

ارزیابی و برآورد خطر فرسایش و رسوب در حوضه‌ی آبریز کرج با استفاده از روش‌های

مورفومتری و تجربی

محمدعلی زنگنه‌اسدی: دانشیار ژئومورفولوژی دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

ابراهیم تقوی‌مقدم*: دکترای ژئومورفولوژی دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

فرشته بیرامعلی: دانشجوی دکترای ژئومورفولوژی دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۷/۱۷)

چکیده

طی هر سال هزاران تن خاک مرغوب و حاصلخیز به وسیله‌ی اشکال مختلف فرسایش از دسترس خارج می‌شود. ارزیابی میزان رسوب و فرسایش حوضه‌ها از مهم‌ترین اقدامات متخصصان ژئومورفولوژی و منابع طبیعی به شمار می‌رود. حوضه‌ی کرج یکی از حوضه‌های مهم و استراتژیک در کلانشهرهای تهران و کرج است که در راستای توسعه پایدار به ارزیابی جامع منابع آب و خاک نیازمند است. در این تحقیق برای برآورد رسوب و خطر فرسایش در حوضه‌ی آبریز کرج، از داده‌های هیدرومتری سازمان آب منطقه‌ای، نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی، تصاویر ماهواره‌ای و مدل رقومی ارتفاعی استفاده و در نرم‌افزارهای Arc Map 10.5 و Envy 5 پردازش شد. سپس از این داده‌ها برای اجرای روش‌های مورفومتری، هیدروفیزیکی (CSY)، فورنیه و فارگاس استفاده شد. محاسبات نشان می‌دهد که میزان رسوب سالانه‌ی حوضه‌ی کرج در روش مورفومتری، ۸/۶۱ تن در هکتار و روش‌های تجربی فورنیه و هیدروفیزیکی به ترتیب ۴/۷۳ و ۳/۸۷ تن در هکتار است؛ این در حالی است که بر اساس داده‌های واقعی منحنی سنج رسوب سازمان آب منطقه‌ای، نرخ رسوب سالانه ۶/۸۹ تن در هکتار می‌باشد. بنابراین، روش مورفومتری از نزدیک‌ترین برآورد نسبت به داده‌های واقعی برخوردار است و برای برآورد فرسایش رسوب در حوضه‌های آبریز بزرگ، روش مناسبی محسوب می‌شود. همچنین طبق نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر فرسایش در روش فارگاس، ۲۹/۱۶٪ از وسعت حوضه‌ی کرج در محدوده‌ی فرسایش شدید قرار دارد. گسترش سازند کهار، زیارت، آسرا و سازندهای کواترنری و فعالیت شدید گسل‌های مشا و کرج، از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر افزایش نرخ فرسایش و رسوب در حوضه‌ی آبریز کرج است.

واژگان کلیدی: حوضه‌ی کرج، فرسایش رسوب، فورنیه، فارگاس، مورفومتری.

۱- مقدمه

خاک و آب از مهم‌ترین منابع ملی محسوب می‌شود و توسعه‌ی پایدار هر کشور در قبال حفظ و بهره‌برداری بهینه از آنهاست. آب از دیرباز عامل فرسایش طبیعی خاک و رسوب بوده‌است و شاید در مقابل کوهزایی (اوروژنز) پدیده‌ای تعادلی باشد، اما فعالیت‌های جاه‌طلبانه‌ی بشر امروز و دخالت خودخواهانه در اکوسیستم‌های زیست کره، به حدی سبب فرسایش آب و خاک شده‌است که توازن و مطلوبیت خود نیز به هم بخورد. فرسایش خاک به دلیل داشتن اثرات

چندجانبه‌ی آشکار و پنهان زیست، به سرطان زمین شهرت یافته و یکی از فرآیندهای پیچیده و خطرناک محیطی است (Ownagh and Nohtani, 2004).

در ابتدای قرن بیست و یکم، حدود ۱۵ درصد از خاک‌های جهان به نوعی گرفتار مسأله‌ی فرسایش بود که ۵۶ درصد آنها یعنی تقریباً ۱۱ میلیون کیلومترمربع، تحت تأثیر فرسایش آبی قرار داشت. اکنون میزان سالانه‌ی فرسایش خاک در جهان، ۷۵ میلیارد تن است که سهم ایران از آن بیش از ۲ میلیارد تن و حدود ۳ برابر فرسایش خاک در آسیا است. از سوی دیگر، میزان فرسایش خاک در مناطق شمالی ایران ۱۵ تا ۲۵ میلیون تن در سال است (Darvish, 2014). میزان فرسایش خاک در منطقه‌ی آسیا، آفریقا و آمریکای جنوبی نیز سالانه ۳۰-۴۰ تن در هکتار، آمریکا و اروپا ۱۳-۱۷ تن و در ایران ۳۰-۳۵ تن در هکتار است. میانگین فرسایش در ایران حدود ۴/۳ برابر متوسط فرسایش در جهان است. از عمده‌ترین دلایل فرسایش شدید خاک در کشور، از بین بردن پوشش گیاهی، کشت بر اراضی شیب‌دار، تغییر شدید کاربری اراضی، گسترش بیابان‌زایی، میزان بارندگی سالانه‌ی بسیار ناچیز و در نهایت رخداد فرسایش بادی است. همه‌ی این عوامل سبب شده تا کارشناسان روند روزافزون فرسایش خاک در کشور را نگران‌کننده بدانند و بر لزوم توجه ویژه به حفاظت آب و خاک برای دستیابی به توسعه‌ی پایدار تأکید کنند. آنان توجه به روش‌های سنتی حفاظت آب و خاک، بهره‌برداری بهینه از منابع و آمایش سرزمین را برای کنترل روند فرسایش خاک ضرورتی اجتناب‌ناپذیر می‌دانند و در عین حال معتقدند کاهش پیامدهای زیانبار تخریب و فرسایش خاک علاوه بر اجرای طرح‌های اصولی و زیربنایی و عزم ملی، به فرهنگ‌سازی و آموزش توده‌های مردم از طریق جراید، رسانه‌های سمعی و بصری و تشکل‌های مردم‌نهاد نیازمند است.

مدل‌سازی فرایندهای فرسایش و تولید رسوب و حمل و ترسیب، پیش از این از جنبه‌های مختلفی بررسی شده‌است. رابطه‌ی انتقال رسوب بایکر (Bijker, 1967)، یکی از اولین رابطه‌هایی است که برای ترکیب موج و جریان گسترش یافت؛ البته این رابطه بر پایه‌ی روش پیشنهادی کالینسکی - فریجلینک نوشته شد. بایکر بین رسوبات کف و رسوبات معلق تفاوت قائل است. ون راین (Van Rijn, 1993) نیز بر پایه‌ی نظریات فیزیک پایه و مشاهدات عملی و نتایج تئوری جامعی را برای محاسبه‌ی نرخ انتقال رسوب در رودخانه پیشنهاد داد. واتنابی (Watanabe, 1993) بر پایه‌ی ظرفیت مدل نیرو، روشی برای رسوب نهایی (کف و معلق) پیشنهاد کرد. حجم رسوبات بر پایه‌ی حرکت در واحد محیط که با تنش برشی از امواج و جریان به این شرط متناسب است که مقدار بحرانی برای آغاز حرکت تجاوز کند و این حجم با سرعت حرکت متوسط جابه‌جا شود. این روش به طور گسترده در ژاپن برای پیش‌بینی به کار گرفته شده‌است. توماس و وینویچ (Thomas and Voinovich, 1955) دوانته و پوسن (De Vente and Poesen, 2005)، زو و همکاران (Zhu et al, 2007) و آلکزاکیس و همکاران (Alexakis et al, 2013) از نمونه افرادی هستند که در خارج از کشور با استفاده از روش‌های نوین، نرخ فرسایش را در نواحی جغرافیای خود مدل‌سازی و برآورد کرده‌اند. محققانی مانند دمیرچی و کارابرون (Demirci and Karaburun, 2012) نیز با استفاده از روش RUSLE، به بررسی تأثیر آبیاری بارانی بر فرسایش خاک در حوضه‌ی آبریز Wadi Kufanja پرداخته و میزان فرسایش خاک را فوق‌العاده بالا ارزیابی کرده‌اند. آنها مدیریت غیر اصولی آب و خاک در تراست‌ها و گالی‌ها را عامل از دست رفتن خاک

مرغوب می‌دانند. گونزالز و همکاران (Gonzalez et al, 2016) با استفاده از روش Cosmogenic ^{10}Be ، به برآورد نرخ فرسایش در پاناما پرداختند و معتقدند که این فرسایش ارتباط مستقیمی با هوازدگی دارد.

در ایران نیز مؤسسه‌ی تحقیقات آب و خاک سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، گزارش‌های نهایی طرح-های واسنجی مدل‌ها را منتشر کرده‌است. Behzadfar و همکاران (۲۰۰۹)، به مطالعه‌ی شاخص فرسایش در استان خراسان شمالی پرداختند. آنها شاخص فورنیه را با استفاده از آمار بلندمدت ایستگاه‌های موجود به دست آوردند و نقشه-ی پهنه‌بندی خطر فرسایش این استان را با استفاده از روش زمین آمار و مقایسه‌ی معیار ERMS و تشخیص کمتر بودن خطای کریجینگ (۰/۹۹) نسبت به IDW (۱/۰۱) تهیه کردند و به تعیین ۵ کلاس فرسایشی در سطح استان پرداختند. Safari and kavian (۲۰۱۳) با استفاده از ۱۰ مدل تجربی به برآورد نرخ رسوب در حوضه‌ی بابل‌رود پرداختند و روش‌های MPSIAC و ژئومورفولوژی را روش‌هایی مناسب برای برآورد رسوب می‌دانند.

