

## برآورد مقادیر فرسایش و رسوب با مقایسه مدل‌های تجربی محدوده مورد مطالعه: حوضه رودخانه زیمکان شهرستان دالاهو استان کرمانشاه

شهرام روستایی\* - استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، ایران.  
هدیه شیرزادی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، ایران.  
اسداله حجازی - دانشیار گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۱۴      تأیید نهایی: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱

### چکیده

امروزه فرسایش خاک به عنوان یکی از مباحث مهم مدیریت حوضه‌های آبریز در سطح ملی و جهانی مطرح است. چون محاسبه مقادیر فرسایش و رسوب از طریق ایستگاه‌های هیدرومتری و رسوب-سنجی و اندازه‌گیری‌های مستقیم در نقاط مختلف حوضه‌ها، فرایندی هزینه‌بر و زمان‌بر است، لذا یافتن روش‌های تجربی برای برآورد دقیق میزان فرسایش و رسوب‌دهی حوضه‌های آبریز امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد. در این پژوهش به ارزیابی کارایی دو مدل EPM و RUSLE جهت برآورد مقادیر فرسایش خاک و رسوب حوضه آبریز رودخانه زیمکان پرداخته شد که در این راستا، عوامل چهارگانه مدل EPM شامل فرسایش حوضه، استفاده از زمین، حساسیت خاک و سنگ به فرسایش، شیب متوسط حوضه و همچنین عوامل مدل RUSLE شامل عامل فرسایشی بارندگی (R)، عامل فرسایش‌پذیری خاک (K)، عامل طول شیب (L)، عامل درجه شیب زمین (S)، عامل پوشش گیاهی (C) و عامل حفاظت خاک (P) مورد تحلیل قرار گرفت. در ادامه از نرم افزار ArcGIS و تصاویر سنجنده ماهواره Sentinel 2 در محیط ENVI 5.3 جهت تهیه لایه‌های مرتبط استفاده گردید. نتایج نشان داد مقادیر فرسایش در دو مدل RUSLE و EPM به ترتیب ۴۰۱۸/۵ و ۶۴۰۱/۲ (تن در سال) و مقادیر رسوب به ترتیب ۲۳۱۵/۷، ۳۶۲۴/۷۲ (تن در سال) بوده و کلاس و شدت فرسایش‌پذیری حوضه از لحاظ هدر رفت خاک در وضعیت شدید قرار دارد که بیشترین شدت فرسایش و تولید رسوب در بخش‌های جنوب و جنوب غرب حوضه مشاهده شد. با توجه به نزدیک بودن مقادیر رسوب برآورد شده در مدل RUSLE به مقادیر مشاهدات واقعی (۲۵۵۹/۱۱ تن در هکتار در سال) در نهایت مشخص شد که مدل RUSLE نسبت به مدل EPM جهت برآورد میزان فرسایش و رسوب در حوضه مورد مطالعه کارایی و دقت بیشتری داشته و قابل اعتمادتر می‌باشد. همچنین پیشنهاد می‌گردد در کنار مدل RUSLE از مدل EPM به عنوان الگوی سایه و فرعی جهت اجرای فازهای اولیه شناسایی، توجیهی و اجمالی در پژوهش استفاده شود.

واژگان کلیدی: فرسایش خاک، رسوب، مدل، EPM RUSLR حوضه آبریز، رودخانه زیمکان.

## مقدمه

خاک از جمله مهم‌ترین منابع طبیعی هر کشوری است که طی فرایندهای پیچیده‌ای که تحت تأثیر پنج عامل اصلی اقلیم، توپوگرافی، سنگ مادر، پوشش گیاهی و زمان تشکیل می‌شود (جعفری و سرمدیان، ۱۳۸۲). در صورت مساعد بودن چهار عامل نخست، زمان طولانی برای تشکیل خاک نیاز است. به طوری که تحقیقات نشان می‌دهد که روند تشکیل خاک نسبت به تخریب و هدر رفت آن جریان ضعیف و زمان‌بری دارد (Tripathi, 2001). بنابراین مهار و کنترل فرسایش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. که با طرح‌های پیش‌بینی شده و مدیریت صحیح می‌توان خسارات ناشی از فرسایش خاک را به حداقل ممکن رساند (جعفری و غفوری، ۱۳۹۹: ۷۶). فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب و کاهش باروری خاک به شمار می‌آید که امروزه در حال افزایش است و منجر به از دست رفتن خاک مرغوب کشاورزی می‌شود (Bouaziz, 2011). فرسایش فرایندی است که در آن ذرات خاک به وسیله عوامل فرساینده از بستر خود جدا شده و توسط عوامل انتقال دهنده به مکان دیگری حمل می‌شود. چنانچه عامل جدا کننده ذرات باد و یخچال باشد. به ترتیب فرسایش بادی و یخچالی نامیده می‌شود. فرسایش آبی، نیز به دلیل مدیریت نامناسب زمین، تخریب پوشش گیاهی و عدم کنترل جریان آب انجام می‌گیرد و سبب ایجاد رواناب‌های شدید سطحی و جابجای خاک می‌شود (امیدوار، ۱۳۸۹). از اثرات مخرب فرسایشی می‌توان به افت حاصل‌خیزی خاک، کاهش آب‌های زیرزمینی، ایجاد سیل‌های خطرناک و طوفان‌های ماسه‌ای و پر شدن سریع مخازن سدها اشاره نمود (ابوالفتحی و همکاران، ۱۳۸۶). براین اساس این فرایند را می‌توان یک عامل مخرب زیست محیطی معرفی کرد، که به یک مسئله اقتصادی و اجتماعی جدی تبدیل شده است (Wang, 2013). این مسئله نه تنها باعث تخریب شدید زمین و کاهش سطح رشد اقتصادی می‌شود بلکه توسعه پایدار اجتماعی را نیز تهدید می‌کند. (Tang, 2004).

بنابراین تعیین عوامل مؤثر بر فرسایش و پیش‌بینی مقادیر فرسایش خاک، نخستین گام در ارائه راهکارهای حفاظتی خاک می‌باشد. جهت کاهش اثرات جبران‌ناپذیر فرسایش خاک و اجرای پروژه‌های حفاظتی بررسی شرایط فیزیکی حوضه و نوع خاک و شرایط اقلیمی و واکنش رواناب و الگوی پراکنش کاربری اراضی می‌باشد (اصغری و همکاران، ۱۴۰۱: ۳۲). امروزه تلاش‌های قابل توجهی در جهت توسعه مدل‌های فرسایش صورت گرفته تا پیامدهای ناشی از این فرایند را کاهش دهند و تدابیر و اقدامات حفاظتی لازم برای پایداری و مقاومت خاک در سطح حوضه‌های مختلف اجرا شود (خالقی و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۶). اخیراً پژوهشگران زیادی در دنیا با بهره‌گیری از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تصاویری ماهواره‌ای و با کمک مدل‌های فرسایشی اقدام به برآورد فرسایش و رسوب می‌کنند تا بتوانند مناطق حساس و ضعیف در مقابل فرسایش را شناسایی و کنترل کنند (نیری و همکاران، ۱۴۰۰: ۲۴). ولی به دلیل پیچیدگی فرایند فرسایش خاک و کمبود آمار دقیق و معتبر و فقدان ایستگاه‌های اندازه‌گیری در زمینه فرسایش و رسوب در بسیاری از حوضه‌های کشور کاربرد مدل‌های تجربی را برای برآورد فرسایش خاک الزامی می‌کند (خدابخش و همکاران، ۱۳۸۸).

رابطه جهانی فرسایش خاک اصلاح شده (RUSLE) در دسترس‌ترین مدل عملی پیش‌بینی فرسایش است که به سادگی در مقیاس محلی و منطقه‌ای قابل اجرا می‌باشد (مزبانی و همکاران، ۱۴۰۰، ۶۳). علاوه بر این مدل‌های فرسایش خاک به عنوان ابزاری برای درک فرایندهای فرسایش و رسوب و تأثیرات متقابل آنها و نیز به منظور تعیین و تنظیم اولویت‌های تحقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد (محمودزاده، ۲۰۰۴).

تاکنون مدل‌های زیادی جهت برآورد فرسایش خاک و توسعه طرح‌های مدیریتی فرسایش خاک ارائه شده که از مهم‌ترین این مدل‌ها، می‌توان به معادله‌های جهانی فرسایش خاک<sup>۱</sup> (Smite, Wischmeier, 1978)، پروژه پیش‌بینی

۱. Universal Soil Loss Equation (USLE)

فرسایش آبی<sup>۱</sup> (Flangan, Nearing, 1995)، ابزار ارزیابی خاک و آب<sup>۲</sup> (Arnold, 1998) و مدل اروپایی فرسایش خاک<sup>۳</sup> (Morgan, 2011) اشاره نمود (آرخی و نیازی، ۱۳۸۹). طی ۴۰ سال اخیر، مدل USLE به سبب داشتن محاسبات ساده، جزء پرکاربردترین روش تخمین فرسایش خاک و برآورد رسوب در طرح‌های عملیات و مدیریتی مورد استفاده می‌باشد (Kinnell, 2000). رابطه جهانی فرسایش خاک اصلاح شده<sup>۴</sup>، مدل توسعه یافته USLE برای پیش‌بینی فرسایش خاک سالانه از یک سطح معین به‌شمار می‌آید. با استفاده از مدل RUSLE، فرسایش سطحی و شیاری<sup>۵</sup> ناشی از باران و رواناب، در سطوح تحت رواناب سطحی پیش‌بینی می‌شود. سطوح تحت رواناب، محدوده‌ای هستند که جریان‌های سطحی از ابتدای آن سرچشمه می‌گیرند و در انتهای آن تمرکز یافته یا به محدوده رسوب‌گذاری وارد می‌شوند. هدررفت خاک، متوسط سرعت فرسایش در این محدوده می‌باشد (Jones, 2008). با این وجود در زمینه فرسایش و رسوب تحقیقات زیادی صورت گرفته و روش‌های زیادی مطرح هستند (میگوتل<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۱). ولی نباید توانایی مدل EPM را در برآورد فرسایش نادیده گرفت. روش فرسایشی EPM با هدف بررسی شدت فرسایش خاک و اندازگیری رسوب مدلی کارآمد در جهت شناسایی نقاط فرسایش‌پذیر است تا بتوان طرح‌های حفاظتی و آبخیزداری را در منطقه اجرا نمود و ویژگی این مدل دخالت دادن پارترهای کمتری نسبت به دیگر روش‌ها در جریان تحلیل و محاسبه فرسایش است که باعث شده این مدل برای مناطقی که آمار و اطلاعات کافی در دسترس نمی‌باشد کارآیی بیشتری داشته باشد. لذا استفاده از مدل‌های فرسایشی که همواره وضع فرسایش و رسوب را نشان می‌دهند مهم است (قضاوی و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۲۷). طی سال‌های اخیر با اجرای طرح عملیاتی سد روی رودخانه زمکان به منظور تامین آب شرب نواحی مسکونی و همچنین مشروب ساختن اراضی کشاورزی پایین دست منجر به تغییراتی کاربری مساحت زیادی از اراضی منطقه و استفاده بیش از ظرفیت خاک شده که این عامل در تشدید هدر رفت خاک و تولید رسوب نقش چشمگیری داشته، لذا با توجه به مباحث فوق هدف اصلی این پژوهش تخمین مقادیر فرسایش خاک و تولید رسوب سالانه در حوضه رودخانه زمکان با مقایسه و ارزیابی دو مدل RUSLE و EPM می‌باشد. تا مدل بهینه و با دقت بیشتر معرفی گردد و در ادامه نقاط حساس و ضعیف در برابر فرسایش خاک جهت انجام اقدامات و عملیات‌های حفاظتی و آبخیزداری شناسایی شود.

