

## شبیه‌سازی فرسایش و رسوب ناشی از زمین‌لغزش‌ها با استفاده از مدل GeoWEPP (مطالعه موردی: حوضه گرمچای میانه)

جمشید یاراحمدی\* - دانشجوی دکترای تخصصی رشته ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز  
شهرام روستایی - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تبریز

پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۱/۲۰ تأیید نهایی: ۱۳۹۲/۰۵/۱۲

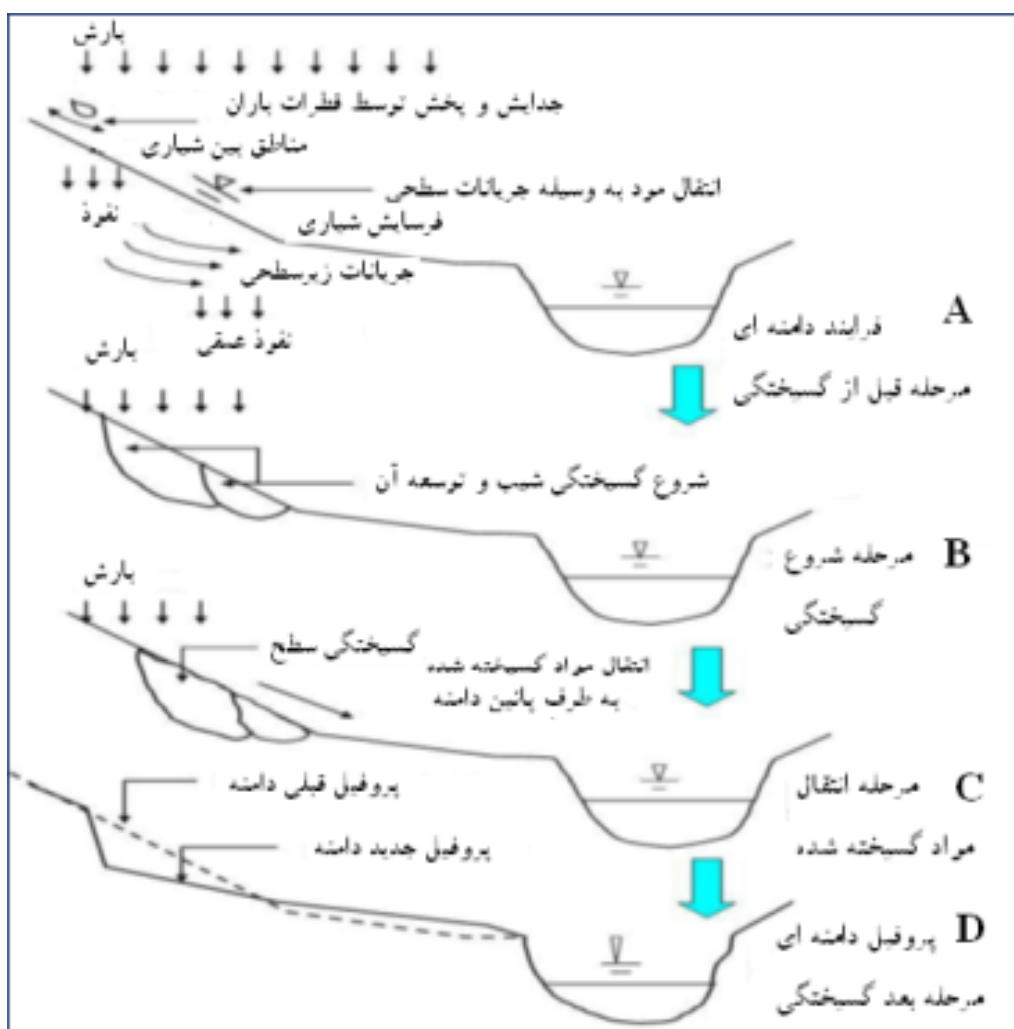
### چکیده

فرسایش آبی و زمین‌لغزش‌ها، هر دو از منابع اصلی تولید رسوب در حوضه‌های آبخیز هستند، ولی تا کنون مدل جامعی برای تعیین سهم حرکات توده‌ای در بار رسوبی حوضه‌هایی که در آن زمین‌لغزش‌های زیادی اتفاق افتاده، ارائه نشده است. پژوهش پیش رو با این فرض انجام گرفته است که عوامل مؤثر در فرسایش‌پذیری و افزایش بار رسوبی حوضه‌ها، تأثیر مشابهی در ایجاد و تشدید حرکات توده‌ای زمین داشته و توان تولید رسوب در دامنه‌های ناپایدار همبستگی معناداری با سطوح گسیختگی دارد. با توجه به اینکه همیشه تمامی مواد جابه‌جا شده لغزشی، امکان انتقال به داخل شبکه زهکشی را نداشته و در اغلب موارد، بخشی از آن در سطح دامنه‌ها همچنان باقی خواهند ماند. در این پژوهش، از مدل فرایندی WEPP در محیط نرم‌افزاری ArcGIS با عنوان GeoWEPP، برای شبیه‌سازی مقادیر رسوب و ته‌نشست متأثر از وقوع زمین‌لغزش‌ها در حوضه گرمچای میانه استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان داد که بار رسوبی سطوح ناپایدار دامنه‌ای در ارتباط با مورفولوژی دامنه و مدیریت حاکم بر آن در قالب کاربری زمین و اقلیم منطقه متغیر بوده و مدل یاد شده به خوبی قادر به شبیه‌سازی مقادیر رسوب و ته‌نشست در ارتباط با عوامل تأثیرگذار بر آن بوده است. قابلیت مدل یاد شده در این زمینه، پیش از این در مطالعات مشابه دیگری ثابت شده است. از آنجاکه در حوضه آبخیز گرمچای اطلاعات رسوب اندازه‌گیری شده موجود نبود، لذا نتایج شبیه‌سازی مدل فقط از طریق انطباق مناطق بحرانی رسوب با سطوح لغزشی مشاهده‌ای، به صورت کیفی ارزیابی شده است. رابطه بین مناطق لغزشی با بار رسوبی، از طریق ارائه مدل رگرسیونی دو متغیره بررسی شد. نتایج آن وجود رابطه معناداری با ضریب تبیین  $0.71+$  درصد را نشان داد که این رقم معیار مناسبی از موفقیت مدل یاد شده است و نشان می‌دهد که می‌توان از این مدل در برآورد بار رسوبی مناطق لغزشی حوضه‌های فاقد آمار رسوب استفاده کرد.

کلیدواژه‌ها: حوضه گرمچای، رسوب، زمین‌لغزش، فرسایش، مدل WEPP.

## مقدمه

فرسایش آبی خاک و زمین‌لغزش‌ها، از منابع اصلی تأمین رسوب در حوضه‌های کوهستانی پرشیب به‌شمار می‌روند (بندا، حسن، چارچ و می، ۲۰۰۵؛ کوراپ، ساوینسی و دیویس، ۲۰۰۴). منشأ این رسوبات در مراحل قبل از گسیختگی دامنه‌ای، عمدتاً فرسایش آبی بوده و در هنگام گسیختگی نیز، وقوع زمین‌لغزش و جریان‌های واریزه‌ای است. این عوامل در کنار فرسایش آبی می‌توانند منشأ تولید رسوب در مرحله بعد از گسیختگی نیز به‌شمار روند. گسیختگی دامنه‌ای و انتقال ذرات خاک دلالت بر دو چیز دارند: اول، وقوع زمین‌لغزش‌ها ممکن است به‌طور معناداری بار رسوبی جریان‌های سطحی نزدیک زخمه لغزش را افزایش دهند؛ دوم، فرایندهای گسیختگی و توزیع مکانی مجدد خاک در سطح دامنه، منجر به تغییر شیب محلی دامنه شده که این تغییر پروفیل سطحی به نوبه خود به فرسایش بعدی دامنه می‌انجامد (شکل ۱).



