

## بررسی اثر جاده‌سازی بر وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی با استفاده از مدل پایداری دامنه‌ها (مطالعه مورد: حوضه آبخیز کلات)

مجید ابراهیمی<sup>۱</sup>، محمود حبیب‌اللهیان<sup>۱</sup>، ابوالقاسم امیراحمدی<sup>۲</sup>

محمدعلی زنگنه اسدی<sup>۲</sup> و حمید نژادسلیمانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران، آدانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران،  
<sup>۲</sup> کارشناسی‌ارشد ژئومورفولوژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد مقدس، مشهد، ایران  
تاریخ دریافت: -----؛ تاریخ پذیرش: ----

### چکیده

ناپایداری شیب در اراضی کوهستانی پر شیب، مشکل اصلی مدیران اراضی در سرتاسر جهان است که موجب خسارت‌های مالی و جانی در جاده‌ها می‌شود. مطالعه ویژگی‌های این دامنه‌ها و تحلیل پایداری آن‌ها در شناسایی و شناخت کامل تر نقش آن‌ها در پدیده زمین‌لغزش از راه‌های ارزیابی خطر این پدیده در حوضه‌های آبخیز است. هدف از این پژوهش، بررسی نقش جاده‌سازی در وقوع لغزش‌های سطحی در دامنه‌های طبیعی با استفاده از مدل پایداری دامنه است. در این پژوهش ابتدا هفت دامنه لغزشی مشرف به جاده تعیین شد، سپس تمامی پارامترهای مدل تحلیل پایداری شیب که شامل:  $c_s$ : چسبندگی خاک،  $\phi$ : چسبندگی ریشه،  $\phi$ : زاویه اصطکاک داخلی خاک،  $\gamma_d$ : چگالی خاک و  $\gamma_w$ : چگالی مرطوب خاک است، با مطالعات میدانی، نمونه‌برداری از خاک و تجزیه و تحلیل توپوگرافی دامنه‌ها استخراج و برای تعیین ضریب پایداری (FS) دامنه‌ها، این پارامترها در مدل تحلیل پایداری شیب وارد و میزان (FS) برای هر دامنه مشخص شد. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل تحلیل پایداری دامنه در تعیین عدم پایداری در دامنه‌هایی که تحت تأثیر جاده‌سازی دچار لغزش می‌شوند، کارایی خوبی دارد، زیرا در دامنه‌های لغزشی، میزان ضریب پایداری کم‌تر از یک به‌دست آمده است. هم‌چنین جاده‌سازی در دامنه‌هایی با شیب تندتر (بیش از ۱۷ درجه) باعث کاهش پایداری دامنه‌ها می‌شود. با استفاده از این مدل می‌توان دامنه‌های ناپایدار را شناسایی و نوع عملیات حفاظتی را برای افزایش ضریب پایداری مشخص کرد؛ به‌طوری که عملیات میخ‌کوبی در دامنه ۵، با موقعیت جغرافیای ۳۷ درجه و ۵ دقیقه و ۳ ثانیه عرض شمالی و ۵۹ درجه و ۴۰ دقیقه و ۲۷ ثانیه طول شرقی باعث افزایش ضریب پایداری از مقدار ۰/۶۷ به ۲/۷۵ و عملیات ترانس‌بندی بر دامنه‌ی شماره ۴، با مختصات جغرافیایی ۳۶ درجه و ۵۹ دقیقه و ۳۱ ثانیه عرض شمالی و ۵۹ درجه و ۴۱ دقیقه و ۵۶ ثانیه طول شرقی باعث افزایش ضریب پایداری از مقدار ۱/۱۰ به ۱/۹۳ شد. که در نهایت می‌توان مناسب‌ترین و بهترین روش را برای انجام عملیات حفاظتی مشخص کرد.

**واژه‌های کلیدی:** تحلیل پایداری دامنه، ضریب پایداری، جاده‌سازی، حوضه آبخیز کلات

### مقدمه و طرح مسأله

فرآیندهای پیچیده‌ای هستند که بر تمامی بخش‌های کره زمین تأثیر می‌گذارند. در این بین زمین‌لغزش به‌عنوان یکی از مخاطرات طبیعی همواره در سراسر جهان در حال رخ دادن بوده، از اهمیت زیادی برخوردار است (نیازی و دیگران، ۱۳۸۹: ۹). بر اساس

یکی از وظایف مهم دانش ژئومورفولوژی کاربردی، بررسی موقعیت و ارزش محیط‌های انسانی خطرپذیر و آسیب‌پذیر در برابر انواع مخاطرات ژئومورفیک است (Rosenfeld, 2004: 423). رخدادهای طبیعی،

یومرائو و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۱)، تحلیل پایداری شیب‌های برش‌یافته را با استفاده از رتبه‌بندی مداوم سطوح شیب‌دار و تجزیه و تحلیل کینماتیک<sup>۴</sup> در منطقه رادراپرایگ<sup>۵</sup> پرداختند. نتایج نشان داد که روش رتبه‌بندی مداوم سطوح شیب‌دار برای تحلیل پایداری شیب‌ها در هیمالیا مناسب است. یوسف و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۲)، تحلیل پایداری شیب سنگ‌ها در امتداد پرتگاه جاده‌ی رایداح<sup>۷</sup> را بررسی و در نهایت توصیه‌ها و روش‌های مختلف جهت پایداری دامنه‌ها ارائه شد. کاین‌تولا و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۱۳)، مروری عددی بر تحلیل پایداری شیب‌ها در شیب جاده‌ای هند را مطالعه و ضریب پایداری را با نرم‌افزار FLAC SLOP محاسبه و راه‌کارهای مناسب را ارائه کردند.

جانعلی‌زاده چوبستی و همکاران (۱۳۹۰) در پژوهشی با عنوان کاربرد ژئوتکتایل<sup>۹</sup> در پایداری زمین‌لغزش در بستر جاده منطقه شار قلت شیرگاه، به‌این نتیجه دست یافتند که استفاده از این روش از طریق افزایش مقاومت داخلی خاک و کاهش فشار آب منفذی خاک چسبنده موجب تثبیت زمین‌لغزش‌های منطقه می‌شود. طالبی و همکاران (۱۳۹۰) در پژوهشی، قابلیت مدل فیزیکی - هیدرولوژی برای زمین‌لغزش‌های سطحی در دامنه‌های طبیعی را در حوضه آبخیز سد ایلام بررسی کردند و ضریب پایداری برای هر دامنه با دوره بازگشت‌های مختلف مشخص شد. نتایج نشان داد که این مدل می‌تواند به‌عنوان یک مدل فیزیکی برای بررسی پایداری در مناطق طبیعی استفاده شود. فعله‌گری و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی اثر جاده‌سازی در وقوع زمین‌لغزش‌ها با استفاده از مدل پایداری دامنه پرداخت و دامنه‌های ناپایدار را شناسایی و نوع عملیات حفاظتی برای افزایش ضریب پایداری<sup>۱۰</sup> را مشخص کرد.

مطالعات انجام شده در سال‌های ۱۹۰۳-۲۰۰۴، زمین‌لغزش به‌تنهایی هفده درصد از بلایای طبیعی جهان را دربرگرفته که بیش‌ترین میزان خسارت آن در اروپا سالانه، هفده میلیون دلار برآورد شده است (Koehorst and et al, 2005: 93). در ایران نیز در مورد خسارات ناشی از حرکات توده‌ای، مطالعاتی صورت گرفته که طبق گزارش، خسارت مربوط به ۴۹۰۰ زمین‌لغزش از بانک اطلاعاتی تا پایان شهریور ماه ۱۳۸۶، معادل ۱۲۶۸۹۳ میلیارد ریال برآورد شد (سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، گروه مطالعه امور زمین‌لغزش‌ها، ۱۳۸۹). امروزه نیاز روزافزونی برای مدیریت خطر زمین‌لغزش به صورت کمی و پهنه‌بندی آن وجود دارد (Fell and et al, 2008: 86). عوامل اصلی وقوع زمین‌لغزش‌ها را سنگ بستر، توپوگرافی (شیب، جهت، انحنای شیب)، ارتفاع، عمق و نوع خاک، کاربری زمین و شبکه زهکشی معرفی شده است (کرمی و دیگران، ۱۳۸۸: ۱۴۰). از عوامل انسانی مؤثر در وقوع زمین‌لغزش می‌توان به اثر جاده‌سازی به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در ناپایداری دامنه‌ها اشاره کرد (کلارستاقی، ۱۳۸۰: ۹۵).