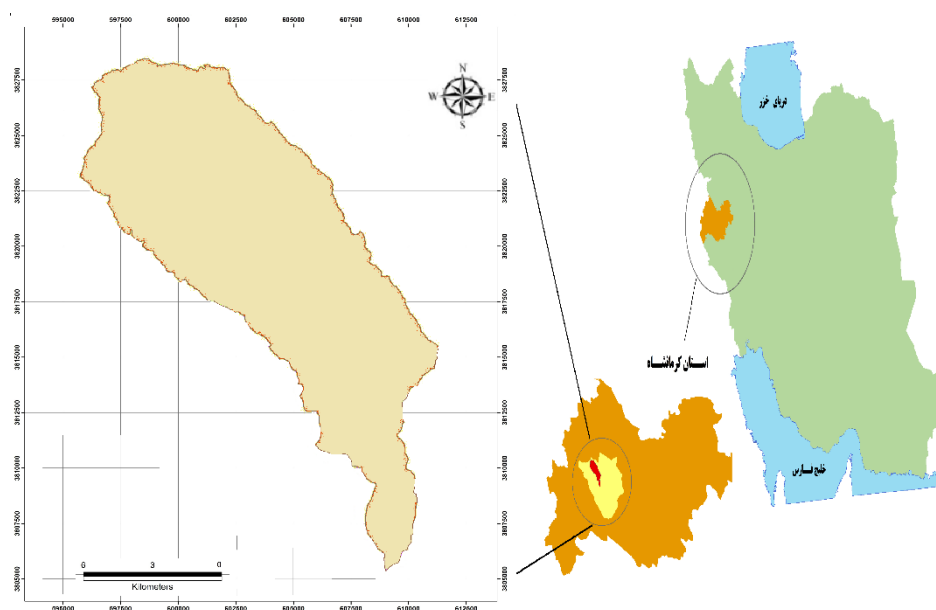
## روش تحقیق

### منطقه مورد مطالعه

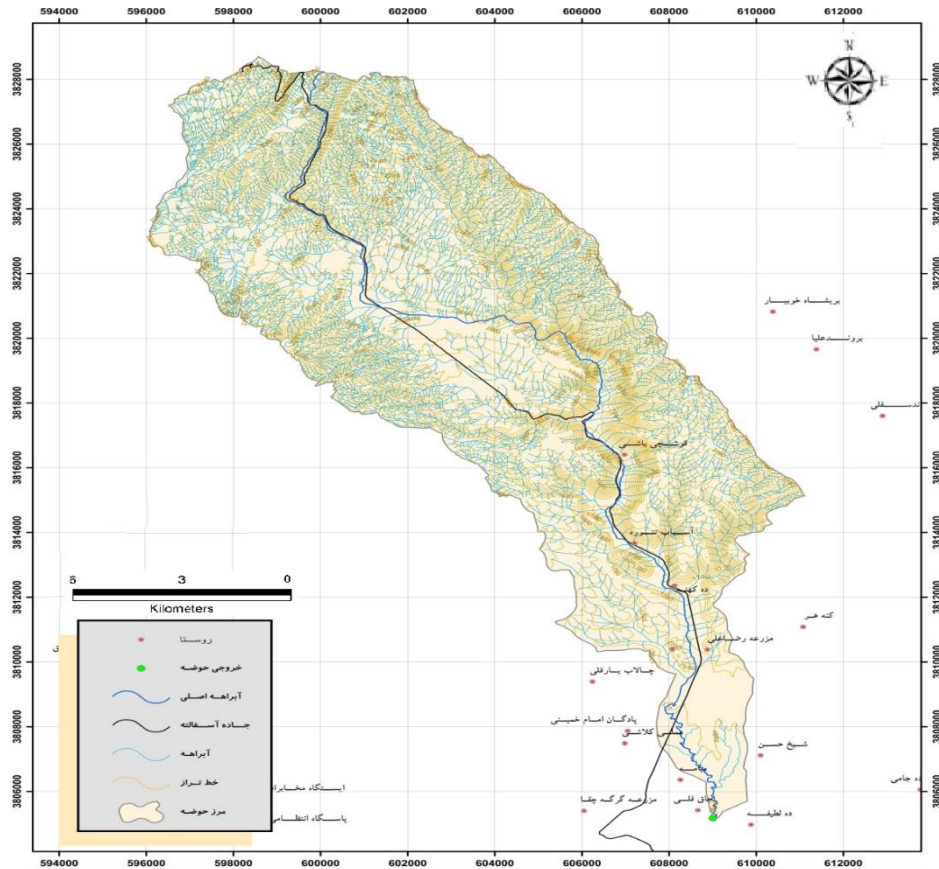
حوضه رود زمکان یا زمکان در شمال شهرستان دالاهو و غرب استان کرمانشاه قرار گرفته است، زهکشی این حوضه به شکل مستطیلی به مساحت ۲۳۲۴ کیلومتر مربع از سمت جنوب شرق به سمت شمال غرب جریان پیدا می‌کند (شکل ۱ و ۲). محیط آن برابر با ۳۱۲ کیلومتر می‌باشد. این حوضه از غرب به حوضه پیران و از شمال به حوضه‌های پشت تنگ و حوضه رودخانه لیما محدود می‌شود. حوضه در مختصات جغرافیایی ۴۶ درجه ۴ دقیقه ۳۰ ثانیه تا ۴۶ درجه ۱۱ دقیقه ۸ ثانیه طول شرقی و ۳۴ درجه ۳۵ دقیقه ۴۴ ثانیه تا ۳۴ درجه ۲۲ دقیقه ۵۶ ثانیه عرض شمالی واقع شده است. از جمله مناطق مسکونی در محدوده حوضه ۱۴۹ روستا است که جمعیتی حدود ۳۹۹۷۲ نفر را شامل می‌شود. از جمله روستاهای که بیشترین تمرکز جمعیت را در خود جای داده، می‌توان به روستاهای قوشچی باشی، آسیاب تنوره، ده کهنه، سید باقر و مزرعه رضا علی اشاره کرد. بیشتر فعالیت مردم بومی منطقه روی دامداری، باغداری و کشاورزی دیم و آبی است که به کشت محصولات مانند گندم، ذرت و حبوبات مشغولند.

1. Water Erosion Prediction Project (WEPP)
2. Soil and Water Assessment Tool (SWAT)
3. European Soil Erosion Model (EUROSEM)
4. Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)
5. Surface and Rill Erosion
8. Miguel PA.

از لحاظ شرایط اقلیمی، حوزه آبریز زمکان در منطقه نیمه مرطوب و معتدل واقع شده است و منشأ عمده بارندگی در نواحی مرتفع و کوهستانی می‌باشد. میانگین بارش سالانه برابر ۴۵۰ میلیمتر و متوسط دمای ماهانه، بین ۲۸/۲ درجه سانتیگراد در تابستان و تا ۱/۸ درجه سانتیگراد در زمستان در نوسان است. بنابراین میانگین دمای سالانه ۱۶/۲ درجه سانتیگراد می‌باشد. ولی در مرداد ماه دمای هوا تا مرز ۴۲ درجه سانتیگراد بالا و در بهمن ماه تا مرز ۱۳- درجه سانتیگراد افت می‌کند. و میانگین ارتفاع حوضه از سطح آبهای آزاد ۱۵۴۴ متر است. رودخانه‌های اصلی منطقه زمکان نام دارد که با طول ۱۲۵ کیلومتر کل مساحت حوضه را زهکشی می‌کند و به روخانه سیروان در عراق ختم می‌شود.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه



شکل ۲: نقشه پایه حوضه آبریز زمکان

## روش پژوهش

در این پژوهش از میان مدل‌های موجود، به ارزیابی دو روش EPM و RUSLE که در محاسبات فرسایش خاک مقبولیت بیشتری دارند استفاده شد. و در گام بعدی نتایج دو مدلی با مشاهدات واقعی مقایسه و مدلی که به مشاهدات نزدیکتر و دقیق‌تر بود معرفی گردید.

- معادله جهانی فرسایش خاک اصلاح شده (RUSLE)

محققان برای ارزیابی خطر تلفات خاک از مدل‌های مختلف فرسایش خاک استفاده می‌کنند که در این میان، مدل‌های خانواده USLE پرکاربردترین ابزار در این زمینه‌اند (Kinnell, 2010). مدل اصلاح شده USLE یعنی RUSLE توسط رینارد و همکاران (۱۹۹۷) معرفی شد. این معادله به شکل ذیل می‌باشد:

$$A=R*K*L*S*C*P \quad (1)$$

که در آن

A: مقدار خاک فرسایش یافته به وسیله فرسایش ورقه ای و شیاری بر حسب جرم در واحد سطح در واحد زمان

R: عامل فرساینده‌ی بارندگی

K: عامل فرسایش پذیری خاک است و حساسیت ذاتی خاک را مشخص میکند.

L: عامل طول شیب  
 S: عامل درجه شیب زمین  
 C: عمل پوشش گیاهی  
 P: عامل حفاظت خاک  
 A: بر حسب تن در هکتار در سال  
 R: بر حسب مگاژول میلی متر در هکتار ساعت سال  
 K: بر حسب تن ساعت مگاژول بر میلی متر و L, S, C, P: نیز بدون واحد هستند.

