

## برآورد میزان فرسایش خاک در حوضه آبخیز شاهرود - میامی با استفاده از مدل SLEMSA و تکنیک GIS

سیدحجت موسوی

استادیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا و اکوتوریسم، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران  
تاریخ دریافت: ۹۳/۷/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۴/۱۷

### چکیده

بهره‌وری صحیح از منابع طبیعی مستلزم شناخت مکانیسم عملکرد فرایندهای محیطی می‌باشد. خاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع طبیعی همواره نیازمند برنامه‌ریزی و مدیریت جامع در زمینه بهره‌وری و حفاظت در برابر فرسایش است. فرسایش خاک به‌عنوان یک مخاطره محیطی، همه ساله موجب از بین رفتن حجم وسیعی از خاک‌های حاصل‌خیز در سراسر دنیا می‌شود. بنابراین هدف از این پژوهش برآورد میزان فرسایش خاک در حوضه آبخیز شاهرود-میامی به تن در هکتار در سال با استفاده از مدل SLEMSA و در نهایت تهیه نقشه فرسایشی این حوضه از طریق تلفیق داده‌های رقومی به وسیله تکنیک سیستم اطلاعات جغرافیایی است. برای دستیابی به اهداف، ابتدا مقدار عددی پارامترهای مدل مذکور شامل شیب، طول دامنه، انرژی جنبشی باران، نقش حفاظتی گیاهان و قابلیت فرسایش‌پذیری خاک بر اساس روابط موجود برآورد گردید. سپس لایه‌های رقومی آنها در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه و تلفیق آنها منجر به تهیه نقشه فرسایش خاک حوضه آبخیز شاهرود-میامی شد. نتایج نشان می‌دهد که سه کمربند فرسایشی در نوارهای کوه‌پایه‌ای شمال و شمال‌غرب، جنوب و مرکز محدوده مطالعاتی گسترده شده است و دامنه فرسایشی کمتر از ۲/۳۷۱ تا حداکثر ۶۷/۱۸۵ تن در هکتار در سال را در برمی‌گیرد. موقعیت مکانی کمربندهای فرسایشی نمایانگر اهمیت پارامترهای توپوگرافی نظیر شیب، جهت شیب، ناپایداری رسوبات در دامنه‌ها و قدرت فرسایش‌پذیری بارش در تخریب خاک است. در مقابل طبقه حداقل فرسایشی با مقدار کمتر از ۲/۳۷۱ تن خاک فرسایش یافته در هکتار در سال، با دارا بودن ۴۸/۴۲ درصد از مساحت کل حوضه بیشترین مساحت را به خود اختصاص داده است که حاکی از گستردگی مقادیر کم فرسایشی به نسبت مقادیر بالا در حوضه مطالعاتی می‌باشد. چنین حجم فرسایشی در درازمدت با توجه به پتانسیل‌های طبیعی منطقه، نیازمند برنامه‌ریزی کاربردی و مدیریت جامع حفاظت خاک است.

**واژه‌های کلیدی:** فرسایش، مدل SLEMSA، سیستم اطلاعات جغرافیایی، حوضه آبخیز شاهرود-میامی.

### مقدمه

سیاست و راهبردهای برخورد با محیط مبادرت نماید (رامشت، ۱۳۷۵: ۱۳). فرسایش خاک یکی از معضلاتی است که انسان از آغاز زراعت با آن روبرو بوده است. بنابراین، برآورد قابل اطمینان مقدار و پتانسیل تخریب خاک به علت افزایش نیاز روزافزون بشر به منابع خاک جهت تولید غذا و همچنین افزایش آگاهی عمومی از عواقب تخریب و فرسایش خاک روز به روز در حال توسعه است. تخریب منابع پایدار، از دست‌دادن پوشش گیاهی، بروز سیلاب، کاهش عمر مفید سدها، افزایش خسارات اقتصادی، گسترش بیابان‌زایی و تغییر شدید کاربری اراضی از عمده پیامدهای مخرب فرسایش خاک می‌باشند (رفاهی، ۱۳۹۴: ۱۰). با توجه به این

ژئومورفولوژی با تکیه بر اصول جهان‌بینی سیستمی، بر آن است که ضمن گویا کردن مکانسیم‌های حاکم بر محیط طبیعی به گونه‌ای عمل نماید که فعالیت‌های بشری در تقابل و تعارض با محیط قرار نگیرد. بنابراین هنر یک ژئومورفولوژیست این خواهد بود که با اشراف و آگاهی بر عوامل مورفودینامیک طبیعی، عکس‌العمل محیط در برابر عملکردهای بشری را پیش‌بینی کند و با دیدی جامع‌تر، نسبت به حل مسائل و تدوین خط مشی،

۱۰ هزار میلیارد ریال معادل تخریب یک میلیون هکتار زمین کشاورزی برآورد کرده‌اند (بخش کشاورزی و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۹۱). این آمار لزوم مدیریت و حفاظت از خاک در ایران را بیش از همیشه نشان می‌دهد. بنابراین شناسایی عوامل و عناصر مؤثر، برآورد مقدار مکانی و زمانی فرسایش و تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک از مهم‌ترین عوامل بنیادی جهت برنامه‌ریزی و مدیریت محیط برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار منطقه‌ای و ملی خواهد بود.

با در نظر گرفتن لزوم مطالعه فرسایش و تخمین مقادیر هدررفت خاک توسط عوامل تأثیرگذار فرسایش‌دگی و فرسایش‌پذیری، این پژوهش سعی دارد تا با استفاده از مدل تخمین فرسایشی SLEMSA مقادیر پارامترهای مؤثر در فرسایش خاک را برآورد نماید و در پایان با تلفیق لایه‌های رقومی عوامل مؤثر در محیط نرم‌افزار ArcGIS، نقشه پهنه‌بندی فرسایشی حوضه آبخیز شاهرود-میامی را تهیه کند. بنابراین فرضیات پژوهش حاضر تأکید بیشتر بر تخمین مقادیر هدر رفت خاک، تهیه نقشه پهنه‌بندی فرسایش جهت تعیین میزان فرسایش‌پذیری خاک، و همچنین شناخت پراکنش مکانی کنون‌های فرسایشی در قالب روش تلفیقی مدل SLEMSA با تکنیک ArcGIS می‌باشد.

### مبانی نظری

فرسایش به مجموعه فعل و انفعالات فیزیکی و شیمیایی گفته می‌شود که طی آن بخش‌هایی از سطح زمین بر اثر فرآیندهایی نظیر هوازدگی، تخریب، انحلال، انتقال و رسوب‌گذاری، پایداری نسی خود را از دست داده و از محل اولیه به سایر مناطق انتقال یافته و ترسیب می‌شود. به عبارتی فرسایش یک فرایند طبیعی در چرخه جغرافیایی است که از دفع ذرات خاک به وسیله آب یا باد و انتقال آنها به دیگر مناطق منتج می‌شود. در حالی که بعضی فعالیت‌های انسانی نیز روند طبیعی نرخ فرسایش را افزایش می‌دهد (Gitas et al., 2009: 40). عوامل مختلف فرسایشی

که فرسایش نه تنها خاک را از بین می‌برد و حاصل‌خیزی آن را کاهش می‌دهد، بلکه با ایجاد رسوب مواد در آبراهه‌ها سبب انسداد آنها شده و همچنین با پُر کردن مخازن سدها ظرفیت ذخیره آنها را کاهش می‌دهد و در نتیجه از عمر آنها می‌کاهد (عاقلی کهنه شهری و صادقی، ۱۳۸۴: ۹۰). بنابراین، سرمایه‌گذاری‌ها بیش از آن که صرف احیای منابع ازدست‌رفته شود، بایستی برای پیش‌گیری از فرسایش به کار رود. یکی از مهم‌ترین اقدامات پیش‌گیرانه، تخمین مقادیر قابل اطمینان و شناسایی کنون‌های مکانی فرسایش خاک، جهت اجرای اقدامات فرسایش‌زدایی در این مناطق است.

فرسایش خاک مخاطره‌ای است که هم در کشورهای در حال توسعه و هم در کشورهای توسعه‌یافته به عنوان یک معضل طبیعی و انسانی مطرح است. به عبارتی این مخاطره می‌تواند هم ناشی از توسعه‌یافتگی، نظیر افزایش فزاینده جمعیت، جنگل‌زدایی، و بی‌توجهی به ظرفیت خاک باشد و هم ناشی از عقب‌افتادگی نظیر چرای بی‌رویه دام، کشت غیراصولی و سنتی، و تخریب پوشش گیاهی؛ به همین دلیل در بسیاری جوامع از آن به عنوان یک مشکل بین‌المللی یاد می‌شود (رامشت و شاه‌زیدی، ۱۳۹۰: ۱۲۸). به طور تقریبی میزان سالانه فرسایش خاک در جهان ۷۵ میلیارد تن است (Pimentel, 2006: 123; Pimentel and Burgess, 2013: 447) که سهم ایران از آن بیش از دو میلیارد تن و حدود سه برابر فرسایش خاک در آسیا گزارش شده است؛ به طوری که نزدیک به ۱۲۵ میلیون هکتار از ۱۶۵ میلیون هکتار اراضی کشور در معرض فرسایش قرار دارند (پزشکی راد و همکاران، ۱۳۸۸: ۵۴). طبق گزارش سازمان خواربار جهانی در حدود ۳۶٪ از کل زمین‌ها و ۶۰٪ از خاک‌های کشاورزی در ایران در معرض خطر فرسایش هستند. در مجموع میانگین فرسایش در ایران برابر ۳۰ تا ۳۲ تن در هکتار در سال بوده است که این مقدار در حدود ۴/۳ برابر متوسط فرسایش جهانی می‌باشد (FAO, 1948). یافته‌های پژوهشگران ارزش اقتصادی خسارات سالانه فرسایش خاک در کشور را

مدل‌ها و معادلات جدیدی جهت برآورد میزان فرسایش خاک طراحی گردد.

در دهه‌های اخیر تجزیه و تحلیل مخاطرات فرسایش خاک به صورت مدل‌هایی نظیر USLE، PSIAC، PESERA، SLEMSA و تلفیق آنها با داده‌های ماهواره‌ای و نرم‌افزاری طرح می‌گردد که خطرات فیزیکی فرسایش خاک را در یک منطقه وسیعی شناسایی و برآورد می‌کند. مدل‌های مزبور می‌توانند اطلاعاتی درباره مقدار تخمینی فرسایش، روند آن و همچنین سناریوهای تجزیه و تحلیل فرسایش فراهم نمایند. در مقابل تکنیک‌های نظیر سیستم اطلاعات جغرافیایی به علت قابلیت بسیار بالای آن در پردازش و تجزیه و تحلیل حجم عظیمی از داده‌ها به صورت لایه‌های رقومی در فرمت‌های برداری و رستری می‌تواند جهت تعیین نوع و ارزش عوامل مؤثر بر تخمین و پیش‌بینی مقادیر فرسایش از طریق مدل‌های مختلف استفاده نموده و در نهایت نتایج را به صورت لایه رقومی زمین آمار ارائه دهد (Droogers & Kite, 2002: 1543).