### پیشینه تحقیق

درباره تحلیل پایداری شیب دامنه‌ها، خان و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۱)، تحلیل پایداری شیب‌ها در سنگ‌های سخت و پیش‌بینی زمین‌لغزش‌ها را در امتداد جاده‌ای در پاکستان مطالعه کردند. نتایج نشان داد که لغزش‌های احتمالی می‌تواند باعث آسیب شدید و انسداد جاده‌ها شود. هیگن و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۱)، به مطالعه عوامل محیطی در تحلیل پایداری جاده‌ها در مناطق کوهستانی و با استفاده از تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی و تحلیل سلسله‌مراتبی پرداختند. نتایج پژوهش حاکی از آن بود که نوع سنگ و نوع خاک دارای حداکثر همبستگی مثبت است، در حالی که شیب و جهت شیب دارای حداکثر همبستگی منفی در پایداری شیب‌ها است.

3- Umrao et al  
4- Kinematic  
5- Radraprayag  
6- Youssef et al  
7- Raidah  
8- Kainthola et al  
9- Geotextile  
10- Factor of Safety

1- Khan et al  
2- Haigin et al

### روش تحقیق

نرم‌افزارهای متعددی برای تجزیه و تحلیل سطوح شیب‌دار ارائه شده است. تعدادی از آن‌ها دارای قابلیت مدل کردن توده‌ی خاک با استفاده از معیار موهر-کلمب<sup>۱</sup> و یا هوک براون<sup>۲</sup> هستند که نرم‌افزار FLAC SLOP از این‌گونه است (Teoh, 2005: 32). در تحلیل پایداری شیب‌ها، تعیین فاکتور ایمنی اهمیت ویژه‌ای دارد. مدل پایداری دامنه‌ها بر اساس نظریه حد پایداری تهیه شده است که ضریب ایمنی را می‌تواند تعیین کند. این مدل، این فرصت را به کاربر می‌دهد که به آنالیز تنش برشی پرداخته و به‌طور خودکار فرآیندهایی را که از نظر فیزیکی ناپایدار هستند، شبیه‌سازی نموده و ضریب ایمنی را در اطراف نقطه پایدار به‌دست آورده و موقعیت شکست بحرانی (ریزش) را تعیین کند (Cala and et al, 2004: 1087). نرم‌افزار FLAC SLOP در گستره وسیعی از بررسی شرایط پایداری شیب‌ها و دیواره‌های خاکی به‌کار برده می‌شود و قادر به ایجاد شکل مرز شیب است که اجازه می‌دهد تا خیلی سریع شبکه‌بندی خطی، غیر خطی و شیب پله‌ها و دیواره‌های خاکی انجام گیرد و قابلیت وارد کردن با جهت‌ها و ضخامت‌های متفاوت در مدل وجود دارد (Cala and et al, 2004: 1089). همچنین خط پیژومتریک و سطح آب زیرزمینی و فضاهایی که توزیع فشار روزه‌ای وجود دارد، برای یکسان شدن تنش‌های مؤثر در مدل وارد می‌گردد و وزن مخصوص خشک و تر در محاسبه ضریب ایمنی تعریف می‌شود (Youssef, 2012: 52).

تاکنون روش‌های مختلفی بسته به نوع خاک و وضعیت خاک برای انجام آنالیزهای پایداری شیب‌ها ارائه شده است که مهم‌ترین آن‌ها روش بیشاب است. این روش در قالب بسته نرم‌افزاری FLAC SLOP برای ارزیابی پایداری خاک مناطق شیب‌دار در برابر زمین‌لغزش در این پژوهش استفاده شد. آزمایش برش سهم‌محوری تحکیم‌نیافته و زهکشی‌نشده (CU) روی نمونه‌های خاک انجام پذیرفت. در این پژوهش ابتدا

با توجه به حجم عظیم خسارات جانی و مالی، مطالعه و بررسی این پدیده ژئومورفولوژی و آگاهی از ضریب پایداری دامنه‌ها برای جلوگیری از کاهش خطرات و خسارات ناشی از آن لازم و ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش سعی بر آن است تا با تجزیه و تحلیل پایداری دامنه‌های لغزشی مشرف به جاده، پایداری آن‌ها با استفاده از مدل یادشده بررسی و میزان ضریب پایداری تحت اثر جاده‌سازی مشخص شود.

**مفاهیم، دیدگاه‌ها و مبانی نظری:** ناپایداری دامنه‌های طبیعی یکی از پدیده‌های ژئومورفولوژیکی است که در تغییر شکل سطح زمین نقش مؤثری دارد (Vittorio, 2011:5). زمین لغزش یکی از فرایندهای اصلی زمین ریختی است که تکامل چشم انداز مناطق کوهستانی را تحت تأثیر قرار داده و موجب ایجاد حوادث فاجعه برانگیزی شده است (Roering and et al, 2005:654). زمین لغزش‌های ایران به عنوان یکی از بلایای طبیعی هر ساله نقش بسزایی در تخریب جاده‌های ارتباطی، تخریب مراتع-باغات، مناطق مسکونی و همچنین فرسایش خاک و انتقال حجم بالای رسوب در حوضه‌های آبخیز کشور دارند (کریمی و همکاران، ۱۳۹۰:۹۶). در ایران در مورد خسارات ناشی از حرکات توده‌ای مطالعاتی صورت گرفته که طبق گزارش، خسارت مربوط به ۴۹۰۰ زمین لغزش از بانک اطلاعاتی تا پایان شهریور ماه ۱۳۸۶، معادل ۱۲۶۸۹۳ میلیارد ریال برآورد گردید (سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، گروه مطالعه امور زمین لغزش‌ها، ۱۳۸۱).

حرکت توده‌ای مواد هنگامی رخ می‌دهد که نیروهای عمل‌کننده بر روی دامنه نسبت به مواد موجود، از قدرت فشار بیشتری برخوردار باشد. این امر می‌تواند به‌عنوان فاکتور یا ضریب اطمینان  $F_s$  بیان گردد، که برابر است با نسبت مقاومت برشی مواد دامنه به شدت فشار برشی. این پدیده به‌وسیله کاربرد افزایش فشار در مورد تغییرات وضعیت خارجی دامنه یا فرآیندهای داخلی، سبب کم شدن مقاومت بر روی دامنه می‌شود (Abramson and et al, 2002: 8).

1- Mohr-Coulomb

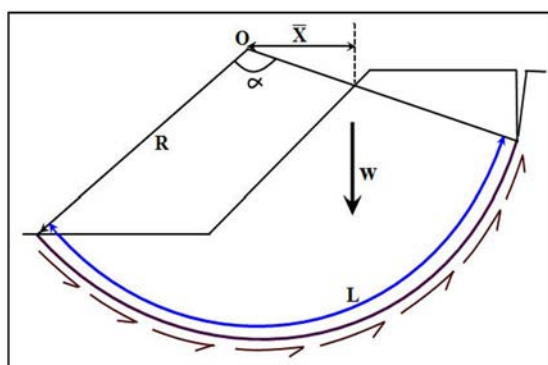
2- Hoek-Brown

وارد و میزان (FS) برای هر دامنه با توجه به رابطه (۱) مشخص شد (Abramson et al, 2002: 8).

$$FS = \frac{\text{گشتاور مقاوم}}{\text{گشتاور محرک}} = \frac{C_u R^2 \alpha}{W \bar{X}} \frac{C_u LR}{W \bar{X}} \quad \text{رابطه (۱):}$$

که در آن،  $\alpha$ : زاویه کمان لغزش،  $C_u$ : چسبندگی،  $R^2$ : شعاع دایره لغزش،  $W$ : وزن توده لغزشی،  $\bar{X}$ : فاصله از مرکز دایره تا مرکز جرم توده است (شکل ۱).