شکل ۱. مراحل مختلف انتقال رسوب در سطح دامنه؛ (A) شروع جریان‌های سطحی آب و فرسایش خاک؛ (B) شروع گسیختگی دامنه و توسعه آن؛ (C) انتقال مواد گسیخته شده؛ (D) تغییر در پروفیل طولی دامنه در اثر وقوع زمین‌لغزش (نقل از آچاریا، ۲۰۱۱).

مطالعات زیادی در ارتباط با شناخت اساسی سازوکار و شرایطی که سبب فرایندهای فرسایش و رسوب و همچنین زمین لغزش می‌شوند، صورت گرفته است. قسمت عمده این مطالعات یا در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی بوده، یا از طریق مطالعات میدانی انجام گرفته است. با توجه به اینکه زمین لغزش‌ها سهم عمده‌ای در تأمین رسوب در حوزه‌های آبخیز دارند، بنابراین قسمت قابل ملاحظه‌ای از مطالعات پیشین در این زمینه، صرف شناخت سازوکار وقوع و رفتار بعدی زمین لغزش‌ها و میزان رسوب حاصل از وقوع آنها در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی شده است (ایورسون و همکاران، ۲۰۰۰؛ وانگ و ساسا، ۲۰۰۳؛ لایورنکو، ساسا و فوکوکا، ۲۰۰۶؛ اولیوارس و دامیانو، ۲۰۰۷)

با وجود این، تعداد نسبتاً اندکی از مطالعات انجام یافته توانسته‌اند به‌طور کامل و دقیق، فرایندهای واقعی شروع گسیختگی دامنه‌ای و مراحل توسعه آن را تشریح کنند. ناپایداری دامنه‌ای، توسعه و توزیع مکانی آن، می‌تواند تأثیر مستقیم در میزان رسوب منطقه، در حین مراحل وقوع ناپایداری دامنه‌ای و بعد از آن داشته باشد. به همین دلیل ضروری است تا مطالعات کافی در زمینه شناخت دقیق ارتباط بین سازوکار ناپایداری کننده دامنه و تأثیر آن در میزان رسوب تحویلی به شبکه هیدروگرافی صورت گیرد.

تا کنون تلاش‌هایی در راستای کمی‌سازی تأثیر رسوبات ناشی از زمین لغزش‌ها و مقایسه آن با مقادیر رسوب سالانه به عمل آمده است. مقادیر بار رسوبی ناشی از وقوع زمین لغزش‌ها، بستگی به این دارد که چه مقدار از مواد لغزش یافته توانسته باشد به شبکه هیدروگرافی انتقال یابد. برداشت عمومی بر این است که اگر مواد لغزش یافته در قالب جریان‌های واریزه‌ای و در ترکیب با مقدار زیاد آب باشد، می‌تواند مسافت زیادی را طی کرده و به‌صورت مستقیم وارد شبکه جریان‌های سطحی منطقه شود. همین فرایند، موجب افزایش قابل ملاحظه بار رسوبی رودخانه‌های منطقه خواهد شد (کرومیناس، ۲۰۰۱؛ ایورسون، راید و لاهوسن، ۱۹۹۷؛ هانت و فیل، ۲۰۰۳؛ مالت، لایگل، ریمایتر و میکواپر، ۲۰۰۵)، اما در اغلب موارد، همه رسوبات حاصل از زمین لغزش‌ها نمی‌توانند وارد سیستم زهکشی منطقه شوند و مقداری از آن همچنان در سطح دامنه‌ها باقی خواهند ماند (جانسون، اسوانستون و مک‌گی، ۲۰۰۰؛ شورچ، دینس مور، مک‌آردل و مولنار، ۲۰۰۶؛ شواب، رایک زاپ، اشنايدر، لینیگر و شولینگر، ۲۰۰۸). به بیان دیگر، زمانی رسوبات ناشی از زمین لغزش‌ها وارد شبکه هیدروگرافی شده و موجب افزایش بار رسوبی خواهند شد که مناطق لغزشی در مجاورت شبکه زهکشی واقع شده باشند و از سوی دیگر، فرایند فرسایش آبی نیز در سطح مناطق لغزشی به‌صورت فعال حضور داشته باشد. در این زمینه، برخی معیارها مانند، ویژگی‌های هیدرولوژیکی خاک، موفولوژی دامنه و... می‌توانند میزان جابه‌جایی و انتقال مواد لغزش یافته را به داخل شبکه زهکشی کنترل کنند. متأسفانه، هنوز سهم هیچ کدام از این عوامل در میزان بار رسوبی به خوبی تعیین نشده است.

معمولاً پایش فرسایش خاک، زمین لغزش‌ها و همچنین میزان جابه‌جایی مواد ناشی از این فرایندها، می‌تواند یک فعالیت پُرهزینه، سخت و زمان‌بر باشد. بنابراین، محاسبه پتانسیل فرسایش خاک، وقوع زمین لغزش‌ها و همچنین تأثیر آنها در میزان بار رسوبی، می‌تواند از طریق مدل‌سازی انجام شود. برای مطالعه توأم این دو فرایند، بایستی مدل

یکپارچه‌ای<sup>۱</sup> توسعه یابد که هر دو هدف وقوع زمین‌لغزش و فرسایش خاک را شامل شده و قادر به برآورد بار رسوبی در سطح دامنه باشد. متأسفانه، تا به حال فعالیت‌های علمی نسبتاً اندکی در زمینه توسعه مدل یکپارچه زمین‌لغزش و فرسایش خاک ناشی از وقوع آن صورت گرفته است (بورتون و باسورست، ۱۹۹۸؛ باسورست، باویلو و سیسنروس، ۲۰۱۰). امروزه، تعیین بار رسوبی حوضه‌ها برای استفاده در طرح‌های توسعه عمرانی - اقتصادی یک ضرورت است. در بین عوامل تأثیرگذار در فرسایش و رسوب، نقش پدیده‌هایی چون حرکات توده‌ای آشکار بوده، ولی تا به حال توجهی چندانی به آن نشده است. تا کنون تلاش‌های اندکی در راستای کمی‌سازی تأثیر رسوبات ناشی از زمین‌لغزش‌ها به عمل آمده است، ولی واقعیت امر این است که معمولاً سیستم رسوب‌دهی یک حوضه بسیار پیچیده و در عین حال دارای تغییرپذیری زمانی و مکانی است و همچنان به‌منزله یک چالش بزرگ پیش روی محققان در این زمینه باقی مانده است (هسو، ون، چن و چای، ۲۰۱۲).