### پیشینه پژوهش

مطالعات متعددی جهت بررسی فرسایش خاک براساس مدل SLEMSA صورت گرفته است، به طوری که: لینارس<sup>۱</sup> (۱۹۹۰) با استفاده از مدل SLEMSA به بررسی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر خطر فرسایش خاک در حوضه رودخانه زامبزی<sup>۲</sup> پرداخت و بیان نمود که این حوضه با نرخ فرسایشی کمتر از ۱۰ تن در هکتار در سال در نواحی دارای پوشش گیاهی طبیعی در معرض خطر کم قرار دارد، اگرچه ممکن است به صورت محلی فرسایش‌پذیری بالا در دامنه‌هایی با شیب تند نیز مشاهده شود. ایگیو<sup>۳</sup> و همکاران (۱۹۹۹) کاربرد مدل‌های USLE و SLEMSA در برآورد فرسایش و تهیه نقشه پهنه‌بندی پتانسیل خطر فرسایش در جنوب غرب نیجریه را

عبارت‌اند از نیروهای عمل‌کننده مانند آب، باد، یخچال و انسان که به عوامل فرسایش دهنده معروف‌اند؛ و دسته دیگر عواملی هستند که در کیفیت عمل این نیروها نقش بسزایی دارند مانند جنس، ساختمان و شیب زمین که به عنوان عوامل فرسایش‌پذیر نامیده می‌شوند (رامشت و شاه‌زیدی، ۱۳۹۰: ۱۳۰).

مدل‌سازی عوامل زمانی و مکانی مؤثر در فرسایش خاک در تعیین عوامل تأثیرگذار درونی و بیرونی کاربری زمین مهم است (Kinzel, 2001: 11). دیدگاه رایج این است که سطح زمین در حوضه آبریز به صورت مجموعه‌ای از شبکه سلولی مجسم می‌گردد و معادله جهانی فرسایش خاک را برای پیش‌بینی مقدار فرسایش در این شبکه سلولی به کار گرفته می‌شود (Wischmeier & Smith, 1965: 1978). جهت ارزیابی خطر فرسایش منطقه‌ای و حوضه‌ای خاک، مدل‌های متنوعی ارائه شده است که می‌توان به مدل‌های تجربی و مکانیکی، پویا و ایستا، جبری و تصادفی، فضایی، کمی و کیفی و مدل‌های زمانی کوتاه و بلندمدت اشاره نمود (Gitas et al., 2009: 40). این مدل‌ها دامنه وسیعی از عوامل مؤثر در فرسایش خاک نظیر عوامل طبیعی و انسانی را شامل می‌شوند (Stocking et al., 1998: 169). معیارهای اصلی انتخاب مدل‌های مزبور شامل هدف، داده‌های موجود، زمان و هزینه آن می‌باشد. با وجود این، دامنه نرخ فرسایش خاک به واسطه تباین فضایی بالای فاکتورهای مؤثر که باعث اختلاف در اندازه‌گیری رسوبات برون‌یابی شده در یک منطقه وسیع می‌شود، بسیار نامشخص است (Helming et al., 2005: 131). بنابراین اکثر مدل‌های ارزیابی خطر فرسایش خاک به صورت منطقه‌ای و حوضه‌ای تدوین و مورد ارزیابی قرار گرفته است و هر یک دارای محاسن و معایب هستند، اما پارامترهای مورد استفاده در آنها در بیشتر موارد از عمومیت و یکنواختی خاصی برخوردار است. در نتیجه، این مدل‌ها برای منطقه مطالعاتی ویژه با تغییرات غیرمعنی‌دار خصوصیات محیطی و پارامترهای نمونه‌برداری خاص کارایی دارند که در صورت تغییرات معنی‌دار در خصوصیات محیطی هر منطقه، بایستی

1. Leenaers  
2. Zambezi  
3. Igwe

فعالیت‌های کشاورزی مختلف را بهتر از SLEMSA شبیه‌سازی کند. گندمکار (۲۰۰۹) با تلفیق سیستم اطلاعات جغرافیایی و SLEMSA به برآورد میزان فرسایش در حوضه آبریز موسی‌آباد تیران در غرب اصفهان پرداخت و بیان نمود که این حوضه با دامنه فرسایشی ۰/۰۰۰۰۲۱ تا ۷۰۷ تن در هکتار در سال مواجه است و نیازمند برنامه حفاظتی از اکوسیستم خاک می‌باشد. شاه‌زیدی و همکاران (۲۰۱۲) با بهره‌گیری از مدل SLEMSA به مطالعه فرسایش در حوضه وریشگان می‌پردازد و عامل شیب را مهم‌ترین پارامتر مؤثر در فرسایش خاک این منطقه می‌داند. بریتزکه<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از تلفیق سیستم اطلاعات جغرافیایی با مدل‌های SLEMSA و USLE به برآورد فرسایش خاک در حوضه آبخیز سد واگن‌دریفت<sup>۹</sup> در آفریقای جنوبی پرداختند و بیان کردند که این روش ترکیبی امکان مطالعات مکانی فرسایش در حوضه‌های متعدد با اندازه‌های متفاوت را فراهم آورده و همچنین مقدار فرسایش در این حوضه بر اساس مدل USLE برابر ۰/۶ تا ۱۶/۲ و بر اساس مدل SLEMSA برابر با ۲/۴ تا ۳۰/۸ تن در هکتار در سال برآورد می‌گردد. کریستو<sup>۱۰</sup> و همکاران (۲۰۱۴) بر اساس ویژگی‌های زمین-فضایی مدل‌های برآورد فرسایش، آنها را طبقه‌بندی نمودند و نتیجه گرفتند که برای دست‌کاری مقیاس جهت افزایش کارایی مدل تخمین فرسایش، دو نظریه فضایی سلسله مراتبی و فراکتال<sup>۱۱</sup> برای بهره‌برداری بیشتر در آینده پیشنهاد می‌شود. همچنین با توجه به برنامه‌های کاربردی فرسایش، تجزیه و تحلیل عدم قطعیت در سیستم اطلاعات جغرافیایی در نظر گرفته شود تا جهت بهبود عملکرد مدل فرسایشی مناسب باشد. کیان‌پور (۱۳۷۶) در بررسی پتانسیل فرسایش حوضه چالستر در استان چهارمحال و بختیاری با تأکید بر مدل SLEMSA به این نتیجه رسید که در حفاظت از منابع آبخیز در اغلب مواقع عملیات مکانیکی توأم با عملیات

بررسی نمودند و بیان داشتند که اگرچه USLE موقعیت‌های میدانی را به صورت واقعی‌تر منعکس می‌کند اما SLEMSA مقادیر دقیق‌تری از فرسایش خاک ارائه می‌دهد. فیستیکوگلو و هارمانسیوگلو<sup>۱</sup> (۲۰۰۲) با تلفیق سیستم اطلاعات جغرافیایی و معادله جهانی فرسایش خاک به تخمین فرسایش خاک حوضه رودخانه گدیز<sup>۲</sup> در غرب ترکیه پرداختند و بیان کردند که این روش به علت فقدان داده در کشورهای در حال توسعه در کاربرد داده‌های مشخصات خاک، کاربری اراضی و پوشش گیاهی ناکارآمد است. ایگیو<sup>۳</sup> (۲۰۰۲) خطر فرسایش آبی در دشت مرطوب بنین<sup>۴</sup> در غرب آفریقا را با استفاده از مدل‌های SLEMSA و USLE مورد ارزیابی قرار داد و نتیجه‌گیری کرد که SLEMSA نسبت به USLE برای تخمین فرسایش خاک از شاخص‌های کمتری بهره‌گیری می‌کند، اما به دلیل ارائه نتایج SLEMSA به صورت نقشه و نزدیکی با نتایج طرح‌های مشابه، کارایی بهتری با شرایط مناطق حاره‌ای دارد. سورین<sup>۵</sup> (۲۰۰۳) جهت برآورد فرسایش خاک در حوضه سیمتو<sup>۶</sup> جزیره سسیل به ارزیابی مدل‌های USLE، RUSLE و SLEMSA و تلفیق آنها با سیستم اطلاعات جغرافیایی پرداخت و به اهمیت انتخاب مدل بر اساس اثبات کیفیت آن معتقد است. لنتسوان<sup>۷</sup> (۲۰۰۴) جهت پایش و بررسی فرسایش خاک برای مراقبت از زمین در جنوب آفریقا، مدل‌های RUSLE و SLEMSA و روش ACED را ارزیابی نمود و نتیجه گرفت که ACED می‌تواند به صورت یک ابزار فراگیر جهت شناسایی مناطق بحرانی فرسایش در دامنه ناهمواری‌ها به صورت مشترک به کار گرفته شود. همچنین مدل‌های RUSLE و SLEMSA ابزارهای مناسبی برای پایش و ارزیابی فرسایش خاک در پروژه‌های مراقبت از زمین هستند که در این خصوص RUSLE می‌تواند تأثیر

