

تحلیل پایداری و راهکارهای پایدارسازی زمین لغزش‌ها (مطالعه موردی: آزادراه خرم‌آباد - پل زال)

مجید ابراهیمی* - دانش‌آموخته دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران
سید احمد ذاکریان - دانش‌آموخته کارشناسی ارشد هیدروژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
جواد داودیان - دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ارزیابی و آمایش سرزمین، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
ابوالقاسم امیراحمدی - دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۱۸

وصول: ۱۳۹۶/۰۴/۱۴

چکیده

با توجه به افزایش روزافزون احداث بناها، جاده‌ها، راه‌آهن و غیره در مناطق کوهستانی و پرشیب، لزوم پایدارسازی شیب‌های طبیعی و مصنوعی و مصنوعي بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. روش‌های متعددی به منظور پایدارسازی شیب‌ها وجود دارد که در تمامی آنها هدف، افزایش نیروهای مقاوم در برابر نیروهای محرک و در نتیجه افزایش ضریب اطمینان است. هدف از پژوهش حاضر، محاسبه پایداری دامنه‌های لغزشی مشرف به جاده و نقش میخ‌کوبی و تراس‌بندی در پایدارسازی این دامنه‌ها در ۴۰ کیلومتری ابتدای آزادراه خرم‌آباد - پل زال است. در این پژوهش، ابتدا هشت دامنه لغزشی مشرف به جاده مشخص شد، سپس تمامی پارامترهای مدل تحلیل پایداری شیب که شامل: c : چسبندگی خاک، ϕ : زاویه اصطکاک داخلی خاک، γ_w : چگالی خاک و γ_s : چگالی مرطوب خاک است. با مطالعات میدانی، نمونه‌برداری از خاک و تجزیه و تحلیل توپوگرافی دامنه‌ها استخراج و برای تعیین ضریب پایداری دامنه‌ها، این پارامترها در نرم‌افزار تحلیل پایداری شیب وارد و میزان ضریب ایمنی برای هر دامنه مشخص شد. نتایج پژوهش نشان داد که احداث جاده و انجام عملیات خاک‌برداری، سبب قطع جریان رواناب و جریانات زیرسطحی دامنه‌ها شده و این جریانات به صورت رواناب در سطح دامنه خاک‌برداری و روی جاده جاری شده و سبب ناپایداری شیب دامنه‌های خاک‌برداری می‌شود؛ همچنین با استفاده از این مدل می‌توان دامنه‌های ناپایدار را شناسایی و نوع عملیات حفاظتی را برای افزایش ضریب پایداری مشخص کرد؛ به طوری که عملیات میخ‌کوبی در دامنه شماره ۶ با کلاس آسیب‌پذیری خیلی زیاد، با موقعیت جغرافیایی $33^{\circ} 20' 43''$ عرض شمالی و $48^{\circ} 10' 59''$ طول شرقی باعث افزایش ضریب پایداری از مقدار $0.57/1$ به $1.98/1$ و عملیات تراس‌بندی بر روی این دامنه باعث افزایش ضریب پایداری به مقدار $2.10/1$ شد که در نهایت، می‌توان مناسب‌ترین روش را برای انجام عملیات حفاظتی مشخص کرد.

واژگان کلیدی: ضریب ایمنی، میخ‌کوبی، تراس‌بندی، زمین‌لغزش، آزادراه خرم‌آباد - پل زال.

