

## بررسی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از GIS و RS (مطالعه موردی سد دوستی)

سیدرضا حسین‌زاده<sup>۱</sup>

علی قربانی شورشانی<sup>۲\*</sup>

علی محمد نورمحمدی<sup>۳</sup>

محسن رضایی عارفی<sup>۴</sup>

### چکیده

یکی از شایع‌ترین پیامدهای ژئومورفیک حاصل از ساخت سدها و ایجاد دریاچه در پشت آنها، فعال شدن لغزش‌هاست. سد دوستی به عنوان یکی از بزرگ‌ترین سدهای ذخیره‌ای کشور در اثر فعال شدن لغزش‌ها با وضعیت بحرانی مواجه شده است. هدف از این مطالعه شناسایی پدیده‌ی لغزش، علل، روند و اثرات آینده آن در دریاچه سد دوستی است و روش تحقیق آن توصیفی-تحلیلی و تجربی است که در آن از داده‌های رقومی تصاویر سنجنده IRS، مدل‌های رقومی ارتفاع (DEM)، نقشه‌های زمین‌شناسی، تصاویر ماهواره‌ای، و اطلاعات حاصل از عملیات میدانی و آزمایشگاهی شامل مشاهده مقاطع زمین شکل‌ها، مقاطع طبقات، و عوارض ساختمانی موجود در منطقه جهت تکمیل نقشه‌ی ژئومورفولوژی، نمونه‌برداری از مواد سطحی، نقشه‌برداری از لغزش‌های نمونه جهت پایش‌های بیشتر و انجام آزمایش توزیع ذرات استفاده شده است. نتایج حاصل از بررسی‌های صورت گرفته در منطقه به شناسایی ۲۵۲ زمین‌لغزه‌ی جدید با مساحت کلی ۱۲۳/۸ هکتار (۱/۲۳ کیلومتر مربع) انجامید، حجم رسوب تولید شده توسط این زمین‌لغزش‌ها حدود ۸۵۹۵۴۳۳ مترمکعب (۸/۵۹ کیلومتر مکعب) بوده که تاکنون وارد دریاچه‌ی سد شده است. عوامل ایجاد لغزش‌ها شامل عوامل زمین‌شناسی، هیدرولوژی، آنتروپوژن، زیستی و اقلیمی است. با توجه به آثار زمین‌لغزش‌ها بر کیفیت آب، گنجایش سد و همچنین ناپایداری دامنه‌های مشرف به دریاچه‌ی سد، برنامه‌ریزی برای کنترل لغزش‌ها ضروری است.

**واژه‌های کلیدی:** لغزش؛ سد دوستی؛ مدل رقومی ارتفاع؛ تصاویر ماهواره‌ای

۱- دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد (نویسنده مسئول).

۳- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۴- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار.

## مقدمه

ساخت سدها و ایجاد دریاچه در پشت آنها باعث تغییرات ژئومورفیک در حاشیه آن می‌شود. یکی از شایع‌ترین این تغییرات فعال شدن و تشدید لغزش‌هاست؛ که در برخی موارد به یک بحران تبدیل می‌شود. «در سطح جهانی» توسعه و پیشرفت مطالعات مربوط به زمین‌لغزش توسط مهندسان زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی عمدتاً ضمن پیشبرد عملیات عمرانی و یا در پی تکامل مطالعات مربوط به زلزله‌ها و بلایای طبیعی صورت گرفته است. اقدامات و کارهای مذکور با پیشرفت‌های اخیر در فنون تهیه و ترسیم نقشه، روش‌های آماری، استفاده از سیستم‌های رایانه‌ای، عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای، روندی به سرعت تکاملی داشته و اکنون استفاده از رایانه، عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای سهم بسیار با ارزشی در این گونه بررسی‌ها، مدل‌سازی و پهنه‌بندی‌ها دارد.

«در کشور ما» مطالعات و کارهای مربوط به مدل‌سازی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، عمدتاً از اوایل دهه ۸۰-۱۳۷۰ آغاز شده است. توجه به عمران و آبادانی کشور قبل و به‌ویژه پس از جنگ، همگام با افزایش آگاهی نسبت به خسارت‌های سنگین بلایای طبیعی و زمین‌لغزش‌ها موجب توجه ویژه‌ی وزارت‌خانه‌ها، سازمان‌های ذیربط و برخی از پژوهشگران به مسأله‌ی سوانح طبیعی و از جمله زمین‌لغزش‌ها شد.

از جمله بررسی‌ها و مطالعات مربوط به زمین‌لغزش‌ها و پهنه‌بندی آنها در کشور، می‌توان به پروژه تشکیل بانک اطلاعاتی زمین‌لغزش‌های کشور توسط مرکز زمین‌لغزش سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزهای کشور و پروژه‌ی کلان پهنه‌بندی زمین‌لغزش توسط پژوهشکده سوانح طبیعی، وابسته به بنیاد مسکن انقلاب اسلامی اشاره کرد. با این همه، چنان‌که باید به این پدیده به عنوان یکی از مخاطرات تکنولوژیک محصول احداث سدهای بزرگ توجه نشده است.

پس از جنگ دوم جهانی ژئومورفولوژیست‌ها و مهندسان تلاش‌هایی جدی درباره بررسی مخاطره لغزش در دریاچه سدها در سطح جهان، انجام داده‌اند: از بهترین کارهای انجام شده می‌توان به مطالعه رابرت شوستر (۱۹۸۶)، با عنوان «رابطه‌ی سدها و زمین‌لغزش‌ها» اشاره کرد که در آن به بررسی ۲۵۰ سد در سراسر دنیا پرداخته است. ایشان در مطالعه خود ابتدا سدها را به لحاظ عوامل ایجاد کننده‌ی لغزش تقسیم‌بندی و مورد بررسی قرار داده و در پایان برای هر گروه راهکار مناسب ارائه داده است.

یلسین در سال ۲۰۰۸ نقشه حساسیت زمین لغزش در حوضه‌ی آردیس ترکیه با سه روش فرایند سلسله مراتبی (AHP)، فاکتور وزنی (Wf) و شاخص آماری (Wi) را تهیه نمود و نتیجه گرفت که برای شناسایی مناطق دارای زمین لغزش در حوضه‌ی مورد مطالعه، روش AHP بهتر از دو روش دیگر است.

از مطالعات انجام شده درباره‌ی زمین لغزش در دریاچه‌ی سدهای ایران و پهنه‌بندی آنها می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

انتظاری و همکاران (۱۳۸۴)، در مقاله‌ای با عنوان پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در محدوده حوضه سد بالایی سیاه‌بیشه، نقشه پهنه‌بندی منطقه و قسمت‌های مستعد زمین لغزش را در پنج منطقه نشان دادند.

در پژوهشی دیگر یمانی و همکاران (۱۳۸۶)، با استفاده از مدل LNRF به بررسی پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز جلیسیان پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مدل مذکور کارایی خوبی برای بررسی داده‌ها و پهنه‌بندی زمین لغزش در نواحی مرطوب تا نیمه‌مرطوب دارد.