1. Fistikoglu and Harmancioglu
2. Gediz
3. Igue
4. Benin
5. Svorin
6. Simeto
7. Lentsoane

8. Breetzke
9. Wagendrift
10. Christos
11. Fractal

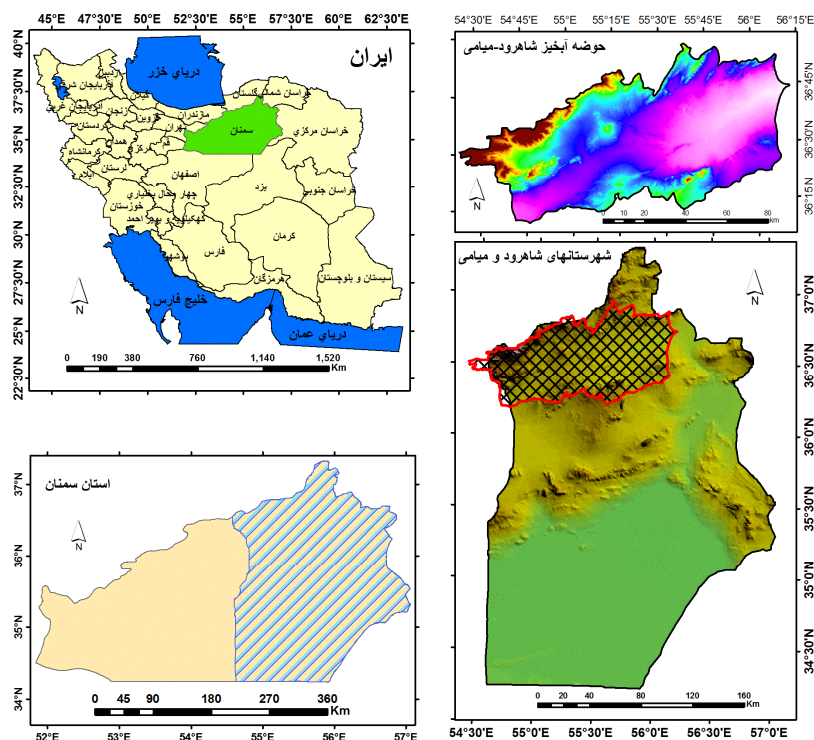
برای این حوضه، ۶۶۷ تن در هکتار در سال برآورد شده است. همچنین نتایج به کارگیری مدل TOPSIS در بررسی وضعیت فرسایشی حوضه رومشگان نیز نشان می‌دهد که عامل توپوگرافی (شیب) بیش از سایر عوامل در فرسایش‌پذیری حوضه مؤثر بوده و نقش اصلی را بر عهده دارد. انتظاری و همکاران (۱۳۹۱) از طریق مدل SLEMSA به ارزیابی پتانسیل فرسایش خاک در حوضه آبخیز دستکن در شمال اصفهان پرداختند و بیان نمودند که پنج کانون فرسایشی در نیمه شمالی منطقه مشاهده می‌شود. بررسی عوامل مؤثر نیز نشان داد که اصلی‌ترین عامل فرسایش در کانون‌های پرخطر در درجه اول انرژی جنبشی باران بوده و شیب زمین و پوشش گیاهی در درجات بعدی اهمیت قرار دارند. همچنین قابلیت فرسودگی خاک نیز با آن که در وسعت زیادی از منطقه مهم‌ترین عامل مؤثر در فرسایش است، ولی در کانون‌های پرخطر نقش چندانی ندارد. تقوی و هاشمی (۱۳۹۲) با استفاده از مدل SLEMSA به محاسبه میزان فرسایش و بررسی عوامل مؤثر بر آن در حوضه آبخیز هویر در شمال تهران پرداختند و بیان نمودند که عامل شیب بیشتر از سایر عوامل در فرسایش این حوضه مؤثر بوده است. سالاری و همکاران (۱۳۹۲) به وسیله مدل SLEMSA میزان خطر فرسایش در حوضه آبریز سیرچ یکی از زیرحوضه‌های شهید در استان کرمان را بررسی کردند و با به کارگیری تکنیک‌های آماری و ترسیم در محیط ArcGIS مبادرت به تهیه نقشه هم ارزش فرسایش خاک منطقه نمودند که شاخص ضریب توپوگرافی مهم‌ترین عامل مؤثر در فرسایش‌پذیری حوضه سیرچ می‌باشد. انتظاری و غلام‌حیدری (۱۳۹۳) در ارزیابی فرسایش خاک در حوضه تنگ سرخ شیراز به مقایسه مدل‌های SLEMSA و CORINE پرداختند و بیان داشتند که CORINE با توجه به این که به جزئیات بیشتری می‌پردازد، نسبت به SLEMSA از دقت بیشتری برخوردار است و شیب، مهم‌ترین عامل در افزایش میزان فرسایش در حوضه تنگ سرخ است.

#### منطقه مطالعاتی

بیولوژیک نتایج بهتری را به دنبال خواهد داشت. پورمحمدی املشی (۱۳۸۰) با بررسی مقایسه‌ای فرسایش در حوضه آبریز شلمان رود در استان گیلان از طریق مدل‌های PSIAC و SLEMSA به این نتیجه رسید که انرژی جنبشی باران و شیب زمین بیشترین تأثیر را در شدت فرسایش خاک در سطح حوضه بر جای می‌گذارد و نتایج محاسبات SLEMSA به واقعیت نزدیک‌تر است. اسکندری (۱۳۸۰) در بررسی کارایی مدل SLEMSA جهت برآورد فرسایش رسوب در حوضه سد زاینده‌رود به وسیله سیستم اطلاعات جغرافیایی، ضمن تهیه نقشه پهنه‌بندی فرسایش و تحلیل تأثیر عوامل مؤثر بر آن، میزان فرسایش را در حدود ۴۲/۱۸ تن در کیلومتر مربع برآورد کرد و بیان نمود که بیشترین میزان پتانسیل فرسایش در مناطق اطراف دریاچه سد و مناطق مرتفع غربی دیده می‌شود. میرزائی (۱۳۸۰) به ارزیابی فرسایش خاک در حوضه آبخیز دشت نجف آباد با تأکید بر مدل SLEMSA پرداخت و به این نتیجه دست یافت که میزان سالانه فرسایش خاک از حداقل صفر تا حداکثر ۱۷۰ تن در کیلومتر مربع در نوسان است. بر این اساس، متوسط سالانه خاک فرسایش یافته ۱۳/۷۲ تن در کیلومتر مربع برآورد می‌گردد که نسبت به مقدار متوسط سالانه ۱۵۰۰ تن در کیلومتر مربع در سطح کشور بسیار پایین است. گندمکار و همکاران (۱۳۸۷) با استفاده از مدل SLEMSA به بررسی فرسایش خاک در حوضه آبریز موسی‌آباد تیران در غرب اصفهان پرداختند و بیان داشتند که این حوضه با مقادیر فرسایشی حداقل ۰/۰۰۰۰۲۱ تا حداکثر ۷۰۷ تن در هکتار در سال روبرو می‌باشد. انتظاری نجف‌آبادی و غلامی (۱۳۹۱) با استفاده از مدل‌های TOPSIS و SLEMSA برآورد میزان فرسایش در حوضه رومشگان از زیرحوضه‌های کرخه در استان لرستان را مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که نقشه پراکندگی عوامل مؤثر در مدل SLEMSA نشان می‌دهد که پارامترهای شیب و فرسایش‌پذیری به ترتیب با ۷۷ و ۲۲ درصد مهم‌ترین عوامل مؤثر در نرخ فرسایش حوضه هستند و مقدار کل هدررفت خاک

یکی از مهم ترین قطب های اقتصادی-کشاورزی استان محسوب می شوند. بنابراین شناسایی و برآورد مؤلفه های فرسایشی و مقادیر آنها و نهایتاً تهیه نقشه پهنه بندی فرسایشی این محدوده جهت برنامه ریزی و مدیریت محیط از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. حوضه آبخیز شاهرود-میامی از لحاظ جغرافیایی در محدوده ای به عرض ۳۶ درجه تا ۳۷ درجه شمالی و طول ۵۴ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۱۵ دقیقه شرقی گسترده شده است (شکل ۱).

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش حوضه آبخیز شاهرود-میامی می باشد که با مساحت ۷۶۸۴/۸۹۶ کیلومتر مربع در شهرستان های شاهرود و میامی واقع شده است. این شهرستان ها با جمعیت ۲۳۸۸۳۰ نفری (درگاه ملی آمار ایران، سرشماری سال ۱۳۹۰) دارای بخش عمده ای از کانون های سکونت گاهی استان سمنان شامل شهرهای شاهرود، بسطام و میامی هستند که در طی سال های اخیر از لحاظ جمعیتی و فعالیت های تولیدی روند توسعه چشم گیری داشته اند و به عنوان



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز شاهرود - میامی

نخستین بار توسط استوکینگ و الویل<sup>۲</sup> در اوایل دهه ۱۹۷۰ تدوین و ارائه شده است که ضمن تلفیق داده های پایه ای و ساده، به روابط محیطی به ویژه پوشش گیاهی، ریزش باران، توپوگرافی و مشخصات خاک تأکید دارد. در مجموع این مدل دربرگیرنده شاخص های توپوگرافی (شیب و طول دامنه)، عوامل اقلیمی (انرژی جنبشی ناشی از سقوط دانه های باران)، پوشش گیاهی (نقش حفاظتی گیاهان) و مشخصات

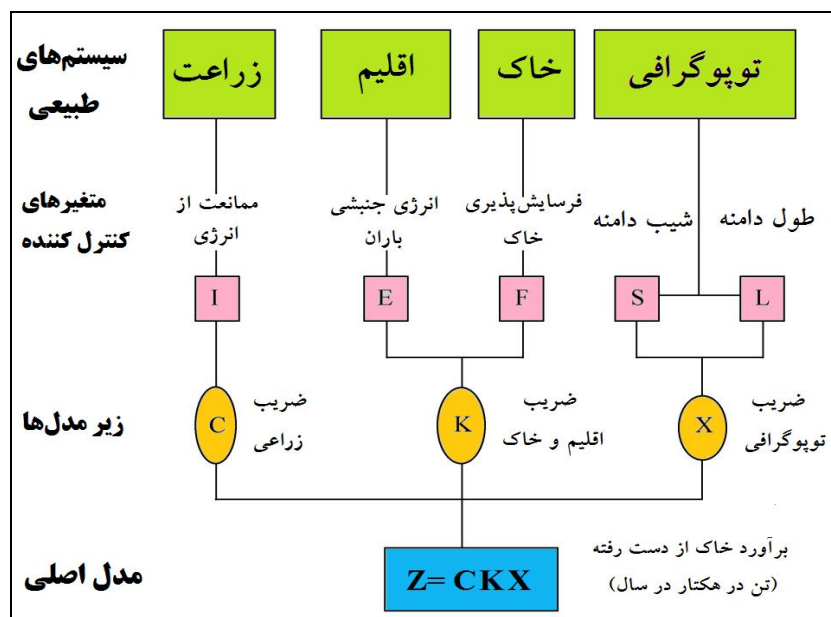
## مواد و روش ها

ابتدا به کمک تصاویر گوگل ارث<sup>۱</sup> و نقشه های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ شاهرود، بسطام، میامی، علی آباد، رامیان، ری آباد، عباس آباد، جاجرم، و دامغان، محدوده مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفت و موقعیت آن تعیین حدود شد. سپس پارامترهای مؤثر در تخمین مقادیر فرسایش خاک حوضه آبخیز شاهرود - میامی براساس مدل SLEMSA تعیین و برآورد گردید. این مدل برای

2. Stocking & Elwell

1. Google Earth

خاک (قابلیت فرسایش پذیری خاک) می باشد (شکل ۲).



شکل ۲- پارامترها و فلوچارت اجرایی مدل SLEMSA (Stocking et al., 1988: 171; Igue, 2002: 276)

پوشش گیاهی منطقه، نقشه کاربری اراضی ملاک عمل قرار گرفت. برای این منظور تصاویر سال ۲۰۱۴ گوگل ارث<sup>۵</sup> به دلیل داشتن توان تفکیک مکانی بالا و به روز بودن، داده‌های مبنا جهت تهیه لایه کاربری اراضی قرار گرفتند. بدین صورت که ابتدا محیط نرم افزار Google Earth بر روی تصاویر سال ۲۰۱۴ ثابت گردید و سپس با استفاده از ابزارهای دیجیتایز<sup>۶</sup> شروع به تفکیک و رقومی سازی هر نوع کاربری به صورت نظارتی در قالب لایه‌های برداری گردید.

نقشه رده بندی خاک منطقه که مستخرج از داده‌های جهاد کشاورزی می باشد، داده پایه‌ای برای تهیه لایه فرسایش پذیری خاک، ملاک عملکرد قرار گرفت و در محیط نرم افزار ArcGIS در قالب فرمت برداری رقومی سازی شد. لایه‌های رقومی سایر پارامترها نیز بر اساس مقادیر محاسبه شده از طریق انجام محاسبات آمار فضایی و زمین آماری در قالب فرمت‌های رستری بر اساس مدل تخمین فرسایش SLEMSA تهیه گردید. در نهایت لایه‌های رقومی شاخص‌های مؤثر با

نحوه تهیه لایه‌های اطلاعاتی شاخص‌های مورد نیاز برای تدوین نقشه پهنه بندی فرسایشی در محدوده مطالعاتی در محیط نرم افزار ArcGIS بدین صورت انجام گرفت: نخست، مدل ارتفاع رقومی آن از مدل ارتفاع رقومی ایران با اندازه سلول ۳۰ متری (تهیه شده شد و بر اساس شکست‌های طبیعی<sup>۲</sup>، به ۹ کلاس ارتفاعی طبقه بندی گردید. سپس لایه شیب از روی مدل رقومی ارتفاع منطقه تهیه گردید. ترسیم لایه هم بارش منطقه از طریق رابطه بارش و ارتفاع صورت گرفت. گرادیان<sup>۳</sup> بارش در منطقه بر اساس اقلیمی ایستگاه‌های هواشناسی منطقه مطالعاتی و مناطق هم جوار از سایت سازمان هواشناسی کشور<sup>۴</sup> از بدو تأسیس ایستگاه‌ها تا سال ۱۳۹۲ محاسبه گردید (جدول ۱).