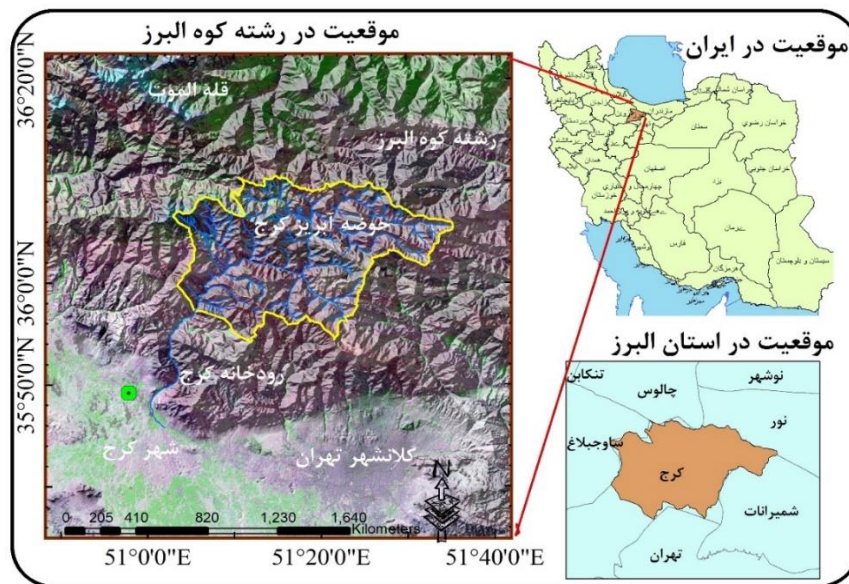
Asadi zanganeh and karimi (۲۰۱۰) و Kosravi و همکاران (۲۰۱۲) نیز با استفاده از مدل‌های مختلف تجربی به برآورد رسوب سالانه در حوضه‌های آبریز پرداختند. Gholipouri و همکاران (۲۰۱۳) حوضه‌ی آبخیز ورده در شمال‌باختر شهر کرج را بررسی کردند. آنها با استفاده از مدل EPM و MPSIAC به اولویت‌بندی حوضه‌ها از نظر فرسایش پرداختند. Haseli and Jalalian (۲۰۱۵) نیز به ارزیابی و پهنه‌بندی مخاطره‌ی فرسایش خاک در حوضه‌ی آبریز الشتر پرداختند. آنها با بررسی ۹ عامل ژئومورفولوژیکی و اقلیمی به این نتیجه دست یافتند که ۶۲٪ از حوضه‌ی الشتر در معرض فرسایش شدید قرار دارد. Ansari Lari (۲۰۱۷) نیز به ارزیابی خطر فرسایش خاک و پتانسیل رسوب-دهی در حوضه‌ی آبریز گابریک هرمزگان پرداخت. او با استفاده از روش EPM به این نتیجه دست یافت که نرخ رسوب سالانه‌ی این حوضه ۸۴ تن در هر کیلومتر مربع است. Abedian و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از مدل EPM، به ارزیابی خطر فرسایش در حوضه‌ی گرگان‌رود پرداختند. Abedini and Tulabi (۲۰۱۷) نیز مقدار رسوب را در حوضه‌ی آبخیز سولاجای اردبیل بررسی کردند. این بررسی از طریق سه مدل فوق صورت گرفت که از میان آنها مدل WEPP نسبت به دو مدل دیگر بهتر بود. AliMohamadi و همکاران (۲۰۱۸) به برآورد شدت فرسایش و رسوب تولیدی در حوضه‌ی قم‌رود - الیگودرز پرداختند. آنها از مدل تجربی EPM و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده و بخش‌های مختلف حوضه را از این نظر طبقه‌بندی کردند. Shojaei و همکاران (۲۰۱۹)، فرسایش و رسوب را در حوضه‌ی آبریز گابریک ارزیابی کردند و نرخ این فرسایش و رسوب را با استفاده از دو مدل تجربی MPSIAC و FSM برآورد ساختند.

هدف این تحقیق، برآورد رسوب حوضه‌ی آبریز کرج با استفاده از روش‌های مورفومتری و تجربی و تحلیل خطر فرسایش در سطح حوضه‌های بزرگ مانند حوضه‌ی آبریز کرج است که برای تأمین آب شرب پایتخت و متروپلیتن تهران - کرج، اهمیت استراتژیک و حیاتی دارد.

۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

حوضه‌ی آبخیز کرج (تا سد امیرکبیر) با مساحت ۸۲۰/۳۶ کیلومتر مربع، در بین عرض‌های جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۰ دقیقه و ۳۵ درجه و ۵۷ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳ دقیقه و ۵۱ درجه و ۳۵ دقیقه شرقی واقع شده‌است (شکل ۱). این حوضه از شمال به حوضه‌ی چالوس، از شرق به حوضه‌ی لار و جاجرود، از غرب به حوضه‌ی کردان و

طالقان و از جنوب به حوضه ی کن، چیتگر و شهر کرج محدود می شود. بیشترین ارتفاع حوضه ی مورد مطالعه ۴۳۴۳ متر و کمترین ارتفاع آن در محل سد، ۱۶۸۰ متر است. طول حوضه ی مورد مطالعه برابر با ۳۸/۳۱ کیلومتر است. به لحاظ فرم شناسی، سیستم حوضه ی کرج در منظر سطوح محدب مرتفع ناهموار قرار دارد. دره های موجود در این حوضه، حاصل فرایندهای فرسایشی یخچال ها و آب های جاری در دوره ی کواترنری است (شکل های ۱-۳). شکستگی های بسیاری در این کوهستان مشاهده می شود که از لحاظ جهت، تابع امتداد گسل های محدوده ی البرز مرکزی است. این گسل ها از گسل های کواترنری ایران است (Berberian, 1979).



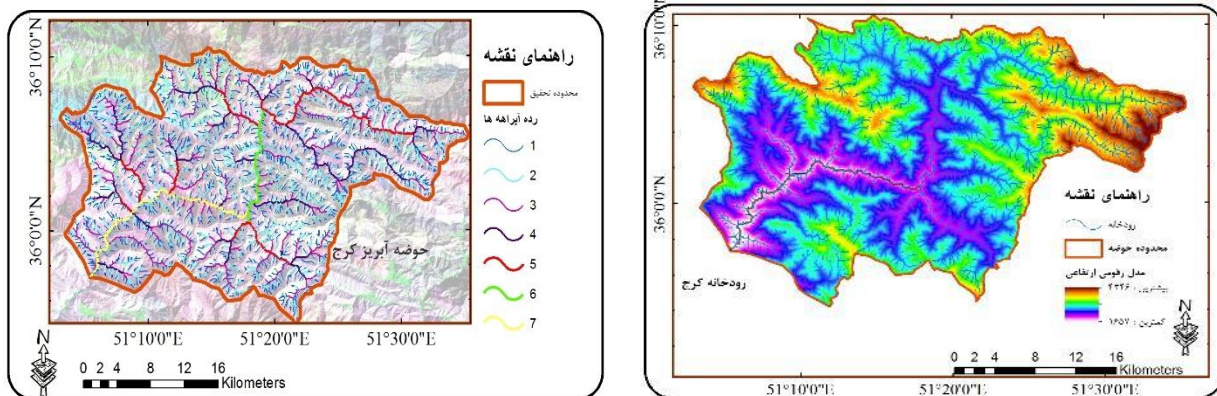
شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوضه ی مورد مطالعه

۳- مواد و روش

در پژوهش حاضر برای برآورد میزان فرسایش رسوب در حوضه ی مطالعاتی، ابتدا با استفاده از نقشه های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ سازمان نقشه برداری کشور، تصویر ماهواره ای و مدل رقومی ارتفاعی با دقت ۳۰ متر مرز حوضه مشخص شد. سپس داده های مورد نیاز از ایستگاه های هواشناسی و باران سنجی حاصل شد. با تهیه ی نقشه های زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰ و ۱:۱۰۰۰۰ تهران و کرج - که در سازمان زمین شناسی کشور تولید شده است - لایه ی زمین شناسی و خطواره های تکتونیکی حوضه ی آبریز کرج فراهم شد. در ادامه ی تحقیق با استفاده از داده ها و آمار ذکر شده، تک تک مؤلفه های مورد نیاز برای اعمال شاخص های تجربی و مورفومتری برآورد رسوب اعم از درجه ی فرسایش پذیری، تراکم زهکشی، ناهنجاری سلسله مراتبی، بارش سالانه، تراکم پوشش گیاهی و سایر خصوصیات توپوگرافی (شکل ۲) حوضه ی آبریز کرج، در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و نرم افزار سنجش از دور Envy ساخته و در ژئودیتابیس پروژه دسته بندی و ذخیره شد. سپس با استفاده از مدل های داگلاس، فورنیه و روش مورفومتری سیکاسی، نرخ رسوب سالانه ی حوضه محاسبه و ارزیابی شد.

روش مورفومتری شبکه زهکشی: Ciccacci و همکاران (۱۹۸۶) روشی ارائه دادند که در آن می توان نرخ رسوب سالانه ی حوضه ها را با استفاده از مؤلفه های شبکه زهکشی حوضه ها از جمله تراکم زهکشی، مساحت حوضه ها و میزان ناهنجاری شبکه زهکشی برآورد کرد. در این روش ابتدا با استفاده از نقشه های ۱:۵۰۰۰۰ سازمان جغرافیایی، شیت های

اوز، مرزن‌آباد، آسارا، تهران، کرج و آبراهه‌های موجود در حوضه‌ی آبریز کرج استخراج و به صورت دستی تمامی آبراهه‌ها شمارش شد. سپس تمامی این آبراهه‌ها با روش Strahler (۱۹۵۲) رده‌بندی شد (شکل ۳).