پس از تعیین دامنه‌های مشرف به جاده و دامنه‌های لغزشی، تمامی پارامترهای مدل تحلیل پایداری شیب که شامل  $c_s$ : چسبندگی خاک،  $c_r$ : چسبندگی ریشه،  $\varphi$ : زاویه اصطکاک داخلی خاک،  $\gamma_h$ : چگالی خاک و  $\gamma_w$ : چگالی مرطوب خاک بودند با مطالعات میدانی و نمونه‌برداری از خاک این دامنه‌ها استخراج شد و نمونه‌ها در اختیار آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک قرار گرفت. سپس برای تعیین ضریب پایداری (FS) دامنه‌ها، این پارامترها در مدل تحلیل پایداری شیب



شکل ۱- نیروهای وارد شده به یک مقطع شیب دامنه (مأخذ: 8: Abramson et al, 2002)

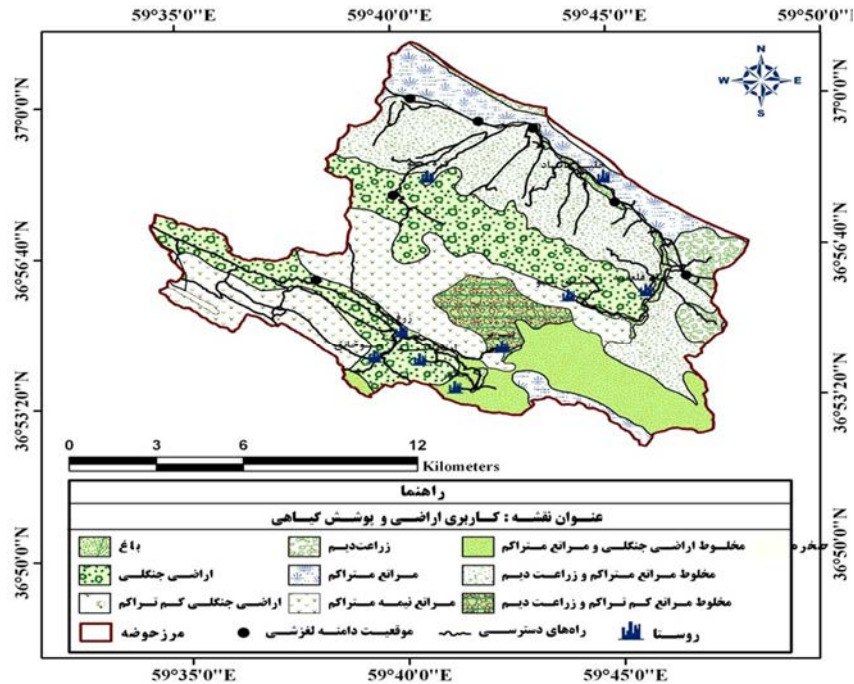
را در محدوده‌ی مورد مطالعه نشان می‌دهد (سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، ۱۳۸۱) که مقادیر چسبندگی ریشه با توجه به کاربری هر دامنه مشخص شد (جدول ۱).

برای مشخص کردن چسبندگی ریشه برای دامنه‌های مورد بررسی، از مقادیری که کایاستا (۲۰۰۶) و وین (۲۰۰۷) برای کاربری اراضی مختلف ارائه کرده‌اند، استفاده شد که مقادیر این شاخص در جدول (۱) آمده است. شکل (۲)، نقشه کاربری اراضی

جدول ۱- مقادیر شاخص چسبندگی ریشه برای کاربری اراضی مختلف

| چسبندگی ریشه (کیلو نیوتن بر مترمربع) | نوع کاربری اراضی               |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| ۱                                    | ارضی کشاورزی                   |
| ۸                                    | ارضی جنگلی                     |
| ۰                                    | روستاها و مناطق ساختمانی       |
| ۱                                    | بوته‌زارها و تپه‌های بدون پوشش |

(مأخذ: 73: Vinh, 2007; 97: Kayasta, 2006)



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز کلات

شد. جدول (۲)، جزئیات این تقسیم‌بندی را نشان می‌دهد. این تقسیم‌بندی بر اساس تعریف ریاضی ضریب اطمینان به دست آمده است.

برای تعیین کلاس ناپایداری دامنه‌های مورد بررسی در این پژوهش بر اساس مقدار ضریب پایداری (FS)، از تقسیم‌بندی پک و همکاران (۱۹۹۸) استفاده

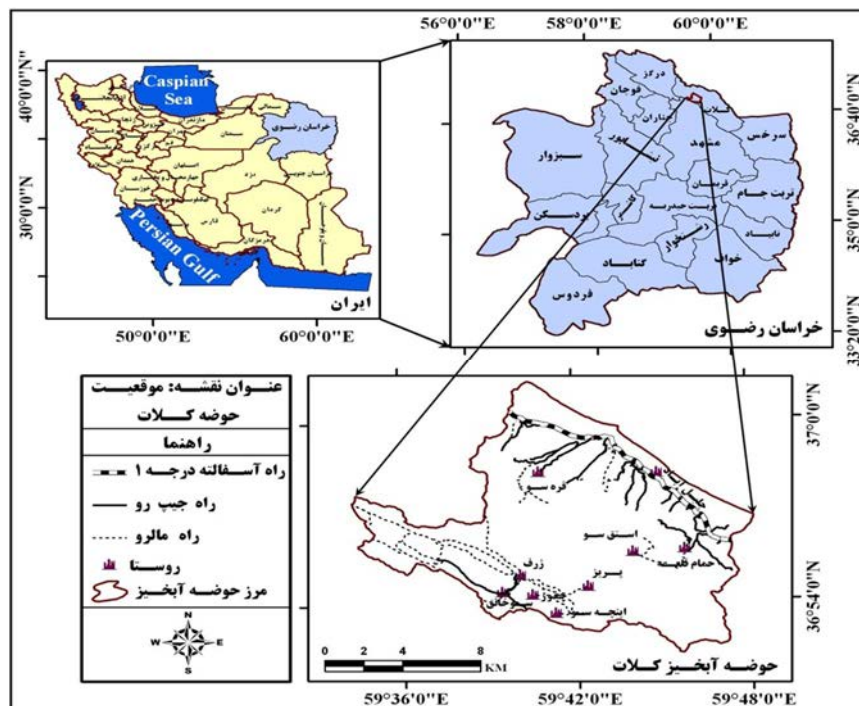
جدول ۲- طبقه‌بندی آسیب‌پذیری زمین‌لغزش

|                                |                   |
|--------------------------------|-------------------|
| کلاس آسیب‌پذیری زمین‌لغزش      | ضریب پایداری (FS) |
| آسیب‌پذیری زمین‌لغزش کم        | $FS > 1/5$        |
| آسیب‌پذیری زمین‌لغزش متوسط     | $1/5 > FS > 1/25$ |
| آسیب‌پذیری زمین‌لغزش زیاد      | $1/25 > FS > 1$   |
| آسیب‌پذیری زمین‌لغزش خیلی زیاد | $FS < 1$          |

(مأخذ: Pack et al, 1998; Andrade et al, 2006)

شهرستان مشهد و از غرب به ارتفاعات لائین نو کلات محدود است. از نظر موقعیت جغرافیایی، این حوضه در ۳۶ درجه ۵۲ دقیقه ۷ ثانیه تا ۳۶ درجه ۵۷ دقیقه ۳۰ ثانیه عرض شمالی و ۵۹ درجه ۳۹ دقیقه ۳۰ ثانیه تا ۵۹ درجه ۴۷ دقیقه ۱۰ ثانیه طول شرقی واقع شده است (شکل ۳).