### ۱- عامل فرساینده‌ی بارندگی (R)

فرساینده‌ی باران، نیروی محرکه یا توان فرسایش‌زا در جداسازی و انتقال ذرات خاک در ارتباط با فرسایش باران است (Lal, 1998) و (Szilassi, 2006). معمول‌ترین شاخص فرساینده‌ی باران، عامل R مربوط به معادلات فرسایش جهانی خاک و فرسایش خاک تجدیدنظر شده می‌باشد. بررسی مقالات علمی نشان می‌دهد، در بسیاری از نقاط دنیا، عامل R همبستگی بالایی با فرسایش خاک دارد (Smith, Wischmeier, 1978). عامل R برای دوره‌های مختلف، از حاصل ضرب انرژی جنبشی باران (E) در حداکثر شدت بارش ۳۰ دقیقه‌ای ( $I_{30}$ ) به دست می‌آید. از آنجایی که نمودار بارندگی و داده‌های تفصیلی رگبار (شدت بارندگی) به ندرت در ایستگاه‌های هواشناسی موجود می‌باشند، اغلب از مقادیر متوسط بارندگی ماهانه و سالیانه، جهت برآورد عامل R در مدل‌های USLE و RUSLE استفاده می‌شود (Ferreira و Renard, 1993). برای محاسبه انرژی جنبشی باران از داده‌های مربوط به بارندگی که از باران‌نگار به دست می‌آید، استفاده می‌شود. برای این منظور مدت بارندگی به تعدادی فاصله‌های کوچک تقسیم می‌شود. با مشخص بودن شدت بارندگی در هر فاصله مقدار انرژی جنبشی باران به وسیله یکی از فرمول‌های مرسوم محاسبه و در مقدار بارندگی آن جزء زمانی ضرب می‌شود. بدین ترتیب انرژی جنبشی در هر دوره محاسبه می‌شود. با جمع انرژی جنبشی در تمام فواصل انرژی رگبار به دست می‌آید. در واقع ترکیب انرژی جنبشی باران KE و بزرگترین شدت ۳۰ دقیقه‌ای در طول زمان بارندگی،  $I_{30}$ ، که شاخص  $EI_{30}$  یا شاخص ویشمایر نامیده می‌شود، توانایی هر باران را در جداسازی ذرات خاک و انتقال آن نشان می‌دهد. در این صورت شاخص فرساینده‌ی باران برای یک سال عبارت است از مجموع  $EI_{30}$  رگبارهای به وقوع پیوسته در طول یک سال و متوسط سالیانه شاخص R عبارت است از:

$$R = 1/n \sum_{j=1}^n \left[ \sum_{k=1}^m (E)_{K(j)} (I_{30})_{K(j)} \right] \quad (2)$$

که در آن:

J: شماره سال

n: تعداد سال‌های آماری مورد استفاده

k: شماره رگبار

m: تعداد رگبارهای اتفاق افتاده در سال J ام می‌باشد.

برای محاسبه عامل فرساینده‌ی باران، برای ایستگاه‌هایی که دارای باران‌سنج معمولی هستند، از شاخص فورنیه استفاده می‌شود که همبستگی بالای این شاخص در تحقیقات زیادی به اثبات رسیده است. از این رو آمار بارندگی ماهانه و سالیانه

با دوره آماری مشترک برای ایستگاه‌ها جمع‌آوری می‌شود که در مراحل بعدی با استفاده از رابطه ۳ شاخص فورنیه و عامل R برای تمام ایستگاه‌ها محاسبه می‌گردد.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{\sum_{i=1}^{12} P} \quad (3)$$

که در آن:

$P_i$  متوسط بارندگی بر حسب (میلی‌متر) در ماه  $i$

$P$  متوسط بارندگی سالانه بر حسب (میلی‌متر) است.

با جاگذاری شاخص فورنیه در روابط ۴ و ۵ که برای مناطق فاقد داده‌های تفصیلی رگبار پیشنهاد شده، عامل R برای ایستگاه‌های مورد نظر محاسبه می‌شود (Renard, Freidmund, 1994)

$$R\text{-factor} = (0.07397 \times F^{1.847}) / 17.2 \quad (4)$$

اگر

$$F < 55 \text{ mm}$$

$$R\text{-factor} = (95.77 - 6.081 \times F + 0.447F^2) / 17.2 \quad (5)$$

اگر

$$F \geq 55 \text{ mm}$$

برای تبدیل مقادیر برآورد نقطه‌ای فرسایش باران به سطح نقشه از یکی از روش‌های میان‌یابی و محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی استفاده می‌شود.

## ۲- عامل فرسایش پذیری خاک (K)

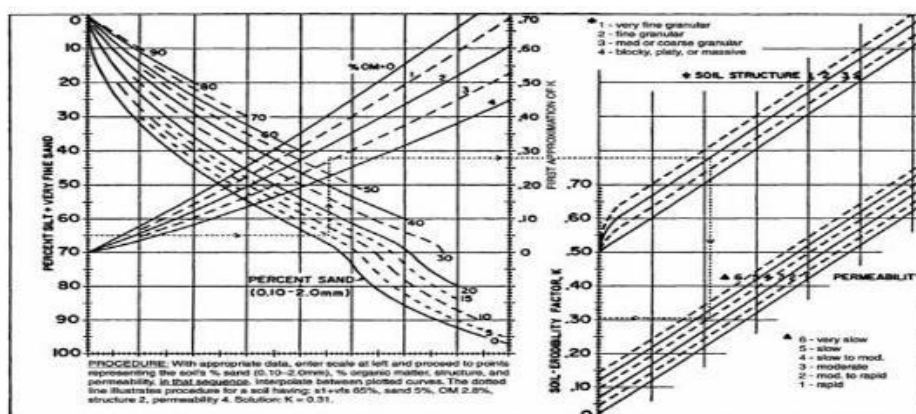
فرسایش‌پذیری خاک بیانگر حساسیت ذاتی خاک به فرسایش است و سهولت جدا شدن ذرات خاک بر اثر انرژی جنبشی قطرات باران و انتقال آنها به وسیله نیروی رواناب را نشان می‌دهد (Veihe, 2002). اگر چه مقاومت خاک نسبت به فرسایش تا اندازه ای به وضعیت پستی و بلندی، درجه شیب، و اثر تخریبی انسان‌ها بستگی دارد (مثلاً در زمان شخم خصوصیت خاک‌ها بسیار تعیین کننده است) اما فرسایش‌پذیری به عواملی از قبیل بافت خاک، پایداری دانه خاکدانه‌ها، مقاومت برشی، ظرفیت نفوذ و مقدار مواد آلی و شیمیایی نیز بستگی دارد. عامل فرسایش‌پذیری در مدل RUSLE را می‌توان از طریق منحنی‌های مربوطه تعیین کرد. مورگان برای فرسایش‌پذیری (K) خاک‌های مختلف اعدادی را پیشنهاد کرده است که در (جدول ۱) نشان داده شده است (احمدی، ۱۳۸۸). برای محاسبه فرسایش‌پذیری خاک (K) نیاز به داده‌هایی همچون نقشه زمین‌شناسی، گزارش خاک‌شناسی و کاربری اراضی می‌باشد. در صورت نبود اطلاعات مربوط به خاک، می‌توان از طریق نمونه برداری به تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی (درصد ذرات معدنی، ماده آلی، آهک، پتاسیم، سنگ‌ریزه، پایداری خاک‌دانه و نفوذپذیری) جهت محاسبه K اقدام کرد.

جدول ۱: فرسایش پذیری خاک (K)

| K    | وضعیت خاک                      | K    | وضعیت خاک                   |
|------|--------------------------------|------|-----------------------------|
| ۰/۱  | اراضی مقاوم به فرسایش          | ۰/۵  | خاک سطحی با پوشش سنگریزه‌ای |
| ۰/۴۲ | خاک‌های ماسه‌ای نرم            | ۰/۱۶ | خاک‌های ماسه‌ای             |
| ۰/۴۲ | خاک‌های لومی با ماسه بسیار ریز | ۰/۱۲ | خاک‌های لومی شنی            |
| ۰/۳۷ | خاک‌های لومی                   | ۰/۴۸ | خاک‌های سیلت لومی           |
| ۰/۳۷ | خاک‌های لومی رسی               | ۰/۲۵ | خاک‌های سیلتی رسی           |

منبع احمدی، ۱۳۸۸: ۵۰۷

برای به دست آوردن K می‌توان از مونوگراف با داشتن مقدار درصد سیلت و شن، مقدار ماده آلی، بافت خاک و نفوذپذیری نیز استفاده کرد (Hyeon, 2006). پس از این که این پنج ویژگی خاک بر روی نمودار استخراج شدند عددی به دست می‌آید که ضریب فرسایش پذیری خاک را مشخص می‌کند. در نهایت برای کل حوضه و نوع خاک‌های موجود در آن، ضریب K به دست می‌آید و بر روی نقشه خاک اعمال و بصورت رستری تبدیل می‌گردد (شکل ۳).



شکل ۳: نمودار تعیین حساسیت فرسایش خاک (Wischmeier, ۱۹۷۸)

### ۳- عامل درجه و طول شیب (LS):

اثر طول و درجه شیب (LS) به عنوان عامل توپوگرافی، اثر میزان، سرعت و پتانسیل فرسایش‌دهی رواناب را نمایش می‌دهد. فاکتور درصد شیب تابعی از درجه شیب بوده و منعکس‌کننده اثر درجه شیب بر مقدار فرسایش است. طول شیب نیز عبارت است از فاصله افقی از مبدأ جریان بالادست دامنه تا جایی که تندی شیب به مقدار قابل ملاحظه‌ای تغییر یافته، به طوری که عمل رسوب‌گذاری آغاز شود. یا جریان‌های روی دامنه در یک کانال معین (کانال ترانس، سطوح تمرکز جریان، خندق، چاله، آبراهه و غیره) ادغام و متمرکز گردد (USDA, 1979). با افزایش طول شیب فرسایش افزایش می‌یابد. افزایش در طول و درجه شیب می‌تواند سرعت جریان آب را در سطح زمین افزایش دهد و باعث تشدید فرسایش خاک شود (Haan, 1994).

آنالیز حساسیت فاکتورهای مدل RUSLE نشان می‌دهد که از بین فاکتورهای این مدل، حساس‌ترین فاکتور توپوگرافی (LS) می‌باشد. محاسبه دقیق فاکتور فوق در برآورد میزان فرسایش تأثیر زیادی دارد، لذا انتخاب روشی دقیق برای پردازش آن ضروری می‌باشد. جهت برآورد این فاکتور مدل‌های تجربی مختلفی پیشنهاد شده است.

(Moora, Wilson .1993) برای محاسبه فاکتورهای L و S فرمول‌های زیر را ارائه کردند.

$$L = 1.4 (A_s / 22.13)^{0.4} \quad (۶)$$

$$S = (\sin \beta / 0.0896)^{1.3} \quad (۷)$$

یا به عبارتی دیگر

$$LS = \left( \frac{A_s}{22.13} \right)^{0.4} \left( \frac{\sin \theta}{0.0896} \right)^{1.3} \quad (۸)$$

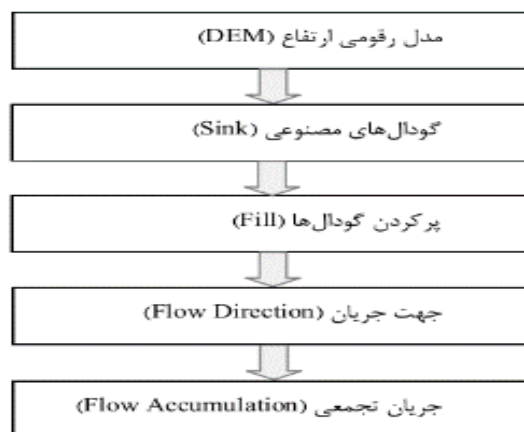
در این معادله:

AS سطح ویژه حوضه است که معادل سلول‌هایی است که آب آن‌ها به داخل سلول مورد نظر جاری می‌شود  
β زاویه شیب بر حسب درجه است.