شکل ۲: سطوح ارتفاعی حوضه‌ی کرج

شکل ۳: رده‌بندی شبکه‌ی زهکشی حوضه‌ی کرج به روش استراهلر

در هر سیستم زهکشی، بی‌نهایت اتصال وجود دارد و در حالت طبیعی باید آبراهه‌های درجه یک به آبراهه‌ی درجه دو و دو آبراهه‌ی درجه دو به یک آبراهه‌ی درجه ۳ بریزد؛ در این حالت شبکه‌ی زهکشی ما هنجار است، ولی اگر این قانون رعایت نشود سیستم آبراهه‌ها ناهنجاری سلسله‌مراتبی دارد. این مسئله می‌تواند در اثر عوامل متعدد زمین‌شناسی و تکتونیکی رخ دهد. Avena و همکاران (۱۹۶۷) از شاخصی به نام Ha (تعداد ناهنجاری سلسله‌مراتبی آبراهه) یاد کرده‌اند. به نظر آونا و همکاران، Ha عبارت است از حداقل تعداد آبراهه‌های درجه یک که باید به طور فرضی به شبکه‌ی زهکشی اضافه شود تا اتصالات، نظم سلسله‌مراتبی داشته باشند (به نقل از Guarnieri and Pirrotta, 2008). با توجه به اینکه هر گونه بی‌نظمی در شبکه‌ی زهکشی به ایجاد جریان نامنظم سیلابی منجر می‌شود؛ شاخص ناهنجاری سلسله‌مراتبی می‌تواند تأثیر مستقیمی بر رسوب حوضه‌ها داشته باشد (Ciccacci et al, 1986). با توجه به اینکه محاسبه‌ی دستی Ha کار مشکلی است، در این تحقیق ابتدا رابطه‌ای برای محاسبه‌ی تعداد ناهنجاری سلسله‌مراتبی هر اتصال آبراهه (Ha_{i-j}) تعریف می‌شود و بر اساس آن، تعداد ناهنجاری سلسله‌مراتبی آبراهه در کل حوضه (Ha_t) حاصل می‌شود. در حالتی که یک آبراهه‌ی مبدأ (به عنوان مثال درجه ۱) به آبراهه‌ی بالاتر یا مقصد (به عنوان مثال درجه ۳) متصل شود، اگر آبراهه‌ی مبدأ را i و آبراهه‌ی مقصد را j بنامیم، تعداد ناهنجاری سلسله‌مراتبی هر اتصال آبراهه (Ha_{i-j})، از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید:

$$Ha_{i \rightarrow j} = 2^{(j-2)} - 2^{(i-1)} \quad \text{رابطه‌ی ۱}$$

بعد از محاسبه‌ی (Ha_{i-j})، تعداد آبراهه‌ها در هر اتصال (Ns_{i-j}) به دست می‌آید. سپس از مجموع حاصل ضرب (Ha_{i-j}) و (Ns_{i-j})، تعداد ناهنجاری سلسله‌مراتبی آبراهه برای کل حوضه (Ha_t) حاصل می‌شود (رابطه‌ی ۲).

$$Ha_t = \sum (Ha_{i \rightarrow j} \times Ns_{i \rightarrow j}) \quad \text{رابطه‌ی ۲}$$

بعد از محاسبه ی Hat ، شاخص Δa (شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی) از تقسیم Hat بر تعداد واقعی آبراهه‌های درجه یک حوضه حاصل می‌شود (Guarnieri and Pirrotta, 2008). روش Ciccacci و همکاران (۱۹۸۶)، بر اساس خصوصیات مورفومتری شبکه زهکشی به خصوص تراکم زهکشی است. یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر افزایش رسوب در حوضه‌ها، میزان تراکم زهکشی است. عموماً هر چه میزان فراوانی آبراهه‌ها در یک حوضه بیشتر باشد، میزان کاوش و برداشت رسوب از سطح حوضه نیز بیشتر خواهد بود. بر همین مبنا، Ciccacci و همکاران به ارائه ی روشی پرداختند که بر اساس آن، می‌توان رسوب حوضه را بر اساس ضریب تراکم زهکشی و میزان ناهنجاری سلسله مراتبی محاسبه کرد. برای محاسبه ی نرخ فرسایش، ابتدا با توجه به نرخ تراکم زهکشی از یکی از این دو تابع استفاده می‌شود (رابطه ی ۳ و ۴):

$$\text{LogTu} = 1.05954 + 2.79687 \log D + 0.13985 \Delta a \quad \Delta a \geq 6 \quad \text{رابطه ی ۳}$$

$$\text{LogTu} = 1.44780 + 0.32619 D + 0.10247 \Delta a \quad \Delta a < 6 \quad \text{رابطه ی ۴}$$

در این رابطه، D تراکم زهکشی و Δa شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی است. روش هیدرو فیزیکی ($1CSY$): برای تعیین پتانسیل رسوب دهی در یک حوضه آبریز ارائه شد (Ahmadi, 2006) که از رابطه ی زیر به دست می‌آید:

$$CSY = As. R. E. V. P \quad \text{رابطه ی ۵}$$

CSY = میزان رسوب دهی، A = عامل مساحت حوضه، R = عامل توپوگرافی، E = عامل قابلیت فرسایش، V = عامل پوشش گیاهی، P = عامل هیدرولوژی (Refahi, 2004) عبارتند از میانگین نزولات جوی سالانه به میلیمتر (P) است. در این روش عامل هیدرولوژی اهمیت زیادی دارد؛ زیرا عامل اصلی تولید رسوب محسوب می‌شود. البته در بعضی موارد هم به طور غیر مستقیم در کاهش رسوب مؤثر است؛ بدین صورت که با افزایش رطوبت خاک به رشد گیاهان و افزایش پوشش گیاهی منجر می‌شود و در نهایت از فرسایش و رسوب خاک ممانعت می‌کند (Ahmadi, 2006). در محاسبات هیدرولوژیکی یک حوضه، محاسبه ی شیب حوضه الزامی است؛ زیرا مقدار رواناب و حجم رسوباتی که در حوضه‌های پر شیب حمل می‌شود، بیش از حوضه‌های کم شیب است. از سوی دیگر، شیب زیاد رودخانه قدرت حمل آب و رسوبات را افزایش می‌دهد. مخروط افکنه‌های موجود در پای ارتفاعات مناطق خشک و با شیب زیاد، بزرگ و قابل توجه‌اند.

شیب حوضه از رابطه ی $R = \frac{H}{L}$ به دست می‌آید که در آن R = شیب حوضه، H = اختلاف ارتفاع به متر (اختلاف ارتفاع بین بلندترین و پست‌ترین نقطه ی حوضه) و L = بزرگ‌ترین محور حوضه به متر است. برای محاسبه ی بارش سالانه ی حوضه از آمار بلند مدت ایستگاه‌های هیدرومتری نسا، شهرستانک، سیرا، سد کرج، مورود و ییلقان استفاده شد. در مناطق مختلف یک حوضه ی آبریز، کم و بیش اختلافاتی در نوع پوشش گیاهی مشاهده می‌شود که نوع و شرایط

¹ Coefficient of Sediment Yield

متفاوت اکولوژی بازمی‌گردد (Ahmadi, 2006). مقدار فرسایش و رسوب‌دهی هر منطقه با وضعیت پوشش گیاهی آن ارتباط تنگاتنگی دارد. بر اساس مطالعات انجام شده در منطقه، ۱۰ تیپ پوشش گیاهی با درصد تراکم پوشش گیاهی مشخص در هر زیر حوضه شناسایی و بررسی (Azami, 2007) و بر اساس آن، عامل پوشش گیاهی (V) از رابطه‌ی زیر حاصل شد:

$$V = \frac{A}{\sum_1^n Vn.an} \quad \text{رابطه‌ی ۶}$$

که در آن A مساحت زیر حوضه به کیلومتر مربع، Vn درصد پوشش گیاهی در هر تیپ و an مساحت هر یک از تیپ‌های گیاهی بر حسب کیلومتر مربع است.

روش فارگاس: Fargas و همکاران در سال ۱۹۹۷ به ارائه‌ی این روش پرداختند. آنها کوشیدند با استفاده از دو عامل فرسایش‌پذیری نوع سنگ و تراکم زهکشی به شناخت منابع منطقه‌ی رسوب‌زا (شدت فرسایش) در سطح منطقه‌ای بپردازند. بدین منظور، نقشه‌ی زمین‌شناسی حوضه‌ی آبریز در محیط GIS تهیه و شاخص فرسایش‌پذیری هر واحد لیتولوژیکی مطابق با جدول ۱ تعیین شد. سپس نقشه‌ی آبراهه‌ها، نقشه‌ی واحدهای لیتولوژی همپوشانی شده و تراکم زهکشی در هر واحد محاسبه شد. با توجه به تراکم زهکشی هر یک از واحدها، وزن مناسب آن از جدول ۲ تعیین شد.

جدول ۱: محاسبه‌ی درجه‌ی فرسایش‌پذیری (Refahi, 2004)

سختی	جنس سنگ	مقاومت به فرسایش
۲-۰	سنگ‌های بازیگ	سنگ‌های خیلی سخت
۵-۰	سنگ‌های اسیدی	
۴-۲	سنگ‌های دگرگونی	
۵-۴	ماسه‌سنگ‌های سخت شده	
۴-۳	سنگ‌های آهکی خردشونده	سنگ‌های سخت تا سست
۵-۳	دولومیت‌ها	
۸-۷	شیل سنگ‌های بسیار سست	
۷-۶	سنگ‌های پلاستیکی	
۱۰-۸	مارن و رس‌ژپس	
۱۰-۹		
۸-۴	آبرفت قدیمی	سست
۹-۷	آبرفت جدید	

جدول ۲: محاسبه‌ی درجه فرسایش با توجه به تراکم زهکشی

(Fargas et al, 1997)

کلاس	شدت فرسایش	تراکم زهکشی km/km2	ارزش نسبی
۱	کم	کمتر از ۰/۱	۲
۲	متوسط	۰/۱ تا ۰/۵	۴
۳	زیاد	۰/۵ تا ۱	۶
۴	شدید	۱ تا ۲	۸
۵	بسیار شدید	بیش از ۲	۱۰

جدول ۳: پهنه‌بندی خطر فرسایش در هر واحد با روش فارگاس

(Fargas et al, 1997)

کلاس	میزان خطر	ارزش نسبی
۱	کم	بیش از ۱۰
۲	متوسط	۱۰-۲۰
۳	زیاد	۲۰-۳۰
۴	شدید	۳۰-۴۰
۵	بسیار شدید	>۴۰

روش Fournier: از اولین مدل‌های برآورد رسوب، مدل فورنیه است که تلاش زیادی برای تعمیم و بهبود نتایج آن صورت گرفت و در سال ۱۹۶۰ ارائه شد. Fournier در مدل خود از فاکتوری موسوم به شاخص بارش فصلی یا شاخص تمرکز فصلی باران - که همبستگی بسیار بالایی با بازده رسوب دارد - استفاده کرد. شاخص بارش فصلی عبارت است از نسبت مجذور بارش مرطوب‌ترین ماه سال (Pm) به میانگین بارش سالانه (Py) برحسب میلی‌متر؛ دبی سالانه رسوب را برحسب تن در کیلومتر مربع حساب کرد (Ahmadi, 2007). در نهایت، فورنیه با توجه به کیفیت ناهمواری‌ها و اقلیم به صورت کیفی و کمی و با احتساب همبستگی بالای رسوب با شاخص بارش، چهار معادله‌ی زیر را ارائه کرد که کاربرد فراگیری داشت (Zanganeh Asadi, 2010).