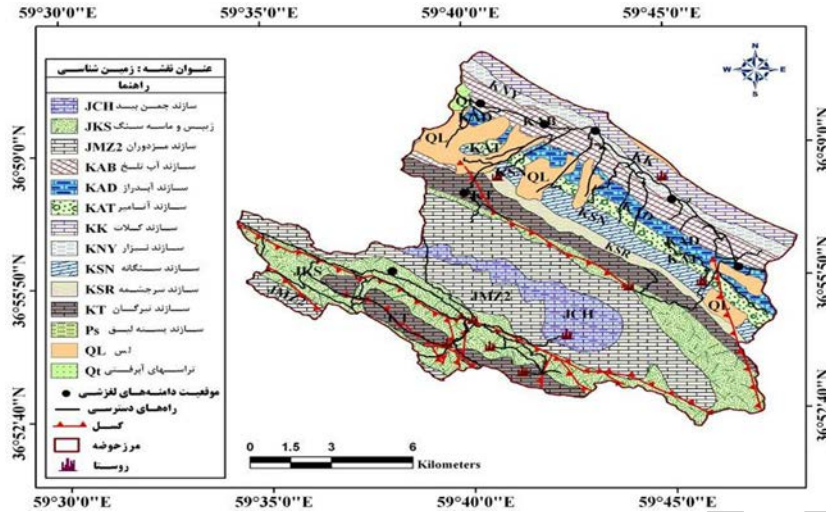
**محدوده و قلمرو پژوهش:** محدوده مورد مطالعه در این پژوهش، حوضه کوهستانی کلات در زون کپه‌داغ است که در ارتفاعات هزار مسجد و شمال شرق کشور واقع شده است. به لحاظ موقعیت سیاسی، این حوضه در شمال شرق کشور و استان خراسان رضوی واقع شده که از شمال به خط‌الرأس ارتفاعات کلات و شهر کلات، از شرق به کوه‌های هزار مسجد و از جنوب به



شکل ۳- نقشه موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

سازند مزدوران دارای بیشترین مساحت نسبت به دیگر سازندها است. سازند شوربیجه از شیل و ماسه‌سنگ‌های قهوه‌ای مایل به خاکستری، رس، کنگلومرا و کمی سنگ‌های کربناته تشکیل شده است که حساسیت بسیار بالایی برای لغزش‌ها دارند. قسمت جنوبی حوضه مورد مطالعه از سازندهای تیرگان (Kt)، مزدوران ( $JMz^2$ ) و کواترنری پوشیده شده است. سازند تیرگان از سنگ‌های آهکی لایه‌دار با میان‌لایه‌های شیلی تشکیل شده است و در بسیاری از موارد حالت پرتگاهی یا پر شیب دارد، نهشته‌هایی مانند فیلیت‌ها، آهک‌های مارنی خردشده، کنگلومراها و دیگر سازندهای سست نیز استعداد بالایی برای ناپایداری‌ها در منطقه مورد مطالعه دارند (شکل ۴).

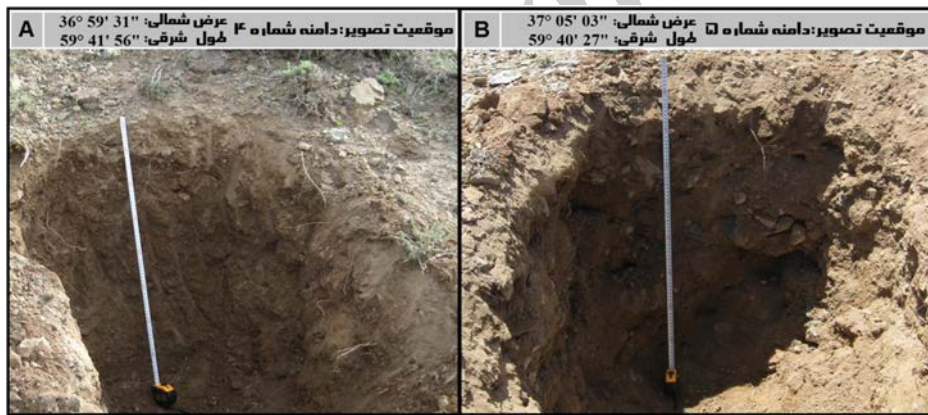
وسعت حوضه ۱۶۸/۳۷ کیلومتر مربع است. بالاترین نقطه ارتفاعی منطقه، ۲۷۰۹ متر و ارتفاع حداقل منطقه ۶۰۰ متر در خروجی حوضه است. سازندهای زمین‌شناسی حوضه مورد مطالعه از چینه‌شناسی حوضه کپه‌داغ تبعیت می‌کند. قدیمی‌ترین سازندهای منطقه را سازند کشف‌رود (البته با گسترش کم) و جدیدترین سازندها را آبرفت‌ها و لس‌های کواترنری تشکیل داده است. بخش‌های شمالی حوضه از سازندهای کلات، نیزار، آب تلخ و آب دراز تشکیل شده‌اند؛ به طوری که هر یک از این سازندها با جهت شمال غرب- جنوب شرق و به صورت هم‌مرز در حوضه کشیدگی دارند. در بخش میانی حوضه، سازندهای سنگانه، سرچشمه، شوربیجه، مزدوران و چمن بید واقع شده‌اند که در این میان



شکل ۴- نقشه زمین‌شناسی حوضه آبخیز کلات

پروفیل (تا عمق سنگ بستر) حفر (شکل ۵) شد و پس از ارسال نمونه‌ها به آزمایشگاه خاک، پارامترهای موردنیاز برای اجرای مدل پایداری دامنه اندازه‌گیری شد (جدول ۳).

بحث اصلی: در این پژوهش، تحلیل پایداری در هفت دامنه لغزشی مشرف به جاده انجام شده است که موقعیت این دامنه‌ها در شکل (۶) آمده است. برای اندازه‌گیری هر یک از پارامترها در هر دامنه، یک

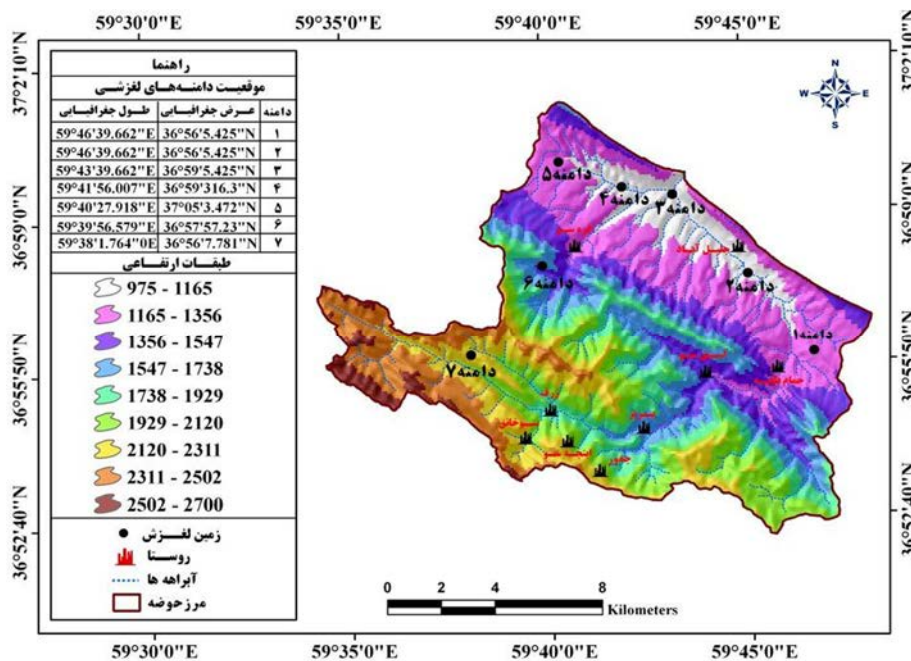


شکل ۵- تصاویری از پروفیل نمونه‌برداری خاک در منطقه مورد مطالعه

شکل (A.۵) در عمق ۷۵ سانتی‌متری به سنگ بستر برخورد کرده است. شکل (B.۵) در عمق ۸۸ سانتی‌متری به سنگ بستر برخورد کرده است.