برای محاسبه زاویه شیب (β) از مدل رقومی ارتفاع (DEM) حوضه استفاده می‌شود و برای محاسبه سطح ویژه حوضه (AS) در ابتدا از مدل رقومی ارتفاع (DEM)، نقشه شیب و نقشه جهت جریان و پس از آن، نقشه تجمع جریان تهیه می‌شود و در نهایت، برای به‌دست آوردن AS، جریان تجمعی در اندازه شبکه‌های مدل رقومی ارتفاع ضرب شده و سطح ویژه حوضه بر حسب متر به دست می‌آید.

$$A_s = \text{Flow Accumulation} \times \text{Cell Size} \quad (۹)$$

مراحل تهیه نقشه جریان تجمعی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS به‌طور شماتیک در (شکل ۴) نشان داده شده است.



شکل ۴. مراحل تهیه نقشه‌ی جریان تجمعی برای محاسبه عامل LS

به‌طور کلی می‌توان هر یک از عوامل طول شیب و درجه شیب را به‌طور جداگانه ارزیابی نمود و برای هر یک مقدار عددی مستقل مشخص نمود، اما از نظر کاربردی معمولاً طول و درجه شیب را با هم در نظر می‌گیرند مقدار LS با استفاده از فرمول زیر نیز قابل محاسبه می‌باشد (احمدی، ۱۳۸۸).

$$LS = \frac{\sqrt{L}}{22.13} (0.065 + 0.045 * S + 0.0065 * S^2) \quad (۱۰)$$

که L طول شیب بر حسب متر و S درجه شیب زمین می‌باشد که با قرار دادن مقادیر در فرمول بالا نقشه LS تهیه می‌گردد.

#### ۴- عامل پوشش گیاهی (C):

فاکتور مدیریت پوشش گیاهی (C) نشان‌دهنده تأثیر کاشت در مدیریت کشاورزی و اثر پوشش‌های درختی، درختچه‌ای، علفی و زمینی بر کاهش فرسایش خاک می‌باشد. با افزایش پوشش گیاهی، فرسایش خاک کاهش می‌یابد (آرخی و نیازی، ۱۳۸۹). در مدل RUSLE فاکتور پوشش گیاهی (C) معمولاً براساس معادلات تجربی تعیین می‌گردد. اما پرکاربردترین معیار رویش گیاهی، شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده<sup>۱</sup> (NDVI) است که با استفاده از فن‌آوری به‌دست می‌آید. این شاخص بعد از تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای با نقشه‌های توپوگرافی به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$(11) \text{NDVI} = \frac{\text{IR}-\text{R}}{\text{IR}+\text{R}}$$

که در این رابطه IR باند مادون قرمز و R باند قرمز سنجنده نقشه‌بردار موضوعی ماهواره لندست می‌باشد. این شاخص معرف انعکاس انرژی خورشیدی از سطح زمین است که برای انواع شرایط پوشش زمین بین ۱ و -۱ در نوسان است. زمانی که پاسخ طیفی اندازه‌گیری شده از سطح زمین برای هر دو باند خیلی مشابه باشد، مقادیر NDVI به صفر نزدیک می‌شود. پوشش گیاهی سالم (دارای فعالیت فتوسنتزی) در بخش طیفی مادون قرمز (IR) (باند ۴ لندست) در مقایسه با بخش طیفی مرئی قرمز (R) (باند ۳ لندست) انعکاس بیشتری دارد. بنابراین مقادیر NDVI برای پوشش گیاهی سبز مثبت خواهد شد. مناطق با پوشش گیاهی کم یا بدون پوشش گیاهی مانند اراضی شهری و اراضی بایر معمولاً مقادیر NDVI بین +۰/۱ و -۰/۱ را نشان می‌دهند. ابرها و منابع آبی مقادیر منفی یا صفر را نشان می‌دهند. شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) برای محاسبه داده‌های طیفی زمینی استفاده شده و نتایج آن نشان داده که این شاخص، همبستگی بالایی با زیست توده سطح زمین دارد (Lin, 1997). بعد از انجام تبدیل خطی معکوس رابطه بین فاکتور C و NDVI بصورت زیر بدست می‌آید:

$$C = \frac{(1-\text{NDVI})}{2} \quad (12)$$

در نتیجه مقدار هر سلول می‌تواند مورد محاسبه قرار گیرد. از آنجایی که مقادیر فاکتور C بین صفر و یک می‌باشد، مقدار صفر به پیکسل‌های با مقادیر منفی و عدد یک به پیکسل‌های با مقدار بیش‌تر از یک اختصاص خواهد داشت. در حقیقت بین شاخص NDVI و ضریب C یک همبستگی کامل وجود دارد (Ahmet, 2010). بدین معنی که با افزایش شاخص NDVI ضریب C کاهش می‌یابد. هر چه این ضریب کاهش پیدا کند بدین معنی است که در حوضه پوشش گیاهی بیشتر است و فرسایش کمتری در حوضه صورت می‌گیرد.

#### ۵- عامل حفاظت خاک (P):

عامل حفاظت خاک عبارت است از نسبت مقدار خاک از بین رفته در واحد سطح یک زمین حفاظت شده؛ به زمینی که لخت بوده و در جهت بالا و پایین تندترین شیب، شخم زده شود. منظور از کارهای حفاظتی، بیشتر کشت در روی خطوط تراز، کشت نواری و تراس بندی، درخت کاری، جلوگیری از قطع بی‌رویه درختان و جلوگیری از چرای بی‌رویه دام است. اگر هیچ‌گونه عملیات حفاظتی انجام نگردد P برابر با یک خواهد بود. مقدار P را می‌توان بر اساس شیب منطقه هم به دست آورد، هر چه شیب کمتر باشد نیاز به عملیات حفاظتی کمتر می‌شود. رابطه بین شیب و مقدار P در (جدول ۲) آمده است (Shi, 2002).

جدول ۲: مقدار P محاسبه شده

| درصد شیب | P مقدار |
|----------|---------|
| ۱-۲      | ۰/۶     |
| ۳-۵      | ۰/۵     |
| ۶-۸      | ۰/۵     |
| ۹-۱۲     | ۰/۶     |
| ۱۳-۱۶    | ۰/۷     |
| ۱۷-۲۰    | ۰/۸     |
| ۲۱-۲۵    | ۰/۹     |

• مراحل محاسبه فرسایش به روش EPM

۱- شدت فرسایش

- برای محاسبه شدت فرسایش در یک حوضه آبخیز اطلاعات و نقشه های زیر مورد ارزیابی استفاده قرار می گیرند.
۱. نقشه های توپوگرافی و عکس های هوایی هم مقیاس متناسب با دقت مورد نیاز در برآورد که در این رابطه از نقشه های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و عکس هوایی ۱:۲۰۰۰۰ و ۱:۵۰۰۰۰ منطقه جهت دقت بیشتر استفاده بعمل آمده و در نهایت نقشه های نهایی ارائه گردید.
  ۲. نقشه های زمین شناسی و سنگ شناسی و ژئومورفولوژی که در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ موجود می باشند.
  ۳. نقشه کاربری اراضی و پوشش گیاهی که بر اساس نقشه های توپوگرافی و بازدید های صحرائی تهیه شده اند.
  ۴. نقشه واحدهای خاک حوضه
  ۵. نقشه شیب حوضه.

۲-۱- تعیین ضریب فرسایش حوضه ( $\psi$ )

برای تعیین ضریب فرسایش ابتدا یک موزائیک از عکسهای هوایی ۱:۲۰۰۰۰ واحدهای همگن مورد مطالعه تهیه و با تطابق بازدیدهای مکرر صحرائی و عکس هوایی ضریب فرسایش حوضه با بهره گیری از (جدول ۳) ارائه شده در روش EPM تعیین گردید.

جدول ۳: مقادیر ضریب فرسایش منطقه ( $\psi$ )

| ردیف | شرایط فرسایش حوضه آبخیز   | مقادیر میانگین |
|------|---|----------------|
| ۱    | منطقه دارای خندق های زیاد و فرسایش شدید می باشد   | ۱              |
| ۲    | در حدود ۰/۸۰ منطقه دارای فرسایش خندوقی و شیباری می باشد   | ۰/۹            |
| ۳    | در حدود ۰/۵۰ منطقه دارای فرسایش خندوقی و شیباری می باشد   | ۰/۸            |
| ۴    | کل منطقه دارای فرسایش سطحی، رسوبات واریزه ها و به مقدار کم دارای فرسایش خندوقی و شیباری و فرسایش کارستی | ۰/۷            |
| ۵    | کل منطقه دارای فرسایش سطحی ولی بدون آثار فرسایش عمیق (خندق ها، شیارها، واریزه ها...)                    | ۰/۶            |
| ۶    | ۰/۵۰ منطقه دارای فرسایش سطحی و بقیه بدون فرسایش   | ۰/۵            |
| ۷    | ۰/۲۰ منطقه دارای فرسایش سطحی و بقیه بدون فرسایش   | ۰/۴            |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| ۰/۳ | سطح زمین فاقد فرسایش قابل رویت بوده ولی در کنار رودخانه‌ها واریزه لغزش مشاهده می‌شود. | ۸  |
| ۰/۲ | سطح زمین فاقد فرسایش قابل رویت بوده و اغلب دارای پوشش زراعی است.                      | ۹  |
| ۰/۱ | سطح زمین فاقد فرسایش قابل رویت بوده و غالباً تحت پوشش جنگل و گیاهان دائمی است.        | ۱۰ |

### ۳-۱- تعیین ضریب استفاده از اراضی ( $X_a$ )

برای تعیین ضریب استفاده از اراضی حوضه از نقشه‌های کاربری اراضی تهیه شده استفاده شد. در دهه‌های اخیر باتوجه به سیاست‌های اتخاذ شده اراضی مرتعی بیشتری جهت دیم کاری مورد دستبرد و دستکاری قرار گرفته و از وسعت مراتع روز بروز کاسته می‌شود، و از طرفی با بهره‌برداری غیر اصولی از مراتع گرایش آنها منفی شده و هر ساله از ظرفیت مراتع عملکرد آنها کاسته می‌شود. در ادامه جهت تعیین ضریب استفاده از زمین با توجه به (جدول ۴) ضریب مربوطه به هر واحد همگن تعیین گردید.

جدول ۴: مقادیر ضریب استفاده از زمین ( $X_a$ )

| ردیف | شرایط استفاده از زمین   | مقادیر میانگین |
|------|---|----------------|
| ۱    | اراضی غیرقابل کشت زرع و بدلندها   | ۱              |
| ۲    | اراضی تپه ماهوری شخم خورد برای زراعت  | ۰/۹            |
| ۳    | باغات میوه، تاکستانهای بدون پوشش گیاهی مرتعی                                | ۰/۸            |
| ۴    | کشتزارهای شخم خورده بر روی خطوط تراز  | ۰/۷            |
| ۵    | جنگل‌های مخروطه و فرسایش یافته و بوته زارهای ایجاد شده بر روی خاکهای فرسوده | ۰/۶            |
| ۶    | مراتع کوهستانی خشک  | ۰/۵            |
| ۷    | مزارع دائمی و یونجه زارها   | ۰/۴            |
| ۸    | مراتع زهکشی شده و پوشیده از گراس‌ها   | ۰/۳            |
| ۹    | جنگل‌های خوب بر روی شیب‌های تند   | ۰/۲            |
| ۱۰   | جنگل‌های خوب بر روی شیب‌های ملایم   | ۰/۱            |

### ۴-۱- تعیین ضریب حساسیت خاک و سنگ به فرسایش ( $Y$ )

برای تعیین ضریب حساسیت خاک و سنگ به فرسایش از نقشه‌های لیتوژی و واحدهای خاک که برای کلیه واحدها تهیه شده، استفاده و براساس (جدول ۵) ضریب مربوطه استخراج گردید.