برای مناطق ناهموار و اقلیم نیمه خشک که $(200 < p_y < 600)$:

$$Q_s = 91.78 \left(\frac{(P_m)^2}{p_y} \right) - 737/62 \quad \text{رابطه‌ی ۶}$$

۴- یافته‌ها (نتایج)

همان طور که گفته شد، در روش سیکاسی و همکاران (۱۹۸۶) از مؤلفه‌های مورفومتری حوضه‌ی آبریز مانند مساحت، تراکم زهکشی و شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی استفاده می‌شد. در این تحقیق پس از استخراج شبکه زهکشی و رده‌بندی آبراهه‌ها با روش استراهلر، شاخص‌های مذکور محاسبه شد. برای محاسبه‌ی شاخص ناهنجاری سلسله

مراتبی طبق جدول ۴ بعد از محاسبه‌ی $(Ha\ i-j)$ ، تعداد آبراهه‌ها در هر اتصال $(Ns\ i-j)$ حاصل شد. سپس از مجموع حاصل ضرب $(Ha\ i-j)$ و $(Ns\ i-j)$ ، تعداد ناهنجاری سلسله مراتبی آبراهه برای کل حوضه (Hat) به دست آمد.

جدول ۴: تعداد اتصالات آبراهه‌ها و محاسبه‌ی شاخص ناهنجاری سلسله‌مراتبی

مسیر	i-j ha	ns	ns×ha i-j
۱→۲	۰	۳۸۰۴	۰
۱→۳	۱	۱۳۲۱	۱۳۲۱
۱→۴	۳	۹۶۶	۲۸۹۸
۱→۵	۷	۶۵۳	۴۵۷۱
۱→۶	۱۵	۱۲۷	۱۹۰۵
۱→۷	۳۱	۱۱۴	۳۵۳۴
۲→۳	۰	۷۸۸	۰
۲→۴	۲	۱۴۲	۲۸۴
۲→۵	۶	۱۷۶	۱۰۵۶
۲→۶	۱۴	۴۸	۶۷۲
۲→۷	۳۰	۴۵	۱۳۵۰
۲→۸	۶۲	۰	۰
۳→۴	۰	۱۶۸	۰
۳→۵	۴	۶۵	۲۶۰
۳→۶	۱۲	۲۰	۲۴۰
۳→۷	۲۸	۲۰	۵۶۰
۴→۵	۰	۵۷	۰
۴→۶	۸	۶	۴۸
۴→۷	۲۴	۵	۱۲۰
۴→۸	۵۶	۰	۰
۵→۶	۰	۱۱	۰
۵→۷	۱۶	۳	۴۸
۵→۸	۴۸	۰	۰
۶→۷	۰	۲	۰
	ha		۱۸۸۶۷
	Hat		۶۹۶۸
	Δa		۲,۷۰۷۶۶۳۶۰۵
	Dd		۳,۷۱
	A		۸۲۰/۳۶

با توجه به اینکه تراکم زهکشی در حوضه‌ی آبریز کرج کمتر از ۶ است، از فرمول دوم ارائه شده توسط سیکاسی و همکاران (۱۹۸۷) استفاده می‌شود.

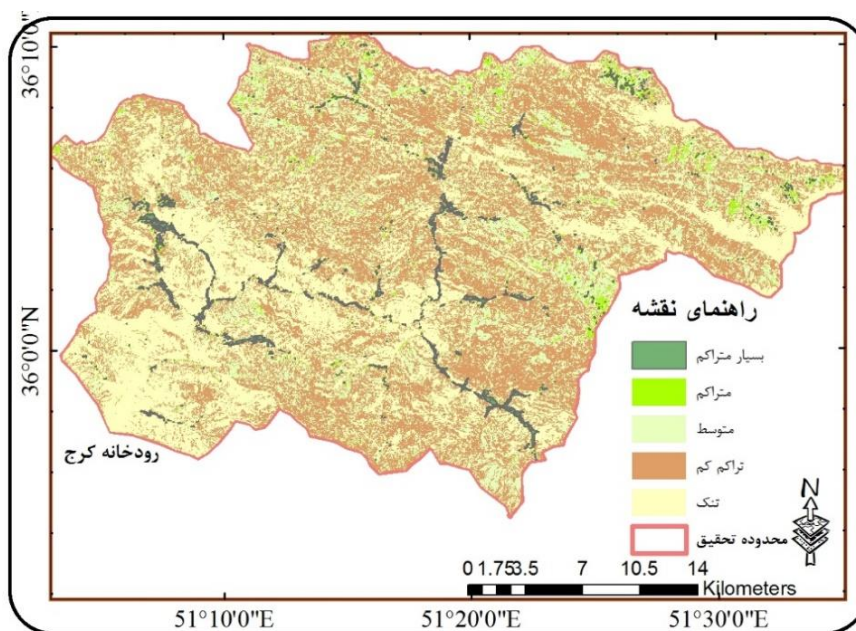
رابطه‌ی ۷

$$1.44780 + 0.32619 \times (3.71)D + 0.10247 \times (2.703) = 10 (2.93) = 737231.6 \text{ ton/km}^2 \text{ in year}$$

طبق محاسبات انجام شده در روش سیکاسی و همکاران (۱۹۸۷) - که اصولاً بر اساس مورفومتری حوضه‌ی آبریز است - نرخ رسوب سالانه برابر با $706241/2$ تن در سال است؛ به عبارتی دیگر، نرخ رسوب سالانه‌ی حوضه‌ی آبریز کرج $8/6$ تن در هر هکتار می‌باشد. مهم‌ترین مؤلفه‌های تأثیرگذار در این روش، تراکم زهکشی، وسعت حوضه و نرخ شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی حوضه‌ی آبریز است.

برآورد پتانسیل رسوب‌دهی حوضه با روش هیدروفیزیکی

به منظور برآورد رسوب با روش هیدروفیزیکی، تک‌تک شاخص‌های مورد نیاز محاسبه شد. با استفاده از نقشه‌ی طبقات ارتفاعی، مقادیر (R) محاسبه شد که در حوضه‌ی کرج به میزان $5/71$ بود. با استفاده از آمار بارش سالانه‌ی ایستگاه‌های مذکور، نرخ بارش سالانه (P) در حوضه‌ی کرج $539/98$ و عامل مساحت حوضه (A)، $820/36$ کیلومتر مربع است. برای محاسبه‌ی شاخص پوشش گیاهی نیز از تصاویر ماهواره‌ای منطقه استفاده و درصد اشغال هر طبقه پوشش گیاهی نسبت به کل منطقه، مطابق با فرمول مذکور محاسبه شد.



شکل ۴: نقشه‌ی تراکم پوشش گیاهی حوضه‌ی کرج

نتایج حاصل شده نشان می‌دهد که در هر زیر حوضه، چندین واحدکاری با تراکم پوشش گیاهی متفاوت وجود دارد. برای به دست آوردن نزدیک‌ترین میانگین تراکم پوشش گیاهی به واقعیت موجود، سعی شده در تفکیک قطعات با تراکم‌های مختلف دقت کافی صورت گیرد و از ارزیابی اجمالی این تراکم پرهیز شود. تراکم 50 و 83 درصد به اراضی زراعی و باغی بازمی‌گردد و کمتر از 50 درصد نیز به اراضی مرتعی اختصاص دارد. حاصل این ارزیابی برای زیر حوضه‌های کارده در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول ۵: محاسبه‌ی شاخص تراکم پوشش گیاهی (V) در حوضه‌ی آبریز کرج

شماره	طبقه	an: وسعت پوشش گیاهی با درصد Vn	Vn درصد پوشش گیاهی	$V = \frac{A}{\sum V_n an}$	A= مساحت حوضه Km2	$S_1^n Vn an$
۱	تنک	۲۹۸,۴۹	۳۶,۳۹	۱۰۸۶۱,۴۴	۸۲۰,۲	۰,۰۲۹۶۵
۲	تراکم	۳۳۹,۰۰	۴۱,۳۳	۱۴۰۰۹,۵۹		
۳	متوسط	۱۴۹,۱۵	۱۸,۱۸	۲۷۱۱,۸۸		
۴	متراکم	۲۳,۹۲	۲,۹۲	۶۹,۷۵		
۵	بسیار	۹,۷۳	۱,۱۹	۱۱,۵۴		
مجموع		۸۲۰,۲۸۲۸		۲۷۶۶۴,۲۱		

محاسبه‌ی کمیت قابلیت فرسایش (حساسیت خاک به فرسایش E): قابلیت فرسایش از رابطه‌ی $E = \frac{\sum enan}{A}$. به دست می‌آید که در آن en = کمیت قابلیت فرسایش است که بر حسب مقاومت سنگ مشخص می‌شود. an مساحت اشغال شده توسط en به کیلومتر مربع و A = مساحت زیر حوضه یا حوضه به کیلومتر مربع است.

قابلیت فرسایش در این منطقه با سنگ‌شناسی و واحدهای سنگی و مقاومت آنها رابطه‌ی مستقیمی دارد؛ بنابراین شناخت و مطالعه‌ی این واحدها و قابلیت فرسایش آنها از اهمیت خاصی برخوردار است. در روش هیدروفیزیکی، درجه‌ی حساسیت به فرسایش سنگ‌ها قابل توجه است و در فرمول قرار داده می‌شود (Ahmadi, 2006). سنگ‌های موجود با توجه به درجه مقاومت آنها، از زیاد به کم مرتب شدند. درجه مقاومت سنگ‌های منطقه، از ۹ برای آبرفت عهد حاضر و رسوبات کواترنری تا ۱/۵ برای مزدوران متغیر می‌باشد؛ بدین ترتیب، سنگ‌ها از نظر درجه حساسیت فرسایش به ۱۵ رده تقسیم شد که نتایج آن در جدول ۱ نشان داده شده‌است. با توجه به ضرایب حساسیت خاک به فرسایش و سطح اشغال شده‌ی هر نوع سنگ در زیر حوضه‌ها، میانگین وزنی کمیت e برای هر زیر حوضه محاسبه شد. نتایج این محاسبات برای حوضه‌ی کرج در جدول (۶) نشان داده شده‌است.