این پژوهش با هدف بررسی توزیع مکانی فرسایش و محاسبه بار رسوبی سطوح ناپایدار دامنه‌ای در حوضه گرمچای میانه صورت گرفته است. پژوهش پیش رو به دنبال آزمون این فرضیه است که چه مقدار از رسوبات حاصل از گسیختگی دامنه‌ای وارد سیستم زهکشی شده و چه قسمتی از آن در سطح دامنه باقی مانده است. به همین دلیل از مدل فرایندی WEPP<sup>۲</sup> استفاده شده است. مدل یادشده تنها مدل موجود با قابلیت شبیه‌سازی فرسایش، رسوب و ته‌نشینی، در قالب واحدکاری دامنه شیب است که در نرم‌افزار ArcGIS در برنامه GeoWEPP، در مقیاس حوضه‌ای نیز قابلیت اجرا دارد.

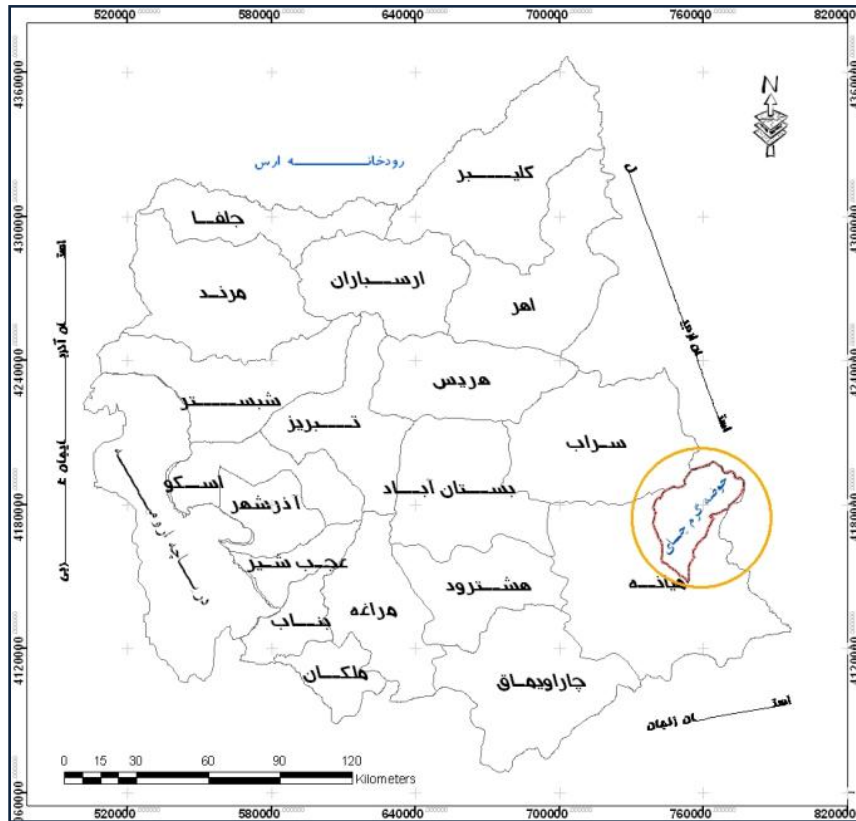
### منطقه مورد مطالعه

از نظر تقسیمات سیاسی، منطقه مورد مطالعه در استان آذربایجان شرقی و در فاصله ۴۰ کیلومتری شمال شرقی شهرستان میانه و در منتهی‌الیه شرقی ارتفاعات بزقوش قرار گرفته است. این منطقه از نظر جغرافیایی بین طول‌های جغرافیایی ۴۷ درجه و ۴۲ دقیقه و ۵۴ ثانیه تا ۴۸ درجه و ۸ دقیقه و ۲۵ ثانیه شرقی و ۳۷ درجه و ۲۵ دقیقه و ۲۴ ثانیه تا ۳۷ درجه و ۵۴ دقیقه و ۴۰ ثانیه عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۲). بلندترین نقطه ارتفاعی منطقه، ۳۰۶۹ متر و پست‌ترین آن ۱۰۴۳ متر است. مهم‌ترین شبکه زهکشی منطقه، رودخانه گرمچای بوده که با جهت شمالی - جنوبی از ارتفاعات جنوبی بزقوش سرچشمه گرفته و در مناطق پست شمال شرق شهر میانه، پس از طی ۴۰ کیلومتر به رودخانه قزل‌اوزن می‌پیوندد. منطقه مورد مطالعه عمدتاً کوهستانی بوده؛ به طوری که ۵۲ درصد مساحت منطقه را شیب‌های ۱۶-۴۵ درصد تشکیل می‌دهد. براساس آمار بلندمدت ایستگاه هواشناسی میانه (۹۰-۱۳۶۶)، میانگین بارش سالانه آن ۲۸۰ میلی‌متر و متوسط دما ۱۳/۵ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. براساس نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی کشور، سازندهای الیگومیوسن و میوسن، بیشترین گسترش را در منطقه داشته که از نظر لیتولوژیکی مربوط به سنگ‌های ریولیت، تراکیت (۲۳ درصد) و گنگلومرا و مارن و ماسه‌سنگ (۱۳ درصد) هستند. حوضه آبخیز گرمچای به دلیل ویژگی‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی آن، از جمله مناطقی است که در آن زمین‌لغزش‌ها از گسترش بالایی برخوردارند؛ به طوری که

1. Integrated model

2. Water Erosion Prediction Project (WEPP)

مطالعه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش‌ها نشان می‌دهد حدود ۲۵ درصد حوضه گرمچای از نظر ریسک خطر زمین لغزش در کلاس زیاد تا خیلی زیاد قرار گرفته است (فتحی، ۱۳۹۰).



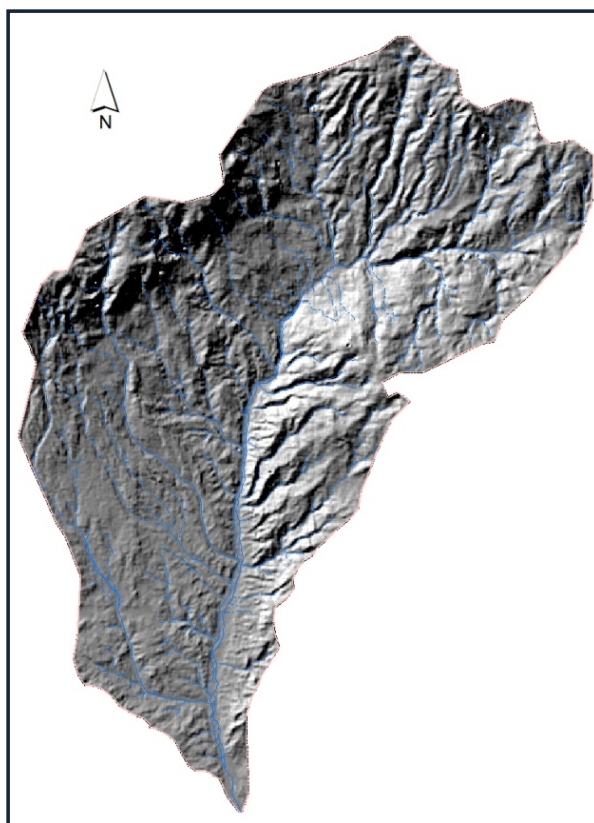
شکل ۲. موقعیت حوضه گرمچای در استان آذربایجان شرقی

## روش پژوهش

روش اجرای این پژوهش ترکیبی از مدل سازی، عملیات میدانی، تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی و تفسیر استریویی عکس‌های هوایی بوده است. در این راستا، ابتدا با استفاده از تفسیر استریویی زوج عکس‌های هوایی مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ به شناسایی انواع زمین لغزش‌های موجود در منطقه اقدام شد و نتایج این قسمت از طریق پیمایش صحرایی کنترل و تدقیق شدند. برخی مشخصات مناطق ناپایدار دامنه‌ای، مانند ویژگی‌های هندسی (طول، عرض و مساحت) و ویژگی‌های ریخت‌شناسی دامنه‌های لغزشی (تحدب و تعقر) در این مرحله انجام گرفت. سپس اقدام به تهیه نقشه توزیع مکانی زمین لغزش‌های شناسایی شده در محیط نرم‌افزاری ArcGIS شد.