جدول ۵: مقادیر ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش ( $Y$ )

| ردیف | شرایط سنگ شناسی و خاک شناسی | مقادیر میانگین |
|------|-----------------------------|----------------|
| ۱    | ماسه، سنگ ریزه، شیست        | ۲              |
| ۲    | لس، توف، خاک شور، خاک استپی | ۱/۶            |
| ۳    | سنگ آهک هوازده و مارن       | ۱/۲            |

|      |   |    |
|------|---|----|
| ۱/۱  | ماسنگ قرمز سرپانتین و رسوبات فلیشی                              | ۴  |
| ۱    | پدزول، پاراپدوزول، شیست خردشده، میکاشیست، گنیس، شیست آریلیت دار | ۵  |
| ۰/۹  | سنگ آهک سخت، لاشبرگ، خاکهای هوموسی و سیلیکات دار                | ۶  |
| ۰/۸  | خاکهای جنگلی قهوه ا و خاکهای کوهستانی                           | ۷  |
| ۰/۶  | خاکهای باتلاقی و هیدرومورف سیاه یا خاکستری تیره                 | ۸  |
| ۰/۵  | چرنوزیوم و رسوبات آبرفتی با بافت خوب                            | ۹  |
| ۰/۲۵ | سنگ های آذرین سخت   | ۱۰ |

۵-۱- تعیین ضریب شدت فرسایش

با تعیین ضرائب سه گانه  $X_a$ ،  $\psi$  و  $Y$  ضریب شدت فرسایش ( $Z$ ) برای هریک از واحدهای همگن با استفاده از رابطه زیر به دست آمد:

$$Z = Y X_a (\psi + I^{0.5})$$

که در آن:

$Z$ : ضریب شدت فرسایش

$Y$ : ضریب حساسیت خاک و سنگ به فرسایش

$X_a$ : ضریب کابری اراضی

$I$ : شیب متوسط وزنی برحسب درصد

ضرائب شدت فرسایش به دست آمده طبق (جدول ۶) از لحاظ کیفی به پنج طبقه تقسیم بندی شده، که بر مبنای آن وضعیت فرسایش در حوضه با عناوینی همچون خیلی شدید، شدید و متوسط و کم و خیلی کم مشخص می شود.

جدول ۶: طبقه بندی شدت فرسایش

| مقادیر متوسط $Z$ | مقادیر حد        | شدت فرسایش | طبقه بندی فرسایش |
|------------------|------------------|------------|------------------|
| ۱/۲۵             | $Z > 1$          | خیلی شدید  | I                |
| ۰/۸۵             | $1 > Z > 0.71$   | شدید       | II               |
| ۰/۵۵             | $0.7 > Z > 0.41$ | متوسط      | III              |
| ۰/۳              | $0.4 > Z > 0.2$  | کم         | IV               |
| ۰/۱              | $0.19 > Z$       | خیلی کم    | V                |

۲- محاسبه میزان حمل رسوب

با تعیین ضریب شدت فرسایش می توان با استفاده از رابطه ی زیر میزان متوسط رسوب ویژه سالانه واحدها را به دست آورد.

$$W_{SP} = T.H.\pi.Z^2$$

که در آن:

$W_{SP}$ : متوسط سالانه رسوب ویژه بر حسب متر مکعب در کیلومتر مربع در سال

T: ضریب درجه حرارت که از رابطه  $T=(t/10+0/1)^{0/5}$  به دست می‌آید که در آن T متوسط درجه حرارت در حوضه آبخیز برحسب درجه سانتیگراد می‌باشد. متوسط درجه حرارت سالانه حوضه برابر ۷/۵ درجه سانتیگراد به دست آمد (۱۵).  
 H: ارتفاع متوسط بارندگی سالیانه حوضه آبخیز برحسب میلی‌متر  
 I: عدد پی  
 مقدار رسوب سالانه حوضه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_P = F \times W_{SP}$$

VP: رسوب حوضه بر حسب متر مکعب  
 F: مساحت حوضه برحسب کیلومتر مربع  
 WSP: میزان متوسط سالانه رسوب ویژه برحسب متر مکعب در کیلومتر مربع در سال  
 و در نهایت با استفاده از روابط بالا مقادیر فرسایش و رسوب سالانه حوضه به روش EPM برای حوضه مورد مطالعه به دست آمد.

### بحث و یافته‌ها

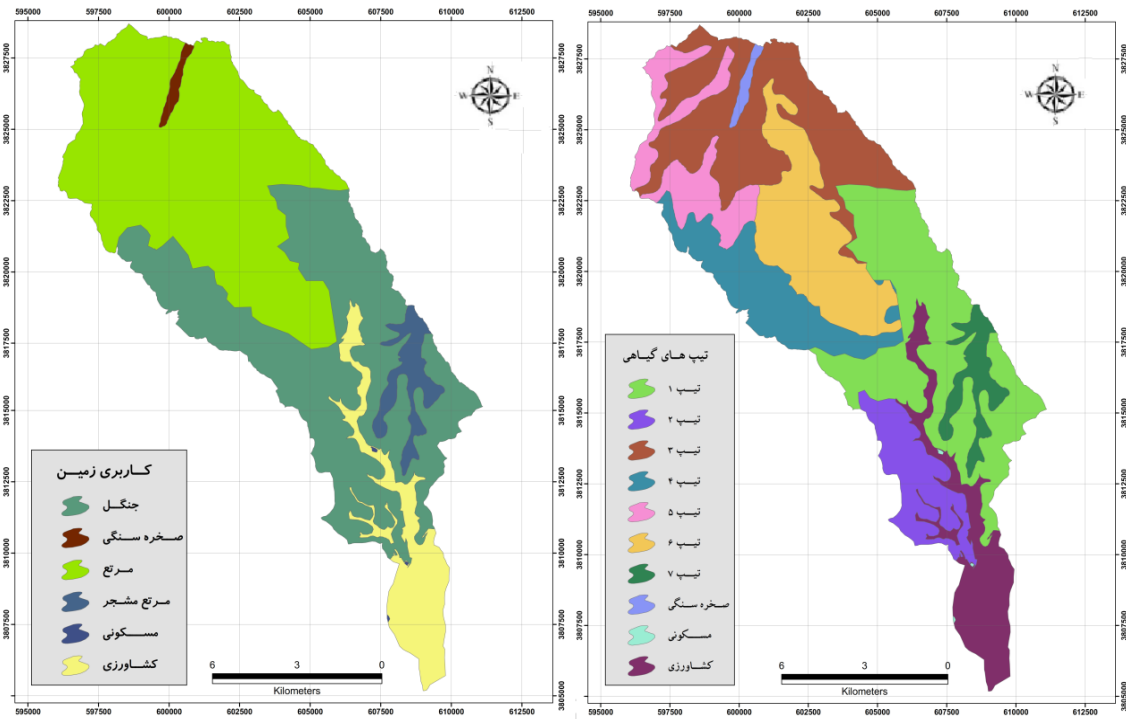
فرسایش خاک در کشورهای در حال توسعه روندی افزایشی دارد. تشدید فرسایش باعث از بین رفتن منابع آب و خاک که از عوامل اصلی حیات بشر به شمار می‌آیند شده است. اندازگیری دقیق مقادیر فرسایش و رسوب به دلایل اقتصادی، فنی و حفاظتی در تمامی نقاط امکان‌پذیر نیست از این رو مناسب‌ترین راهکار، پیش‌بینی یا محاسبه کمی فرسایش و رسوب است که لازمه‌ی آن آگاهی از مکانیزم‌های فرسایش و عوامل مؤثر بر آن است در این میان تاثیر کاربری اراضی به دلیل نقش مؤثر انسان بر چرخه طبیعت مهم‌تر از سایر عوامل می‌باشد به ویژه در دهه‌های اخیر با تغییرات گسترده‌ای که در نتیجه پیشرفت‌های فناوری در طبیعت انجام شده نقش زیادی در گسترش فرسایش داشته، به گونه‌ای که وسعت زیادی از جنگل‌ها و مراتع تبدیل به کاربری کشاورزی، تجاری و مسکونی شده و به تبع آن تشدید سیلاب و افزایش میزان تولید رسوب سالانه دلالت بر این امر دارد.

### کنش‌ها و فعالیت‌های انسانی در گسترش فرسایش منطقه مورد مطالعه

در دهه‌های اخیر، تشدید فعالیت‌های انسان در بروز آشفته‌گی‌ها و تسریع در عمل مکانیسم فرسایش خاک قابل توجه می‌باشد. اثرات مستقیم و غیر مستقیم فعالیت‌های بشر و استقرار ساختارهای انسانی در بخش‌های حساس منجر به وقوع پیامدهای منفی در منطقه شده بطوریکه هر ساله به دلیل رابطه نادرست انسان با طبیعت، حجم عظیمی از خاک شسته و از نواحی بالادست به سمت پایین‌دست حوضه منتقل می‌شود. در نواحی مرتفع که عمق خاک نفوذپذیر کمتر می‌باشد و به نحوی خاک ضعیف بحساب می‌آید احداث جاده که یکی از مهمترین و گسترده‌ترین ساختارهای انسانی در سطوح شیب‌دار است تاثیر عمده‌ای در هدر رفت خاک داشته لذا با احداث جاده، آشفته‌گی سطوح شیب‌دار و در نتیجه بار رسوبی حوضه تا سه برابر افزایش یافته است (Fransen, 2001). نقش انسان در ایجاد خطوط راه‌ها، تغییر کاربری مراتع ضعیف به کشاورزی دیم، دخالت در بستر رودخانه‌ها و باریک شدگی بستر یا پهن شدگی آن در نقاط مختلف، آتش سوزی‌های عمدی و غیرعمدی بعد از برداشت محصول، نابودی جنگل‌ها و مراتع در جهت گسترش نواحی مسکونی و مواردی از این قبیل اقدامات که روزبه‌روز هم بر روند گسترش آن افزوده می‌شود از عوامل تقویت کننده فرآیندهای فرسایشی در کل