تأثیر حفاظتی پوشش گیاهی، بستگی به نوع گونه و درصد تراکم پوشش دارد که جهت تهیه لایه رقومی

5. Google Earth  
6. Digitizer

1. USGS  
2. Natural break  
3. Gradient  
4. www.weather.ir

یکدیگر تلفیق و منجر به تهیه نقشه فرسایش خاک حوضه آبخیز شاهرود - میامی شد.

جدول ۱- مشخصات و آمار اقلیمی ایستگاه‌های هواشناسی منطقه مطالعاتی و مناطق هم‌جوار

نام ایستگاه	سال تأسیس	طول جغرافیایی (شرقی)	عرض جغرافیایی (شمالی)	ارتفاع از سطح دریا (m)	بارش سالیانه (mm)	دمای سالیانه (C°)
فولاد محله	۱۳۷۳	۵۳°۴۳'	۳۶°۰۴'	۱۸۶۰	۱۸۹/۲	۱۰
چهل دختر	۱۳۵۰	۵۵°۱۸'	۳۶°۴۲'	۱۵۲۰	۱۳۹/۳	۱۲/۵۱
بسطام	۱۳۷۵	۵۵°۰۰'	۳۶°۲۹'	۱۳۶۶	۱۴۴/۲	۱۲/۹
شاهرود	۱۳۳۰	۵۴°۵۷'	۳۶°۲۵'	۱۳۴۵/۳	۱۵۴/۴	۱۴/۶
دامغان	۱۳۳۶	۵۴°۱۹'	۳۶°۱۳'	۱۱۷۰	۱۱۲	۱۵/۳۲
سمنان	۱۳۴۴	۵۳°۳۳'	۳۵°۳۵'	۱۱۳۰	۱۴۰/۸	۱۸/۱
بیارجمند	۱۳۷۰	۵۵°۵۰'	۳۶°۰۳'	۱۱۰۶/۲	۱۲۶/۹	۱۶
کوهان	۱۳۶۳	۵۵°۵۳'	۳۶°۳۷'	۱۰۰۴	۱۲۴/۵	۱۴/۲۷
حسینان	۱۳۶۳	۵۴°۳۴'	۳۵°۱۳'	۸۹۵	۸۱/۶	۲۰/۴۸

### یافته‌ها

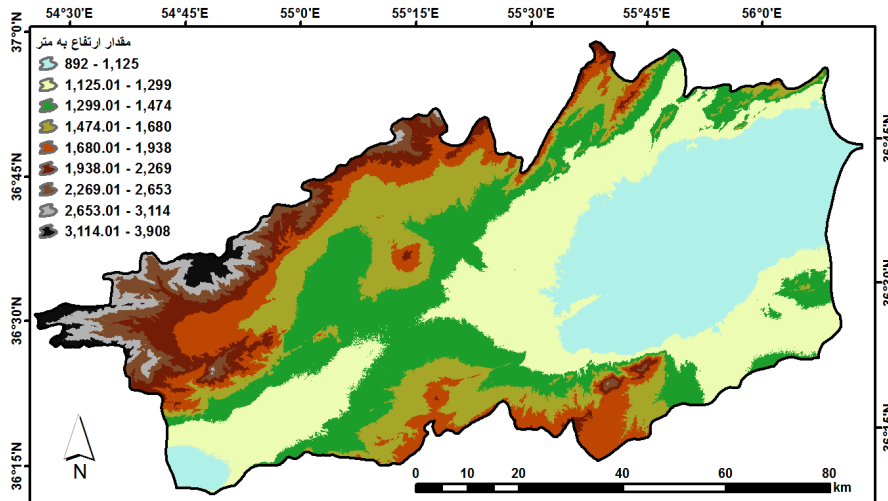
فرسایش از جمله عواملی است که توان اکولوژیک و بیولوژیک اکوسیستم را کاهش داده و باعث تخریب زمین می‌شود. در نتیجه، این امر تلاش متخصصان و سازمان‌های ذیربط را برای شناسایی کانون‌های فرسایشی، عوامل مؤثر بر آن و جلوگیری از اثرات مخرب فرسایش ضروری می‌سازد. با توجه به فرایند اجرایی مدل SLEMSA (شکل ۲)، این مدل برای آیندی از سه پارامتر ضریب توپوگرافی (X)، خاک از دست رفته توسط قابلیت فرسایش پذیری خاک و انرژی جنبشی باران (K)، و خاک از دست رفته از سطح عریان (C) می‌باشد. جهت محاسبه ضریب توپوگرافی دو مؤلفه میزان شیب به درصد (S) و طول دامنه به متر (L) مدنظر است. برای محاسبه متوسط شیب حوضه از رابطه (۱) استفاده می‌شود که در آن CI: فاصله بین منحنی میزان به متر و Cn: تعداد تقاطعات منحنی میزان در یک کیلومتر می‌باشد (Wentworth, 1930; Stocking et al., 1988: 173).

$$S = \frac{Cn \times CI}{636.6} \times 100 \quad \text{رابطه (۱)}$$

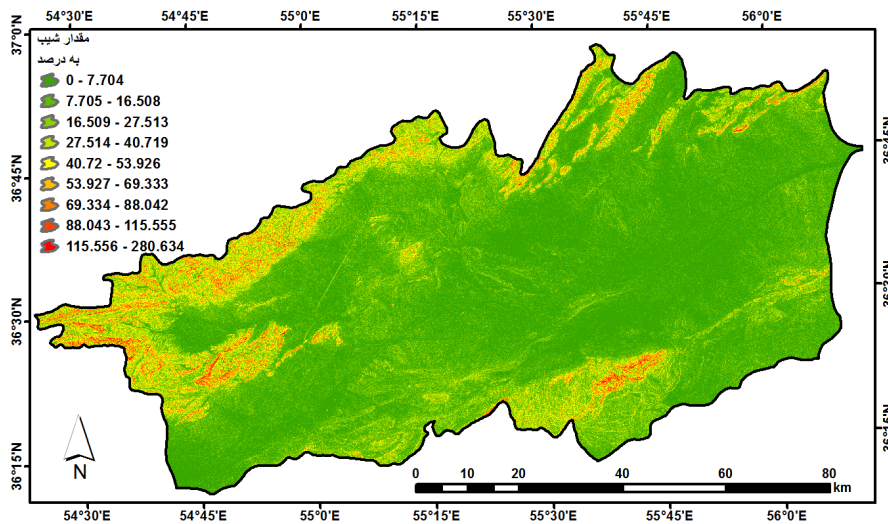
نتیجه حاصل از تهیه و ترسیم نقشه شیب منطقه به صورت شکل (۴) می‌باشد. از آنجایی که حوضه مطالعاتی در دامنه‌های جنوبی البرز شرقی واقع شده است، بیشترین ارتفاعات در بخش‌های شمال و شمال غرب حوضه، گستردگی دارند. این نوار کوهستانی با حداکثر ارتفاع ۳۹۰۸ متر قله شاهرود را در خود جای داده است. در مقابل کمترین ارتفاع با ۸۹۲ متر به بخش شرقی تعلق داشته که نقطه خروجی حوضه مطالعاتی می‌باشد (شکل ۳). متناظر با پراکنش حداکثر ارتفاعات، بیشترین شیب با مقدار ۲۸۰ درصد نیز منطبق بر نوار کوهستانی شمال و شمال غرب، و کمترین شیب مقدار با مقدار کمتر از ۷ درصد منطبق بر نواحی اطراف نقطه خروجی حوضه است (شکل ۴). نحوه محاسبه طول دامنه (L) نیز به صورت رابطه (۲) می‌باشد (Gitas et al., 2009: 46)، که در آن As: مساحت حوضه به مترمربع و مقادیر m از طریق میزان شیب و جدول (۲) استخراج می‌گردد.

$$L = 1.4 \left( \frac{As}{22.13} \right)^m \quad \text{رابطه (۲)}$$





شکل ۳- نقشه طبقات ارتفاعی حوضه مطالعاتی که منتج از مدل رقومی ارتفاعی است



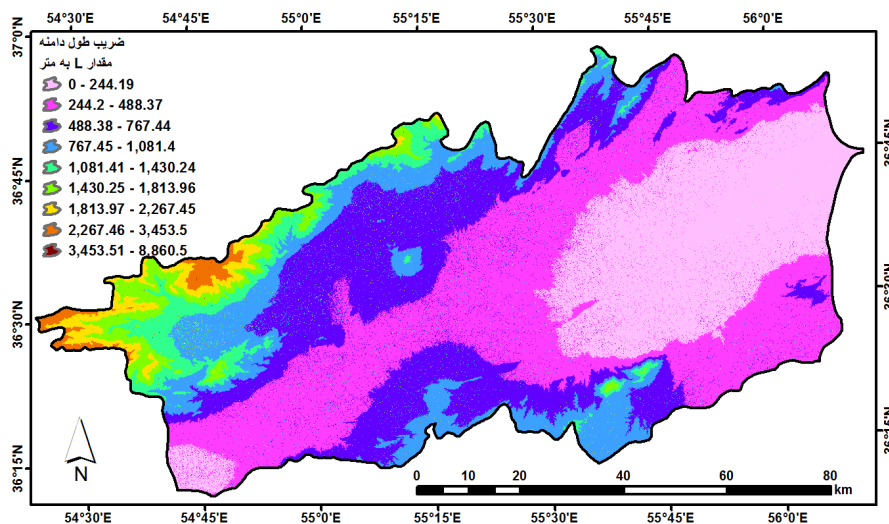
شکل ۴- نقشه شیب حوضه مطالعاتی که منتج از مدل رقومی ارتفاعی است

جدول ۲: مقادیر متناظر m برای شیب‌های متفاوت (Stone & Hilborn, 2000: 4; Kinnell, 2001: 11)

شیب به درصد	$s < 1$	$1 < s < 3$	$3 < s < 5$	$s > 5$
مقدار m	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵

مرتفع اختصاص دارد که این ویژگی می‌تواند به دلیل شیب زیاد این مناطق و برخوردار بودن از مقادیر بالای m براساس جدول (۲) و دوری از مبنای محاسبات یعنی نقطه خروجی حوضه باشد.