فرسایش و رسوب ناشی از ناپایداری دامنه‌ای با استفاده از مدل فرایندی WEPP مدل سازی شد. این کار در مقیاس حوضه‌ای در محیط نرم‌افزار ArcGIS با برنامه GeoWEPP انجام گرفت. برای این کار لازم بود تا اجزای مدل، یعنی عواملی که بر وقوع زمین لغزش‌ها و میزان بار رسوبی ناشی از آنها تأثیرگذار بودند، به کار گرفته شوند. در ادامه شرح کوتاهی از آماده‌سازی مراحل اجرای مدل آورده شده است:

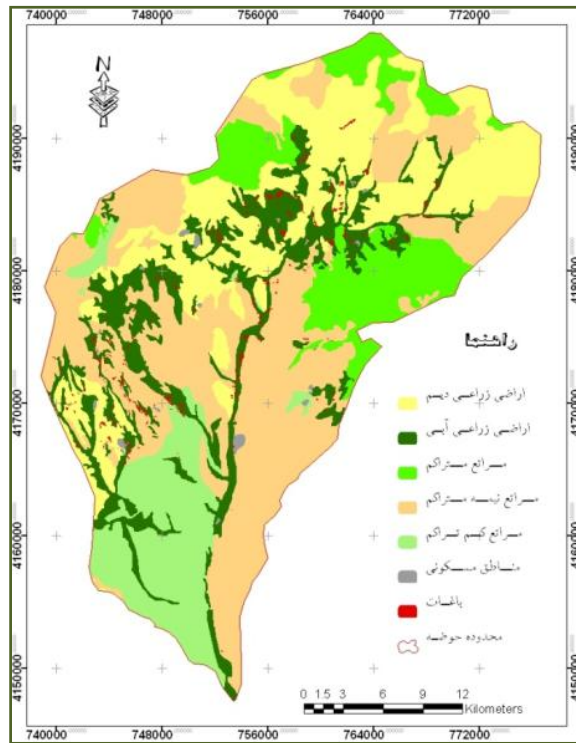
- تهیه مدل رقومی زمین (DEM)<sup>۱</sup>: در محیط نرم‌افزاری ArcGIS و با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور تهیه شده در مرحله بعدی، نقشه رستری مرحله قبل به فرمت ASCII تبدیل شد تا براساس آن برنامه GeoWEPP قادر به تهیه شبکه هیدروگرافی و مدل سایه - روشن<sup>۲</sup> شود (شکل ۳). تعیین محدوده زیرحوضه‌های هرکدام از شبکه هیدروگرافی مورد نظر و تعیین نقاط خروجی حوضه، به‌صورت خودکار در این مرحله صورت می‌گیرد.



شکل ۳. نقشه سایه - روشن و شبکه هیدروگرافی تهیه شده با استفاده از برنامه GeoWEPP

- تهیه نقشه کاربری اراضی: این لایه اطلاعاتی براساس تفسیر رقومی تصاویر ماهواره‌ای SPOT5 به روش جدید شیء‌گرا<sup>۳</sup> و با استفاده از نرم‌افزار eCognition صورت گرفت. ارزیابی نتایج حاصله براساس مشاهدات میدانی انجام گرفت و اطلاعات این قسمت در قالب داده‌های مدیریتی به محیط WEPP انتقال یافت. این نقشه شامل هفت کلاس کاربری به نام‌های: مناطق زراعی آبی، زراعت دیم، باغات، مراتع متراکم (مراتع با تراکم تاج پوشش گیاهی بیش از ۵۰ درصد)، مراتع نیمه‌متراکم (تاج پوشش گیاهی بین ۲۵-۵۰ درصد)، مراتع کم‌تراکم (تاج پوشش گیاهی کمتر از ۲۵ درصد و عمدتاً گیاهان یک‌ساله) و مناطق مسکونی است (شکل ۴).

1. Digital Elevation Model  
2. Hill-shade  
3. Object Oriented Method



شکل ۴. نقشه کاربری اراضی حوضه گرمچای میانه

- تهیه نقشه خاک: این نقشه با حفر پروفیل و نمونه‌برداری از خاک و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی روی نمونه‌های خاک به دست آمد و برای هر یک از نمونه‌های خاک، اطلاعاتی مانند بافت خاک، عمق، درصد سنگریزه، درصد رس، درصد مواد عالی، ظرفیت تبادل کاتیونی<sup>۱</sup> (جدول ۱) که ورودی‌های مدل و تأثیرگذار بر میزان فرسایش و رسوب بودند، تعیین شد.

جدول ۱. نمونه‌ای از اطلاعات خاک حوضه گرمچای در محیط WEPP

کلاس	عمق (mm)	درصد شن	درصد رس	درصد مواد آلی	CEC (meg/100G)	درصد سنگریزه	بافت
۱.۲.۱	کم عمق	۹۸	۲	۰/۰	۲	۷۵ >	Sandy
۳.۳.۱	نیمه عمیق	۹۰	۷	۰/۱	۵	۳۰	Loamy sand
۴.۳.۱	نیمه عمیق	۹۰	۸	۰/۱	۶	۳۰	Loamy sand
۵.۳.۱	نیمه عمیق	۸۶	۱۰	۰/۱	۶	۲۵	Loamy sand
۲.۳.۲	نیمه عمیق	۸۸	۵	۰/۰	۵	۲۰	Loamy sand
۳.۳.۲	نیمه عمیق	۸۸	۵	۰/۰	۵	۲۰	Loamy sand
۱۸.۲	عمیق	۴۰	۳۰	۰/۱	۲۵	۰	Clay Loam
۱.۲.۳	عمیق	۳۶	۳۲	۰/۵	۲۵	۰	Clay Loam
۵.۶.۱	نیمه عمیق	۸۶	۱۰	۰/۳	۷	۲۵	Loamy sand
۱۹.۶	عمیق	۳۰	۳۰	۰/۶	۳۵	۰	Clay Loam

- کم عمق = ۵۰ < سانتی‌متر؛ نیمه عمیق = ۵۰-۸۰ سانتی‌متر؛ عمیق = ۸۰ > سانتی‌متر.