یکی دیگر از معدود مطالعات انجام شده درباره پدیده‌ی لغزش در دریاچه سدهای ایران، مطالعه آشتیانی (۱۳۸۷)، است که به بررسی امواج ضربه‌ای ناشی از رخداد لغزش در سدها پرداخته و یک مدل آزمایشگاهی کامل از مراحل ایجاد لغزش و امواج ضربه‌ای حاصل از آن را ارائه کرده است.

رضانی (۱۳۸۸)، در مقاله‌ای با عنوان شناخت عوامل مؤثر زمین لغزش در حوضه‌ی آبخیز سد برنجستانک قائمشهر به این نتیجه رسید که عوامل مهم در ایجاد توده‌های لغزشی در حوضه‌ی مورد مطالعه، عوامل لیتولوژیکی، وجود بیرون‌زدگی‌های سنگی و تراکم و تکتونیک می‌باشد.

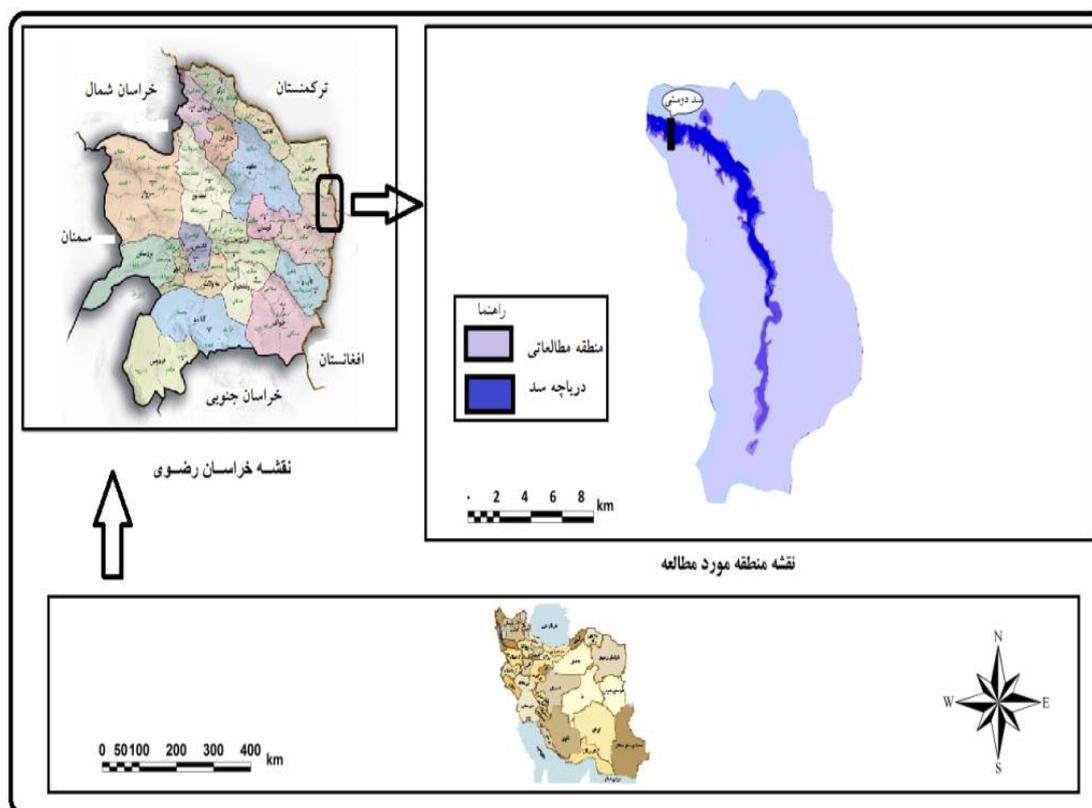
بای و همکاران (۱۳۸۹)، در پژوهشی دیگر با عنوان پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از روش AHP در حوضه مادرسو، نتیجه گرفتند که این روش برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه مود مطالعه، روش بسیار مناسبی است.

سوری و همکاران (۱۳۹۰)، در مقاله‌ای با عنوان پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه نوژیان با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در این حوضه، ساختار نهایی ۱-۱۱-۹ را به دست آوردند.

### معرفی منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه با مساحتی حدود ۵۱۰ کیلومتر مربع دامنه‌های مشرف به دریاچه سد دوستی را در بر می‌گیرد. این سایت در ۱۸۰ کیلومتری شرق مشهد و ۷۵ کیلومتری جنوب سرخس بین  $35^{\circ} 41' 29''$  تا

۳۵° ۵۵' ۴۳" عرض شمالی و ۶۱° ۰۸' ۵۳" تا ۶۱° ۲۲' ۵۱" طول شرقی قرار دارد. به لحاظ موقعیت سیاسی ساختار خود سد در شهرستان سرخس و بخش اعظمی از دریاچه آن در شهرستان تربت جام و بخش صالح آباد واقع شده است (شکل ۱).



شکل (۱) موقعیت منطقه مطالعاتی

سد دوستی با همکاری مشترک ایران و ترکمنستان ساخته شده و از نوع خاکی با هسته رسی است، ارتفاع آن ۷۸ متر و طول تاج ۶۵۰ متر می‌باشد. در جدول (۱) خلاصه‌ای از مشخصات سد بیان شده است.

از نظر ژئومورفولوژی ساختمانی منطقه مورد مطالعه جزو سیستم چین‌خورده‌ی کپه‌داغ بوده و در انتهای جنوب شرقی این رشته کوه و در مرز تلاقی صفحه توران و ایران مرکزی واقع شده است. ارتفاعات در این منطقه دارای روند شمال غرب - جنوب شرق می‌باشد که با روند ارتفاعات در کپه‌داغ همسو است. میانگین ارتفاع در این منطقه ۶۰۸ متر و بلندترین و پست‌ترین نقاط آن به ترتیب ۱۲۴۰ و ۳۸۲ متر ارتفاع دارند. شکل ۲ وضعیت نیمرخ توپوگرافی سد در بخش‌های مختلف را نشان می‌دهد.

بیش از ۸۰ درصد مساحت منطقه شیبی بین ۰ تا ۲ درصد و ۱۴ درصد شیبی بین ۲ تا ۴ درصد دارد و

تنها ۶ درصد مساحت منطقه شیبی بالای ۴ درصد دارد.

ریخت‌شناسی منطقه جوان است و توپوگرافی آن، رابطه مستقیم با ساختارهای زمین‌شناسی دارد. واحدهای سنگی منطقه مطالعاتی با توجه به ساختمان زمین‌شناسی شامل سازندهای سنگانه (شیل و مارن)، اتامیر (ماسه‌سنگ و شیل)، آبدراز (مارن، آهک)، آبتلخ (مارن و شیل)، شوربچه (گچ و کنگلومرا)، خانگیران (شیل و ماسه‌سنگ) نهشته‌های کواترنری و رسوبات عهد حاضر می‌باشند. در بخش‌های مرتفع و دامنه‌های مشرف به دریاچه، برخلاف داده‌های نقشه‌ی زمین‌شناسی موجود منطقه، که بیشتر مواد پوششی این قسمت را سازندهای اصلی ذکر شده در بالا ثبت کرده‌اند، عمدتاً از نوع رسوبات لسی است.