جدول ۶: نوع سنگ، مساحت و کمیت قابلیت فرسایش واحدهای سنگی حوضه

شماره	اختصار	واحدهای لیتولوژیک	مساحت در حوضه	درصد هر سازند	درجه فرسایش پذیری	en an	$E = \frac{s_1^n en an}{A}$
۱	TRjs	سازند شمشک ماسه سنگ و سیلتستون و گل سنگ	۷۸,۶۰	۹,۵۸	۶	۴۷۱,۶۲۱۸	۴,۲۳۲۱۶۵
۲	Ekgy	ژپیش	۵۴,۸۸	۶,۶۹	۹	۴۹۳,۹۵۵۸	
۳	Ek	سازند کرج توف و شیل توف شده	۳۸۴,۴۴	۴۶,۸۶	۳	۱۱۵۳,۳۱۶	
۴	Mm,s,l	کواترنری مارن و ماسه سنگ و کنگلومرا	۷,۵۴	۰,۹۲	۷,۵	۵۶,۵۱۶۶۲	
۵	Pr	سازند روته آهک ضخیم	۲۹,۰۲	۳,۵۴	۲	۵۸,۰۳۵۷۹	
۶	Jl	سازند لار آهک ضخیم خاکستری	۲۲,۱۶	۲,۷۰	۲,۵	۵۵,۴۱۱۹۷	
۷	pC-Cs	سازند سلطانیه دولومیت و آهک و میان لایه شیل	۱۱,۵۸	۱,۴۱	۴	۴۶,۳۰۰۵۲	
۸	pCk	سازند کهارشیل و ماسه سنگ و کواتر خاکستری	۳۴,۲۶	۴,۱۸	۸,۵	۲۹۱,۲۰۱۷	
۹	Pd	سازند کنگلومرایی فجن آتشفشانی مارن	۱,۵۷	۰,۱۹	۳	۴,۷۰۹۸۵	
۱۰	Eksh	سازند شیل تحتانی، شیل آهکی و کدازه داسیتی	۸۵,۰۰	۱۰,۳۶	۴	۳۴۰,۰۱۴۸	
۱۱	P	صخره‌های متصل پرمین	۹,۴۷	۱,۱۵	۲	۱۸,۹۴۴۲۷	
۱۲	Ed.at	سازند کرج ۲ روانه‌های آندیزیتی و بازالتی	۲۸,۹۱	۳,۵۲	۱	۲۸,۹۰۸۰۶	
۱۳	Qs,d	نهشته‌های بادی کواترنر	۵,۵۲	۰,۶۷	۹	۴۹,۶۸۶۶۴	
۱۴	Ek.a	سازند شیل آسارا شیل و توف	۲۶,۷۴	۳,۲۶	۷	۱۸۷,۱۶۹۳	
۱۵	PeEz	سازند زیارت آهک‌های مارن و ژپیس دار	۰,۳۴	۰,۰۴	۸	۲,۷۳۵۳۶۴	
۱۶	Ktzi	سازند تیزکوه سنگ آهک ضخیم سفید صورتی	۱,۰۹	۰,۱۳	۳,۵	۳,۸۳۱۰۳۹	
۱۷	COm	سازند میلا دولومیت صفحه‌ای با شیل	۲۳,۰۱	۲,۸۰	۵	۱۱۵,۰۴۶	
۱۸	Qft2	تراس‌های آبرفتی کواترنری	۸,۳۳	۱,۰۲	۸,۵	۷۰,۸۲۴۷۸	
۱۹	TRe	سازند الیکا سنگ آهک ضخیم زرد و کرم	۷,۸۹	۰,۹۶	۳	۲۳,۶۷۴۱۴	
		مجموع	۸۲۰,۳۶۰۸	۱۰۰,۰۰	۹۶,۵	۳۴۷۱,۹۰۲	

با تکمیل محاسبات مربوط به عوامل مؤثر در روش هیدروفیزیکی شامل عامل مساحت (A)، توپوگرافی (R^2)، هیدرولوژی (P)، پوشش گیاهی (V) و کمیت قابل فرسایش (E) از رابطه‌ی زیر، نرخ رسوب سالانه‌ی حوضه‌ی آبریز کرج محاسبه شد (جدول ۷).

$$CSY = A^s \cdot R \cdot V \cdot E \cdot P$$

رابطه‌ی ۷

جدول ۷: برآورد رسوب سالانه حوضه آبریز کارده با روش هیدروفیزیکی

حوضه	عوامل هیدروفیزیکی					پتانسیل رسوبدهی (CSY)X تن در سال
	AS	R	E	V	P	
واحد	Km2	%	-	-	mm	
آبریز کرج	۸۲۰/۳۶	۵/۷۱	۴/۲۳	۰/۰۲۹۶۵	۵۴۰	۳۱۷۴۶۸/۲

در روش هیدروفیزیکی علاوه بر مؤلفه‌های ذکر شده، عوامل مؤثر دیگری نیز وجود دارد که می‌تواند در نرخ رسوب سالانه عوامل تعیین‌کننده‌ای باشد؛ مؤلفه‌هایی مانند وضعیت توپوگرافی، پوشش گیاهی، هیدرولوژی و درصد سازندهای فرسایش‌پذیر حوضه آبریز که در این روش بررسی شد و طبق محاسبات (جدول ۷)، نرخ رسوب سالانه حوضه آبریز کرج بر اساس روش CSY، ۳۱۷۴۶۸/۲ تن است. همچنین نرخ رسوب سالانه در هر کیلومتر مربع از حوضه، ۳۸۷/۲ تن است.

برآورد میزان فرسایش رسوب براساس معادله فورنیه

انتقال داده‌های بارش به معادله Fournier، میزان متوسط فرسایش رسوب را در حوضه مورد مطالعه نشان می‌دهد. میانگین بارش سالانه حوضه کرج، ۵۳۷/۷ میلیمتر و میانگین بارش مرطوب‌ترین ماه سال برابر با ۸۴/۲ میلیمتر است. بنابراین، برای حوضه کرج از رابطه شماره ۸ استفاده می‌شود:

$$Qs = 91.78 \left(\frac{(84.2)^2}{537.7} \right) - 737/62 = 472.513 \quad \text{رابطه ۸}$$

بر اساس محاسبات انجام شده، میزان دبی رسوب در حوضه کرج براساس معادله فورنیه برابر با ۴۷۲/۵۱۳ تن در یک کیلومتر مربع است که چنانچه این میزان به کل حوضه مورد مطالعه تعمیم داده شود، میزان متوسط فرسایش رسوب در حوضه ۳۸۷۶۳۰/۸ تن در سال می‌باشد.

در ادامه‌ی تحقیق به پهنه‌بندی خطر فرسایش در حوضه آبریز کرج پرداخته شد. همان گونه که ذکر شد، در روش فارگاس دو عامل زمین‌شناسی و تراکم آبراهه در واحد زمین‌شناسی بسیار اهمیت دارد. این دو عامل مطابق جدول ۸ محاسبه می‌شود.

جدول ۸: تعیین درصد هر یک از واحدهای سنگ شناسی و شبکه زهکشی آن

واحد	علامت	شرح سازند	مساحت	درصد	طول	تراکم
N	-	-	Km2	%	Km	Km/km2
۱	TRjs	سازند شمشک ماسه سنگ و سیلتستون و گل سنگ با فسیل	۷۸,۶	۹,۵۸	۳۰۵,۱۸	۳,۸۸۲
۲	Ekgy	ژپیش	۵۴,۸۸	۶,۶۹	۱۷۴,۱۴	۳,۱۷۳
۳	Ek	سازند کرج توف و شیل توف شده	۳۸۴,۴۴	۴۶,۸۶	۱۲۹۱,۳۴	۳,۳۵۹
۴	Mm,s,l	کواترنری مارن و ماسه سنگ و کنگلومرا	۷,۵۴	۰,۹۲	۲۱,۸	۲,۸۹۳
۵	Pr	سازند روته آهک ضخیم	۲۹,۰۲	۳,۵۴	۱۰۸,۰۳	۳,۷۲۳
۶	JI	سازند لار آهک ضخیم خاکستری	۲۲,۱۶	۲,۷	۶۹,۶۲	۳,۱۴۱
۷	pC-Cs	سازند سلطانیه دولومیت و آهک و میان لایه شیل	۱۱,۵۸	۱,۴۱	۴۱,۳۲	۳,۵۷
۸	pCk	سازند کهار: شیل و ماسه سنگ و کواتز خاکستری	۳۴,۲۶	۴,۱۸	۱۲۶,۹۹	۳,۷۰۷
۹	Pd	سازند کنگلومرای فجن سنگ های آتشفشانی مارن و	۱,۵۷	۰,۱۹	۳,۸۱	۲,۴۲۸
۱۰	Eksh	سازند شیل تحتانی شیل آهکی و کدازه داسیتی	۸۵	۱۰,۳۶	۲۶۶,۸۸	۳,۱۴
۱۱	P	صخره های متصل پرمین	۹,۴۷	۱,۱۵	۲۹,۹۵	۳,۱۶۲
۱۲	Ed.at	سازند کرج ۲ روانه های آندیزیتی و بازالتی	۲۸,۹۱	۳,۵۲	۹۲,۹۴	۳,۲۱۵
۱۳	Qs,d	نهشته های بادی کواترنر	۵,۵۲	۰,۶۷	۲۲,۲۲	۴,۰۲۵
۱۴	Ek.a	سازند شیل آسارا شیل و توف	۲۶,۷۴	۳,۲۶	۸۹,۶۳	۳,۳۵۲
۱۵	PeEz	سازند زیارت آهک های مارن و ژپیس دار	۰,۳۴	۰,۰۴	۰,۶۶	۱,۹۳۲
۱۶	Ktzl	سازند تیزکوه سنگ آهک ضخیم سفید صورتی	۱,۰۹	۰,۱۳	۴	۳,۶۵۴
۱۷	COm	سازند میلا دولومیت صفحه ای با شیل و ماسه سسنگ	۲۳,۰۱	۲,۸	۷۵,۱۷	۳,۲۶۷
۱۸	Qft2	تراس های آبرفتی کواترنری	۸,۳۳	۱,۰۲	۲۷,۳۳	۳,۲۸
۱۹	TRe	سازند الیکا سنگ آهک ضخیم زرد و کرم	۷,۸۹	۰,۹۶	۲۵,۹۵	۳,۲۸۹