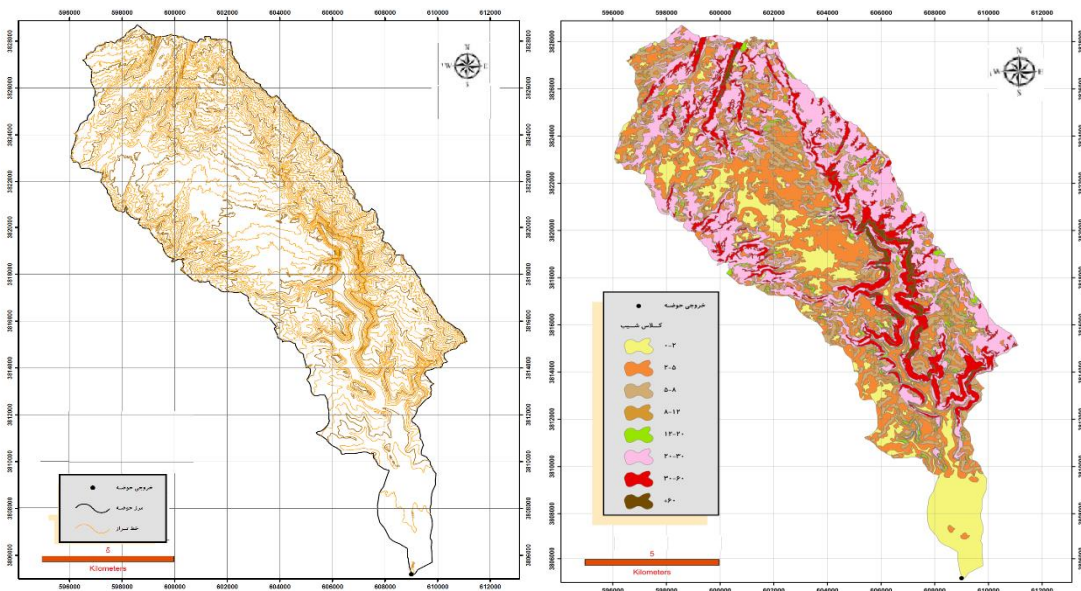
حوضه بحساب می‌آید. بطوریکه مباحث فوق با سه مکانیسم عمده بر فرآیندهای هیدرولوژیکی منطقه، همچنین بر عمل فرآیندهای ژئومورفولوژیکی و در نهایت تلف شدن خاک تاثیر زیادی گذاشته است. این مکانیسم عمده شامل: ۱- کاهش نفوذپذیری خاک در طی بارش‌های شدید که منجر به تجمع جریانات بر سطح خاک و شستن و انتقال حجم زیادی از خاک به بخش‌های خروجی حوضه شده است. ۲- افزایش شدت جریانات سطحی ناشی از کاهش میزان نفوذپذیری خاک، که این کاهش نفوذپذیری منجر به بالا رفتن سرعت رواناب از نواحی بالادست و پرشیب‌تر حوضه به سمت نواحی پایین دست که شیب کمتری دارد خواهد شد. ۳- انحراف آب‌های سطحی ناشی از تغییرات هیدرولوژیکی، به نقطه ویژه در بخش‌های پایینی حوضه، منجر شده که بر قدرت سایشی آن افزوده شود و در نتیجه جدا از ایجاد اشکال فرسایشی در تشدید میزان تلف شدگی خاک نیز نقش داشته است. بر این اساس تاثیر کنش و فعالیت‌های انسان در منطقه باعث تضعیف خاک و در نتیجه کانالیزه شدن و قدرت گرفتن جریانات سطحی در شستن و جابجای خاک به نقاط پایین دست و خروجی حوضه شده، با توجه به این پیامدها ساکنین این منطقه علاوه بر تحمل خسارات ناشی از به هدر رفتن میلیون‌ها تن از خاک‌های مرغوب و قابل کشت، مجبور به تحمل خسارات ناشی از وقوع سیلاب‌های بزرگ نیز شده اند. و متأسفانه بزرگی این مخاطرات هر سال بیش از سال‌های گذشته تاثیر داشته است.

اجرای برنامه‌های عمرانی و بهبود زندگی روستاییان و در محور قرار دادن فعالیت‌های انسانی در جهت کاهش آسیب‌های وارده به خاک می‌تواند نقش مفیدی در کنترل و مهار فرسایش داشته باشد. با توجه به تبعات جبران‌ناپذیری که دخالت‌های غیرکارشناسانه انسان در منطقه داشته و آن را از روند طبیعی خارج کرده است. لذا در راستای مدیریت صحیح و اجرای اقدامات حفاظتی و طرح‌های آبخیزداری گام نخست، کاهش نقش و اثرات منفی انسان در منطقه، و اجرای آموزش‌های لازم به ساکنان بومی جهت کاربری بهینه و شناسایی نواحی حساس و ضعیف برای جلوگیری از کشت و چرای بی‌رویه و منع پروژه‌های عمرانی سنگین و ساخت و سازهای غیر اصولی در نواحی آسیب پذیر می‌باشد. از طرفی انتخاب مدل مناسب با در نظر گرفتن ویژگی‌های هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی حوضه، مستلزم ارزیابی دقیق و کاربردی مدل‌های مختلف از طریق مقایسه نتایج آنها با مشاهدات واقعی در یک حوضه آبریز می‌باشد. جهت محاسبه فرسایش و رسوب اقدام به تهیه نقشه‌های پایه مورد نیاز گردید این نقشه‌ها شامل نقشه کاربری اراضی، پوشش گیاهی، جهت شیب، توپوگرافی، جریانات هیدرولوژیکی حوضه، بافت و عمق خاک می‌باشد (شکل ۵ الی ۱۰).



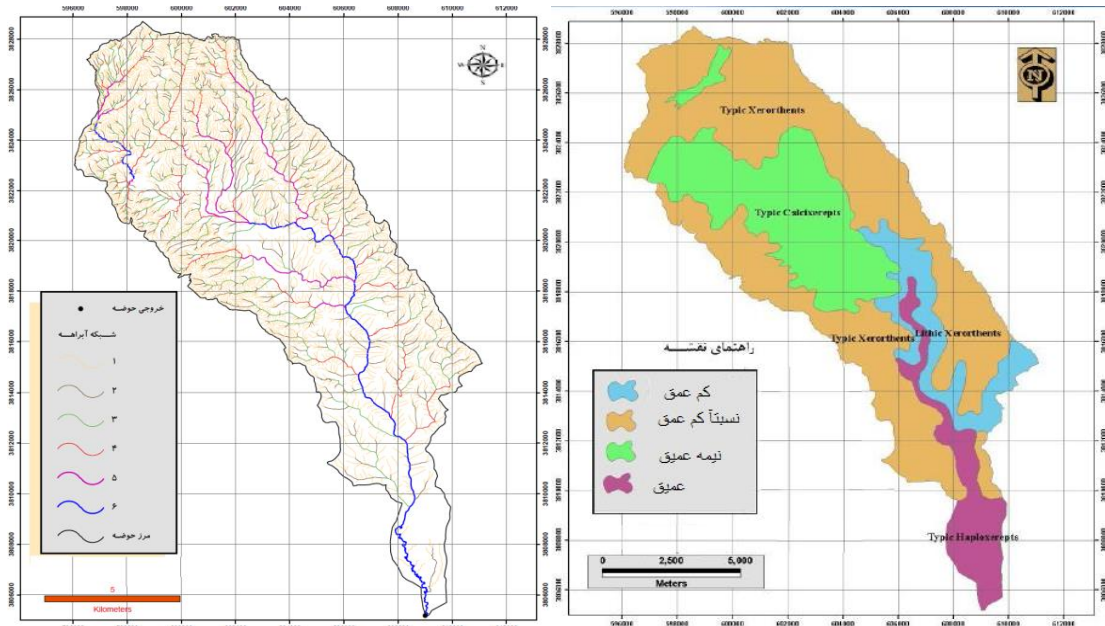
شکل ۵. نقشه کاربری اراضی حوضه زیمنان

شکل ۶. نقشه پوشش گیاهی حوضه زیمنان



شکل ۷. نقشه شیب حوضه زیمنان

شکل ۸. نقشه توپوگرافی حوضه زیمنان



شکل ۱۰. نقشه شبکه آبراهه حوضه زیمکان

شکل ۹. نقشه بافت و عمق خاک حوضه زیمکان

• نتایج برآورد فرسایش و رسوب با روش **RUSLE**

برای تهیه نقشه‌ی میزان رسوبدهی حوضه آبریز مورد مطالعه، لایه‌های شیب و طول شیب به صورت لایه‌ی ارتفاعی، فرسایش‌پذیری خاک، حفاظت خاک، پوشش گیاهی و فرساینده‌ی باران در محیط GIS ادغام و نقشه نهایی به دست آمد. با تجزیه و تحلیل نقشه‌های به دست آمده میانگین فاکتور فرسایش‌پذیری خاک (K) دارای مقادیر ۰/۰۳ است و میانگین فاکتور پوشش گیاهی (C) دارای مقادیر ۰/۲۱ است. که نشان‌دهنده‌ی تفاوت میزان پوشش گیاهی در قسمت‌های مختلف حوضه است.

نتایج حاصل از فاکتور فرساینده‌ی باران (R) در حوضه مورد مطالعه نشان داد که میزان این فاکتور در سال در نوسان است که نشان‌دهنده تغییرات شدید مقدار بارندگی در حوضه از پایین دست به بالادست منطقه است. بطوری که میزان فرساینده‌ی باران در نقطه خروجی به حداقل می‌رسد که دلیل آن تغییرات ارتفاعی و آب‌وهوایی می‌باشد، و همچنین کاهش تقریبی بارش و افزایش دما در بخش‌های پایین دست حوضه نسبت به مناطق مرتفع‌تر مشهودتر است (جدول ۸).

جدول ۷: ضرایب عوامل مدل **RUSLE**

| ضریب    | R<br>(عامل فرساینده‌ی باران) | K<br>(عامل فرسایش-پذیری) | LS<br>(توپوگرافی) | C<br>(پوشش گیاهی) | P<br>(عملیات حفاظتی) |
|---------|------------------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| حداقل   | ۹۶/۴                         | ۰/۰۲                     | ۰/۰۲              | ۰/۹               | ۰/۷                  |
| حداکثر  | ۱۵۶/۹                        | ۰/۰۵                     | ۶۶                | ۰/۴۸              | ۳                    |
| میانگین | ۱۱۲/۴۴                       | ۰/۰۳                     | ۴/۱۸              | ۰/۲۱              | ۰/۷                  |

بر اساس نتایج مدل **RUSLE** بیشتر مساحت حوضه در کلاس فرسایش متوسط تا خیلی کم قرار دارد که مربوط به نواحی بالادست حوضه می‌باشد. و کلاس فرسایش زیاد و خیلی زیاد کمترین مساحت و حدوداً در نواحی پایین دست حوضه می‌باشد. که فرسایش این بخش بیشتر ناشی از کاربری کشاورزی که بیشترین استفاده را از خاک منطقه می‌کند قرار

دارد. و همچنین شدت رواناب بخاطر جمع شدن تمام جریانات در پایین دست و شدت گرفتن شسته‌شوی خاک بیشتر می‌شود در نتیجه در این نواحی هدر رفت خاک و تولید بار رسوبی بیشتری مشاهده می‌شود (جدول ۹).