اقلیم منطقه خشک و سرد و متوسط بارندگی سالانه‌ی منطقه ۲۲۶ میلی‌متر گزارش شده است (گزارشات شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان رضوی). جهت وزش باد غالب در منطقه‌ی مورد مطالعه عمدتاً از شمال غرب به جنوب شرق بوده و فقط در ماه‌های مرداد و شهریور جهت آن شمالی است. از نظر پوشش گیاهی منطقه مطالعاتی دارای پوشش مرتعی فقیری است و توان حفاظت از خاک منطقه را ندارد (گزارشات شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان).

جدول (۱) مشخصات دریاچه‌ی سد دوستی

طول مخزن	۳۷/۶ کیلومتر	عرض متوسط	۱ کیلومتر
حجم در تراز نرمال	۱۲۵۰ میلیون متر مکعب	حجم مرده	۳۰۰ میلیون متر مکعب
حجم مفید	۹۵۰ میلیون متر مکعب	حجم تنظیم سالانه	۸۲۰ میلیون متر مکعب
تراز نرمال آب	۴۷۳/۷۵ متر از سطح دریا	تراز حداکثر آب	۴۷۶/۵۰ متر از سطح دریا
تراز حداقل آب	۴۴۵ متر از سطح دریا		

## مواد و روش‌ها

این تحقیق به طور کلی یک تحقیق کاربردی است که در آن از روش توصیفی-تحلیلی، تاریخی و تجربی استفاده شده است. در این تحقیق از مدل رقومی ارتفاع (DEM) نوع SRTM<sup>۱</sup> و ASTER<sup>۲</sup>، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰، تصاویر ماهواره‌ای Google Earth، داده‌های رقومی تصاویر سنجنده ETM و IRS مربوط به مارس ۲۰۰۵ و ژولای ۲۰۰۲ و نرم‌افزارهای تهیه و تفسیر نقشه استفاده شده است. شایان ذکر این

1- Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

2- Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection

که برای کنترل و گردآوری اطلاعات تکمیلی، عملیات میدانی و آزمایشگاهی و به منظور بررسی پیشینه تحقیق و روش‌های مختلف مطالعه لغزش‌ها از روش کتابخانه‌ای استفاده شده است.

ابتدا محدوده مورد مطالعه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ذخیره شده از Google Earth و داده‌های رقومی تصاویر سنجنده IRS تعیین حدود گردیده و سپس تحلیل شیب، جهت شیب و توپوگرافی منطقه با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) (Srtm Iran) انجام شد. نقشه پراکندگی لغزش‌های منطقه با استفاده از نرم‌افزار Arc/GIS9.3 از تصاویر ماهواره‌ای Google Earth تهیه و تفسیر شد و سپس به منظور تدقیق نقشه خروجی پراکندگی لغزش‌های منطقه از داده‌های رقومی تصاویر سنجنده IRS مربوط به ژوئای ۲۰۰۵ استفاده گردید.

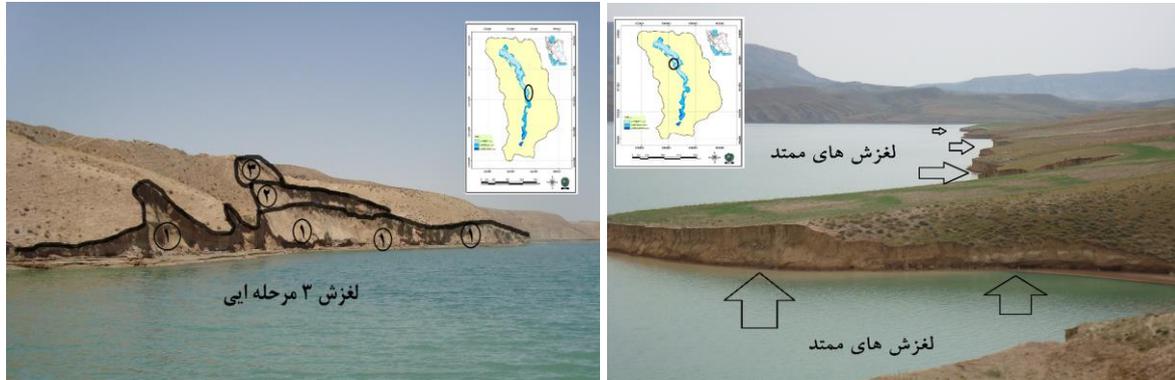
در تحلیل و بررسی وضعیت زمین‌شناسی منطقه متأسفانه نقشه‌ی زمین‌شناسی موجود به دلیل نقایصی که دارد چندان مفید واقع نشد. لذا پس از تهیه نقشه گسترش مواد سطحی حساسیت‌پذیر، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و عملیات میدانی ۷ نمونه رسوب از رسوبات لسی مستعد لغزش برداشت و به آزمایشگاه منتقل گردید. در آزمایشگاه ۲۰ گرم از هر نمونه پس از بین بردن املاح محلول شور توسط آبشویی با آب مقطر و از بین بردن مواد آلی توسط آب اکسیژنه‌ی ۳۰ درصد، مجدداً خشک و توزین شده و بدون آهک‌زدایی برای تعیین توزیع اندازه‌ی ذرات استفاده شد. زیربخش‌های شن خیلی درشت (۲-۱ میلی‌متر)، شن درشت (۱-۵ میلی‌متر)، شن متوسط (۵-۲۵ میلی‌متر)، شن ریز (۲۵-۱ میلی‌متر) و شن خیلی ریز (۱-۰۵ میلی‌متر) به‌وسیله‌ی سری الک جدا شدند. با استفاده از روش پیپت (۲۹)، سیلت به سه بخش سیلت درشت (۵۰-۲۰ میکرون)، سیلت متوسط (۲۰-۵ میکرون) و سیلت ریز (۵-۲ میکرون) تقسیم شد. بخش رس (کمتر از ۲ میکرون) نیز تفکیک گردید (USDA-NRCS, ۱۹۹۶).

