.
- بیات، رضا (۱۳۷۸)، «بررسی کارایی مدل‌های EPM, MPSIAC در برآورد فرسایش و رسوب حوضه آبخیز طالقان»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.
- پاک پرور، مجتبی (۱۳۷۴)، «ارزیابی روش‌های EPM, MPSIAC در برآورد رسوب و تعیین پراکنش فرسایش در حوضه آبخیز سد لتیان»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.
- رفاهی، حسینقلی (۱۳۸۲)، «فرسایش آبی و کنترل آن»، تهران، انتشارات دانشگاه تهران، ص ۶۷۱.
- روستایی، شهرام؛ رسولی، علی‌اکبر؛ احمدزاده، حسن (۱۳۸۹)، «مدل‌سازی فرسایش و رسوب حوضه‌ی آبریز قلعه‌چای عجب‌شیر با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در محیط GIS»، *مجله جغرافیا و توسعه*، شماره ۱۸، صص ۱۷۸-۱۵۹.
- سرخوش، ا (۱۳۷۵)، «بررسی کارایی مدل USLE در برآورد رسوب و مقایسه آن با مدل PSIAC در حوضه آبریز درکه»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.
- شاه کریمی، عزیزا... (۱۳۸۱)، «بررسی روش‌های برآورد رسوب MPSIAC, EPM, PSIAC در حوضه آبخیز نوزیان»، *مجموعه مقالات همایش ملی مدیریت اراضی-فرسایش خاک و توسعه پایدار*، اراک، صص ۵۶۲-۵۷.
- شیخ حسنی، حسین (۱۳۷۴)، «بررسی پتانسیل تولید رسوب در واحدهای فرسایشی حوضه آبخیز سد مخزنی طالقان»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس.
- عسگری، شمس ا...؛ ثروتی، محمدرضا؛ جعفری، محمدرضا (۱۳۸۷)، «برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب حوضه سد ایلام با استفاده از مدل MPSIAC»، *مجله پژوهش‌های جغرافیایی*، شماره ۶۴، صص ۲۹-۳۵.

- علیزاده گرجی، غلامرضا (۱۳۸۵)، «برآورد فرسایش و رسوب با استفاده از مدل MPSIAC در محیط GIS»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه تبریز.
- فیض‌نیا، سادات (۱۳۷۴)، «مقاومت سنگ‌ها در مقابل فرسایش در اقلیم مختلف ایران»، *مجله منابع طبیعی*، شماره ۴۷، صص ۴۸-۴۰.
- کوک، آریو؛ دورکمپ، جی. سی (۱۳۷۷) «ژئومورفولوژی و مدیریت محیط»، (ترجمه شاپور گودرزی‌نژاد) جلد اول، تهران، انتشارات سمت، ۳۸۴ ص.
- نیک‌جو، محمدرضا (۱۳۷۳)، «ارزیابی کاربرد مدل MPSIAC در برآورد فرسایش و رسوب حوضه آبخیز دریانچای»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس.

- Ledemza, P., (2004), "Comparison of global and remotely sensed digital elevation models for use in hydrologic and erosion models", ITC, penguin, London.

-Schwab, O., Delmar, D., Fangmeier, W.G., Frevert, R. R., (1993), "*Soil and Water Conservation Engineering*", Fourth Edition, New York, Wiley & Sons, PP507.