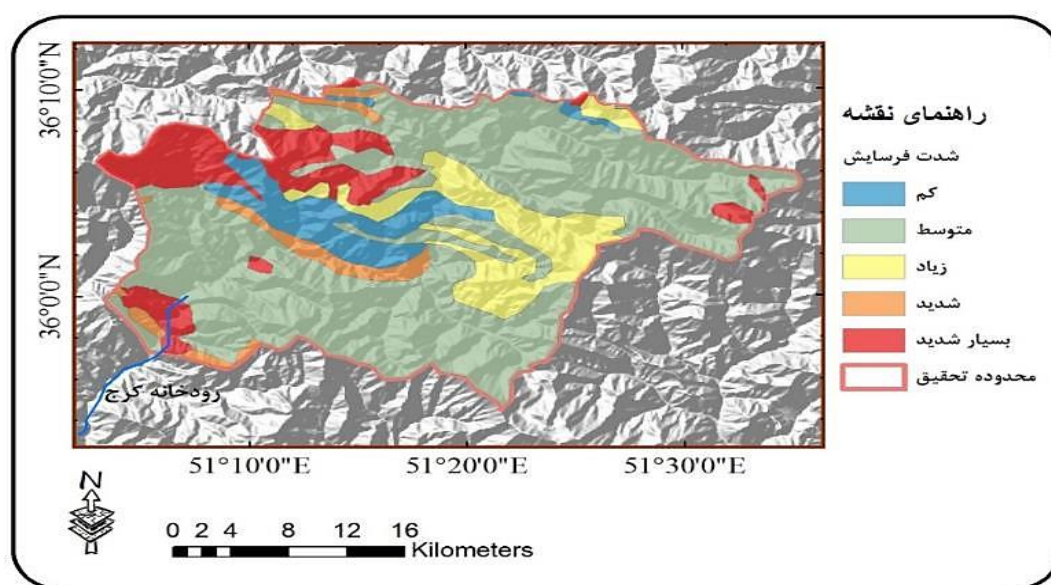
شرح سازندهای زمین شناسی منطقه، از نقشه‌ی زمین شناسی استخراج شد. برای شبکه زهکشی حوضه‌ی آبریز کرج نیز از آبراهه‌های رده‌بندی شده در روش سیکاسی و همکاران (۱۹۸۷) استفاده و نرخ تراکم زهکشی در هر سازند محاسبه شد.

وضعیت فرسایش پذیری هر یک از سازندها با توجه به فاکتور زمین شناسی سطحی در روش ام‌پسیاک، در بازه‌ی ۱-۹ تعیین شد و با توجه به نوع سنگ شناسی هر یک از پهنه‌ها، اوزان شایسته به هر واحد اعطا گردید. فرسایندهای تراکم زهکشی نیز بر اساس جدول (۹) تعیین شد. تمامی واحدهای زمین شناسی منطقه و تراکم شبکه زهکشی متناظر آنها در کلاس ۱۰ قرار دارد؛ به جز واحد سازند زیارت که با ترکم زهکشی پایین تر نسبت به سایر کلاس‌ها به آن وزن ۸ اختصاص داده شده‌است.

جدول ۹: کلاس فرسایشی تراکم زهکشی در هر واحد زمین‌شناسی و شدت فرسایش در هر کلاس سنگ‌شناسی

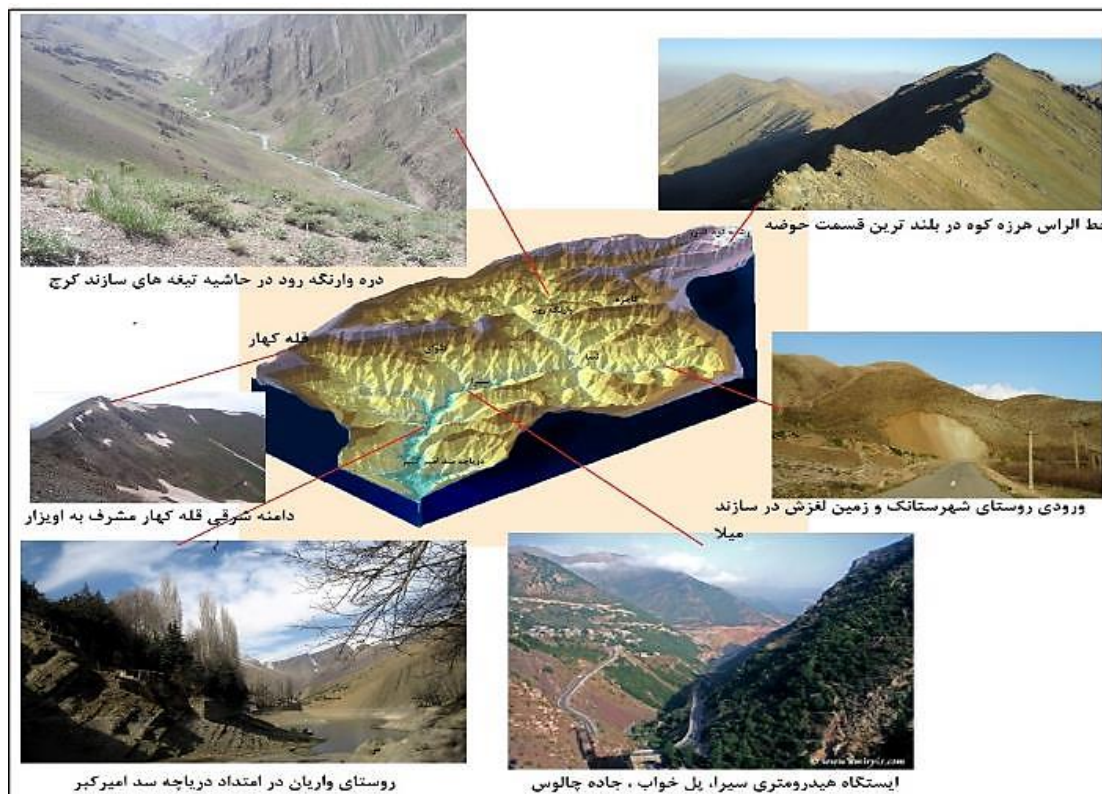
واحد	علامت	شرح سازند	فرسایش	فرسایش‌دگی	حساسیت	شدت
			پذیری	تراکم	بسه	فرسایش
			سنگ	زهکشی	فرسایش	
۱	TRjs	سازند شمشک ماسه‌سنگ و سیلتستون و گال سنگ با فسیل	۶	۱۰	۶۰	بسیار
۲	Ekgy	ژئپیش	۹	۱۰	۹۰	بسیار
۳	Ek	سازند کرج توف و شیل توف شده	۳	۱۰	۳۰	زیاد
۴	Mm,s,l	کواترنری مارن و ماسه‌سنگ و کنگلومرا	۷/۵	۱۰	۷۵	بسیار
۵	Pr	سازند روته آهک ضخیم	۲	۱۰	۲۰	متوسط
۶	Jl	سازند لار آهک ضخیم خاکستری	۲/۵	۱۰	۲۵	زیاد
۷	pC-Cs	سازند سلطانیه دولومیت و آهک و میان لایه شیل	۴	۱۰	۴۰	شدید
۸	pCk	سازند کهار شیل و ماسه‌سنگ و کواتر خاکستری	۸/۵	۱۰	۸۵	بسیار
۹	Pd	سازند فجن سنگ‌های آتشفشانی مارن و کنگلومرا	۳	۱۰	۳۰	زیاد
۱۰	Eksh	سازند شیل تحتانی، شیل آهکی و کدازه داسیتی	۴	۱۰	۴۰	شدید
۱۱	P	صخره‌های متصل پرمین	۲	۱۰	۲۰	متوسط
۱۲	Ed.at	سازند کرج ۲ روانه‌های آندزیتی و بازالتی	۱	۱۰	۱۰	کم
۱۳	Qs,d	نهشته‌های بادی کواترنر	۹/۵	۱۰	۹۵	بسیار
۱۴	Ek.a	سازند آسارا شیل و توف	۷	۱۰	۷۰	بسیار
۱۵	PeEz	سازند زیارت آهک‌های مارن و ژئپس دار	۸	۸	۶۴	بسیار
۱۶	Ktzl	سازند تیزکوه سنگ آهک ضخیم سفید صورتی	۳/۵	۱۰	۳۵	شدید
۱۷	COm	سازند میلا دولومیت صفحه‌ای با شیل و ماسه‌سنگ	۵	۱۰	۵۰	بسیار
۱۸	Qft2	تراس‌های آبرفتی کواترنری	۸/۵	۱۰	۸۵	بسیار
۱۹	TRe	سازند الیکا سنگ آهک ضخیم زرد و کرم	۳	۱۰	۳۰	زیاد

زمین‌شناسی و ساختارهای زمین‌شناسی موجود در منطقه با وجود فرسایش‌پذیر بودن واحدهای سنگی، تولید رسوبات را بیشتر در مناطق خردشده و گسلی انجام می‌دهند. مناطق خردشده و گسلی، محل عبور آبراهه‌های فرعی یا سرشاخه‌های ورودی به رودخانه‌ی کرج است. در مجموع، فرسایش‌پذیر بودن و تراکم بالای شکستگی عامل اصلی حمل رسوبات فراوان به منطقه است.



شکل ۵: نقشه‌ی پهنه‌بندی شدت فرسایش با روش فارگاس

مطابق با روش فارگاس طبق محاسبات انجام شده، ۱۰۲/۹۷ کیلومترمربع از مساحت حوضه‌ی آبریز کرج در معرض فرسایش بسیار شدید قرار دارد که این نواحی منطبق بر سازندهای کهار و لار و نهشته‌های قدیمی کواترنر است. ۳۴/۶۳ کیلومترمربع از این حوضه نیز در معرض فرسایش شدید و ۱۰۱/۷ کیلومترمربع در محدوده‌ی با فرسایش زیاد قرار دارد. همان گونه که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود، بخش وسیعی از منطقه تحت تأثیر فرآیندهای جریانی و یخچالی قرار دارد و فرسایش به شکل هوازدهی و زمین لغزش در سازندهای کهار و لار، از مهم‌ترین فرایندهای شکل‌زای منطقه است.