## بحث و نتایج

### تحلیل و بررسی لغزش‌ها و فراوانی آنها در منطقه

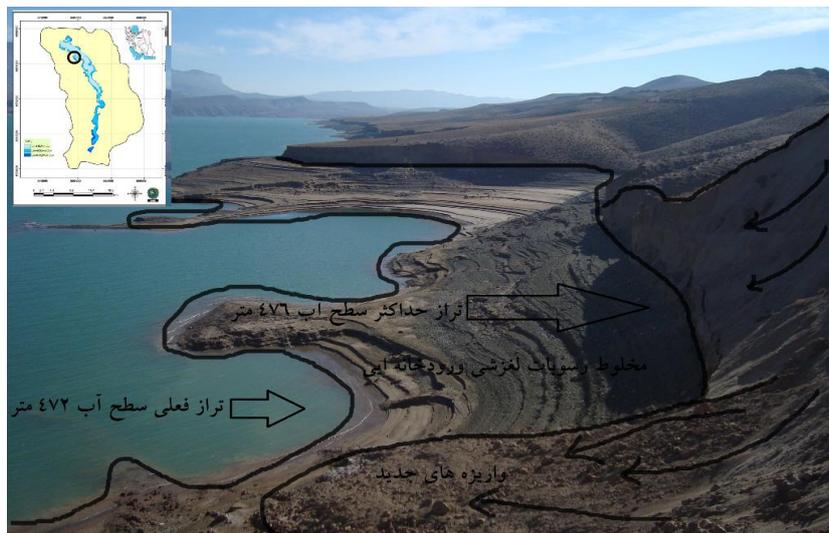
قبل از ارایه‌ی نتایج آماری زمین‌لغزش‌ها، لازم به ذکر است که بررسی‌های صورت گرفته بر روی عکس‌های هوایی (۱۳۴۵) و تصاویر ماهواره‌ای قدیمی‌تر (ژوئای ۲۰۰۲) منطقه‌ی مورد مطالعه نشان می‌دهد که دامنه‌ها به دلیل شرایط خاص محیطی قبل از ساخت سد، از یک تعادل نسبی برخوردار بوده‌اند و لغزش‌ها و گسیختگی‌های آنچنانی به‌جز چند لغزش کوچک و منفرد و دور از هم در آن اتفاق نیفتاده و شرایط کنونی یعنی تشدید ناپایداری دامنه‌ها به طور قطع ناشی از ساخت سد است.

لغزش‌های بعد از احداث سد همان‌طور که در شکل (۲) (سمت راست) مشاهده می‌شود هم در سواحل کم ارتفاع و هم در سواحل مرتفع دریاچه (سمت چپ) رخ داده‌اند.



شکل (۲) نمونه‌ای از زمین‌لغزش‌های سواحل کم ارتفاع (سمت راست) و نمونه‌ای از زمین‌لغزش چند مرحله‌ای سواحل مرتفع و پرتیب (سمت چپ)

دلیل اصلی وقوع لغزش در سواحل مرتفع، تغییرات سطح اساس آب است که در آن با هر بار بالا یا پایین رفتن سطح آب یک گسیختگی کوچک یا بزرگ اتفاق افتاده و منجر به ایجاد لغزش‌ها و پرتگاه‌های پرتیب در این گونه سواحل می‌شوند. وقوع لغزش و ناپایداری دامنه‌ها منجر به تداوم حرکات دامنه‌ای از نوع ریزش می‌شود (شکل ۳). در این حالت حتی کوچک‌ترین عوامل تحریک‌کننده مانند لرزش‌های ناشی از عبور وسایط نقلیه سنگین و نیمه‌سنگین در امتداد جاده مرزی، ریزش‌های جدیدی را به همراه دارد.

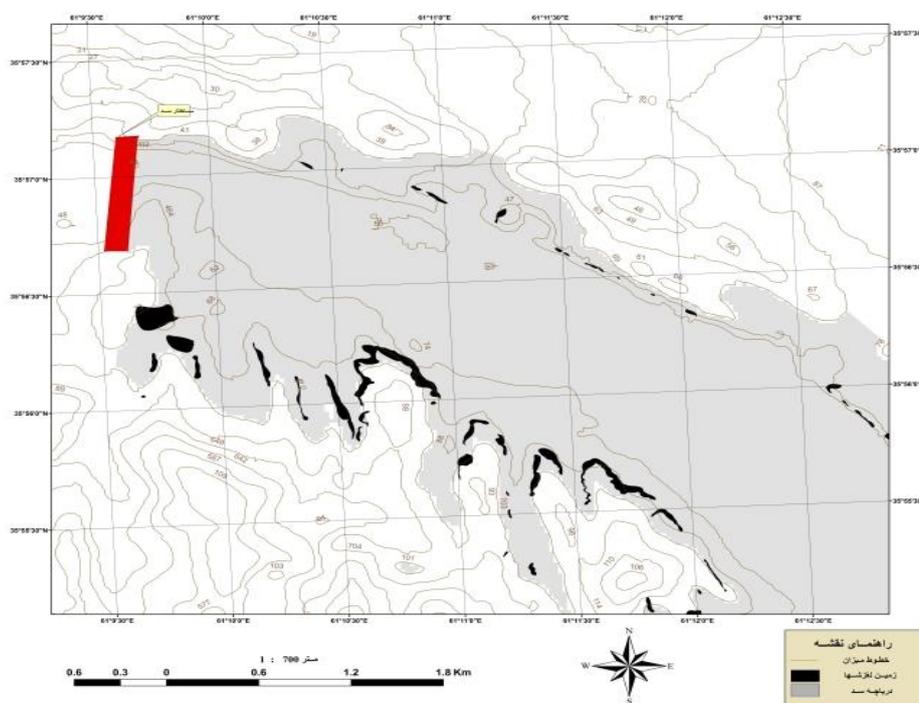


شکل (۳) نمونه‌ای از زمین‌لغزش همراه با واریزه در سواحل دریاچه‌ی سد دوستی

### تحلیل فراوانی لغزش‌ها

لغزش‌ها بر اساس مساحت در هفت پهنه تقسیم شده‌اند که خلاصه‌ی آن در جدول (۲) نشان داده شده است. بیشترین فراوانی زمین‌لغزش‌ها در پهنه‌ی لغزشی اول (۹۲٪) و کمترین فراوانی آنها در پهنه‌ی لغزشی هشتم (۲٪) قرار دارند. به لحاظ مساحت به ترتیب بیشترین مساحت مربوط به پهنه‌ی هفتم (۱۸/۵٪)، و کمترین آن به پهنه‌ی اول (۳٪) اختصاص دارد.

تعداد ۲۵۲ زمین‌لغزش به مساحت کلی ۱۲۲/۸ هکتار (۱/۲۳ کیلومترمربع) شناسایی و ثبت شده است که حجم رسوب تولید شده توسط این زمین‌لغزش‌ها با توجه به عمق متوسط (۷متر) رسوبات مستعد لغزش، حدود ۸۵۹۵۴۳۳ مترمکعب (۸/۵۹ کیلومترمکعب) تخمین زده می‌شود. با در نظر گرفتن جرم حجمی متوسط ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب، جرم این رسوبات ۲۲۷۷۷۸۹۷ تن است. مساحت بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین زمین‌لغزش به ترتیب حدود ۱۱۱۷۶۵ و ۱۳/۶ مترمربع و میانگین مساحت زمین‌لغزش‌ها ۵۰۱۴ مترمربع برآورد شد. ۶۴/۵ درصد لغزش‌های منطقه در ارتفاع بین ۴۴۵ تا ۴۸۰ متر و از نظر شیب ۹۸ درصد لغزش‌های منطقه در شیبی بین ۰ تا ۲ درصد اتفاق افتاده که خود بیانگر نقش مستقیم دریاچه سد است حدود ۵۰ درصد لغزش‌ها در دامنه‌های شمالی و شمال غربی رخ داده که علاوه بر نقش رسوبات سطحی، توجیه‌کننده‌ی جهت وزش باد و امواج حاصل از آن در برخورد به سواحل مذکور است (شکل ۴).