جدول ۳- پارامترهای موردنیاز جهت تعیین ضریب پایداری دامنه‌ها

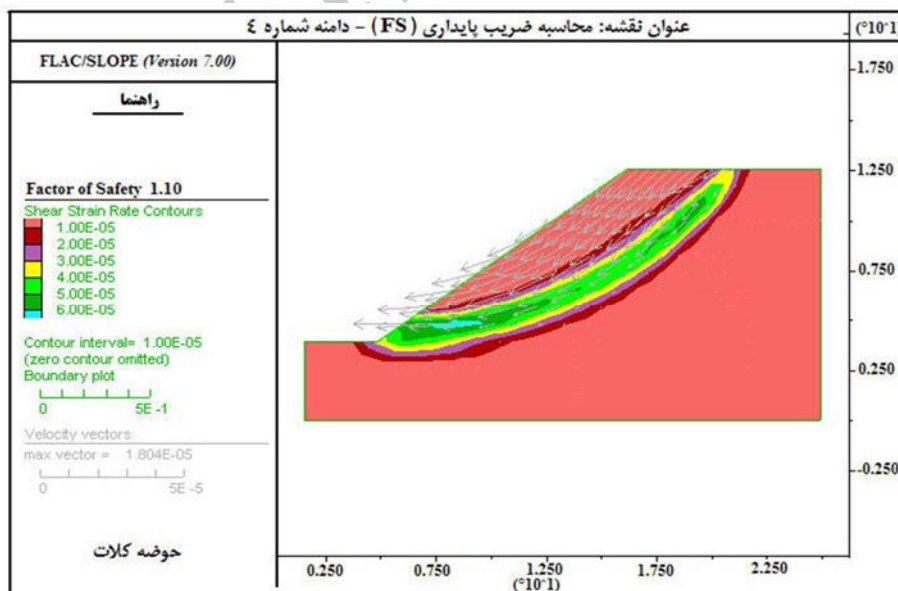
| دامنه | طول دامنه (متر) | شیب متوسط (درجه) | ارتفاع متوسط (متر) | تخلخل مؤثر (درصد) | $c_u$ ( $\text{Kg/cm}^2$ ) | $\phi^o$ (درجه) | $\gamma_d$ ( $\text{KN/m}^3$ ) | $\gamma_w$ ( $\text{KN/m}^3$ ) | $c_t$ ( $\text{KN/m}^2$ ) |
|-------|-----------------|------------------|--------------------|-------------------|----------------------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| ۱     | ۵۹              | ۲۱/۹۲            | ۱۲۸۲               | ۳                 | ۰/۰۳                       | ۱۱              | ۱۳۴۱                           | ۱۵۶۷                           | ۱                         |
| ۲     | ۴۳/۵            | ۹/۵۴             | ۱۰۸۲               | ۵/۷۸              | ۰/۰۵                       | ۱۴              | ۱۶۸۴                           | ۱۹۳۱                           | ۱                         |
| ۳     | ۶۷              | ۱۷/۴۱            | ۱۰۰۷               | ۲/۶۵              | ۰/۰۲                       | ۱۱              | ۱۴۵۳                           | ۱۶۰۳                           | ۱                         |
| ۴     | ۱۲۱             | ۳۶/۰۷            | ۱۰۶۰               | ۲/۴۵              | ۰/۰۱                       | ۱۵              | ۱۰۳۲                           | ۱۳۸۷                           | ۱                         |
| ۵     | ۳۹              | ۴۹/۰۳            | ۱۲۰۹               | ۲/۳۰              | ۰/۰۱                       | ۲۱              | ۱۸۷۹                           | ۲۰۱۹                           | ۱                         |
| ۶     | ۶۰/۵            | ۷/۹۸             | ۱۵۸۷               | ۱۴/۴۴             | ۰/۰۴                       | ۱۳              | ۱۷۷۲                           | ۱۹۸۷                           | ۸                         |
| ۷     | ۴۰              | ۸/۲۴             | ۲۲۸۶               | ۳/۲۱              | ۰/۰۴                       | ۱۹              | ۱۱۵۶                           | ۱۳۵۷                           | ۸                         |



شکل ۶- موقعیت دامنه‌های لغزشی در حوضه آبخیز کلات

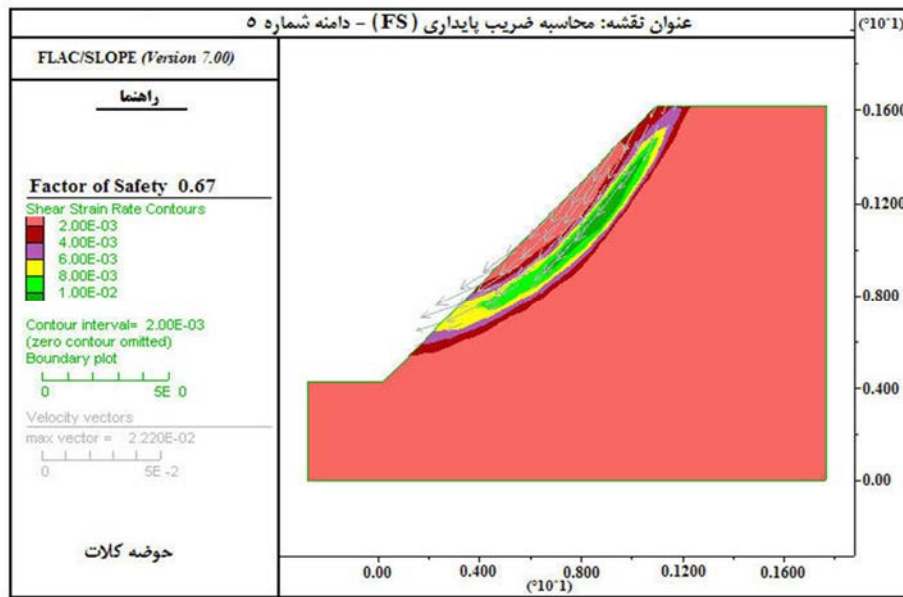
۰/۶۷ به دست آمده است. با توجه به طبقه‌بندی ارائه شده توسط پک و همکاران (۱۹۹۸)، دامنه ۴ در کلاس آسیب‌پذیری زیاد و دامنه ۵، در کلاس آسیب‌پذیری خیلی زیاد قرار می‌گیرد.

شکل‌های (۷ و ۸) دامنه‌های ۴ و ۵ را که با استفاده از مدل پایداری دامنه در محیط نرم‌افزار FLAC SLOP، شبیه‌سازی شده است، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب پایداری (FS) برای دامنه ۴، معادل ۱/۱۰ و برای دامنه ۵، معادل



شکل ۷- ضریب پایداری (FS) به دست آمده در دامنه ۴، با استفاده از نرم‌افزار FLAC SLOP





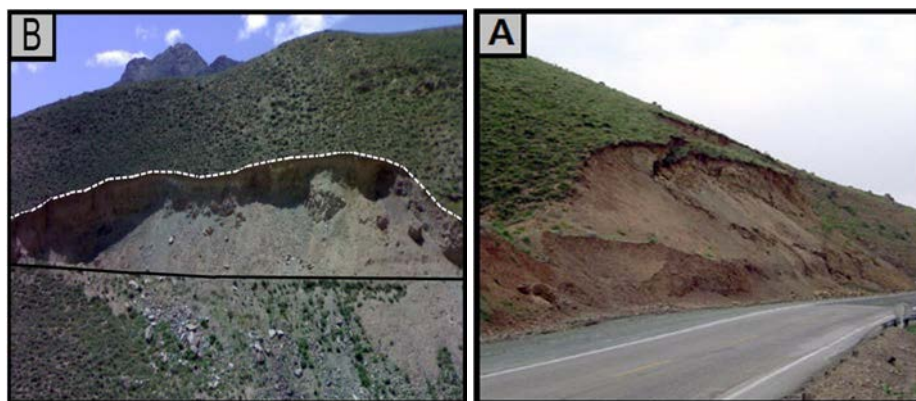
شکل ۸- ضریب پایداری (FS) به‌دست آمده در دامنه ۵، با استفاده از نرم‌افزار FLAC SLOPE