- CEC = هدایت الکتریکی خاک

- اطلاعات اقلیمی: داده‌های روزانه هواشناسی ایستگاه سینوپتیک میانه (۲۰۱۱-۱۹۸۷) در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. پارامترهای اقلیمی مورد استفاده در مدل WEPP عبارتند از: میانگین بارش، تعداد روزهای بارانی، متوسط بارش در روزهای مرطوب، میانگین حداکثر و حداقل دما و باد. در این مدل از برنامه CLIGEN برای شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی و رگبارها در دوره‌های بازگشت مختلف، برای استفاده در فرایند شبیه‌سازی فرسایش و رسوب استفاده می‌شود. براساس اطلاعات هواشناسی ایستگاه میانه، فایل اقلیمی در محیط CLIGEN ایجاد شد (شکل ۵).

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Average Monthly Precip(mm)	31.91	26.08	34.93	46.63	31.82	8.16	5.83	3.50	4.63	19.96	31.95	27.61
Number of Wet Days	8.97	7.90	9.17	10.80	9.64	3.57	1.53	1.38	2.03	5.24	6.29	6.79
Average Monthly Max Temp(C)	2.70	6.40	13.67	20.37	25.67	32.27	35.07	35.16	30.77	23.21	13.60	6.76
Average Monthly Min Temp(C)	-5.66	-3.49	1.49	6.81	10.89	15.81	19.42	19.24	14.67	9.04	2.26	-2.02
Average Precip on Wet Days(mm)	3.56	3.30	3.81	4.32	3.30	2.29	3.81	2.54	2.29	3.81	5.08	4.06
Probability of wet day following wet day	0.46	0.44	0.50	0.52	0.49	0.26	0.23	0.14	0.31	0.41	0.51	0.43
Probability of wet day following dry day	0.22	0.22	0.21	0.27	0.23	0.10	0.04	0.04	0.05	0.12	0.13	0.16
Solar Radiation (Langley/Day)*	255.00	359.00	479.00	584.00	657.00	718.00	654.00	607.00	532.00	407.00	300.00	237.00
Maximum 30 minute Rainfall (mm)*	3.81	6.10	4.32	5.08	5.59	5.08	22.10	12.70	8.13	4.83	4.83	3.05

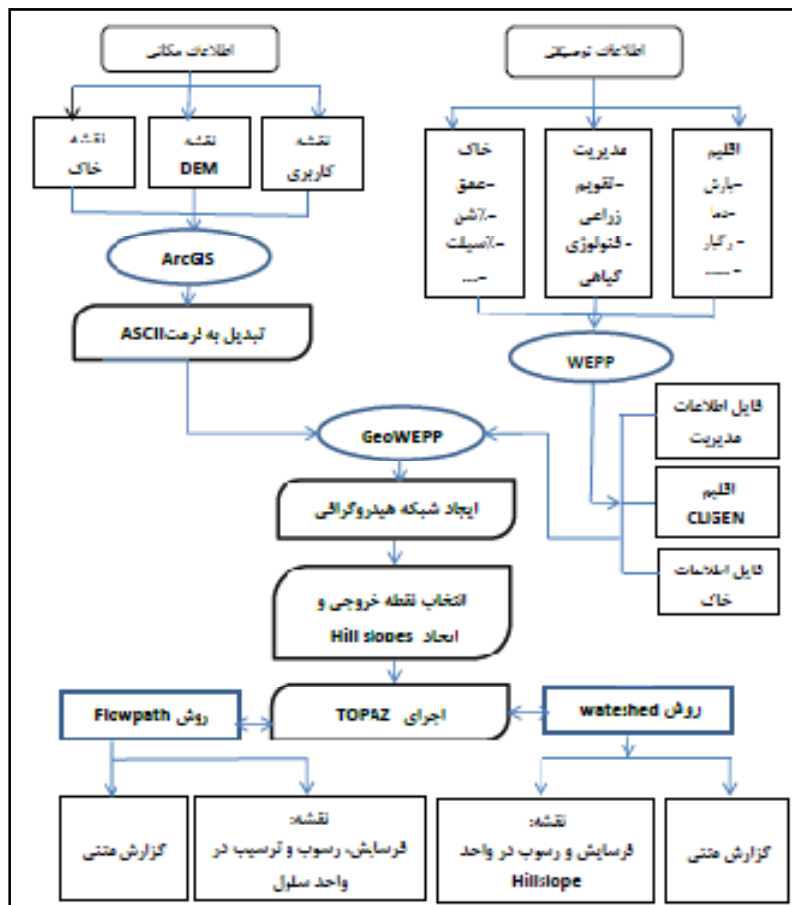
شکل ۵. داده‌های اقلیمی مدل WEPP در محیط برنامه CLIGEN

- برآورد فرسایش و رسوب در مناطق ناپایدار دامنه‌ای: شبیه‌سازی فرسایش و رسوب در مناطقی که زمین‌لغزش‌ها در آنجا از تراکم بالایی برخوردارند، در مقیاس حوضه‌ای با استفاده از برنامه رایانه‌ای GeoWEPP انجام گرفت. در اجرای این مدل، ابتدا لایه‌های اطلاعاتی مانند: مدل رقومی ارتفاعی، اطلاعات کاربری اراضی (در قالب نقشه و اسناد متنی<sup>۱</sup>) و اطلاعات خاک منطقه (نقشه و اسناد متنی) در ابتدای اجرای آن به برنامه معرفی می‌شوند. در مرحله بعد، برخی پارامترها مانند، جهت جریان<sup>۲</sup>، جریانات تجمعی<sup>۳</sup>، حداقل مساحت مورد نیاز برای تعیین زیرحوضه (CSA)<sup>۴</sup> و حداقل طول مورد نیاز برای ایجاد آبراهه (MSCL)<sup>۵</sup> از روی مدل رقومی ارتفاعی استخراج شده تا براساس آن شبکه هیدروگرافی منطقه ایجاد شود (شکل ۳). با تعیین نقطه خروجی حوضه<sup>۶</sup>، برنامه GeoWEPP واحدهای کاری را براساس هر آبراهه مشخص خواهد کرد. بدین صورت که در مدل WEPP برای

1. Text
2. Flow direction
3. Flow Accumulation
4. Critical Source Area(CSA)
5. Minimum Source Channel Length(MSCL)
6. Outlet



هر آبراهه سه واحدکاری به نام دامنه شیب<sup>۱</sup> (دامنه سمت راست آبراهه، دامنه سمت چپ آبراهه و مناطق بالادست آن) تعیین خواهد شد و برای هر کدام از آنها شماره‌ای اختصاص داده می‌شود که در مراحل بعدی، محاسبه و ارائه نتایج شبیه‌سازی فرسایش و رسوب، براساس همین شماره‌ها خواهد بود. آخرین مرحله مورد نیاز برای شبیه‌سازی با استفاده از برنامه TOPAZ خواهد بود. این برنامه برای هر دامنه شیب، نوع کاربری اراضی، خصوصیات خاک و مقدار بارش همراه با مورفولوژی دامنه مانند شیب، طول دامنه و شکل آن را تشخیص داده و براساس آنها مدل فرسایش پذیری شباری<sup>۲</sup>، فرسایش پذیری بین شباری<sup>۳</sup>، مقادیر تنش بحرانی<sup>۴</sup> هدایت الکتریکی مؤثر<sup>۵</sup> را در سطح هر دامنه شیب محاسبه کرده و نتایج محاسبات را هم به صورت نقشه و هم در فرمت متنی برای هر شبیه‌سازی ارائه خواهد کرد. در این مدل، امکان شبیه‌سازی برای چندین سال و همچنین محاسبه دوره‌های بازگشت امکان پذیر نیز وجود دارد (شکل ۶).