شکل (۴) پراکنش لغزش‌های جدید در سواحل دریاچه سد دوستی

جدول (۲) خصوصیات پهنه‌های لغزشی

توضیح مکانی	درصد تجمعی مساحت	درصد تجمعی تعداد	درصد مساحت	درصد تعداد	حداکثر	حداقل	میانگین مساحت	مساحت کل	تعداد	مساحت پهنه لغزشی (متر)	پهنه لغزشی
تمرکز بیشتر در ساحل سمت راست نزدیک سد	۳٪	۳۶٪	۳٪	۳۶٪	۹۹۳	۱۳	۴۰۴	۳۸۰۳۷	۹۲	کوچک‌تر از ۱۰۰۰	اول
در دو طرف سواحل پراکنده‌اند	۷٪	۵۰٪	۴٪	۱۴٪	۱۹۱۸	۱۰۰۲	۱۴۱۲	۵۳۶۷۴	۳۶	۲۰۰۰-۱۰۰۰	دوم
در دو طرف سواحل پراکنده‌اند	۱۸٪	۷۲٪	۱۱٪	۲۲٪	۳۹۲۷	۲۰۲۰	۲۸۲۴	۱۴۴۰۷۲	۵۶	۴۰۰۰-۲۰۰۰	سوم
تراکم بیشتر در سمت چپ و قسمتهایی که دچار ماندردگی‌اند	۳۲٪	۸۶٪	۱۵٪	۱۴٪	۷۹۷۵	۴۰۹۵	۵۵۳۸	۱۹۳۸۵۵	۳۳	۸۰۰۰-۴۰۰۰	چهارم
تراکم بیشتر در پیچ ماندرها و در هر دو طرف سواحل	۴۸.۵٪	۹۳٪	۱۶.۵٪	۷٪	۱۵۸۴۸	۸۱۱۳	۱۰۶۴۷	۲۰۲۳۰۸	۱۶	-۸۰۰۰ ۱۶۰۰۰	پنجم
در ساحل سمت چپ و نزدیک به ساختار سد	۶۶.۵٪	۹۷٪	۱۸٪	۴٪	۳۱۸۷۵	۱۶۵۶۰	۲۱۶۷۷	۲۳۸۴۵۱	۱۱	-۱۶۰۰۰ ۳۲۰۰۰	ششم
در ساحل سمت چپ و نزدیک به ساختار سد	۸۵٪	۹۹٪	۱۸.۵٪	۲٪	۴۳۷۶۴	۳۳۱۹۶	۳۸۹۸۴	۲۳۳۹۰۹	۶	-۳۲۰۰۰ ۶۴۰۰۰	هفتم
در ساحل سمت راست و نزدیک به ساختار سد	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۱۵٪	۰.۷٪	۱۱۱۷۰۷	۶۷۷۲۰	۳۸۹۸۳	۱۷۹۴۲۸	۲	بیشتر از ۶۴۰۰۰	هشتم
	-----	-----	۱۰۰٪	۱۰۰٪			-----	۱۲۸۳۷۳۷	۲۵۲	-----	جمع

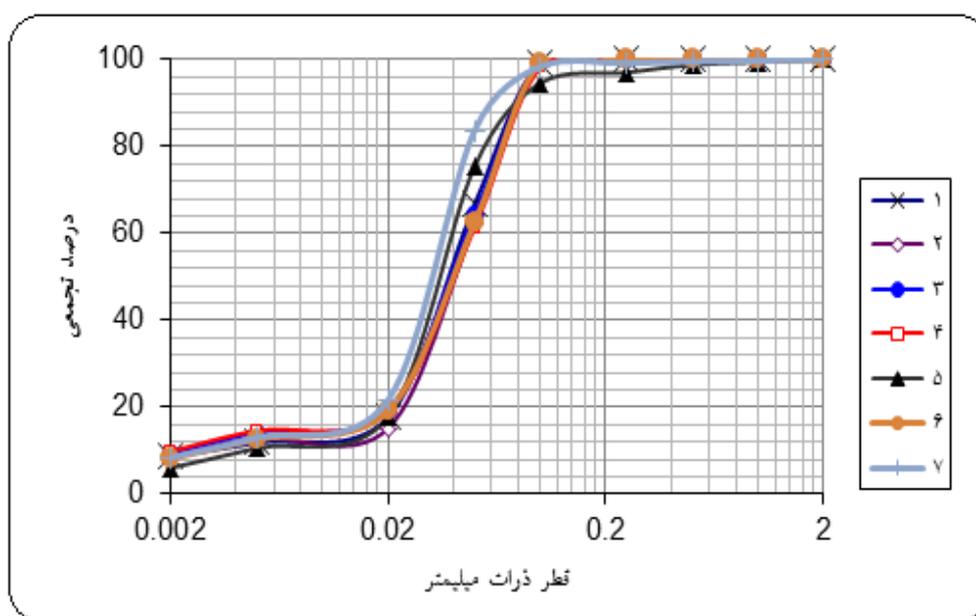
منبع: محاسبات نگارندگان

عوامل زیادی در ناپایداری دامنه‌ها و وقوع زمین لغزش نقش دارند که دارای کنش و واکنش پیچیده‌ای هستند. به‌طور کلی حساسیت دامنه‌ها به لغزش وابسته به ویژگی‌های سنگ‌شناسی، ساختمان زمین‌شناسی، نوع خاک و مواد سطحی، شرایط اقلیمی، شرایط آب‌شناختی، پوشش گیاهی، نوع کاربری اراضی و عملکرد انسان است.

مهم‌ترین عامل زمینه‌ساز لغزش در منطقه مورد مطالعه، ساختار زمین‌شناسی بوده و پس از آن امواج و تغییرات سطح آب دریاچه، فقر پوشش گیاهی، فعالیت موجودات حفار، فعالیت‌های انسانی و بارندگی‌های سنگین در منطقه در ایجاد لغزش‌ها تأثیر دارند. تغییرات سطح اساس آب دریاچه قطعاً نقش سرنوشت‌ساز و مهمی در شروع لغزش‌ها داشته و مهم‌ترین عامل ماشه‌ای است که در ادامه بحث به آن پرداخته خواهد شد.

نتایج تعیین اندازه‌ی ذرات رسوبات حاصل از لغزش، نشان می‌دهد که بیش از ۸۰ درصد ذرات تشکیل دهنده‌ی نمونه‌ها از شن خیلی ریز و سیلت درشت تشکیل شده‌اند (شکل ۵). بادرفتی بودن و غالب بودن جزء سیلت، دو ویژگی اصلی رسوبات لسی است (پای، ۱۹۹۵). با توجه به این توزیع اندازه ذرات و شواهد رسوب شناسی، این مواد از نوع لس تشخیص داده شد. این رسوبات به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، رسوبزایی و فرسایش‌پذیری زیادی دارند. رسوبات لسی، معمولاً بیش از ۵۰ درصد سیلت دارند. وجود مقدار زیاد سیلت در خاک و رسوبات باعث افزایش حساسیت آنها به فرسایش می‌شود. یکی از عوامل اصلی تخریب اراضی لسی، فرسایش زیاد است. مقدار فرسایش در رسوبات لسی در چین تا ۱۰۰ تن در هکتار در سال برآورد شده است (چن<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۳). رسوبات لسی همانگونه که شارما<sup>۲</sup> (۱۹۸۶: ۱۸۹) اشاره می‌نماید از چهار منشأ شستشوی مجاور یخچالی، رسوبات رودخانه‌ای سیلابی دشت‌ها، هوازدگی سنگ‌ها در اقلیم خشک و ماسه‌های بیابانی فراهم می‌آید. در این منطقه رسوبات مذکور ابتدا به وسیله‌ی رودخانه‌ی هریرود در محل برجای گذاشته شده و سپس به وسیله‌ی بادهای شمال شرقی به منطقه‌ی مرتفع‌تر حمل شده است.