شکل ۶: نمای سه بعدی از حوضه‌ی کرج و بخش‌های مختلف آن

۵- بحث و نتیجه‌گیری

رودخانه‌ی کرج با طول حدود ۸۰ کیلومتر از آغاز تا پایان مسیر خود، مناطق زمین‌شناسی و اقلیمی کاملاً متنوعی را پشت سر می‌گذارد. این شرایط در تراکم زهکشی و آنومالی شبکه زهکشی تأثیر می‌گذارد و در نتیجه، مقدار و نوع رسوبات حمل شده و ترسیمی این رودخانه از ابتدا تا پایان مسیر بسیار متفاوت است. طبق محاسبات انجام شده در روش سیکاسی و همکاران (۱۹۸۶) که اصولاً بر اساس مورفومتری حوضه‌ی آبریز است، نرخ رسوب سالانه برابر با ۷۰۶۲۴۱/۲ تن در سال از کل حوضه است. نرخ رسوب در واحد سطح در حوضه، ۸/۶۱ تن در هر هکتار محاسبه شده است. مهم‌ترین مؤلفه‌های تأثیرگذار در این روش تراکم زهکشی، وسعت حوضه و نرخ شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی حوضه آبریز است. این مقدار نرخ رسوب بسیار بالاتر از میانگین داده‌های سازمان آب منطقه‌ای است، ولی با در نظر گرفتن مساحت و متوسط بارش سالیانه زیاد حوضه و تأثیر آن در شبکه زهکشی، برآورد رسوب مناسبی از سطح حوضه کرج صورت گرفته است.

در روش هیدروفیزیکی علاوه بر مؤلفه‌های ذکر شده، عوامل مؤثر دیگری نیز وجود دارد که می‌تواند عامل تعیین‌کننده‌ای در نرخ رسوب سالانه باشد. مؤلفه‌هایی مانند وضعیت توپوگرافی، پوشش گیاهی، هیدرولوژی و درصد سازندهای فرسایش‌پذیر حوضه آبریز در این روش بررسی شد و طبق محاسبات، نرخ رسوب سالانه‌ی حوضه آبریز کرج بر اساس روش CSY، $317648/2$ تن می‌باشد که این میزان در واحد سطح $3/87$ تن در هر هکتار است و با توجه به داده‌های سازمان آب منطقه‌ای، برآورد بسیار کمی از نرخ رسوب سالیانه محسوب می‌شود. طبق داده‌های متناظر دبی-رسوب ایستگاه هیدرومتری سیرا تحت مدیریت سازمان آب منطقه‌ای و با استفاده از میانگین حد وسط دسته‌ها، منحنی سنجه دبی-رسوب برای داده‌های ۳۰ سال آبی حوضه‌ی کرج ترسیم شد که از این مقدار، ۲۰٪ آن - که جزء بار بستر بود - حذف شد. طبق محاسبات، نرخ رسوب سالانه در هر کیلومترمربع از حوضه $689/46$ تن در سال و نرخ رسوب سالانه $565605/4$ تن محاسبه شد.

نرخ بارش سالانه در میزان بار رسوب معلق رودخانه‌ها از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر نرخ فرسایش در سطح حوضه می‌باشد که در روش‌های یاد شده یا اصلاً لحاظ نشده یا کمتر دخیل بوده‌است. در مدل فورنیه - که از رایج‌ترین مدل‌های برآورد نرخ فرسایش رسوب حوضه است - این عامل بیشتر لحاظ شده‌است. طبق محاسبات انجام شده بر مؤلفه‌هایی چون میانگین نرخ بارش در پر باران‌ترین ماه هر سال، میانگین بارش سالیانه و سایر خصوصیات توپوگرافی چون شیب و ارتفاع در مدل فورنیه، نرخ رسوب سالانه در هر هکتار $4/72$ تن محاسبه شده‌است. طبق محاسبات انجام شده با روش فارگاس، $102/97$ کیلومترمربع از مساحت حوضه‌ی آبریز کرج در معرض فرسایش بسیار شدید قرار دارد که این نواحی منطبق بر سازندهای کهار و لار و نهشته‌های قدیمی کواترنر است. $34/63$ کیلومترمربع از این حوضه نیز در معرض فرسایش شدید و $101/7$ کیلومترمربع در محدوده‌ی با فرسایش زیاد قرار دارد. همچنین محدوده‌ی وسیعی از منطقه، از سازند کرج تشکیل شده که جنس آن از شیل و توف است. این سازند که ۶۱ درصد حوضه را در بر گرفته است، چشم‌انداز و توپوگرافی خشن و مضرس دارد که حساسیت آن به فرسایش بسیار کم می‌باشد.

طبق نتایج تحقیق، نرخ رسوب سالانه حوضه‌ی کرج بر اساس روش مورفومتری سیکاسی و همکاران، $8/61$ تن در هر هکتار است. نرخ رسوب سالانه بر اساس دو روش تجربی فورنیه و هیدروفیزیکی، به ترتیب $4/72$ و $3/87$ تن در هر هکتار محاسبه شده‌است؛ این در حالی است که بر اساس داده‌های سازمان آب منطقه‌ای و منحنی سنجه رسوب، نرخ رسوب $6/89$ تن در هر هکتار در سال می‌باشد. نتایج تحقیق Mirzaei و همکاران (۲۰۰۹) در حوضه‌ی کرج نشان می‌دهد که نرخ رسوب این حوضه $6/51$ تن در سال است. در نتیجه روش سیکاسی و همکاران نتایج نزدیک‌تری با نرخ رسوب واقعی حوضه آبریز کرج دارد. با توجه به استراتژیک بودن حوضه‌ی آبریز کرج و تأمین آب شرب کلانشهر تهران، مطالعه و ارزیابی پیوسته‌ی نرخ فرسایش و رسوب در دوره‌ها و فصول مختلف امری مهم و الزامی است. طبق برآورد خطر فرسایش با روش فارگاس، $29/16$ ٪ از وسعت حوضه‌ی کرج در محدوده‌ی فرسایش شدید قرار دارد.

گسترش سازند کهار، زیارت، آسرا و سازندهای کواترنری و فعالیت شدید گسل‌های مشا و کرج به شدت فرسایش در حوضه‌ی آبخیز کرج منجر شده‌است که حاصل آن، افزایش بارمعلق است. از سوی دیگر، این فرآیند در طی سالیان متمادی به کاهش ظرفیت سد مخزنی و حیاتی کرج منجر شده‌است. رژیم رطوبتی و یخچالی حوضه‌ی آبریز کرج نیز همواره به فعالیت فرآیندهای فرسایشی چون یخ شکافتگی، سنگ‌شکافتگی و حرکات توده‌ای به شکل‌های مختلف

منجر شده و نرخ فرسایش رسوب را فوق‌العاده بالا برده‌است. سد امیرکبیر که از سال ۱۳۴۸ بر رودخانه‌ی کرج احداث شده، تاکنون نقش قابل توجهی در کنترل آب و در نتیجه کنترل فرسایش رودخانه در طول رودخانه‌ی کرج داشته است. این گونه تحقیقات با ارائه‌ی روش‌های نوین و علمی در برآورد رسوب و فرسایش در سطح حوضه می‌تواند در مدیریت و کنترل رسوب ورودی به سدهای مهم و حیاتی کشور نقش بسزایی داشته باشد.

منابع

1. Abedian, S.; Salman Mahiny, A.; & H. Karbakhsh Ravori, 2017. Estimating of erosion and sediment yield of Gorganrud basin using erosin potential method, *Natural Environment Change*, 3(1), 19-32.
2. Abedini, M., & S. Tulabi., (2017). Modeling of Soil Erosion and Sediment Production with Three Models of WEPP, EPM and Fournier in GIS Case Study: Sulachai Watershed-Ardabil. *geographical reaserches*. 32 (2), 93-105 (In Persian).
3. Ahmadi, H., 2006. Application Geomorphology, University of Tehran Press, Iran, 688 pp (In Persian).
4. Ahmadi, H., & A. Mohammadi., (2009). Identification of Erosion Severity Area with Study of Fargas Model (Case Study: Sangab Drainage Basin- Iran). *territory*, 6(22), 1-9. (In Persian).
5. Alexakis, D. D.; Hadjimitsis, D. G.; & A. Agapiou, 2013. Integrated use of remote sensing, GIS and precipitation data for the assessment of soil erosion rate in the catchment area of "Yialias" in Cyprus, *Atmospheric Research*, 131, 108-124.
6. AliMohamadi, A.; Iildermi, A.; & M. Mirsanjari, 2018. Estimation of erosion and sediment production using GIS and EPM model (Case study area: Ghomrood-Aligudarz Basin), 12(42), 1-10 (In Persian).
7. Alizadeh, A., 2008. Principles of Applied Hydrology, Edition. Imam Reza UniversityPress 480 pp (In Persian).
8. Ansari Lari, A., & M. Ansari., 2017. Evaluation of soil erosion risk and sedimentation potential by using EPM model in Gabric basin- SE Hormozgan- Iran. *journals of management sestem*. 6(11), 1-14 (In Persian).
9. Avena, G. C.; Giuliano, G.; & E. Lupia Palmieri, 1967. Sulla valutazione quantitativa della gerarchizzazione ed evoluzione dei reticoli fl uviali, *Bollettino della Societa Geologica Italiana*, 86, 81-796.
10. Azami Rad, M., 2007. Investigation of Sediment Potential Using Hydrophysical Method (Kardeh Dam Basin, Mashhad), Fourth National Conference on Watershed Management and Engineering, Iran. , Faculty of Natural Resources, University of Tehran. Karaj (In Persian).
11. Berberian, M., 1979. Discussion of the paper AA Nowroozi, 1976 Seismotectonic provinces of Iran", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 69(1), 293-297.
12. Behzadfar, M.; Hasanzadeh, H.; & H. Saberi, 2009. Estimation of Rainfall Erosion Using Forney Method 5th National Conference on Watershed Management Sciences and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (In Persian).
13. Bijker, E. W., 1967, some considerations about scales for coastal models with movable bed, Doctoral dissertation, TU Delft, Delft University of Technology.
14. Ciccacci, S.; Fredi, P.; Palmieri, E. L.; & F. Pugliese, 1986. Indirect evalution of erosion entity in drainage basins through geomorphic, climatic and hydrological parameters, *International geomorphology conference. Manchester*, 30, 233-248.
15. Darvish, 2014. Blows the erosion crisis in Iran, *Sina Science and Culture Publishing House*, 7, 1-9 (In Persian).
16. 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(1-2), 95-125.