مقدمه

یکی از مهم‌ترین عوامل تحریک‌کننده زمین‌لغزش، جاده‌سازی است که زمینه را برای وقوع زمین‌لغزش‌های بزرگ از طریق ایجاد ترانشه‌های ناپایدار در دو طرف جاده، تغییر دادن مسیر آبراهه‌ها، باربرداری و بارگذاری نامناسب خاک و قطع درختان در نواحی جنگلی و ایجاد خسارات جدی فراهم می‌آورد (کانگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۵). زمانی که چندین کیلومتر از مسیر بزرگراه‌ها و جاده‌ها با عوارض توپوگرافی برخورد می‌کنند و از نواحی با شیب‌های سنگی و تند عبور می‌کنند، در اثر حفر پایه و تکیه‌گاه شیب، پدیده‌های ژئومورفولوژیک، به شکل سنگ‌ریزش، لغزش، جریان‌ها و ریزش‌های واریزه‌ای، مسیرهای ارتباطی را متأثر می‌سازند (کوا و کانگر^۲، ۲۰۰۹). این حوادث، ضریب اطمینان راه‌ها را کاهش می‌دهند و ضمن ایجاد اختلال در ترافیک، هزینه‌های اقتصادی زیادی را برای تعمیر و بازگشایی مجدد جاده‌ها به بار می‌آورند (بالیفارد^۳ و همکاران، ۲۰۰۳). آثار حرکات توده‌ای روی شبکه‌های ارتباطی در نظام‌های علمی متعددی ارزیابی شده است. در ضمن، مکانیسم و علت، وسعت و تعداد وقوع زمین‌لغزش‌ها، در محیط‌های گوناگون به وسیله ژئومورفولوژیست‌ها و زمین‌شناسان بررسی شده است (هیگن^۴ و همکاران، ۲۰۱۱).

مطالعات پایداری شیب، مبتنی بر محاسبه ضریب پایداری برای یک شیب یا دامنه مشخص است. به طور کلی، برای جلوگیری از ناپایداری شیب‌ها می‌توان دو روش را در نظر گرفت. الف: تقویت نیروهای مقاوم در مقابل جابه‌جایی (میخ‌کوبی) ب: کاهش نیروهای رانشی زمین (محرک) (تراس‌بندی). میخ‌کوبی از جمله روش‌های پایدارسازی دامنه‌های خاکی است که به دلیل صرفه اقتصادی و سادگی اجرا، به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد (علیپور مازندرانی و همکاران، ۱۳۹۲). میخ‌کوبی خاک، یک روش تسلیح در جای خاک است، تئوری استفاده از روش میخ‌کوبی بر مبنای مسلح کردن و مقاوم نمودن توده خاک با استفاده از دوختن توده خاک توسط مهارهای کششی فولادی با فواصل نزدیک به یکدیگر است. خاک معمولاً مقاومت فشاری نسبتاً بالا و مقاومت کششی و برشی پایینی دارد، میخ‌کوبی، خاک را تسلیح نموده و مقاومت کششی و برشی آن را افزایش می‌دهد (جانعلی‌زاده چوپستی و همکاران، ۱۳۹۰). در حال حاضر میخ‌کوبی شیب‌های خاکی در بسیاری از کشورهای دنیا به صورت گسترده به عنوان راه‌حلی مناسب برای افزایش پایداری شیب‌ها، مورد توجه قرار گرفته است (هاک^۵ و همکاران، ۲۰۰۷)؛ برای این حالت باید مقاومت داخلی توده لغزنده به اندازه‌ای افزایش یابد که شیب، پایدار بماند. میخ‌کوبی زمانی مؤثر است که میخ‌ها^۶ به اندازه کافی در زیر سطح گسیختگی قرار گیرد تا بتواند در مقابل نیروهای رانشی مقاومت کنند. در طراحی و استفاده از این‌گونه میخ‌ها، افزون 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 (فن و لو^۷، ۲۰۰۸).

تراس‌بندی شیب‌ها، به منظور کاهش نیروهای محرک یا افزایش نیروهای مقاوم، روشی است که به طور متداول برای افزایش ضریب پایداری دامنه‌ها و تثبیت زمین‌لغزش‌ها به کار می‌رود، از مزایای قابل توجه این روش که کاربرد بیشتری نسبت به سایر روش‌ها دارد، هزینه کمتر و سهولت اجرا است (زمانی لنجانی و

- 1- Kang
- 2- Cova & Conger
- 3- Baillifard
- 4- Huiqin
- 5- Hack
- 6- Nails
- 7- Fan & Luo