شکل ۶. فلوجارت فرایند شبیه سازی در محیط برنامه GeoWEPP

• بررسی ارتباط بین بار رسوبی و سطوح گسیخته شده دامنه‌ای از طریق ارائه مدل رگرسیونی.

1. Hillslope
2. Rill Erodibility
3. Interrill erodibility
4. Critical Shear
5. Effective Hydr Conductivity

## یافته‌های پژوهش

نتایج تفسیر استریویی عکس‌هایی هوایی، نشان داد که دامنه‌های محدوده حوضه گرمچای میانه، یک منطقه کاملاً ناپایدار بوده و از این طریق، تعداد ۱۳۰ منطقه لغزشی در منطقه شناسایی شد (شکل ۷)؛ به طوری که طی مشاهدات میدانی نیز مشخص شد زمین لغزش‌های زیادی در منطقه مورد مطالعه رخ داده است. همان‌گونه که از شکل ۷ نیز پیداست، اکثر پهنه‌های لغزشی در مجاورت شبکه زهکشی منطقه در بالادست آنها واقع شده‌است؛ به گونه‌ای که پنجه بیش از ۷۰ درصد زمین لغزش‌های منطقه، در مجاورت مسیل‌ها قرار گرفته‌اند. در بسیاری از دامنه‌ها زون‌های لغزشی کاملاً آشکار است و عموماً چندین لغزش منفرد و ترکیبی در یک دامنه مشاهده می‌شود.

از سوی دیگر، با توجه به همپوشانی نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها با نقشه‌های خاک و درصد شیب، مشخص شد که اولاً قسمت عمده لغزش‌های حوضه در شیب‌های نسبتاً تند مشرف بر مسیل‌ها واقع شده‌اند (جدول ۲)؛ به طوری که حدود ۶۰ درصد زمین لغزش‌های حوضه در شیب‌های ۳۰-۱۲ درصد رخ داده‌اند. همین امر تسریع در انتقال هرچه بیشتر مواد زون گسیخته شده را به همراه جریانات سطحی روی دامنه فراهم می‌کند. مدل WEPP را براساس همین ویژگی فیزیکی حوضه در محاسبه و شبیه‌سازی مقادیر فرسایش و رسوب در سطح دامنه‌ها به کار گرفتیم تا تأثیر آن را به همراه سایر پارامترهای تأثیرگذار در فرسایش و رسوب، مانند کاربری اراضی، بارش، خصوصیات فرسایش‌پذیری خاک و مورفومتری دامنه‌ها در برآورد بار رسوبی مسیل‌های مجاور مناطق زمین لغزش‌ها نشان دهیم.

جدول ۲. تراکم زمین لغزش‌ها در ارتباط با درصد شیب

کلاس شیب	درصد پوشش زمین لغزش
۰-۲	۰/۳
۲-۵	۱/۱۹
۵-۸	۶/۹۰
۸-۱۲	۱۴/۰۸
۱۲-۲۰	۳۵/۹۰
۲۰-۳۰	۲۴/۵۶
۳۰-۶۰	۱۷/۰
بزرگتر از ۶۰	۰/۰۵

ثانیاً حدود ۸۶ درصد پراکنش زمین لغزش‌ها، منطبق با خاک‌های با عمق کمتر از ۱ متر بوده است که این خاک‌ها در روش خاک‌شناسی USDA در کلاس‌های Lithic (۲۲/۵ درصد) و Shallow (۶۳/۵ درصد) قرار می‌گیرند. به گفته دیگر، زمین لغزش‌های منطقه بیشتر از نوع زمین لغزش‌های کم عمق<sup>۱</sup> و واریزه‌ای<sup>۲</sup> براساس طبقه‌بندی وارنر (۱۹۸۴) بوده و

1. Shallow landslide

2. Debris

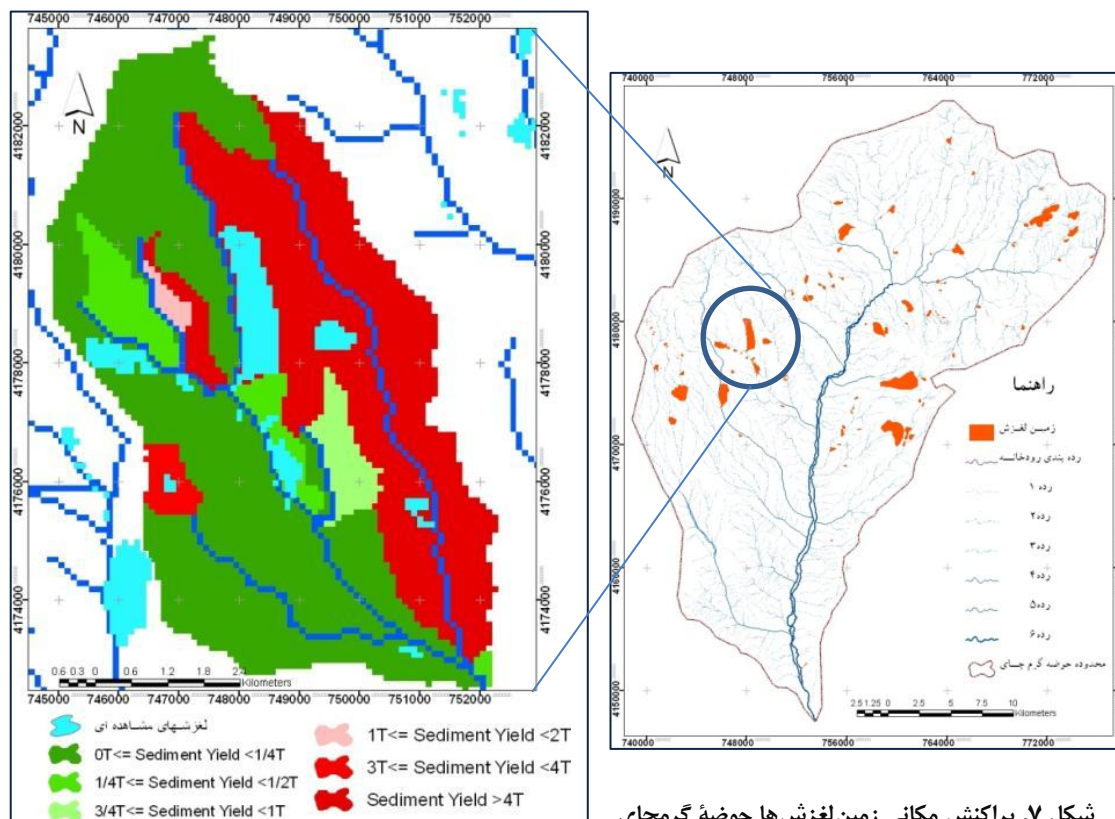
همچنانکه مشخص است، واریزه‌ها بسته به میزان رطوبت آن، در دو نوع جریان‌ات واریزه‌ای<sup>۱</sup> (در داخل مسیل‌ها همراه با آب) و لغزش‌های واریزه‌ای<sup>۲</sup> (در سطح دامنه‌ها با رطوبت کمتر) هستند و این دو نوع، در جریان بازدیدهای صحرایی به‌وفور در منطقه مشاهده شده است. با توجه به موارد گفته شده، مشخص می‌شود که سطح دامنه‌های منطقه که تراکم لغزشی بالایی دارد، از پتانسیل بالای فرسایش‌پذیری و تولید رسوب نیز برخوردار است. به همین دلیل با فرض مسلم در وجود ارتباط و همبستگی عامل بار رسوبی منطقه با پهنه‌های گسیخته‌شده لغزشی، مبنی بر اینکه عوامل مؤثر در رسوب‌دهی واحدهای هیدرولوژیکی به نحوی در ناپایداری شیب‌ها نیز مؤثرند، شبیه‌سازی فرسایش، رسوب و ته‌نشست ناشی از ناپایداری دامنه‌ای در محیط نرم‌افزاری GeoWEPP با در نظر گرفتن مورفولوژی دامنه، درصد شیب، پوشش گیاهی، بافت خاک و بارش، برای زیرحوضه‌های حاوی مناطق لغزشی صورت گرفت، ولی از آنجا که امکان بحث و ارائه نتایج همه آنها در این مقاله مقدور نیست، در این بخش برای نمونه فقط نتایج به‌دست آمده از یک زیرحوضه ارائه شده است.