17. Demirci, A., & Karaburun, A., (2012). Estimation of soil erosion using RUSLE in a GIS framework: a case study in the Buyukcekmece Lake watershed, northwest Turkey, *Environmental Earth Sciences*, 66 (3), 903-913.
18. Fargas, D.; Martinez, J. A.; & R. M. Poch, 1997. Identification of Critical Sediment Source Area At Regional Level, *Journal of Physics & Chemistry of the earth*, 22, 3 - 4.
19. Fournier, F., 1960. Climate and erosion. University of Paris.
20. Fournier, F., 1956. The effect of climatic factors on soil erosion estimates of solids transported in suspension in runoff, *Association Hydrologic Int*, 38.
21. Gholipouri, S.; Ghazanfari, P.; Almasian, M.; & N. Jalali, 2013. Qualitative and Quantitative Ways of Erosion and Sediment Assessment Using MPSIAC and EPM Models in Vardeh Drainage Basin(North of Karaj), *Journal of Geoscience*, 22(88), 145-154. doi: 10.22071/gsj.2013.53688 (In Persian).
22. Gonzalez, V. S.; Bierman, P. R.; Nichols, K. K.; & D. H. Rood, 2016. Long-term erosion rates of Panamanian drainage basins determined using in situ ¹⁰Be, *Geomorphology*, 275, 1-15.
23. Guarnieri, P., & Pirrotta, C., (2008). The response of drainage basins to the late Quaternary tectonics in the Sicilian side of the Messina Strait (NE Sicily). *Geomorphology*. 95(3-4), 260-273.
24. Haseli M., & H. Jalalian., (2015). Soil Erosion Risk Assessment and Zoning in the Aleshtar. *Catchment Spatial Analysis Of Risks Journal*. 1 (4), 91-104. (In Persian).
25. kavian, A., & A. Safari., (2013). Determining the Model for Estimating Sediment Using Statistical Methods of Case Study; Babolrood Basin. *Journal of Applied Geosciences Research*. 13(30), 111-130 (In Persian).
26. Kosravi, Kh.; Safari, A.; Habib Nejad, M.; & N. Mahmoodi, 2012. Evaluation of soil erosion and sediment yield estimation various empirical model by observation values (Case study: Babolroud watershed, Mazandaran Provienc), *E.E.R*. 1 (4), 32-52.
27. Mirzaei, A.; Shoaee, Z.; Jalali, N.; & A. Eslami, 2009. Evaluation of sediment yield in Karaj basin by Hydro-physical model, *Watershed Engineering and Management*, 1(1), 53-60 (In Persian).
28. Morgan, RPD., 1989. Soil erosion and conservation. Translation by Amin Alizadeh, Third Edition. Press Astan Quds Razavi (In Persian).
29. Ownegh, M., & Nohtani, M., (2004). Relationship Between Geomorphologic Units And Erosion And Sediment Yield In Kashidar Watershed, Gorganrod. *Journal of Science, Agriculture and Natural Resources*. 11(1), 157-170 (In Persian).
30. Pimentel, D.; Harvey, C.; Resosudarmo, P.; Sinclair, K.; Kurz, D.; McNair, M.; ... & R. Blair, 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits, *Science*, 267(5201), 1117-1123.
31. Refahi, H., 2004. Water erosion and conservation. University of Tehran Press, Iran, 568 pp (In Persian).
32. Strahler, A. N., 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography, *Geological Society of America Bulletin*, 63(11), 1117-1142.
33. Shojaei, S.; Noura, M.; & S. Habibi-mood, 2019. Estimation of sedimentation and erosion using MPSIAC, FSM and direct measurement methods in Gabric watershed, *South-eastern of Iran. E.E.R*, 8(4), 82-100 (In Persian).
34. Thomas, MB., & GV. Voinovich., (1955). Landslide in Ohio, The division of geological survey geofacts series. Ohio. United states.
35. Van Rijn, LC., 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua publications. Amsterdam...
36. Watanabe, A., 1993. Total rate and distribution of longshore sand transport, *journal of Coastal Engineering*, 45, 2528-2541.
37. Zanganeh Asadi, M. A., & A. Karimi Dost., 2010. Quantitative Erosion Estimation Models. Hakim Sabzevari University Press. Sabzevar, Iran, 176 pp(In Persian).

Evaluating and estimating the risk of erosion and sediment in Karaj basin using morphometric and experimental methods

- 1- Mohammad Ali zangane asadi, Associate Professor Geomorphology of Hakim Sabzevari University, Sabzevar
2- Ebrahim taghavi Moghadam, (corresponding author) PhD graduates Geomorphology, Hakim Sabzevari University, sabzevar
3- Fereshteh beramali, PhD student in Geomorphology, Hakim Sabzevari University, Sabzevar

Article History (Received: 2019/05/4

Accepted: 2019/10/9)

Extended abstract

1- Introduction

There was about 15 percent of the world's soil erosion at the beginning of the twenty-first century that nearly 11 million square kilometers was affected by water erosion. Soil erosion after population growth is a serious threat to the environment, health and well-being of humans, and it has been introduced as the second most important environmental challenge in the world. The annual level of soil erosion in the world is 75 billion tons and Iran's share is more than 2 billion tons and about 3 times more than the total soil erosion which has been reported in Asia. On the other hand, the amount of soil erosion in north of Iran is 15 to 25 million tons per year, While the amount of forest per capita is 2.0 hectares in Iran and 8.0 hectares in the world. Soil erosion in the region of Asia, Africa and South America is 30-40 tons per hectare annually, in the United States and Europe is 13-17 tons per hectare and in Iran is 30-35 tons per hectare. The mean erosion in Iran is about 3.4 times the average erosion in the world. In the present study, we used Fournier and Douglas models to predict the amount of sediment in the watershed of Karaj.

2- Methodology

Karaj river Basin (to the Amir-Kabir dam) with an area of 764 square kilometers, is located in north latitudes between 36 degrees and 10 minutes and 35 degrees and 57 minutes and East longitude between 51 degrees and 3 minutes and 51 degrees and 35 minutes east. The highest elevation in the basin which was studied is 4343 meters and the lowest elevation in the Karaj dam is 1680 meters. The length of the studied basin is 38/31 km. In the present study in order to estimate the amount of sediment erosion in basin, initially basin has been limited using topographic maps and Google earth. Then the required data was extracted from meteorological and precipitation stations, geological maps and field observations in the study area. Finally, it was analyzed in four models; Fournier, Fargas, Ciccacci and CSY. The first model of sedimentation that put in much effort to extend and improve its results is Fournier model that was presented by him in 1960. Fournier used his model to factor in seasonal precipitation index, which has a high correlation with the yields of deposits. In 1968, Douglas worked on ten factors involved in erosion. And by distinction of top four factors, he presented a formula that is perhaps the most used.

Modeling processes of erosion and sediment production, transport and deposition, have been studied before. Sediment transport formula of Bijker (1976 and 1971), one of the first formulas extended to combine current and the wave. Van Rijn in 1984, proposed a comprehensive theory for sediment transportation rates in rivers in basic physic theories and practical observations. Watanabe in 1992, proposed a formula for final deposition based on the capacity of force model. This formula has been widely used for prediction in Japan. In Iran it is also published in the final report of calibration of models by the Soil and Water Research Institute, Watershed management and thesis of graduate students. Behzadfar et al. (2009) studied the erosion index in North Khorasan Province. Pour-Abdullah (1385) used two models 2000SWAT and RUSLE for modeling and comparing the results with the actual values in the watershed Enameh. Salajegheh et al. (1388), Asadi et al. (1389) and Ahmadi et al. (1393) are other domestic papers which have been done about soil erosion and

sedimentation. The purpose of this study was to estimate the sediment yield of Karaj basin using morphometric and experimental methods and erosion risk analysis at large catchment areas such as Karaj basin. Which has a strategic and vital importance for supplying drinking water to the capital and metropolitan Tehran-Karaj.

3- Results

Calculation of Ciccacci et al. 1986 method, which is based on the morphometry of the catchment area, shows that the annual precipitation rate of Karaj basin is 706241.2 tons per year from the basin. According to the calculations, the annual sedimentation rate of Karaj Basin, based on the csy method, is 317648.2 tons from the basin. According to the Fournier model, eroding and sedimentation rates in the whole Karaj basin are 387630.8 tons from the basin. The Sediment-rating Curve Data showed that the annual sediment rate was calculated to be 565605.4 tons per year. In order to evaluate and estimate the risk of erosion in the basin, Fargas method was used. According to the calculations, 29.6% of the area of Karaj basin is in severe erosion. The expansion of the kahar Formation, Ziarat, Asara and Quaternary Formations, and the intense activity of Masha faults and Karaj fault have caused erosion in the Karaj basin. As a result of this increase, this process has reduced the reservoir capacity of Karaj during many years. The moisture and glacial regime in Karaj watershed has always caused the activity of erosion processes such as cerioclasti, thermoclasty and mass movements in different shapes, The erosion rate has increased tremendously.

4- Discussion & Conclusions

The results showed that the annual precipitation rate of Karaj basin is 6.91 tons in morphometric method and 4.73 and 3.87 tons per hectare in experimental, forenier and hydrophysical methods respectively. Meanwhile, based on real data of Sediment-rating Curve Data of the regional water organization, the annual sedimentation rate is 6.89 tons per hectare. Therefore, the morphometric method has the closest estimate to actual data and is a suitable method for estimating erosion of sediment in large catchment areas. The difference of quantitate value between the original value and two equations, represents the disqualification of two methods in this study for basins like Karaj River Basin. It seems that other experimental models such as Hydrophisic and artificial neural network models with having alittle difference compared to the real value have the more richness to estimate the sediment load. However, this amount of power of erosion represents a high rate of attrition in upstream river- top of Amir Kabir Dam- and accumulation of eroded sediment mass in the dam.

Key Words: : Sediment erosion, Fournier, Fargas, Karaj river basin, morphometry