جدول ۴- کلاس ناپایداری دامنه‌ها بر اساس میزان ضریب پایداری (FS)

| دامنه | ضریب پایداری (FS) | کلاس آسیب‌پذیری                |
|-------|-------------------|--------------------------------|
| ۱     | ۱/۳۵              | آسیب‌پذیری زمین‌لغزش متوسط     |
| ۲     | ۲/۹۸              | آسیب‌پذیری زمین‌لغزش کم        |
| ۳     | ۱/۱۵              | آسیب‌پذیری زمین‌لغزش متوسط     |
| ۴     | ۱/۱۰              | آسیب‌پذیری زمین‌لغزش زیاد      |
| ۵     | ۰/۶۷              | آسیب‌پذیری زمین‌لغزش خیلی زیاد |
| ۶     | ۳/۰۵              | آسیب‌پذیری زمین‌لغزش کم        |
| ۷     | ۲/۵۲              | آسیب‌پذیری زمین‌لغزش کم        |

به‌عبارت دیگر پایدار محسوب شده‌اند. در نتیجه در این دامنه‌ها که دارای شیب کم‌تر از ۹/۵۴ درصد هستند، نباید لغزش مشاهده شود. پس می‌توان استدلال کرد که در طبیعت این دامنه‌ها به‌خودی‌خود امکان لغزش ندارند، اما وجود عواملی مصنوعی مانند جاده‌سازی، در ایجاد لغزش در این دامنه‌ها مؤثر بوده است. شکل (۹)، به‌خوبی موقعیت دامنه ۴ و ۵ و تأثیر احداث جاده را در وقوع لغزش‌ها روی دامنه‌ها نشان می‌دهد.

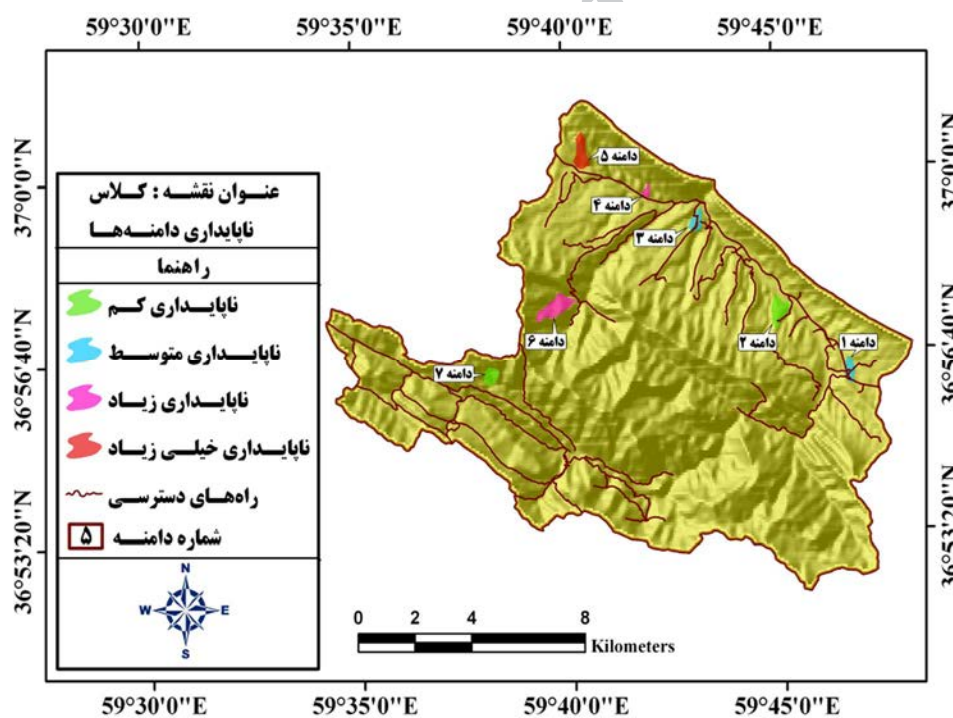
با توجه به جدول (۴)، فقط دامنه ۲ با طول ۴۳/۵ متر و شیب متوسط ۹/۵۴ درجه، دامنه ۶ با طول ۶۰/۵ متر و شیب متوسط ۷/۹۸ درجه و دامنه شماره ۷ با طول ۴۰ متر و شیب متوسط ۸/۲۴ درجه، ضریب پایداری بالایی دارند که آن هم به‌علت شیب کم (۷ تا ۹ درصد) آن‌ها است. با توجه به ضریب پایداری دامنه‌ها (FS) در محدوده مورد مطالعه بر اساس تحلیل پایداری شیب و مقایسه آن با شرایط واقعی، می‌توان نتیجه گرفت که دامنه‌های ۲، ۶ و ۷ بر اساس جدول (۴) در کلاس ناپایداری کم قرار گرفته‌اند یا



شکل ۹- تصویری از لغزش‌های اتفاق افتاده در دامنه‌ها بر اثر جاده‌سازی  
 شکل ۹.۱ (A) دامنه ناپایدار ۵ و شکل ۹.۲ (B) دامنه ناپایدار ۴ در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جاده‌سازی در وقوع زمین‌لغزش در این دامنه‌ها مؤثر بوده است. کلاس ناپایداری هر یک از دامنه‌های مورد بررسی در این مطالعه بر اساس تقسیم‌بندی پک و همکاران (۱۹۹۸)، در شکل (۱۰) آمده است.

مقادیر شاخص ضریب پایداری (FS) دامنه‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد که این دامنه‌ها به ترتیب در کلاس آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته‌اند که به‌طور مشخص عامل شیب و عوامل مصنوعی مانند



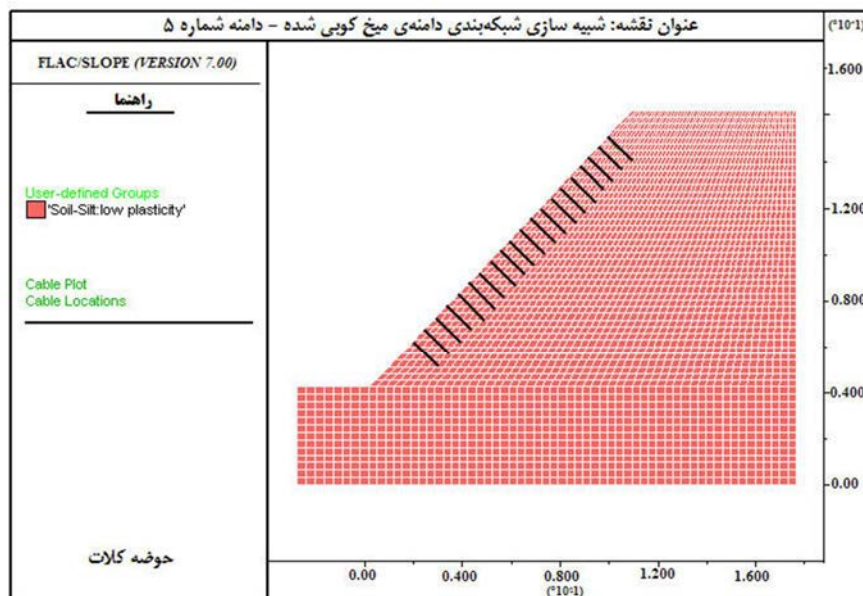
شکل ۱۰- کلاس ناپایداری هر یک از دامنه‌ها با توجه به ضریب پایداری (FS)

محاسبه ضریب پایداری (FS) برای یک شیب یا دامنه مشخص است. به طور کلی برای جلوگیری از ناپایداری شیب‌ها می‌توان دو روش را در نظر گرفت.