زیرحوضه انتخابی اوین نام دارد که موقعیت آن در شکل ۷ نشان داده شده است. در این ناحیه، درصد گسیختگی ناشی از رانش زمین حدود ۶ درصد بوده و تعداد ۱۵ واحد لغزشی در آن شناسایی شده است که عمدتاً در مجاورت مسیل‌ها قرار گرفته‌اند. نتایج شبیه‌سازی مدل در این واحد هیدرولوژیکی در شکل ۸ ارائه شده است. یافته‌های این پژوهش نشان داد که تطابق مکانی خوبی بین مناطق لغزشی مشاهده شده با مناطق بحرانی، از نظر فرسایش وجود دارد و همان‌گونه که از شکل ۸ نیز می‌توان استنباط کرد، قسمت عمده لغزش‌های مشاهده‌ای در مناطقی واقع شده‌اند که در آن بار رسوبی بیشتر از ۴ تن در هکتار شبیه‌سازی شده و این امر نشان‌دهنده همبستگی بالای مناطق گسیختگی دامنه‌ای با بار رسوبی رودخانه در منطقه است. نتایج شبیه‌سازی مدل، متوسط سالانه تلفات خاک در سطح این زیرحوضه را ۴۰۴۶۴ تن در سال نشان می‌دهد، در حالی که این میزان در شبکه زهکشی داخل محدوده ۹۴۱۹ تن در سال محاسبه شده است. به بیان دیگر، فقط ۲۳ درصد از مجموع تلفات خاک توانسته‌اند در قالب رسوب وارد سیستم زهکشی منطقه شوند. متوسط سالانه بار رسوبی در نقطه خروجی منطقه مورد نظر برابر با ۸۸۹۱ تن در سال برآورد شده که بر اساس این ارقام، متوسط سالانه تحویل رسوب در واحد سطح حوضه در محدوده مورد نظر برابر با ۱/۸ تن در هکتار در سال و نسبت تحویل رسوب برای محدوده مورد نظر ۰/۱۸۷ محاسبه شده است.

ارتباط بین رسوبدهی و سطوح گسیخته‌شده در مناطقی که حاوی نقاط لغزشی متعددی بوده از طریق ایجاد رابطه همبستگی بین آن دو صورت گرفت. نتیجه به‌دست آمده بیانگر وجود یک رابطه رگرسیونی با درجه همبستگی بسیار خوب بین عامل بار رسوبی (y) با سطوح دارای گسیختگی لغزشی (x) در حوضه گرمچای میانه است (شکل ۹). معادله عددی این ارتباط به‌صورت زیر است.

$$y = 1/7994x + 735/73$$

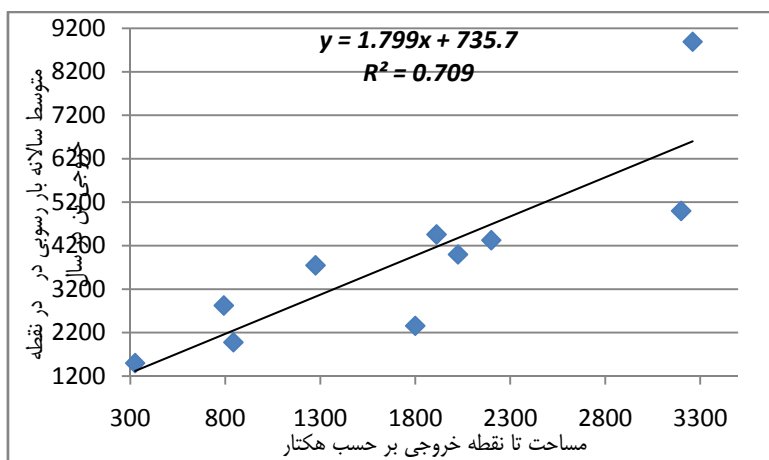
$$R^2 = 0/71$$



شکل ۷. پراکنش مکانی زمین لغزش‌ها حوضه گرمچای

شکل ۸. شبیه‌سازی بار رسوبی ناشی از وقوع لغزش

مقدار ضریب تبیین<sup>۱</sup> در این رابطه ۰/۷۱ محاسبه شد که از لحاظ آماری برای یک مدل رگرسیونی دو متغیره مطلوب بوده و بیانگر درصد وابستگی قابل توجه در رسوب‌دهی حوضه گرمچای به حرکات توده‌ای است.



شکل ۹. نمودار رابطه همبستگی بین سطوح گسیخته با بار رسوبی آن در حوضه گرمچای میانه

## بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر حرکات توده‌ای در بار رسوبی حوضه گرمچای با به‌کارگیری مدل فرایندی WEPP صورت گرفت و از آنجایی که توزیع مکانی فرسایش و رسوب در ارتباط با نقاط لغزشی مد نظر بود، از برنامه رایانه‌ای GeoWEPP در محیط نرم‌افزاری ArcGIS9.3 استفاده شد. نتایج محاسبات فرسایش و رسوب با وجود ارزیابی کیفی آن، منطقی به نظر می‌رسند. این‌گونه مطالعات در گذشته از طریق محاسبه مورفومتری لغزش‌ها (روستایی، ۱۳۷۹)، اجرای مدل تجربی PSIAC و ارائه مدل رگرسیونی چندمتغیره بین مساحت و مقادیر رسوب نقاط لغزشی (شریعت جعفری، ۱۳۸۴؛ امیدوار و کاویان، ۱۳۸۹)، محاسبه ابعاد لغزش‌ها و برآورد حجم مواد گسیخته شده (گازوتی و همکاران، ۲۰۰۹) انجام می‌شد، ولی این دست مطالعات معمولاً نه‌تنها زمان‌بر هستند، بلکه مستلزم صرف هزینه زیادی نیز خواهند بود. ضمن آنکه در هیچ یک از این روش‌ها مشخص نشده که چه مقدار از مواد جابه‌جا شده در سطح دامنه‌ها بر اثر حرکات توده‌ای وارد سیستم زهکشی شده‌اند و چه مقدار از آن، همچنان در سطح دامنه‌ها در قالب مواد نهشته‌شده باقی مانده است؟ بنابراین امروزه مدل‌سازی یکپارچه احتمال وقوع زمین‌لغزش‌ها و تأثیر آن بر بار رسوبی شبکه رودخانه‌ای، به‌ویژه برای مناطق فاقد اطلاعات رسوبات مشاهده‌ای رایج شده است. در همین زمینه، مدل فرایندی WEPP قابلیت شبیه‌سازی فرسایش و رسوب در سطح دامنه‌ها را داشته و تنها مدلی است که همزمان امکان محاسبه حجم و توزیع مکانی رسوبات نهشته شده در سطح دامنه‌ها را نیز دارد. آچاریا (۲۰۱۱) از مدل فرایندی WEPP برای محاسبه بار رسوبی مناطق لغزشی در نیوزلند استفاده کرد و از طریق مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده GeoWEPP با نتایج آزمایشگاهی وقوع لغزش و رسوبات ناشی از آن، نتیجه گرفت که تطابق مناسبی بین مقادیر رسوب مشاهده‌ای و محاسبه شده توسط مدل یاد شده وجود دارد. روش مورد استفاده در این پژوهش برای نخستین بار است که در سطح کشور انجام شده است. با توجه به نبود داده‌های رسوب مشاهده‌ای و عدم امکان مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده فرسایش و رسوب توسط مدل GeoWEPP در حوضه گرمچای، پیشنهاد می‌شود که در مطالعات مشابه در مناطقی با امکان دسترسی به داده‌های واقعی رسوب کارایی این مدل بیشتر مورد ارزیابی قرار گیرد.