جدول ۸: طبقه بندی هدر رفت خاک در حوضه زیمنان با مدل RUSLE

| وضعیت کلاس | مقدار هدر رفت خاک (تن در هکتار) | مساحت (km <sup>2</sup> ) | مساحت (%) |
|------------|---------------------------------|--------------------------|-----------|
| خیلی کم    | ۰-۱۵                            | ۲۰۰/۸۰                   | ۱۱/۱۰     |
| کم         | ۱۵-۵۰                           | ۳۱۵/۱۱                   | ۱۹/۱۱     |
| متوسط      | ۷۵-۵۰                           | ۳۶۹/۲                    | ۲۵/۵      |
| زیاد       | ۱۰۰-۷۵                          | ۴۰۱/۸                    | ۳۰/۳۴     |
| خیلی زیاد  | >۱۰۰                            | ۱۳۲۲/۳                   | ۳۹/۱۴     |

بررسی نقشه خطر فرسایش خاک که از ترکیب لایه تولید شده شامل لایه‌های فرساینده، خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی در محیط ARC/GIS تهیه و در ادامه نقشه نهایی شدت فرسایش ترسیم شد، نتایج این مدل نشان داد که مناطق با خطر فرسایش متوسط تا زیاد عمدتاً در مناطق کم ارتفاعتر که از نظر پوشش گیاهی فقیرترند و یا تحت دخالت انسان و تغییرات کاربری اراضی قرار دارند و همچنین شدت جریان رواناب در این نواحی بالا است بیشتر مشاهده می‌شود.

#### • نتایج برآورد فرسایش و رسوب با روش EPM

در حوضه مورد مطالعه، برای تعیین میزان فرسایش و همچنین تولید رسوب از مدل EPM استفاده گردید. با توجه به نتایج به دست آمده از مطالعه پایه و بازدیدهای میدانی انجام شده، نتایج به دست آمده از مدل EPM نشان می‌دهد که بر طبق (جدول ۱۰) در بخش‌های پایین دست و جنوبی حوضه هدر رفت و شسته‌شوی خاک بیشتر به چشم می‌خورد. که اصولاً عامل اصلی آن کشاورزی (استفاده بیش از توان خاک) و تغییرات کاربری شدید از جمله به زیر کشت دیم بردن مراتعی که دارای خاک سطحی با ساختار ضعیف و شکننده است می‌توان اشاره کرد. بالا بودن مقادیر فرسایش در نواحی جنوبی و جنوب غرب حوضه هشدار برای نابودی خاک منطقه به حساب می‌آید.

جدول ۹: طبقه بندی هدر رفت خاک در حوضه زیمنان با مدل EPM

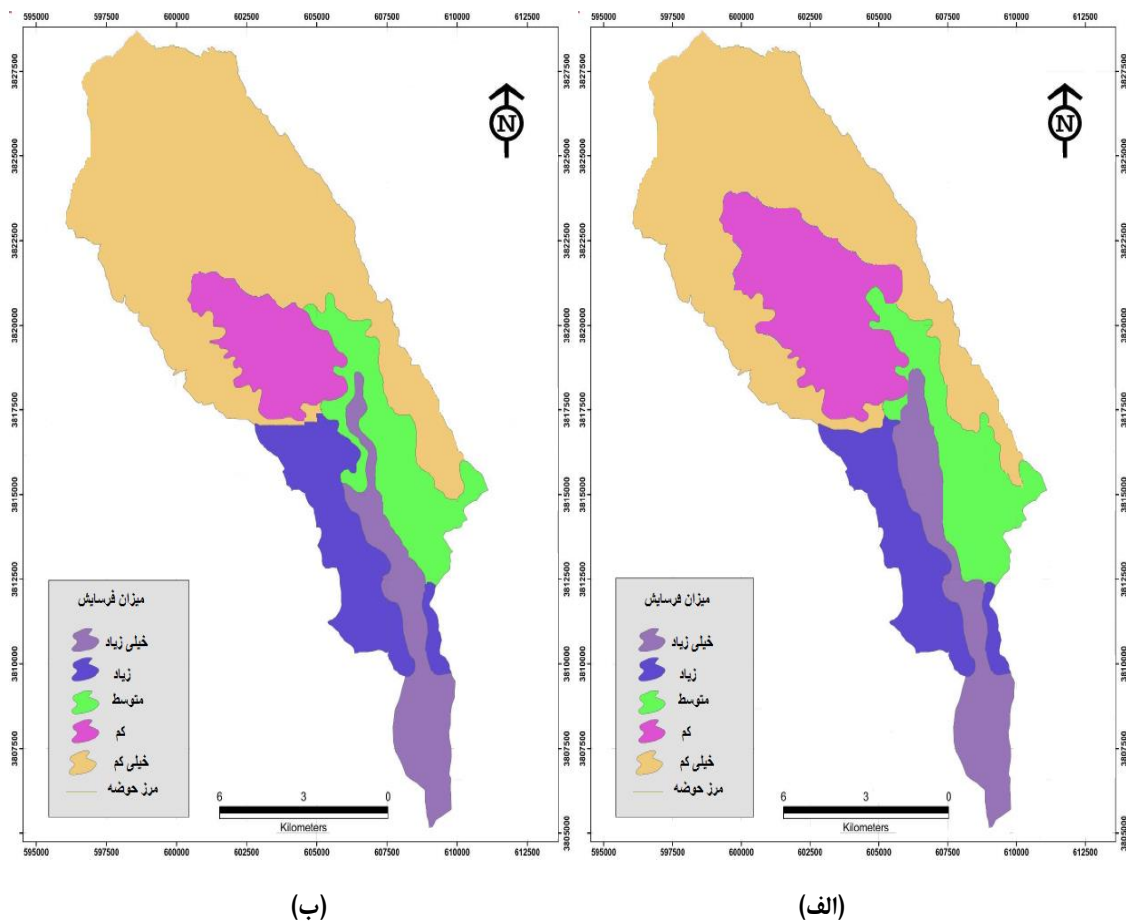
| وضعیت کلاس | مقدار هدر رفت خاک (تن در هکتار) | مساحت (km <sup>2</sup> ) | مساحت (%) |
|------------|---------------------------------|--------------------------|-----------|
| خیلی کم    | ۰-۲۵                            | ۱۸۰/۱۸                   | ۹/۲۵      |
| کم         | ۲۵-۵۰                           | ۲۱۰                      | ۱۸/۷      |
| متوسط      | ۷۵-۵۰                           | ۳۵۵/۲                    | ۲۱/۱      |
| زیاد       | ۱۰۰-۷۵                          | ۳۸۰/۲                    | ۲۶/۴۴     |
| خیلی زیاد  | >۱۰۰                            | ۱۴۲۰/۳                   | ۳۷/۴      |

با مقایسه نتایج این پژوهش و مطالعات پیشین، مشخص شد که روش RUSLE نسبت به مدل EPM دقت و اعتبار بیشتری دارد و کارایی بهتری از خود نشان می‌دهد که دلیل این امر نزدیکتر بودن نتایج مدل RUSLE به مشاهدات واقعی می‌باشد (جدول ۱۱). بر این اساس می‌توان گفت مدل EPM در مطالعات اجمالی فرسایش خاک موفقیت آمیزتر عمل می‌کند. و از آنجاییکه به آمار خاصی نیز نیاز ندارد برای حوضه‌های بدون آمار براحتی قابل اجراست. همچنین با

استفاده از قابلیت نرم‌افزار Arc/GIS به خوبی می‌توان میزان همخوانی و توافق بین طبقات و وضعیت فرسایش حاصله از دو مدل را با هم مقایسه نمود.

جدول ۱۰: مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده با دو مدل EPM و RUSLE

| فاکتور/ واحد    | فرسایش ویژه<br>(ton/ha/year) | فرسایش کل<br>(ton /year) | رسوب ویژه<br>(ton/ha/year) | رسوب کل<br>(ton/ha/year) |
|-----------------|------------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| RUSLE           | ۳/۲                          | ۴۰۱۸/۵                   | ۲/۱۵                       | ۲۳۱۵/۷                   |
| EPM             | ۳/۶۸                         | ۶۴۰۱/۲                   | ۲/۷۴                       | ۳۶۲۴/۷۲                  |
| مقدار مشاهده‌ای | ۳/۱۱                         | ۵۲۶۱/۹                   | ۲/۳۸                       | ۲۵۵۹/۱۱                  |



شکل ۱۱: مقایسه شدت فرسایش و رسوب حوضه با مدل RUSLE (الف) و EPM (ب)

### ارزیابی دقت

به دلیل کمبود آمار و اطلاعات در زمینه فرسایش خاک و تولید رسوب در بسیاری از حوضه‌های آبریز کشور کاربرد مدل‌ها و روش‌های تجربی مناسب برای برآورد میزان فرسایش خاک و رسوب الزامی می‌باشد. باید در نظر داشت به دلیل شرایط متفاوت آب و هوایی و دیگر فاکتورها نمی‌توان بدون آزمون مدل‌ها را مورد استفاده قرارداد. بهتر است قبل از بکارگیری این

گونه مدل‌ها آنها را با روش‌های مختلف آماری مورد سنجش قرارداد و در صورت درست بودن خروجی از آنها استفاده کرد، در ارزیابی دو مدل مشخص شد مدل RUSLE دقت و صحت بیشتری نسبت به مدل EPM دارد. و همچنین کارایی روش RUSLE نسبت به EPM بالاتر بوده و به مقادیر مشاهده‌ای قرابت بیشتری دارد.

### نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف برآورد میزان فرسایش خاک و تولید رسوب و همچنین پهنه‌بندی مناطق ح-ساس به فرسایش در حوضه آبریز زیمکان به کمک دو روش EPM، RUSLE انجام گردید. که نتایج نشان داد در روش RUSLE فاکتور فرسایش‌پذیری خاک و معیار پوشش گیاهی و طول شیب در نواحی مختلف حوضه دارای نوسان است، که نشان‌دهنده تفاوت در ویژگی‌های بارش و خاک، پوشش گیاهی در بخش‌های مختلف حوضه می‌باشد. مقادیر فرسایش در دو روش EPM و RUSLE، به ترتیب  $۶۴۰۱/۲$  و  $۴۰۱۸/۵$  تن در سال می‌باشد در گام بعدی با تلفیق لایه‌های مدل فرسایشی حوضه مورد مطالعه از لحاظ فرسایش‌پذیری به رده‌های فرسایشی خیلی کم و کم، متوسط و زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شده، که بیانگر بالا بودن پتانسیل فرسایش‌پذیری خاک حوضه می‌باشد. ولی با این وجود شرایط اقلیمی مساعد در منطقه و پوشش مناسب جنگل و مرتع حوضه مورد مطالعه، باعث شده تا حدودی خاک در مقابل ریزش‌های جوی شدید محافظت شود. ولی اقدامات دخالتگرانه انسان از جمله تغییرات کاربری و به زیر کشت بردن مراتع ضعیف جهت کشت دیم و تمرکز مناطق مسکونی در بخش‌های پایین دست حوضه، مقادیر فرسایش و هدر رفت خاک را در این نواحی بیشتر از نقاط دیگر بالا برده است. در تحلیل‌های انجام شده روی دو مدل مذکور مشخص شد، که تفات ناچیزی بین میزان رسوب برآورد شده در روش RUSLE که معادل  $۲۳۱۵/۷$  تن در هکتار در سال می‌باشد. با مقدار رسوب مشاهده‌ای که معادل  $۲۵۵۹/۱۱$  تن در هکتار در سال است وجود دارد. این در حالی است که این اختلاف در مدل EPM بیشتر مشاهده می‌شود. و همچنین کلاس فرسایش کم بیشترین مساحت حوضه را به خود اختصاص داده است که حدوداً ۵۸ درصد مساحت را دارا می‌باشد و کلاس فرسایش زیاد و متوسط جمعاً مساحتی حدود ۴۲ درصد حوضه را شامل می‌شود. همچنین مقادیر فرسایش در دو مدل RUSLE و EPM به ترتیب برابر با  $۴۰۱۸/۵$  و  $۶۴۰۱/۲$  تن در سال می‌باشد. که با این وجود وضعیت حوضه را در شرایط شدیدی از لحاظ هدر رفت خاک نشان می‌دهد. لذا شناسایی نقاط بحرانی و ضعیف در مقابل فرسایش از جمله کاربردهای مهم طبقه‌بندی فرسایش خاک به حساب می‌آید. بر همین اساس مدیریت صحیح در بخش کشاورزی و بالابردن آگاهی مردم بومی منطقه در استفاده از خاک و انجام عملیات حفاظتی و آبخیزداری در سطح حوضه در اولویت قرار دارد. به این ترتیب با توجه به نتایج حاصل از دو مدل مشخص شد که در پژوهش حاضر مدل RUSLE در محاسبات فرسایش خاک کاربرد بهتر و مورد قبول‌تری داشته است. و همانطور که در مباحث فوق بیان شد خروجی‌های آن بیشتر به واقعیت نزدیک تر بود. و در ادامه قابلیت بالای سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور در تدقیق بیشتر مدل‌های تجربی که منتج به ارائه خروجی با کیفیت بالا و قابلیت به روزرسانی مناسب است نمایان شد. لذا با توجه مقادیر به دست آمده از فرسایش و رسوب حوضه مورد مطالعه تغییرات کاربری در نقاطی با پتانسیل فرسایشی بالا، بایستی بر اساس آگاهی و دانش کافی از شرایط ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی حوضه صورت گیرد تا خطرات ناشی از کاربری اراضی منابع آب و خاک حوضه را تهدید نکند و همچنین مسئله فرسایش خاک را تا حدودی مهار و کنترل کرد. در نهایت نتیجه کلی که در مقایسه دو مدل مذکور به دست آمد مشخص شد که روش EPM برای فازهای اولیه مطالعاتی یعنی شناسایی، توجهی و اجمالی مناسب‌تر است و برای مطالعات تفصیلی توصیه نمی‌شود، در مقابل می‌توان جهت مطالعات تفصیلی و دقیق‌تر برآورد مقادیر فرسایش و رسوب حوضه از روش RUSLE بهره برد.

## منابع

- ابوالفتحی، داریوش، کیانی، مهرداد. ۱۳۸۶. میزان فرسایش خاک و رسوب دهی معادل با میزان سیلاب در حوضه فارسبان با استفاده از GIS. نشریه علوم جغرافیایی، جلد ۷، شماره ۱۰، ص ۱۵۷-۱۷۲.
- احمدی، حسن. ۱۳۸۸. ژئومورفولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ ششم، ۶۸۸.
- آرخی، صالح. نیازی، یعقوب. ۱۳۸۹. بررسی کاربرد GIS و RS برای تخمین فرسایش خاک و بار رسوب با استفاده از مدل RUSLE (مطالعه موردی: حوضه بالادست سد ایلام). پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، دوره ۱۷، شماره ۲، صص. ۲۷-۱.
- اصغری، صیاد. مظفری، حسن. اسفندیاری، فریبا. ۱۴۰۱. مدل‌سازی نرخ فرسایش و رسوب رودخانه سجاسرود قبل و بعد از ساخت سد گلابر با الگوریتم‌های یادگیری ماشین. مجله پژوهش‌های فرسایش محیطی. شماره ۴۶، ص ۳۲ از ۲۰۳-۱۷۲.
- امیدوار، ک. ۱۳۸۶، مقدمه ای بر آبخیزداری، انتشارات دانشگاه یزد، چاپ اول.
- جعفری، غلام حسن. غفوری، کژال. ۱۳۹۹. تحلیل وضعیت فرسایش‌پذیری زیرحوضه‌های واحد مورفوتکتونیک زاگرس در زمینه خصوصیات مورفومتری. مجله پژوهش‌های فرسایش محیطی. شماره ۴۰، ص ۸۹-۷۴.
- جعفری، محمد؛ سرمیدیان، فریدون. ۱۳۸۲؛ مبانی خاک‌شناسی و رده بندی خاک، انتشارات دانشگاه تهران، ۷۸۸ صفحه.
- خالقی، سمیه. عباسپور، رحیم. نصرتی، کاظم. ۱۳۹۹. برآورد فرسایش خاک و انتقال رسوب در بالادست حوضه آبخیز بادآور لرستان با استفاده از مدل SWAT. مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. شماره ۳۵، ۲۰۲-۱۸۶.
- خدابخش، سعید. محمدی، اکبر. رفیعی، بهروز. بزرگ‌زاده، عیسی. ۱۳۸۸. مقایسه برآورد میزان فرسایش و رسوب‌زایی در زیرحوضه سزار (حوضه‌آبریز سد دز) با استفاده از مدل‌های تجربی ای پی ام و ام پسیاک با کمک دانش فازی، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، سال سوم، شماره ۱۲، ص ۵۱-۶۱.
- قضاوی، رضا. ولی، عباسعلی. مقامی، یاسر. عبدی، ژاله. شرفی، سیامک. ۱۳۹۱. مقایسه مدل‌های EPM, MPSIC, PSIAC در برآورد فرسایش و رسوب با استفاده از GIS، جغرافیا و توسعه، شماره ۲۷، ص ۱۱۷-۱۲۶.
- مزبانی، مهدی. رضایی مقدم، محمدحسین. حجازی، اسداله. ۱۴۰۰. ارزیابی خطر فرسایش خاک در کاربری‌های اراضی با استفاده از معادله اصلاح شده جهانی فرسایش خاک (مطالعه موردی: حوضه آبریز سیکان). مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی. شماره ۳۷، بهار ۱۴۰۰، ص ۶۳-۴۱.
- نیری، هادی. سالاری، ممند، چارداولی، ژیلا. ۱۴۰۰. اولویت‌بندی فرسایش خطی با استفاده از شاخص‌های مورفومتری و ژئومورفولوژیکی مطالعه موردی حوضه آبریز قشلاق - سنندج غرب ایران. مجله هیدروژئومورفولوژی. شماره ۲۸، ص ۲۴ از ۲۱۴-۱۹۱.
- Ahmet, K. (2010). *Estimation of C factor for soil erosion modeling using NDVI in Buyukcekmece watershed. Ozean Journal of Applied Sciences.*
- Bouaziz, Moncef, Leidiy, Mathias, Gloaguen, Riechard (2011). *Optimal parameter selection for qualitaive regional erosion risk monitoring: Aremotoe sensing study of sc ethiopia*, Geoscience frontiers. 2: 237-245.
- Fransen, P. J.B., G.J. Phillips and B.D. Fltey, (2001). Forest road erosion in new Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms*. 26:165-174.
- Haan, C.T., Barfield, B.J., and Hayes, J.C., (1994), *Design hydrology and sedimentology for small catchments*. Academic Press, San Diego, 588p.

- Hyeon Sik, K.(2006). *Soil Erosion modeling using RUSLE and GIS on the IMHA watershed*, South Korea. Thesis. Colorado State University.
- Jones, D.S., Kowalski, D.G. and Robert, B.S.( 2008). *Calculating Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) Estimates on Department of Defense Lands: A Review of RUSLE Factors and U.S. Army Land Condition-Trend Analysis (LCTA) Data Gaps. Center for Ecological Management of Military Lands Department of Forest Science, Colorado State University Fort Collins, CO 80523.*
- Kinnell, P. I. A. (2010). Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: *A review. Journal of Hydrology*, 385, 384–397.
- Kinnell, P.I.A. (2000). *AGNPS-UM: applying the USLE-ithin the agricultural non point source pollution model. Environmental Modelling and Software*, 15: 3. 331-341.
- Lal, R .(1998).*soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality*.Critical reviews in plan sciences , 17(4), 319-464.
- Lin, C.Y. (1997). *A study on the width and placement of vegetated buffer strips in a mudstone-distributed watershed . J , china*Soil Water Conservation. 29: 3,. 250- 266(In Chinese with English abstract).
- Mahmoodzadeh, A,( 2004). *Research methods in soil erosion. University of Orumie Press. (In Persian)*.
- Moore, I.D., andWilson, J.P. 1993. Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: *Simplified method of estimation. J.Soil and Water Conservation*,47: 423-428.
- Morgan RPC, Nearing MA.(2011). *The future role of information technology in erosion modeling. Hand Book of Erosion Modeling.*
- Miguel PA, Samual-Rosa R Simao Dennis Dalmolin F, Arajo Pedron J,and ora Bueno, A.(2011). *The USLE model for estimating soil erosion in compex topography areas. Annals XV Brazilian Symposium on Remote Sensing (SBSR),Brasil,85:9227-9230.*
- Renard, K.G and V.A. Ferreira.(1993). *RUSLE model description and database sensitivity. Journal of Environmental Quality*, 22(3): 458–466.
- Renard, K.G. and Freidmund, J.R,( 1994), *Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the RUSLE, J. Hydro. 157: 287-306.*
- Shi, Z.H., Cai. 2002. *Assessment of Erosion Risk with the Rusle and Gis in the Middle and Lower Reaches of Hanjiang River. 12th ISCO Conference Beijing.*
- Szilassi. P . Jordan, G., van Rompaey , A., Csillag, G .(2006). Impacts of historical land use Changes on erosion and agricultural soil properties in the kali Basin at Lake Balaton, ungarv. CATENA.68:96-108.
- Tang. K.L. 2004. *Soil and water conservation in China Beijing.China: Science Press(in Chinse)*.
- Tripathi, R. P., 2001. *Soil Erosion and Conservation, New Age International Ltd, Polishers. 350 p.*
- USDA (United States Department of Agriculture), 1979, *Sediment Sources, Yields, and Delivery Ratios, National Engineering Handbook, Section 3 Sedimentation.*
- Veihe, A., (2002), *The spatial variability of erodibility and its relation to soil types: a study from northern Ghana, Geoderma, Vol. 106, PP. 101-120.*
- Wang, B., Zheng, F. L., Darboux, F., & Römken, M. J. M. (2013). *Soil erodibility in erosion by water: a perspective and the Chinese experience.Georphology*, 187,1–10.
- Wischmeier, W.H and Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Agriculture Handbook. *US Department of Agriculture. Washington DC, 537: 13-27.*