ویژگی‌های زمین‌شناسی بیان شده در بالا می‌تواند به‌عنوان یک عامل زمینه‌ساز و اصلی شرایط را برای عوامل آغازگر و ماشه‌ای به‌خوبی فراهم کند و با کوچک‌ترین تحریک موجب بروز حرکات دامنه‌ای گردد.



شکل (۵) نمودار نیمه‌لگاریتمی توزیع اندازه ذرات رسوبات لسی در محدوده سد دوستی

1- chen

2- sharma

تغییرات سطح آب موجب خیس شدن خاک، سنگینی و روان شدن و نهایتاً حرکت آن می‌شود، زیربری زمانی رخ می‌دهد که امواج باعث وارد آوردن نیرو به دیواره و فرسایش آن می‌شود، در واقع عامل اصلی شروع حرکات توده‌ای، تغییر سطح اساس آب دریاچه (بالا و پایین رفتن آن) به ویژه بالا آمدن سطح آب (به‌خصوص اسفند و فروردین ماه) است. تغییرات سطح اساس آب با انجام عمل زیربری در پای دامنه‌ها منجر به بروز لغزش شده است؛ بدین صورت که با اولین زیربری، دامنه‌ی مستعد لغزش تحریک شده و ضریب اطمینان (Fs) به پایین‌تر از یک رسیده و ناپایداری به وجود می‌آید. قبل از بروز لغزش ابتدا ترک‌هایی به صورت عمود در شیب دامنه پدیدار شده، (شکل ۶) سپس این ترک‌ها به سرعت بزرگ‌تر و عمیق‌تر شده و گسیختگی نهایی اتفاق می‌افتد. تحقیقات جعفری (۱۳۸۶)، در حوضه‌ی بدرانلو خراسان شمالی گواه این مسأله است. در این تحقیق مشخص شد حدود ۹۸ درصد واحدهای دارای حرکات توده‌ای در فاصله‌ی صفر تا ۳۰۰ متری از آبراهه‌ها و جوی‌های آب دیده می‌شوند.

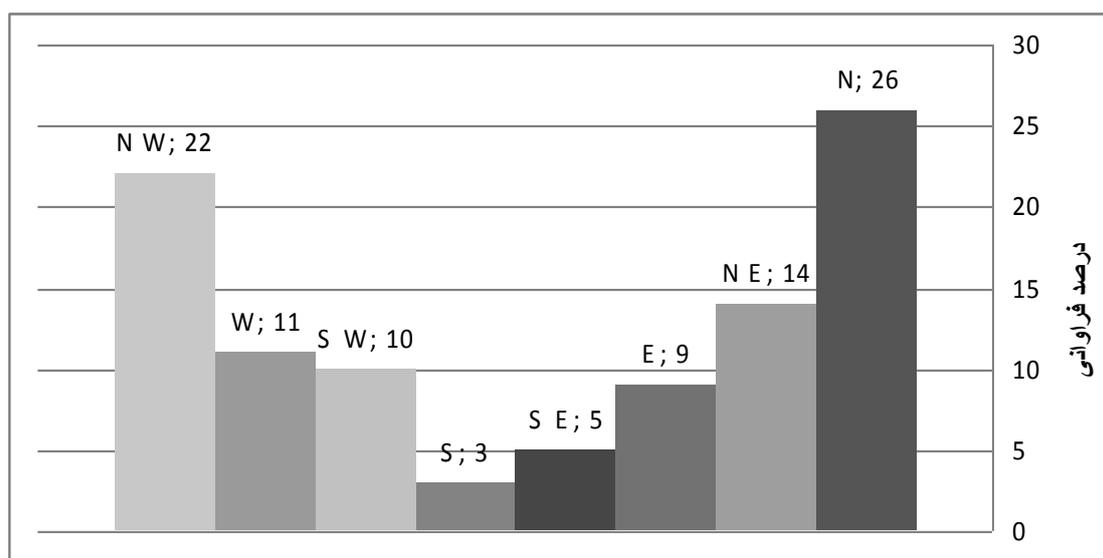


شکل (۶) ترک‌های ایجاد شده قبل از گسیختگی

باد به عنوان یک عنصر اقلیمی در زمین‌لغزش‌های دریاچه‌ی سد دوستی، تأثیر ثانویه و تشدید کننده دارد؛ به طوری که وقتی باد در سطح آب دریاچه می‌وزد ایجاد موج می‌کند و وقتی این امواج به ساحل دریاچه می‌رسند باعث تشدید تأثیر زیربری رودخانه بر روی دامنه‌ها می‌شود.

بررسی خصوصیات مختلف باد منطقه شامل جهت و سرعت وزش بادهای غالب و باد آرام نشان می‌دهد که پیشینه‌ی تعداد، سرعت و شدت باد در منطقه از سمت شمال و شمال غرب است (شکل ۷)، و از سوی دیگر،

بزرگ‌ترین و بیشترین لغزش‌ها (حدود ۵۰ درصد)، در دامنه‌های رو به باد اتفاق افتاده که این وضعیت نشان دهنده‌ی تأثیر به‌سازی عامل باد در ایجاد موج و سپس وقوع لغزش‌های منطقه است.



شکل (۷) نمودار درصد تعداد لغزش‌ها در جهات مختلف

یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار در بروز لغزش در منطقه، فعالیت موجودات حفار بر روی دامنه‌های مشرف به دریاچه است. بیشتر این موجودات موش‌های صحرایی هستند که به دلیل ویژگی ذاتی علاقه‌مند به حفر زمین هستند و نرم بودن خاک منطقه، زمینه‌ساز فعالیت گسترده‌ی آنها شده است (شکل ۸). حفره‌های به جا مانده از فعالیت این موجودات پس از هر بارندگی پر از آب شده و رطوبت را به داخل خاک منتقل می‌کنند که باعث کاهش مقاومت برشی خاک و سپس بروز لغزش می‌شود. شریعت جعفری (۱۳۸۲)، نیز در کتاب خود به این عامل به‌عنوان تشدیدکننده‌ی لغزش اشاره کرده است.