## تشکر و قدردانی

این پژوهش برگرفته از رساله دکترای رشته ژئومورفولوژی دانشگاه تبریز بوده است که با همکاری و حمایت مالی سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی انجام گرفت و برخی اطلاعات لازم از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری و همچنین مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی مرکز تبریز تهیه شده است. بدین وسیله از همه مسئولان و کارشناسان محترم این اداره‌ها و سازمان‌ها تشکر و قدردانی می‌شود.

## منابع

Acharya, G., 2011, **Analyzing the Interactions between Water-induced Soil Erosion and Shallow Landslides**, Ph.D. Thesis, Department of Civil and Natural Resources Engineering University of Canterbury.

- Bathurst, J.C., Bovolo, C.I., Cisneros, F., 2010, **Modelling the Effect of Forest Cover on Shallow Landslides at the River Basin Scale**, Ecological Engineering, Vol. 36, No. 3, PP. 317–327.
- Benda, L., Hassan, M.A., Church, M., May, C.L., 2005, **Geomorphology of Steepland Headwaters: the Transition from Hillslopes and Channels**, Journal of the American Water Resources Association, Vol. 41, No.4, PP. 835–851.
- Burton, A., Bathurst, J.C., 1998. **Physically Based Modelling of Shallow Landslide Sediment Yield at a Catchment Scale**, Environmental Geology, Vol. 35, No. 2-3, PP. 89-99.
- Corominas, J., 2001, **Landslides and Climate**, in: the Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides, Cardiff, UK.
- Fathi, M., 2011, **Landslide Hazard Zonation Based on AHP Method (Case Study: Garm Cahy Basin Mianeh)**, MSc thesis, Physical Geography Department, Tabriz University, Tabriz, Iran.
- Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Rossi, M., Valigi, D., 2009, **Landslide Volumes and Landslide Mobilization Rates in Umbria, Central Italy**, Earth and Planetary Science Letters, Vol. 279, No. 3-4, PP. 222–229.
- Hsu, S. M., Wen, H. Y., Chen, N. C., Hsu, S. Y. and Chi, S., 2012, **Using an Integrated Method to Estimate Watershed Sediment Yield during Heavy Rain Period: a Case Study in Hualien County, Taiwan**, Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 12, No. 6, PP. 1949–1960.
- Hunter, G., Fell, R., 2003, **Travel Distance Angle for “Rapid” Landslides in Constructed and Natural Soil Slopes**, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 40, No. 6, PP. 1123-1141.
- Iverson, R.M., Reid, M.E., Iverson, N.R., LaHusen, R.G., Logan, M., Mann, J.E., Brien, D.L., 2000, **Acute Sensitivity of Landslide Rates to Initial Soil Porosity**, Science, Vol. 290, No.5491, PP. 513-516.
- Iverson, R.M., Reid, M.E., LaHusen, R.G., 1997, **Debris-Flow Mobilization from Landslides**, Annual Review of Earth Planetary Sciences, Vol. 25, PP. 85-138.
- Johnson, A.C., Swanston, D.N., McGee, K.E., 2000, **Landslide Initiation, Runout, and Deposition within Clearcuts and Old-growth Forests of Alaska**, Journal of the American Water Resources Association, Vol. 36, No. 1, PP. 17-30.
- Korup, O., McSaveney, M.J., Davies, T.R.H., 2004, **Sediment Generation and Delivery from Large Historic Landslides in the Southern Alps, New Zealand**, Geomorphology, Vol.61, No. 1-2, PP. 189-207.
- Lourenco, S.D.N., Sassa, K., Fukuoka, H., 2006, **Failure Process and Hydrologic Response of a Two Layer Physical Model: Implications for Rainfall-Induced Landslides**, Geomorphology, Vol. 73, No. 1-2, PP. 115-130.
- Malet, J.P., Laigle, D., Remaître, A., Maquaire, O., 2005, **Triggering Conditions and Mobility of Debris Flows Associated to Complex Earthflows**, Geomorphology, Vol. 66, No. 1-4, PP. 215-235.
- Olivares, L., Damiano, E., 2007, **Postfailure Mechanics of Landslides: Laboratory Investigation of Flowslides in Pyroclastic Soils**, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 133, No. 1, PP. 51-62.

- Omidvar, E., and Kavian, A., 2011, **Landslide Volume Estimation Based on Landslide Area in a Regional Scale (Case Study: Mazandaran Province)**, Journal of Natural Environmental, Iranian Journal of Natural Resources, Vol. 63, No. 4, PP. 439-455.
- Roostaei, Sh., 1989, **A Research on Landslide Dynamics those Occurrence Causes by Morphometric Method in Ahar Chay Basin**, Ph.D. Thesis, Physical Geography Department, Tabriz University, Tabriz.
- Schwab, M., Rieke-Zapp, D., Schneider, H., Liniger, M., Schlunegger, F., 2008, **Landsliding and Sediment Flux in the Central Swiss Alps: a Photogrammetric Study of the Schimbrig Landslide, Entlebuch**, Geomorphology, Vol. 97, No. 3-4, PP. 392-406.
- Schuerch, P., Densmore, A.L., McArdell, B.W., Molnar, P., 2006, **The Influence of Landsliding on Sediment Supply and Channel Change in a Steep Mountain Catchment**. Geomorphology, Vol.78, No. 3-4, PP. 222-235.
- Shariat Jafari, M. and Ghayomian, J., 2004, **Relationship between Slope Failure and Sediment Yield in Central Talegan Watershed**, Earth Science Publication, 57, www.ngdir.ir.
- Varnes, D., 1984, **Landslide Hazard Zonation: a Review of Principles and Practice**, Paris' UNESCO.
- Wang, G., Sassa, K., 2003, **Pore-Pressure Generation and Movement of Rainfall-Induced Landslides: Effects of Grain Size and Fine-Particle Content**, Engineering Geology, Vol. 69, No.1-2, PP. 109-125.