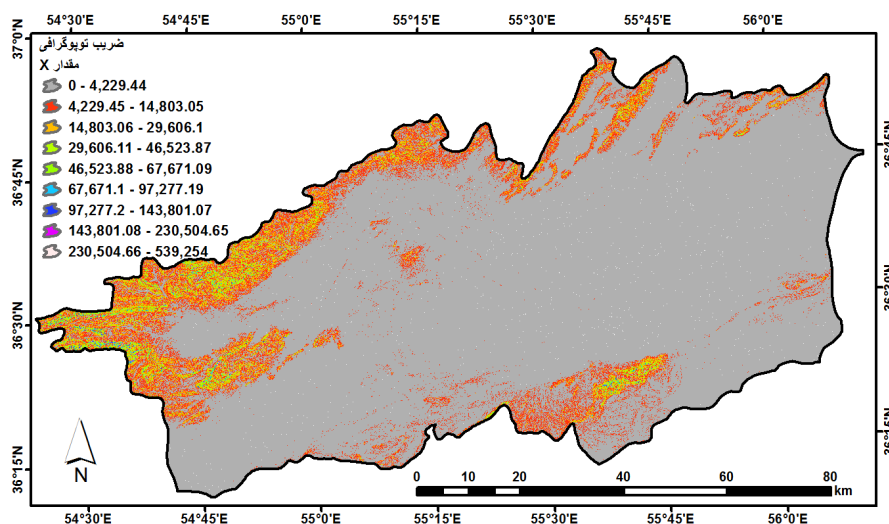
نتایج حاصل از محاسبه طول دامنه بر اساس اعمال رابطه (۲) روی نقشه شیب حوضه (شکل ۴)، به صورت شکل (۵) می‌باشد. همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌گردد بیشترین مقادیر طول دامنه به مناطق



شکل ۵: نقشه مقادیر طول دامنه در حوضه مطالعاتی

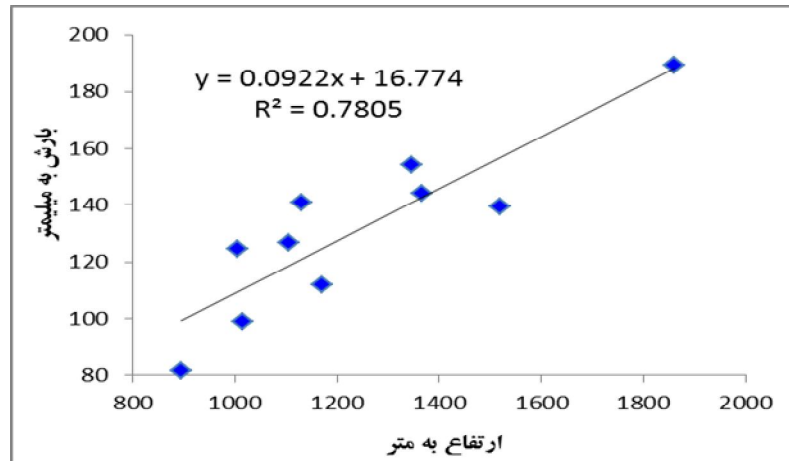
رابطه (۳):  $X = L^{0.5} (0.76 + 0.53S + 0.076S^2) / 25.65$   
 نتایج حاصل از محاسبه ضریب توپوگرافی بر اساس اعمال رابطه (۳) بر روی نقشه‌های شیب و طول دامنه در شکل (۶) به تصویر کشیده شده است. در این نقشه نیز بیشترین مقادیر ضریب توپوگرافی به دلیل بالا بودن مقادیر شیب و طول دامنه به ارتفاعات شمالی و شمال غربی و بخشی از ارتفاعات جنوبی منطقه اختصاص دارد (شکل ۶).

برآیند مقادیر شیب (S) و طول دامنه (L) بر اساس رابطه غیرخطی بین آنها که در معادله (۳) تدوین شده است، ضریب توپوگرافی (X) را نتیجه می‌دهد (Stocking et al., 1988: 180; Igwe et al., 1999: 42). این ضریب بیانگر تأثیر عوامل ناهمواری و شکل زمین در فرسایش خاک است که از آن به عنوان ضریب توپوگرافی یاد می‌شود. به عبارتی، میزان خاک از دست رفته ناشی از عوامل ناهمواری و شکل زمین نظیر شیب و طول دامنه، توسط متغیر X تبیین می‌گردد (رابطه ۳).

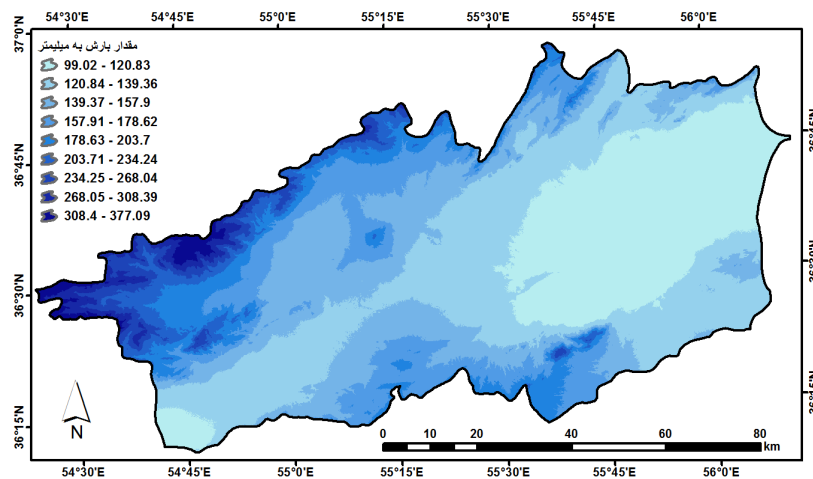


شکل ۶- نقشه ضریب توپوگرافی حوضه مطالعاتی

(خاک از دست رفته ناشی از عوامل ناهمواری و شکل زمین)



شکل ۷- رابطه خطی مستقیم بین ارتفاع و بارش



شکل ۸- نقشه هم‌بارش حوضه مطالعاتی

جهت برآورد انرژی جنبشی باران، ابتدا نقشه هم‌بارش منطقه از طریق اعمال گرادیان بارش و ارتفاع که بر اساس داده‌های اقلیمی ایستگاه‌های هواشناسی حوضه مطالعاتی و مناطق هم‌جوار محاسبه شده است (شکل ۷)، بر روی مدل رقومی ارتفاعی ترسیم گردید. نتایج حاصل از آن به صورت شکل (۸) می‌باشد که نمایانگر نقشه هم‌بارش حوضه مطالعاتی است.

سپس بر اساس رابطه (۵) که بیشتر بارندگی‌های منطقه از نوع بارش‌های رگباری با دانه‌های درشت هستند، نقشه پراکنش انرژی جنبشی باران (E) ترسیم گردید که نتیجه حاصل از آن به صورت شکل (۹) است. بر اساس اصل افزایش مقدار بارش با افزایش ارتفاع، بیشترین مقادیر بارش به نیمه شمالی منطقه،

برای محاسبه مقدار K (ضریب تأثیر اقلیم و خاک) دو فاکتور انرژی جنبشی باران (E) و قابلیت فرسایش پذیری خاک (F) لازم است. جهت محاسبه انرژی جنبشی باران با توجه به ویژگی‌های اقلیمی و رژیم بارشی منطقه از روابط (۴) و (۵) استفاده می‌شود که در این روابط P متوسط بارندگی سالیانه به میلی‌متر است (Stocking et al., 1988: 180; Igwe et al., 1999: 42).

رابطه (۴): برای مناطق نفوذپذیر با باران ریزدانه:

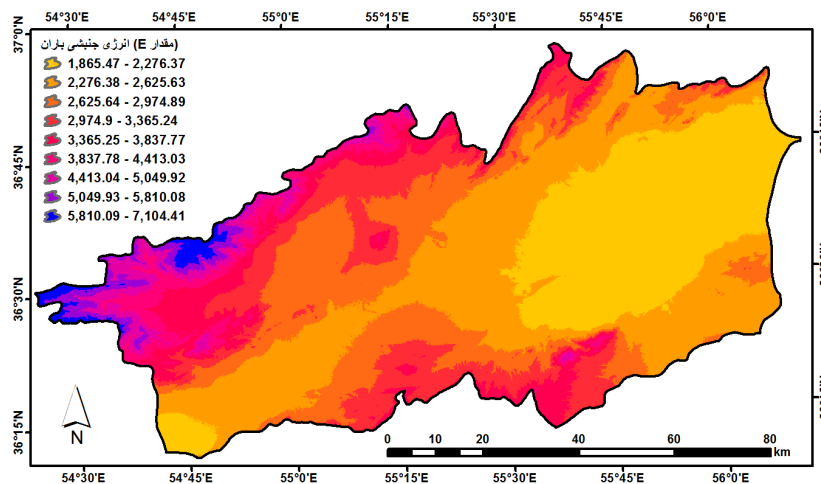
$$E = 17.368 \times P$$

رابطه (۵): برای اقلیم‌های رگباری:

$$E = 18.846 \times P$$

بارش و انرژی جنبشی باران نیز به مناطق پست و کم ارتفاع محدوده‌های مرکزی و شرقی حوضه مطالعاتی تعلق دارد (شکل ۹).

ارتفاعات البرز و کوه‌های شاهوار اختصاص دارد و به تبع آن بیشترین مقادیر انرژی جنبشی نیز در این مناطق مشاهده می‌گردد. در مقابل کمترین مقادیر



شکل ۹- نقشه پراکنش انرژی جنبشی باران در حوضه مطالعاتی

جدول ۳: مقادیر قابلیت فرسایش پذیری خاک بر اساس روش الویل (۱۹۷۸)

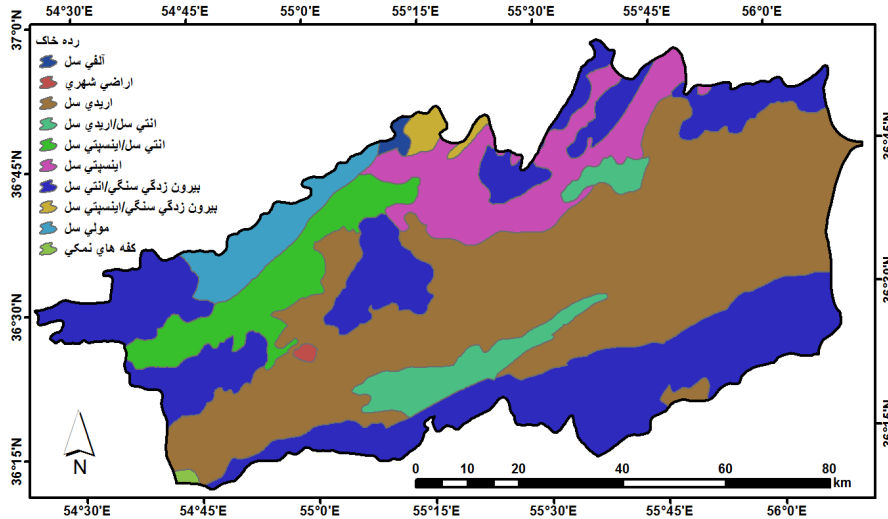
ویژگی‌های خاک	مقدار کمی	ردیف
خاک‌های سُدیک که از نظر شیمیایی پایداری بسیار کمی و جوپارهای متعددی دارند.	۱	۱
به ترتیب خاک‌های حد فاصل بین موارد ۱ و ۳ می‌باشند.	۲ تا ۶	۲
خاک‌هایی که به خوبی زهکش می‌شوند و نفوذپذیری بالا و مقاومت خوبی دارند.	۷	۳
خاک‌هایی که عامل مدیریت منجر به تغییر قابلیت فرسایش پذیری آنها شده است.	۸ تا ۱۰	۴

صورت شکل (۱۱) می‌باشد که مقادیر رقومی آن با توجه به رده خاک، دامنه عددی از ۱ تا ۹ را به خود اختصاص داده است. از آنجایی که رده خاک‌های آریدی سل<sup>۱</sup>، اینسپتی سل<sup>۲</sup> و انتی سل<sup>۳</sup> بر روی مناطق کوه‌پایه‌ای و دشتی با ارتفاع و شیب کم استقرار یافته‌اند از ضخامت بیشتری برخوردار بوده و پایداری و ثبات بیشتری دارند و فرسایش پذیری کمتری از خود نشان داده‌اند. در مقابل، خاک‌های ارتفاعات بالاتر که با بیرون زدگی‌های سنگی مخلوط شده‌اند به علت شیب بالا و ضخامت کمتر، ناپایدارتر هستند و فرسایش پذیری بیشتری دارند (شکل‌های ۱۰ و ۱۱).