## شکل (۸) سوراخ‌های حاصل از فعالیت موجودات

اثر پوشش گیاهی در پایداری دامنه‌ها به شرایط محلی، عمق خاک، شیب دامنه، نوع گیاه، وضعیت خرد شدگی سنگ‌ها و آب و هوا بستگی دارد. پوشش گیاهی بسته به ویژگی‌هایی که دارد می‌تواند هم عامل پایداری و هم محرک ناپایداری باشد. ولی در بیشتر مواقع عامل پایداری دامنه‌ها است

پوشش گیاهی منطقه مرتعی است. متوسط بارندگی سالانه‌ی پایین و توزیع نامناسب آن در طول سال، باعث فقر پوشش گیاهی منطقه شده است؛ (شکل ۹) که این ویژگی خود، یکی از عوامل طبیعی عمده‌ی بروز لغزش‌ها به‌شمار می‌رود. نتایج به‌دست آمده از مطالعه‌ی جعفری (۱۳۸۶)، در حوضه‌ی چناران که در آن ۶۹ درصد از حرکات توده‌ای شناسایی شده در نواحی با شاخص تراکم پوشش گیاهی خیلی کم تا متوسط صورت گرفته، گواه بر این مسأله است.



شکل (۹) میزان فقر پوشش گیاهی

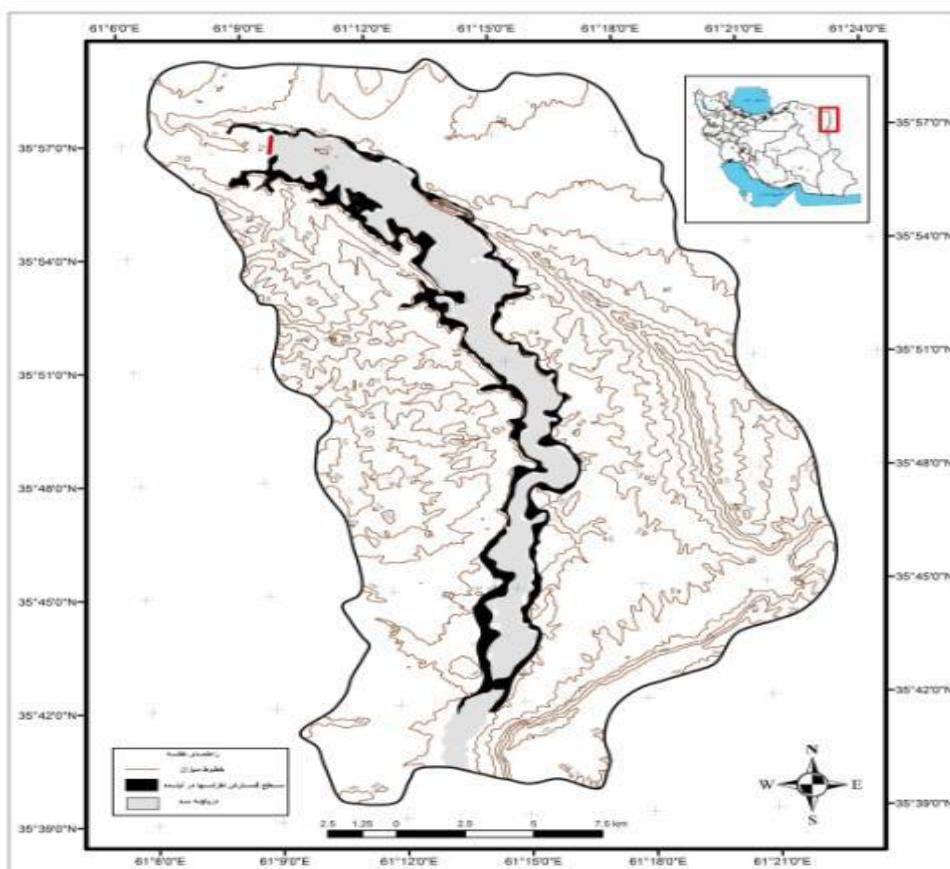
در منطقه مورد مطالعه فعالیت‌های انسانی مانند ساخت سد، چرای بیش از حد مراتع و از بین بردن پوشش گیاهی و انجام فعالیت کشاورزی در دامنه‌های مشرف به دریاچه سد در بروز لغزش‌های منطقه نقش مهمی دارند؛ خصوصاً ساخت و آبرگیری سد که می‌توان گفت عامل اصلی بروز حرکات دامنه است (شکل ۱۰). مطالعه رابرت شوستر<sup>۱</sup> (۱۹۸۶)، در مورد نقش احداث سدها در وقوع لغزش (بر روی ۲۵۰ سد در سراسر دنیا) مؤید نقش مهم احداث سد در وقوع لغزش‌ها است.

با عنایت به مواردی که ذکر شد، می‌توان پیش‌بینی نمود که در در آینده گسترش محدوده لغزش زیاد خواهد بود (شکل ۱۱).

1- Robert L. Schuster, 1986



شکل (۱۰) فعالیت انسانی در فرسایش



شکل (۱۱) میزان گسترش لغزش‌ها در آینده

## نتیجه‌گیری

بررسی‌های انجام شده بر روی حجم رسوب حاصل از وقوع ۲۵۲ لغزش به مساحت ۱/۲۷ کیلومترمربع در منطقه نشان می‌دهد این لغزش‌ها با عمق متوسط ۷ متر، تاکنون حدود ۸/۸ کیلومتر مکعب رسوب وارد دریاچه سد کرده و از ظرفیت آبیگری آن کاسته‌اند. این مواد تنها در سال‌های اولیه بهره‌برداری، لایه‌ای به ضخامت حدود ۲۵ سانتی‌متر در کف دریاچه ایجاد کرده‌اند، که در صورت عدم کنترل لغزش‌ها در آینده نیز ادامه خواهد داشت.

همان‌طور که گفته شد یکی از اهداف احداث سد دوستی تأمین بخش عظیمی از آب شرب شهر مقدس مشهد می‌باشد. نمونه‌های خاک برداشت شده از منطقه به طور میانگین، حدود ۸/۵ درصد گچ و ۱۷/۵ درصد آهک دارند، که بعد از هر لغزش وارد آب دریاچه شده و بر کیفیت آب تأثیر می‌گذارد. میزان آهک و گچ موجود در آب و به ویژه گچ نقش به‌سزایی در کاهش کیفیت آب دارد. هر چه این میزان بیشتر باشد کیفیت آب پایین‌تر و باعث گرفتگی لوله‌های انتقال آب می‌شود و هزینه‌های هنگفتی را برای تصفیه آب و رسوب‌زدایی لوله‌ها به بار می‌آورد. همچنین گل‌آلودگی آب در اثر رسوبات حاصل از لغزش‌ها هزینه تصفیه آب را نیز افزایش می‌دهد.

یکی دیگر از اثرات لغزش‌ها بر منطقه تغییر مورفولوژی دامنه‌ها و ایجاد شیب‌های عمودی پرتگاهی است. به‌عنوان نمونه پرتگاه ایجاد شده توسط لغزش در شکل (۱۲) حدود ۱۳ متر ارتفاع دارد. مطابق جدول (۳) بررسی‌های انجام شده بر روی تصاویر ماهواره‌ای و رسم و محاسبه طول شیب‌های عمودی (پرتگاه) توسط نرم‌افزار ArcGIS به شناسایی ۲۲۵ پرتگاه با طول معادل ۴۶۸۲۶ متر و میانگین طول ۲۰۸ متر انجامید.