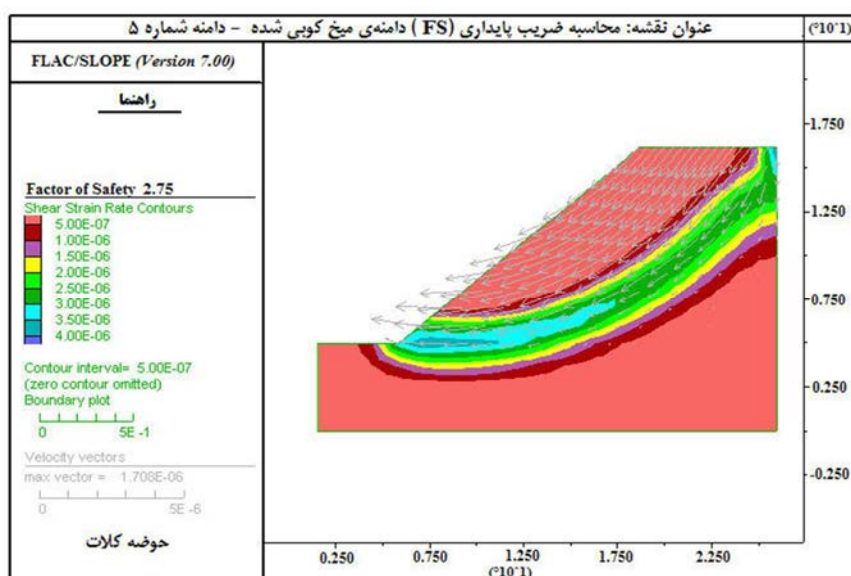
راه‌کارهای پایدارسازی دامنه‌ها  
 عملیات میخ‌کوبی و تراس‌بندی بر پایدارسازی  
 دامنه‌های لغزشی: مطالعات پایداری شیب مبتنی بر

در این پژوهش برای شبیه‌سازی دامنه‌های ناپایدار میخ‌کوبی شده در محیط نرم‌افزار FLAC SLOP از ۲۰ میلگرد با قطر ۲۰ میلی‌متر و طول ۷ متر و زاویه ۳۰ درجه نسبت به افق با فواصل ۱/۵ متر استفاده شد. به علت اینکه تحلیل‌ها در این پژوهش به صورت دو بعدی است، فرض بر این است که تمامی میخ‌ها با فواصل یکسان در امتداد یکدیگر در جهات افقی و عمودی قرار گرفته‌اند. شکل (۱۱)، عملیات شبیه‌سازی میخ‌کوبی دامنه (۵) در مدل را نشان می‌دهد که باعث افزایش ضریب پایداری دامنه از ۰/۶۷ به ۲/۷۵ شده است (شکل ۱۲). با توجه به طبقه‌بندی آسیب‌پذیری زمین‌لغزش ارائه شده توسط پک و همکاران (۱۹۹۸)، دامنه ۵ با عملیات میخ‌کوبی از کلاس آسیب‌پذیری خیلی‌زیاد ( $FS < 1$ ) در کلاس آسیب‌پذیری کم ( $FS > 1/5$ ) قرار می‌گیرد.

**الف) تقویت نیروهای مقاوم در مقابل جابه‌جایی:**  
در حال حاضر میخ‌کوبی شیب‌های خاکی در بسیاری از کشورهای دنیا به صورت گسترده به‌عنوان راه‌حلی مناسب برای افزایش پایداری شیب‌ها، مورد توجه قرار گرفته است (Hack and et al, 2007: 8). برای این حالت باید مقاومت داخلی توده لغزنده به اندازه‌ای افزایش یابد که شیب پایدار بماند. میخ‌کوبی زمانی مؤثر است که میخ‌ها<sup>۱</sup> به اندازه کافی در زیر سطح گسیختگی قرار گیرد، تا بتواند در مقابل نیروهای رانشی مقاومت کنند. تاکنون مطالعات تجربی و تحلیل‌های عددی فراوانی برای درک بهتر رفتار شیب‌های میخ‌کوبی شده انجام گرفته است. در طراحی و استفاده از این گونه میخ‌ها، علاوه بر هندسه شیب و مشخصات خاک، عوامل دیگری همچون زاویه قرارگیری میخ‌ها، مشخصات میخ‌ها، طول آن‌ها و فواصل بین میخ‌ها، بر پایداری شیب‌های میخ‌کوبی شده تأثیر فراوانی دارند (Fan and et al, 2008: 592).



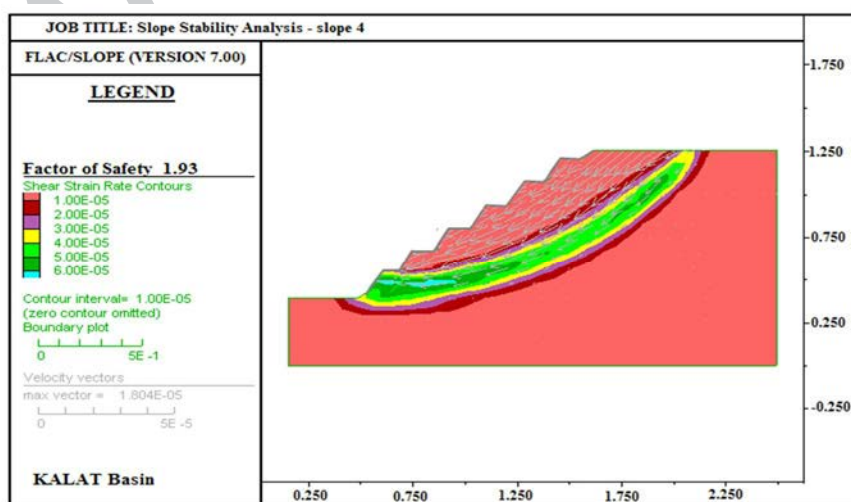
شکل ۱۱- شبیه‌سازی شبکه‌بندی دامنه میخ‌کوبی شده در دامنه ۵.



شکل ۱۲- ضریب پایداری (FS) به دست آمده در دامنه میخ کوبی شده شماره ۵.

(رضسانی و دیگران، ۱۳۸۸: ۱۱۵). شکل (۱۳)، عملیات تراسبندی را روی دامنه ۴ نشان می‌دهد که باعث افزایش ضریب پایداری (FS) در این دامنه از مقدار ۱/۱۰ به ۱/۹۳ شده است. با توجه به طبقه‌بندی آسیب‌پذیری زمین‌لغزش ارائه شده توسط پک و همکاران (۱۹۹۸)، عملیات تراسبندی روی این دامنه باعث افزایش پایداری دامنه از کلاس آسیب‌پذیری زیاد ( $1/25 > FS > 1/5$ ) به کلاس آسیب‌پذیری کم ( $FS > 1/5$ ) شده و افزایش پایداری دامنه را به دنبال دارد.

(ب) کاهش نیروهای رانشی زمین (محرک): کاستن از زاویه شیب، پلکانی نمودن و زهکشی خاک و استفاده از مصالح سبک در خاک‌ریزها و مسلح‌سازی خاک، نمونه‌هایی از روش‌های اجرایی برای کاهش وزن توده لغزنده و در نتیجه کاستن از نیروهای رانشی زمین است (توفیق ریحانی، ۱۳۸۲: ۱۳۵). برای پایدارسازی برخی از دامنه‌ها، از روش تراسبندی استفاده می‌شود. این روش باعث پراکندگی و توزیع مجدد بار وارد آمده و تثبیت لغزش‌ها می‌شود. این روش، بیش‌تر در خاک‌های مناطق کوهستانی و دامنه‌های دارای شیب متوسط تا تند استفاده می‌شود



شکل ۱۳- محاسبه ضریب پایداری (FS) دامنه تراسبندی شده در دامنه ۴.

## جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

می‌شود. همچنین با استفاده از مدل ارائه شده می‌توان دامنه‌های ناپایدار را شناسایی کرد و نوع عملیات حفاظتی را برای افزایش ضریب پایداری مشخص کرد؛ به طوری که عملیات میخ‌کوبی و تراس‌بندی با افزایش ضریب پایداری و کاهش نیروهای محرک می‌تواند باعث پایداری دامنه‌ها شود.

طبق نتایج به‌دست آمده، به‌کارگیری عملیات میخ‌کوبی و تراس‌بندی در دامنه‌هایی که ناپایدار بودند، نشان داد که این روش‌ها می‌تواند باعث افزایش پایداری دامنه شود، به طوری که عملیات میخ‌کوبی باعث افزایش ضریب پایداری از مقدار  $0/67$  به  $2/75$  و عملیات تراس‌بندی روی دامنه‌های ناپایدار، باعث افزایش ضریب پایداری از مقدار  $1/10$  به  $1/93$  شد که در نهایت می‌توان بهترین روش را برای انجام عملیات حفاظتی مشخص کرد.