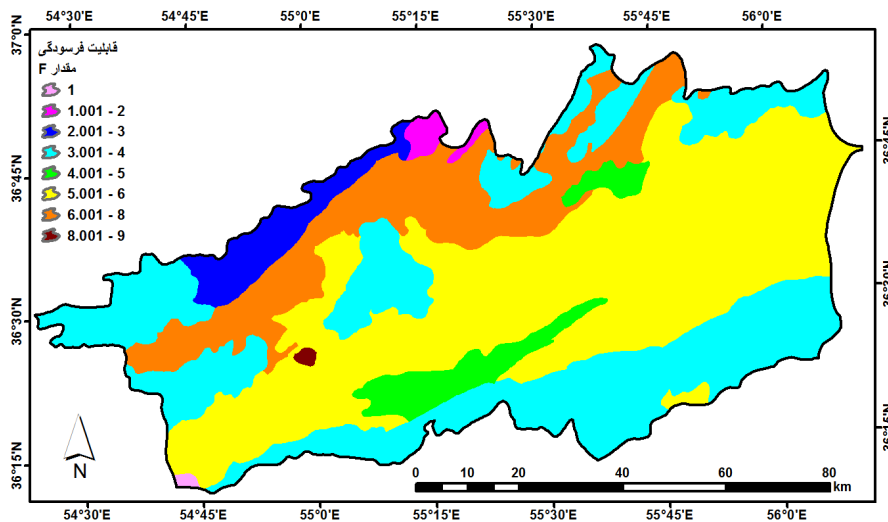
قابلیت فرسایش پذیری خاک معمولاً در مناطقی که عاری از پوشش گیاهی هستند ارزیابی می‌گردد و میزان آن برای هر واحد مکانی با مقدار خاک از دست رفته ناشی از فرسایش باران بیان می‌شود. مقادیر قابلیت فرسایش پذیری خاک از روش تفصیلی الویل<sup>۱</sup> (۱۹۷۸) که در مورد زیمباوه بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به کار گرفته شد (جدول ۳)، استخراج می‌گردد (رامشت، ۱۳۷۵: ۱۱۵). جهت تدوین نقشه پراکنش فضایی عامل قابلیت فرسایش پذیری خاک، ابتدا نقشه خاک‌شناسی حوضه (مستخرج از داده‌های جهاد کشاورزی) تهیه شد (شکل ۱۰). سپس بر اساس نوع و رده خاک موجود در حوضه، بر اساس جدول (۳) این نقشه رقومی‌سازی و تبدیل به داده رستری گردید. نتایج حاصل از آن به

2. Aridisols
3. Enceptisols
4. Entisols

1. Elwell



شکل ۱۰- نقشه رده خاک حوضه مطالعاتی



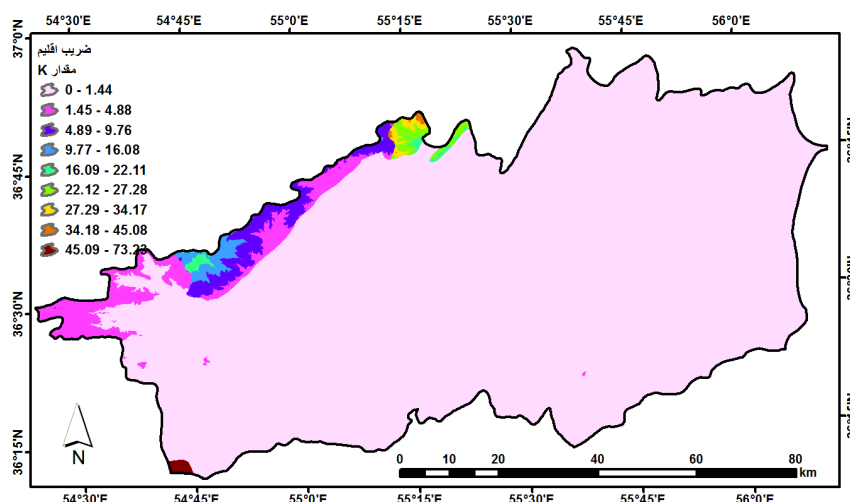
شکل ۱۱- نقشه پراکنش مکانی قابلیت فرسودگی بر اساس رده خاک

می‌گردد اکثریت سطح حوضه دارای مقادیر  $K$  کمتر از  $1/44$  می‌باشند که عموماً منطبق بر نواحی کم ارتفاع و دشتی منطقه به علت شیب کم و خاک ضخیم و پایدار می‌باشد. در مقابل بیشترین مقادیر ضریب اقلیم به صورت نواری با جهت شمال شرقی - جنوب غربی در شمال و شمال غرب منطقه کشیده شده است. این نوار منطبق بر کوهستان‌های شمالی منطقه (توده کوهستانی البرز) بوده و دارای بیشترین مقادیر بارش، بیشترین شیب، و خاک‌هایی با ضخامت کم و ناپایدار می‌باشد (شکل ۱۲).

برآیند مقادیر انرژی جنبشی باران ( $E$ ) و قابلیت فرسایش‌پذیری خاک ( $F$ ) براساس رابطه (۶)، عامل اقلیمی ( $K$ ) را نتیجه می‌دهد (Stocking et al., 1988: 42; Igwe et al., 1999: 178).  
رابطه (۶):

$$K = \exp[(0.4681 + 0.7663F) \times \ln E + 2.884 - 8.1209F]$$

نتایج حاصل از برآورد ضریب اقلیم ( $K$ ) بر اساس اعمال رابطه (۶) بر روی نقشه‌های انرژی جنبشی باران و قابلیت فرسایش‌پذیری خاک در شکل (۱۲) به تصویر کشیده شده است. همان گونه که مشاهده



شکل ۱۲- نقشه پراکنش مکانی عامل اقلیمی در حوضه مطالعاتی

پوشش گیاهی (i) با استفاده از جدول (۴) و روابط (۷) و (۸) صورت می‌گیرد.

پارامتر C در بردارنده میزان خاک از دست رفته در سطوح عریان و تأثیر پوشش گیاهی در حفاظت از خاک می‌باشد. محاسبه آن از طریق اندازه‌گیری کمیت

جدول ۴: چگونگی محاسبه کمیت پوشش گیاهی (Stocking et al., 1988: 175)

مقادیر i به درصد		تعداد روزهای چرای دام در هکتار	وضعیت مرتع از نظر چرای دام
بارندگی تا ۸۰۰ میلی‌متر	بارندگی تا ۶۰۰ میلی‌متر		
۹۰	۷۰	۱۰۰ تا ۰	ضعیف
۶۰	۴۰	۳۰۰ تا ۱۰۰	متوسط
۳۰	۲۰	بیشتر از ۳۰۰	قوی

(مستخرج از تصاویر گوگل ارث<sup>۱</sup>) تهیه شد (شکل ۱۳). سپس بر اساس نوع کاربری و تراکم پوشش گیاهی موجود در حوضه و طبق جدول (۴)، این نقشه رقوم‌سازی گردید. در نهایت مقادیر پارامتر C، با توجه به وضعیت مرتع و مقدار بارندگی کمتر از ۶۰۰ میلی‌متر بر اساس رابطه (۷) تخمین زده شد که نتایج حاصل از آن به صورت شکل (۱۴) می‌باشد. همان گونه که مشاهده می‌گردد بیشترین مقدار خاک از دست‌رفته در سطوح عریان به مناطقی اختصاص دارد که کمترین مقدار پوشش گیاهی را دارند. به عبارت دیگر از منظر معیار C، کاربری‌های اراضی بایر و مرتع فقیر با دارا بودن مقادیر ۶۶ تا ۱۲۱/۵۱ حداکثر مقدار خاک

با استخراج مقدار i از جدول (۴) و قراردادن آن در روابط (۷) و (۸) مقدار خاک از دست رفته در سطوح عریان (C) به دست می‌آید (Stocking et al., 1988: 179).

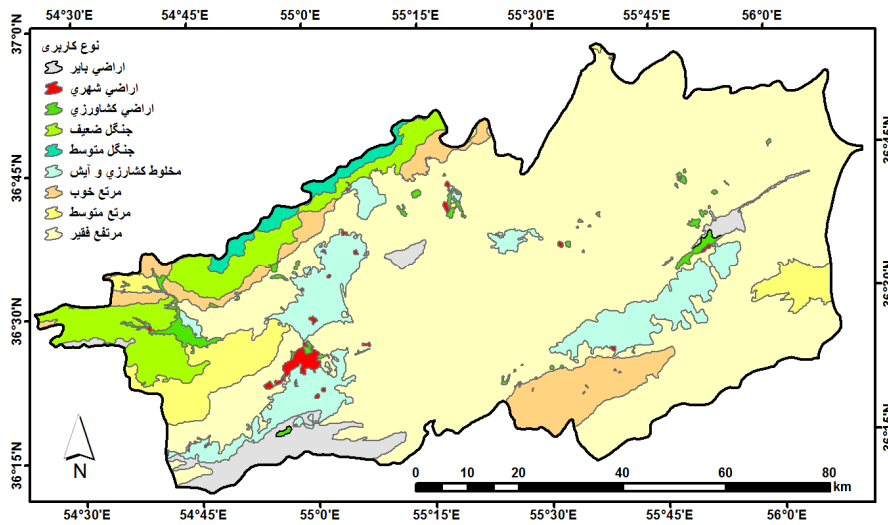
رابطه (۷):  $C1 = \exp(0.06i) \kappa$  وقتی که  $0 \leq i \leq 50$  (برای اراضی زراعی و علفزارهای طبیعی) و  $i \geq 50$  (برای مراتع متراکم).

رابطه (۸):  $C1 = (2.3 - 0.01i) / 30$  وقتی که  $i \geq 50$  (برای اراضی زراعی و علفزارهای طبیعی).