حدود ۴۰ کیلومتر جاده آسفالت‌ه در منطقه مورد مطالعه وجود دارد که نزدیک به ۱۵ کیلومتر آن بعد از آبیگری به زیر آب رفته و جاده آسفالتی جایگزین در ارتفاع بالاتر در دامنه‌های مشرف به دریاچه احداث شده است؛ اما آبیگری سد و وقوع لغزش در دامنه‌های مشرف به دریاچه مجدداً جاده را تحت تأثیر قرار داده و در بعضی موارد موجب نشست جاده، ایجاد ترک‌ها و تخریب جزئی آن شده است.

با توجه به وجود بازارچه‌ی مرزی سرخس و همچنین رونق فعالیت کشاورزی در پایین دست سد، تردد ماشین‌های سنگین ترانزیتی و ماشین‌های حامل محصولات کشاورزی بخش عمده‌ای از بار ترافیکی این جاده را به‌خود اختصاص می‌دهد. اگرچه جاده قبلاً تحت تأثیر وقوع لغزش‌ها بوده است، اما تردد ماشین‌های سنگین

می‌تواند موجب تسریع وقوع لغزش‌ها باشد. ایجاد منطقه‌ی پرخطر برای عبور مرور از دیگر خطرات زمین‌لغزش‌ها است.

با توجه شرایط ذکر شده در بالا می‌توان نتیجه گرفت که تعداد و مساحت لغزش‌ها در منطقه روزبه‌روز در حال افزایش و گسترش می‌باشند و این روند در آینده نیز ادامه خواهد داشت. بالاترین ارتفاعی که لغزش در آن اتفاق افتاده ارتفاع ۵۴۰ متری از سطح دریا است و اگر گسترش نهایی لغزش‌های منطقه در آینده را تا این ارتفاع فرض کنیم، مساحت لغزش‌های منطقه در آینده ۲۰۷۵۰۳۵۶ مترمربع خواهد بود که باعث ورود ۱۴۵۲۵۲۴۹۲ مترمکعب (۱۴۵ کیلومتر مکعب) رسوب به سد خواهد شد و حدود ۳ متر رسوب در کف دریاچه سد ایجاد خواهد کرد. نقشه‌ی سطح گسترش لغزش‌ها در ذیل آمده است.

## منابع

- آر. یو. کوک و جی. سی. دورکمپ (۱۳۷۷)، ژئومورفولوژی و مدیریت محیط، جلد دوم، ترجمه شاپور گودرزی‌نژاد، چاپ اول، تهران: انتشارات سمت.
- افشار حرب، عباس (۱۳۷۳)، زمین‌شناسی کپه داغ، چاپ اول، تهران: سازمان زمین‌شناسی کشور.
- جعفری، تیمور (۱۳۸۶)، مدل‌سازی کمی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در دامنه‌های شمالی آلاداغ، رساله‌ی دکتری، دانشگاه تهران.
- حسن‌زاده نفوتی، محمد (۱۳۷۸)، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوضه شلمان‌رود گیلان، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تهران.
- حسنی، سعید، (۱۳۷۳)، بررسی پدیده زمین‌لغزش در جاده‌های جنگلی کوهستانی، جنگل آموزشی- پژوهشی خیرود کنار نوشهر، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی نور، دانشگاه تربیت مدرس.
- حق‌شناس، ابراهیم (۱۳۷۴)، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و ارتباط آن با تولید رسوب در حوضه آبخیز طالقان، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- سرور، جلیل‌الدین (۱۳۸۳)، ارزیابی فرایند لغزش در باغ‌های چای نواحی کوهستانی شرق گیلان، مجله پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۴۹، پاییز ۱۳۸۳، صص ۱-۱۷.
- شادفر، صمد (۱۳۸۴)، ارزیابی تحلیلی مدل‌های پهنه‌بندی زمین‌لغزش در حوضه آبخیز چالکرود تنکابن، رساله دکتری، دانشگاه تهران.
- شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان (۱۳۷۸)، زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی، کتاب اول، جلد اول، گزارش شماره ۱۲۲۳-۲۳۲: مشهد.
- شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان (۱۳۸۳)، پخش سیلاب و تغذیه مصنوعی دشت سرخس، هواشناسی و هیدرولوژی، جلد اول، گزارش شماره ۱۹۷۱/۱-۱۹۴-۲۳۰: مشهد.
- شریعت جعفری، محسن (۱۳۸۲)، زمین‌لغزش (مبانی و اصول پایداری شیب‌های طبیعی)، تهران: انتشارات سازه.
- شریعت جعفری، محسن (۱۳۷۶)، پهنه‌بندی دستی زمین‌لغزش منطقه‌ی میانی حوضه آبخیز طالقان با استفاده از روش‌های تجربی کاناکاوا، نیلسن و نیلسن اصلاح شده، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

- شوستر، رابرت (۱۹۸۶)، اندرکنش سدها و زمین‌لغزش‌ها: مطالعات موردی و راه‌های کاهش آن، ترجمه محسن احتشامی معین‌آبادی (۱۳۸۶)، پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور.
- فیض‌نیا، سعید و همکاران (۱۳۸۰)، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوضه آبریز شلمان‌رود در استان گیلان، مجله منابع طبیعی دانشگاه تهران، شماره ۵۴، صص ۲۱۹-۲۷۰.
- کرم، عبدالامیر (۱۳۸۰)، مدل‌سازی کمی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در زاگرس چین‌خورده، نمونه موردی حوضه آبخیز سرخون (استان چهارمحال و بختیاری)، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.
- کهی میانجی، یعقوب (۱۳۷۷)، تحلیل چندمتغیره آماری احتمال وقوع زمین‌لغزش با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در منطقه‌ی طالقان، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- مهدوی‌فر، محمدرضا (۱۳۷۵)، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش منطقه خورش رستم (جنوب غربی شهرستان خلخال)، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- Anbalagan, R., (1992), **Land Hazard Evaluation and Zonation Mapping in Mountainous Terrain**, Engineering Geology, Vol. 32, PP 269-277.
- Cooke, R.U. and Doornkamp, J.C., (1990), **Geomorphology in Environmental Management**, 2nd ed., Oxford: Clarendon Press.
- Espizua, L.E. and Bengochea, J. D., (2002), **Landslide Hazard and Risk Zonation Mapping in the Rio Grande Basin, Central Andes of Mendoza, Argentina**, Mountain Research and Development, Vol. 22, No. 2, PP 177-185.
- Gerrard, John and R. G, (2001), **Relationships between Landsliding and Land Use in the Likhu khola Drainage Basin, Middle Hills, Nepal**, Mountain Research and Development, Vol. 22, No. 1, PP 48-55.
- Komac, M. and Gerald F., (2006), **A Landslide Susceptibility Model Using an Analytical Hierarchy Process Method and Multivariate Statistics in Perialpine Slovenia**, Geomorphology, Vol. 174, PP 17-28.
- Korup, Oliver, (2004), **Landslide-induced River Channel Avulsions in Mountain Catchments of Southwest New Zealand**, Geomorphology, Vol. 63, pp. 57-80.
- Mantovani, Franco; Soets, Robert and Van Westen C.J., (1995), **Remote Sensing Techniques for Landslide Studies and Hazard Zonation in Europe**, Geomorphology, Vol. 15, PP 213-225.