یافته‌های این پژوهش نشان داد که جاده‌سازی باعث کاهش طول شیب و افزایش مقدار شیب دامنه می‌شود و همچنین نبود زهکشی مناسب برای تخلیه آب اضافی زیر سطحی دامنه در فرایند جاده‌سازی، باعث افزایش رطوبت خاک به اندازه اشباع (افزایش فشار منفذی) و افزایش وزن توده خاک و کاهش چسبندگی می‌شود و در کل باعث افزایش نیروهای محرک و در نتیجه کاهش زیاد در مقاومت خاک می‌شود. همچنین مدل پایداری دامنه در تعیین عدم پایداری در دامنه‌هایی که تحت تأثیر جاده‌سازی دچار لغزش می‌شوند، کارایی خوبی دارد. زیرا در دامنه‌های لغزشی، میزان ضریب پایداری کم‌تر از یک به‌دست آمده است و جاده‌سازی در دامنه‌هایی با شیب تند (بیش از ۱۷ درجه) باعث کاهش پایداری دامنه‌ها

## منابع

۱. توفیق ریحانی، محمدحسین. ۱۳۸۲. روش‌های پایداری‌سازی شیب‌های خاکی، دوره آموزشی تحلیل و پایداری‌سازی شیب‌ها، ۲۸ و ۲۹ بهمن، صص ۱۳۱-۱۶۱.
۲. جانعلی‌زاده چوبستی، عسکر؛ فرشیدرضا حقیقی؛ محمد برارپور و عباس طهماسبی‌پور. ۱۳۹۰. کاربرد ژئوتکستایل در پایداری‌سازی زمین‌لغزش (مطالعه موردی: زمین‌لغزش بستر جاده منطقه شارقلت شیرگاه)، اولین همایش منطقه‌ای مهندسی عمران، ۲۲ اردیبهشت ماه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد جویبار، صص ۲۵-۲۸.
۳. رضایی، بهمن و هدی ابراهیمی. ۱۳۸۸. زمین‌لغزش و راه‌کارهای تثبیت آن، فصل‌نامه جغرافیایی آمایش محیط، شماره ۷، صص ۱۱۰-۱۱۸.
۴. سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور. (۱۳۸۱). فهرست زمین‌لغزش‌های کشور. گروه مطالعه امور زمین‌لغزش‌ها، شهریورماه.
۵. طالبی، علی و یعقوب نیازی. ۱۳۹۰. بررسی قابلیت مدل فیزیکی-هیدرولوژی برای بررسی زمین‌لغزش‌های سطحی در دامنه‌های طبیعی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز سد ایلام)، مجله منابع طبیعی ایران، شماره ۳، صص ۳۲۳-۳۳۷.
۶. فعله‌گری، محسن؛ علی طالبی و یاسر کیااشکوریان. ۱۳۹۲. بررسی اثر جاده‌سازی در وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل پایداری دامنه FLAC SLOP (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سد ایلام)، مجله پژوهش‌های آب و خاک، شماره اول، صص ۲۲۷-۲۴۰.
۷. کلارستاقی، عطالله. (۱۳۸۰). بررسی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوضه سد تجن ساری)، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، به راهنمایی فیض‌نیا سادات، دانشگاه تهران، دانشکده منابع طبیعی.
۸. کرمی، فریبا و معصومه رجبی. ۱۳۸۸. بررسی خطر زمین‌لغزش و تحلیل ریسک‌پذیری آن در نواحی روستایی (مطالعه موردی: دامنه شمالی توده کوهستانی سهند)، نشریه انجمن جغرافیایی ایران، شماره ۱۸، صص ۱۳۹-۱۵۴.

۹. کریمی، حاجی؛ نادری، فتح اله؛ ابراهیم مرشدی و مهدی نیک سرشت، ۱۳۹۰، پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز چرداول ایلام با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، شماره ۴، صص ۳۱۹-۳۳۲.
۱۰. نیازی، یعقوب؛ محمدرضا اختصاصی؛ علی طالبی؛ صالح آرخی و محمدحسین مختاری. ۱۳۸۹. ارزیابی کارایی مدل آماری دو متغیره در پیش‌بینی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوضه سد ایلام). مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، شماره ۱۰، صص ۹-۲۰.
11. Abramson, L.W., Lee, T.S., Sharma, S., and Boyce, G.M. 2002. Slope Stability Concepts, Slope Stabilisation and Stabilisation Methods. Second edition, published by John Willey and Sons, Inc, 329-461.
  12. Andrade, P.S., and Saraiva, A. 2006. Stability analysis of road slope in central Portugal, The Geological Society of London, IAEG2006 paper number 483, Pp: 1-12.
  13. Cala, M., Flisiak, J., and Tajdus, A. 2004. Slope stability with modified shear strength reduction technique. 9th International Symposium on Landslides, Landslides: Evaluation and Stabilization, 1085-1090.
  14. Fan, C.C., and Luo, J.H. 2008. Numerical study on the optimum layout of soil-mailed slopes. Computers and Geotechnics 35: 585-599.
  15. Fell, R., Corominas, J., Bonnard, CH., Cascini, L., Leroi, E., and Savage, Z.S. 2008. Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for land Use Planning. Engineering Geology 1(102), 85-98.
  16. Hack, R., Alkema., D., Kruse, G.A., Leenders, N., and Luzi, L. 2007. Influence of earthquakes on the stability of slopes. Engineering Geology. 91: 4-15.
  17. Huiqin, He., Shaocai, Li., Hailong, and S., Yang, T. 2011. Environmental factors of road slope stability in mountain area using principal component analysis and hierarchy cluster, Environmental Earth Sciences 62: 55-59.
  18. Kainthola, A., Verama, D., Thareja, R., and Singh, T.N. 2013. A Review on Numerical Slope Stability Analysis. International Journal of Science, Engineering and Technology Research 6: 1315-1320.
  19. Kayasta, P. 2006. Slope stability analysis GIS on a regional scale. Master thesis in physical land resources, Virje University Brusse 1, 111p.
  20. Kham, M.S., Ahmad, S.R., and Qadri., M.A. 2011. Slope Stability Analysis in Hard Rocks and Prediction of Landslide Along KHEWRA CHOH SAIDDEN SHAH ROAD, SALT RANGE PAKISTAN. Pakistan Journal of Science 4: 232-235.
  21. Koehorst, B.A.N., Kjekstad, O., Patel, D., Lubkowski, Z., Knoeff, J.G., and Akkerman, G.J. 2005. Work Package 6, Determination of Socio-Economic Impact of Natural Disasters. Assessing socio-economic Impact in Europe, 173p.
  22. Pack, R.T., Tarboton, D.G., and Goodwin, C.N. 1998. The SINMAP approach to terrain stability mapping. In: Proceedings of 8th Congress of the International Association of Engineering Geology, Vancouver, British Columbia, Canada, 1157-1165.
  23. Roering, J.J., Kirchner, J.W., and Dietrich, W.E. 2005. Characterizing structural and lithologic controls on deep-seated landsliding: Implications for topographic relief and landscape evolution in the Oregon Coast Range, USA. Geological Society of America Bulletin 117: 654-668.
  24. Rosenfeld, C.L. 2004. Geomorphological Hazard. Encyclopedia of Geomorphology. 1: 423-426.
  25. Teoh, E.A. 2005. Numerical modeling of complex slope using FLAC/SLOPE bachelor Thesis, University of Southern Queensland Faculty of Engineering and Surveying, 110p.
  26. Umrao, R.K., Singh, R., Ahmad, M., and Singh, T.N. 2011. Stability Analysis of Cut Slopes Using Continuous Slope Mass Rating and Kinematic Analysis in Rudraprayag District. Uttarakhand, Geomaterials 1, 79-87.
  27. Vittorio, F. 2011. Introduction to the physics of landslides. Springer.
  28. Vinh, B.L. 2007. Regional slope instability zonation using different GIS techniques Master thesis in Physical Land Resources, Vrije Universiteit Brussel, 98p.
  29. Youssef, A.M., Maerz, N.H, Al-Otaibi, A.A. 2012. Stability of Rock Slopes along Raidah Escarpment Road, Asir Area, Kingdom of Saudi Arabia. Journal of Geography and Geology 2: 48-70.