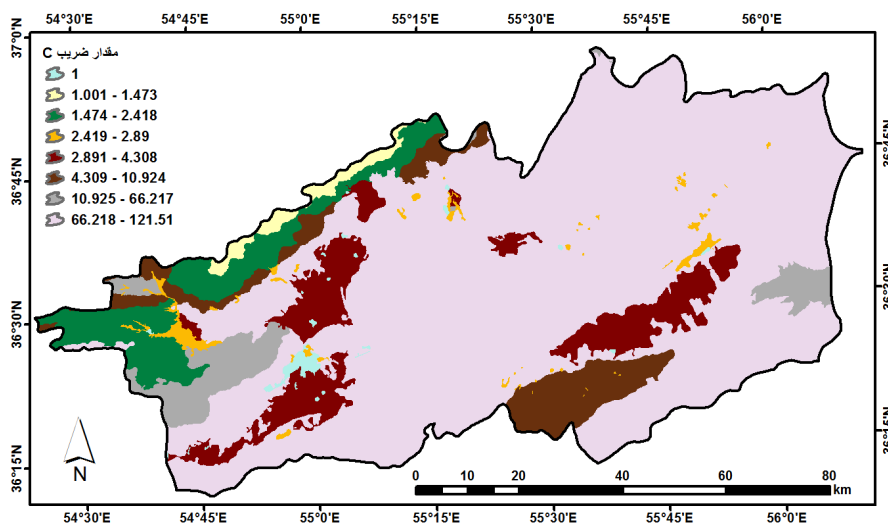
جهت برآورد میزان خاک از دست‌رفته در سطوح عریان و به تصویرکشیدن تأثیر پوشش گیاهی در حفاظت از خاک، ابتدا نقشه کاربری اراضی حوضه

ارتفاعات شمالی و شمال غربی حوضه گسترده شده‌اند،  
تعلق دارد (شکل ۱۴).

از دست رفته در سطوح عریان را شامل می‌شوند. در  
مقابل، کمترین مقدار C به کاربری‌های جنگلی که در



شکل ۱۳- نقشه کاربری اراضی حوضه مطالعاتی

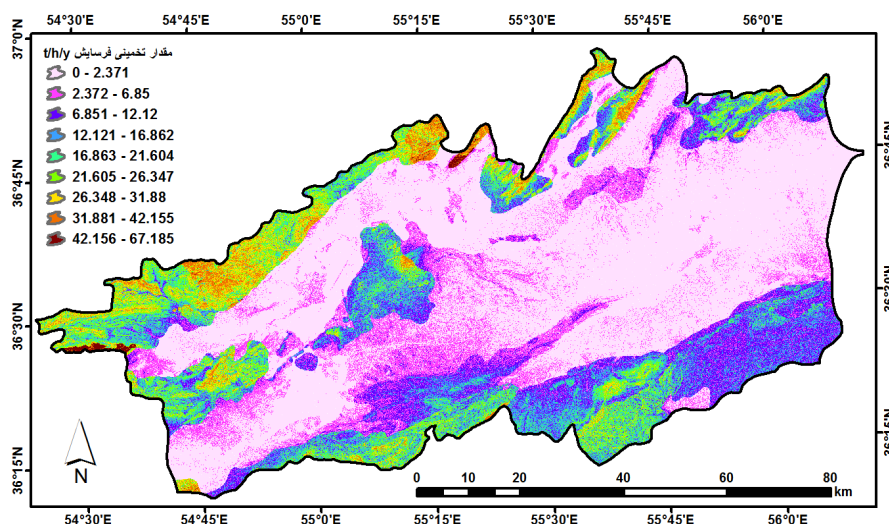


شکل ۱۴- نقشه مقدار ضریب C (خاک از دست رفته در سطوح عریان) در حوضه مطالعاتی

نتایج حاصل از برآورد مقادیر رقمی فرسایش  
خاک با مدل SLEMSA و همچنین تلفیق لایه‌های  
رقومی پارامترهای مؤثر بر اساس الگوریتم مدل مزبور  
در حوضه آبخیز شاهرود-میامی به صورت شکل (۱۵)  
می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از مساحت سنجی  
طبقات فرسایش به صورت جدول (۵) است.

در پایان، رابطه بین مقادیر پارامترهای C (ضریب  
زراعی)، K (ضریب اقلیم و خاک) و X (ضریب  
توپوگرافی)، میزان خاک فرسایش یافته را به تن در  
هکتار در سال نشان می‌دهد که شکل کلی معادله به  
شرح رابطه (۹) است (رامشت، ۱۳۷۵: ۱۷۲).

$$Z = C.K.X \quad \text{رابطه (۹)}$$



شکل ۱۵- نقشه پهنه‌بندی فرسایش خاک حوضه مطالعاتی به تن در هکتار در سال بر اساس مدل SLEMSA

جدول ۵- نتایج مساحت سنجی طبقات فرسایش خاک در حوضه مطالعاتی

طبقه	فرسایش به تن در هکتار در سال	مساحت به کیلومترمربع	درصد مساحت	خطر فرسایش
۱	۰ - ۲/۳۷۱	۳۷۱۳/۳۱۸	۴۸/۴۱۷	کم
	۲/۳۷۲ - ۶/۸۵	۱۰۴۶/۲۶۷	۱۳/۶۴۲	
	۶/۸۵۱ - ۱۲/۱۲	۳۷۳/۵۲۲	۹/۶۱۶	
۲	۱۲/۱۲۱ - ۱۶/۸۶۲	۶۸۳/۸۵۵	۸/۹۱۷	متوسط
	۱۶/۸۶۲ - ۲۱/۶۰۴	۵۶۶/۸۷۵	۷/۳۹۱	
	۲۱/۶۰۵ - ۲۶/۳۴۷	۴۴۴/۵۷۳	۵/۷۹۹	
	۲۶/۳۴۸ - ۳۱/۸۸	۳۱۵/۶۵۷	۴/۱۱۶	
	۳۱/۸۸۱ - ۴۲/۱۵۵	۱۴۱/۶۲۵	۱/۸۴۷	
۳	۴۲/۱۵۶ - ۶۷/۱۸۵	۱۹/۶۴۱	۰/۲۵۶	بالا

۳۱/۷۲ درصد از وسعت کل حوضه را دربر گرفته است. همچنین کمربند فرسایشی سوم منطبق بر نوار کوه‌پایه‌ای کوهستان‌های مرکزی حوضه مطالعاتی بوده و دارای مقدار تقریبی ۲ تا ۲۱ تن خاک فرسایش یافته در هکتار در سال است. این موضوع نمایانگر اهمیت پارامترهای توپوگرافی نظیر شیب، جهت شیب، ناپایداری رسوبات در دامنه‌ها و قدرت فرساینده‌گی بارش در تخریب خاک است. در مقابل طبقه حداقل فرسایشی با مقدار کمتر از ۲/۳۷۱ تن خاک فرسایش یافته در هکتار در سال، با دارا بودن ۴۸/۴۲ درصد از وسعت کل حوضه بیشترین مساحت را به خود اختصاص داده است که حاکی از گستردگی مقادیر کم فرسایشی به نسبت مقادیر بالا در حوضه مطالعاتی می‌باشد. در مجموع سطحی در حدود

نتایج حاصل از برآورد مقدار خاک فرسایش یافته در حوضه مطالعاتی (شکل ۱۵ و جدول ۵) حاکی از وجود سه کمربند فرسایشی در منطقه است. کمربند نخست با مقدار فرسایش ۲۶/۳۵ تا ۶۷/۱۶۵ تن در هکتار در سال دارای دامنه ارتفاعی ۲۲۰۰ تا ۳۹۰۸ متر، دامنه شیب ۴۰ تا ۲۸۰ درصد و دامنه بارش ۲۰۰ تا ۳۷۷ میلی‌متر می‌باشد که از نظر پراکنش فضایی منطبق بر کوه‌پایه‌های مرتفع حاشیه شمالی و شمال غربی بوده و حدود ۶/۲۲ درصد از مساحت کل حوضه را به خود اختصاص داده است. کمربند دوم نیز با مقدار فرسایش ۶/۸ تا ۲۶/۳۵ تن در هکتار در سال در نوار کوه‌پایه‌ای جنوب گستردگی دارد که دارای دامنه ارتفاعی ۱۴۷۰ تا ۱۹۵۰ متر، دامنه شیب ۲۷ تا ۶۹ درصد و دامنه بارش ۱۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد و



حفاظتی از اکوسیستم خاک در حوضه مطالعاتی می‌باشد.

برای جلوگیری از فرسایش خاک پیشنهاد می‌گردد که روش بهره‌برداری از زمین متناسب با اصول حفاظت از خاک تدوین شود. همچنین جهت ایجاد تعادل بین اجزای اکوسیستم نظیر آب، باد، خاک، گیاه و انسان، شناخت توانمندی‌های محیطی و آشنایی با قابلیت‌های ارضی لازم و ضروری است تا متناسب با استعداد زمین، در آن منطقه فعالیت‌های حفاظتی نظیر جنگل‌کاری، مرتع‌داری، زراعی و غیره استقرار و توسعه یابد. در بهره‌برداری بهینه از خاک رعایت نکاتی بدین شرح ضروری است: به طوری که زمین‌هایی مانند ارتفاعات و کوه‌ها که شیب آنها زیاد و صخره‌ای هستند و خاک کم‌عمق دارند، بایستی به جنگل‌کاری اختصاص داد تا حساسیت خاک در مقابل فرسایش کم شود. همچنین زمین‌های کوهپایه‌ای که نسبت به نواحی مرتفع دارای خاک نرم‌تر با شیب کمتری هستند، جهت مرتع‌داری مناسب خواهند بود. در مقابل اراضی با خاک عمیق و شیب کم که دسترسی به آب آبیاری دارند، با احتیاط و از روی اسلوب صحیح کشاورزی پایدار مورد کشت و زرع واقع شوند.

#### منابع

۱. اسکندری، منصور. ۱۳۸۰. بررسی و کارایی مدل SLEMSA در برآورد و فرسایش رسوب در حوضه سد زاینده‌رود به وسیله G.I.S. پایان‌نامه کارشناسی ارشد جغرافیا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، دانشکده علوم انسانی، گروه جغرافیا.
۲. انتظاری، مژگان. رسول شریفی و زهرا ایزدی و سمیه السادات شاه‌زیدی. ۱۳۹۱. ارزیابی پتانسیل‌های فرسایشی منطقه دستکن با استفاده از مدل SLEMSA. فصلنامه جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۳، شماره ۴، صص ۱۰۹-۱۲۰.
۳. انتظاری، مژگان. حمیده غلام‌حیدری. ۱۳۹۳. مقایسه مدل‌های SLEMSA و CORINE در ارزیابی فرسایش خاک (مطالعه موردی: حوضه تنگ سرخ شیراز). فصلنامه برنامه‌ریزی و آمایش فضا، دوره هجدهم، شماره ۳، صص ۱-۲۸.

۲/۱۰۳ درصد از مساحت حوضه (طبقات ۸ و ۹) با دارا بودن ۳۱ تا ۶۷/۱۸۵ تن خاک فرسایش یافته در هکتار در سال، دارای مقادیری بیش از مقدار متوسط فرسایش خاک در ایران (۳۰ تا ۳۲ تن در هکتار در سال) هستند که نیاز به برنامه‌ریزی، مدیریت و انجام اقدامات فرسایش‌زدایی و حفاظت از اکوسیستم خاک دارند.

#### نتیجه‌گیری

یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که مقادیر پارامترهای بارش، انرژی جنبشی باران، شیب و طول دامنه به شدت تحت تأثیر ارتفاع قرار دارند. بدین معنی که مقادیر آنها با افزایش ارتفاع روند صعودی را نشان می‌دهد. در بین عوامل مؤثر، پارامتر قابلیت فرسودگی خاک وابسته به جنس زمین، نوع خاک و درصد پوشش گیاهی بوده و عملکرد آن مستقل از دیگر مؤلفه‌ها است. با توجه به نحوه محاسبه پارامترهای مدل، عامل میزان خاک از دست رفته در سطوح عریان به علت وابستگی به پوشش گیاهی، وجود مراتع فقیر با چرای دام کمتر از ۱۰۰ روز در سال و میزان بارندگی کمتر از ۶۰۰ میلی‌متر، در اکثر منطقه تقریباً یکنواخت می‌باشد.

از منظر فرسایش خاک منطقه مطالعاتی دامنه فرسایشی حداقل کمتر از ۲/۳۷۱ تا حداکثر ۶۷/۱۸۵ تن در هکتار در سال را شامل می‌شود که در این میان کمترین مقادیر فرسایشی یکی منطبق بر نقطه خروجی حوضه با حداقل دامنه ارتفاعی و شیب، و دیگری منطبق بر کوه‌های بسیار مرتفع با جنس کنگلومرای قرمز و سنگ آهک و حداکثر شیب به دلیل عدم وجود خاک جهت فرسایش می‌باشد. در مقابل، بیشترین مقادیر فرسایش با مناطق کوه‌پایه‌ای و سکونت‌گاهی انسانی هماهنگی قابل توجهی دارد. این موضوع بیانگر نقش مخرب و فزاینده انسان در تسریع روند طبیعی فرسایش خاک می‌باشد که در صورت عدم کنترل و سوء مدیریت به معضلی جبران‌ناپذیر در آینده‌ای نزدیک تبدیل خواهد شد و نیازمند برنامه‌های

۴. انتظاری نجف‌آبادی، مژگان. مجید غلامی. ۱۳۹۱. برآورد فرسایش در حوزه رومشگان با استفاده از مدل‌های TOPSIS و SLEMSA. فصلنامه پژوهش‌های فرسایش محیطی، سال دوم، شماره ۸، صص ۳۰-۴۳.
۵. پزشکی راد، غلامرضا. سعید فعلی و محمد چیدری. ۱۳۸۸. تأثیر ناظرین گندم در پذیرش تکنولوژی‌ها و نوآوری‌های حفاظت از خاک در کشاورزان گندمکار استان تهران. مجله تحقیقات اقتصاد و توسعه کشاورزی ایران، دوره ۴۰-۲، شماره ۲، صص ۵۳-۵۹.
۶. پورمحمدی املشی، احترام. ۱۳۸۰. محاسبه مقایسه‌ای فرسایش در حوضه آبریز شلمان رود به روش PSIAC، SLEMSA. پایان‌نامه کارشناسی ارشد جغرافیا، دانشگاه اصفهان دانشکده علوم انسانی، گروه جغرافیا.
۷. تقوی، سمانه. معصومه هاشمی. ۱۳۹۲. برآورد رسوب و فرسایش با مدل SLEMSA با استفاده از روش GIS در حوضه آبخیز هویر. اولین همایش ملی الکترونیکی کشاورزی و منابع طبیعی پایدار، تهران، ۱۰ بهمن‌ماه.
۸. رامشت، محمدحسین. ۱۳۷۵. کاربرد ژئومورفولوژی در برنامه‌ریزی ملی، منطقه‌ای و اقتصادی، چاپ اول، اصفهان، انتشارات دانشگاه اصفهان.
۹. رامشت، محمدحسین. سمیه سادات شاه‌زیدی. ۱۳۹۰. کاربرد ژئومورفولوژی در برنامه‌ریزی ملی، منطقه‌ای، اقتصادی و توریسم. چاپ دوم (ویرایش اول)، اصفهان، انتشارات دانشگاه اصفهان.
۱۰. رفاهی، حسینقلی. ۱۳۹۴. فرسایش آبی و کنترل آن. چاپ هفتم، تهران، انتشارات دانشگاه تهران.
۱۱. سالاری، نرجس. نسرین رنجبرمنش و هاجر نظری پور. ۱۳۹۲. بررسی میزان خطر فرسایشی در حوضه آبریز سیرج با استفاده از مدل SLEMSA. اولین همایش ملی الکترونیکی کشاورزی و منابع طبیعی پایدار، تهران، ۱۰ بهمن‌ماه.
۱۲. عاقلی کهنه شهری، لطفعلی. حسین صادقی. ۱۳۸۴. برآورد آثار اقتصادی فرسایش خاک در ایران. فصلنامه پژوهش‌های اقتصادی، شماره ۱، صص ۸۷-۱۰۰.
۱۳. کیان پور، عباس. ۱۳۷۶. بررسی پتانسیل فرسایش حوضه چالشر. پایان‌نامه کارشناسی ارشد جغرافیا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، دانشکده علوم انسانی، گروه جغرافیا.
۱۴. گندمکار، امیر. نفیسه شیخی و سمیرا احمدی. ۱۳۸۷. فرسایش خاک در حوضه آبریز موسی‌آباد تیران با استفاده از مدل SLEMSA. فصلنامه چشم‌انداز جغرافیایی، سال سوم، شماره ۶، صص ۹۵-۱۰۸.
۱۵. میرزائی، مجید. ۱۳۸۰. ارزیابی فرسایش خاک در سیستم آبخیز دشت نجف‌آباد با تأکید بر مدل SLEMSA. پایان‌نامه کارشناسی ارشد جغرافیا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، دانشکده علوم انسانی، گروه جغرافیا.
16. Breetzke, G.D., Koomen, E., and Critchley, W.R.S. 2013. GIS-Assisted Modelling of Soil Erosion in a South African Catchment: Evaluating the USLE and SLEMSA Approach. *Water Resources Planning, Development and Management*, Prof. Ralph Wurbs (Ed.), ISBN: 978-953-51-1092-7, InTech, DOI: 10.5772/52314. Pp. 53-71.
17. Christos G. Karydas, Panos Panagos, Ioannis Z. Gitas, 2014. A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics. *International Journal of Digital Earth*, 7(3): 229-250.
18. Droogers, P., and Kite, G. 2002. Remotely sensed data used for modelling at different hydrological scales. *Journal of Hydrological Processes*, 16: 1543-1556.
19. Fistikoglu, O., Harmancioglu, N.B., 2002. Integration of GIS with USLE in Assessment of Soil Erosion. *Water Resources Management*, 16: 447-467.
20. Gandomkar, A., 2009. Using GIS in Soil Erosion Control (Case study: Mousa Abad Basin, Isfahan, Iran), *GIS Ostrava*, 1: 25-28.
21. Gitas, I.Z., Douros, K., Minakou, C., Silleos, G.N. and Karydas, C.G. 2009. Multi-temporal soil erosion risk assessment in N. CHALKIDIKI using a modified USLE raster model. *Journal of EARSeL Proceedings*, 8: 40-52.
22. Helming, K., Auzet, A.V., and Favis-Mortlock, D. 2005. Soil erosion patterns: evolution, spatio-temporal dynamics and connectivity. *Earth Surface Processes and Landforms*, No. 30: 131-132.
23. Igue, A.M., 2002. The Qualitative Assessment of Water Erosion Risk in the Moist Savanna of Benin, 12th ISCO Conference, Pp. 275-280.

- (Case Study: Varmishgan, Iran). J. Basic. Appl. Sci. Res., 2(12): 13115-13121.
31. Stocking, M.A., Chakela, Q., and Elwell, H.A. 1988. An improved method for erosion hazard mapping. Part I: The technique. Journal of Geografiska Annaler, 70 (A.3): 169-180.
  32. Stone, R.P., and Hilborn, D. 2000. Universal Soil Loss Equation (USLE), Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs. Agricultural Engineering, No. 00-001.
  33. Svorin, J. 2003. A test of three soil erosion models incorporated into a geographical information system. Hydrological Processes, 17: 967-977.
  34. Wentworth, C.K. 1930. A simplified method of determining the average slope of land surface. Am. J. Sci. Ser., 5: 184-194.
  35. Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. 1965. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. US Government Print Office, Washington, DC, (Agricultural Handbook) Vol. 282.
  36. Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning. US Dept. Of Agriculture, (Agricultural Handbook), Vol. 537.
  24. Igwe, C.A., Akamigbo, F.O.R., and Mbagwu, J.S.C. 1999. Application of SLEMSA and USLE erosion models for potential erosion hazard mapping in south-eastern Nigeria. Journal of Int. Agriculture, 13: 41-48.
  25. Kinnell, P.I.A. 2001. Slope length factor for applying the USLE-M to erosion in grid cells. Journal of Soil & Tillage Research, 58: 11-17.
  26. Leenaers, H., 1990. Estimating the Impact of Land Use Change on Soil Erosion Hazard in the Zambezi River Basin. International Institute for Applied Systems Analysis, A-2361 Laxenburg, Austria, Pp. 1-27.
  27. Lentsoane, P.M.M. 2004. Evaluation of erosion models and field assessment methods as tools for monitoring and evaluation of soil erosion in LandCare. MSc Thesis for (Agric) Soil Science, Faculty of Natural and Agricultural Sciences, University of Pretoria.
  28. Pimentel, D. 2006. Soil Erosion: A Food and Environmental Threat. Journal of Environment, Development and Sustainability, 8: 119-137.
  29. Pimentel, D., and Burgess, M., 2013. Soil Erosion Threatens Food Production. Journal of Agriculture, 3: 443-463.
  30. Shahzeidi, S.S., Entezari, M., Gholami, M., and Dadashzadah, Z. 2012. Assessment Rate of Soil Erosion by GIS



## Estimation of soil erosion rate in Shahroud-Mayami watershed using SLEMSA model and GIS technique

### Abstract

The productivity of natural resources requires the accurate recognition of predominant mechanisms on environmental processes. Soil, as one of the most important natural resources, will always need a comprehensive planning and management for efficiency and conservation against the erosion. Soil erosion, as an environmental hazard, causes the loss of a large volume of fertile soil in the world annually. Therefore, purposes of this study are to estimate the amount of soil erosion per  $t \cdot h^{-1} \cdot yr^{-1}$  in Shahroud-Mayami watershed using SLEMSA model, and finally provide the erosion map of study area through integrating the data by GIS technique. For this, first, the parameters of the mentioned model and the numerical values of erosion rates were estimated based on existing relationships. Then, their digital layers were prepared in the environment of ArcGIS software, and the erosion map of Shahroud-Mayami watershed was plotted by integration of these layers. The results show that study area includes three erosional belts with minimum rate of less than 2.371 to a maximum of 353.425  $t \cdot h^{-1} \cdot yr^{-1}$  that are located in the north and northwest, south, and center of study area. Spatial position of erosional belts indicates the importance of topography parameters such as slope, aspect, sediments instability in side's slope and rainfall erosivity in soil degradation. Versus, the minimum erosional class, with eroded soil of less than 2.371  $t \cdot h^{-1} \cdot yr^{-1}$ , involve the 48.42% of total area that illustrate the expansion of erosion minimum rate per its maximum rate in study region. This erosion values require the comprehensive and applied planning and management in long-term according to natural potential of the area.

**Keywords:** Erosion, SLEMSA Model, Geographic Information System, Shahroud-Mayami watershed.