همکاران، ۱۳۹۲). در خاک‌های دارای مؤلفه اصطکاک و چسبندگی توأم، هدف اصلی تراس‌بندی کاهش شیب و مسطح کردن کل دامنه است. بعضی اهداف دیگر مدّ نظر تراس‌بندی می‌تواند جمع‌آوری ریزش‌های واریزه‌ها و انحراف آب سطحی باشد. کاستن از زاویه شیب، پلکانی نمودن و زهکشی خاک و استفاده از مصالح سبک در خاک‌ریزه‌ها و مسلح‌سازی خاک، نمونه‌هایی از روش‌های اجرایی برای کاهش وزن توده لغزنده و در نتیجه کاستن از نیروهای رانشی زمین است. این روش باعث پراکندگی و توزیع مجدد بار واردشده و تثبیت لغزش‌ها می‌شود. این روش، بیشتر در خاک‌های مناطق کوهستانی و دامنه‌های دارای شیب متوسط تا تند استفاده می‌شود (رمضانی ابراهیمی و ابراهیمی، ۱۳۸۸).

در سال‌های اخیر، در ایران مطالعات گسترده‌ای در رابطه با تأثیر مسلح‌کننده‌ها به منظور افزایش ضریب اطمینان و پایداری دامنه‌ها صورت گرفته است، تعداد زیادی از این پژوهشگران مقدار ضریب اطمینان را با استفاده از نرم‌افزارهای مختلف، مدل‌سازی و مورد مطالعه قرار داده و برای افزایش ضریب اطمینان دامنه‌ها راهکارهای مناسبی از جمله استفاده از مسلح‌کننده‌های مهار، میخ‌کوبی^۱ و استفاده از لایه‌های ژئوفایریک و غیره را ارائه داده‌اند (شارما^۲ و همکاران، ۲۰۱۲؛ ورما^۳ و همکاران، ۲۰۱۳؛ کانگ و همکاران، ۲۰۱۵؛ اوه و لیو^۴، ۲۰۱۵؛ اسدی و حشمتی، ۱۳۹۰؛ حشمتی و شکیباراد، ۱۳۹۰؛ عامل‌سخی و منافی، ۱۳۹۲؛ فعله‌گری و همکاران، ۱۳۹۲). نتایج مطالعه مَنگ^۵ و همکاران (۲۰۱۳)، با استفاده از نرم‌افزار اجزاء منفصل پی.اف.سی. (۲ بعدی)^۶، نشان داد که این روش، موجب استحکام‌بخشی به شیب دامنه‌ها و ثبات در سنگ‌های دامنه خواهد شد. در همین راستا در ایران، علیپور مازندرانی و همکاران (۱۳۹۲)، در پژوهش خود پایداری دامنه‌ها را با دو نوع مسلح‌کننده مهار و میخ‌کوبی، بررسی و دریافتند که هرچه چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک بیشتر شود، جابه‌جایی افقی شیب کمتر شده در نتیجه شیب پایدارتر است.

آزادراه خرم‌آباد - پل زال به عنوان گلوگاه شاهراه ترانزیتی شمال - جنوب کشور، از مسیرهای پرپیچ و خم کوهستانی است که به دلیل گستردگی بیش از حد آن و عبور از واحدهای ژئومورفیک گوناگون همواره در معرض مخاطرات جاده‌ای ناشی از ناپایداری دامنه‌ای است. از طرفی بیشتر مخاطراتی که این محور را مورد تهدید قرار می‌دهند غالب اوقات، منشأ ژئومورفولوژیکی - اقلیمی دارند که به دلیل لحاظ نکردن راهکارهای مهندسی و سازه یا کم‌اهمیت شمردن پارامترهای ژئومورفولوژیکی در حال و آینده، خسارت‌های مالی و جانی متعددی را به وجود آورده است. هدف از پژوهش حاضر، محاسبه پایداری دامنه‌های لغزشی مشرف به جاده و نقش میخ‌کوبی و تراس‌بندی در پایدارسازی این دامنه‌ها در ۴۰ کیلومتری ابتدای آزادراه خرم‌آباد - پل زال است تا در نهایت مناسب‌ترین روش پایدارسازی زمین لغزش انتخاب شود.

معرفی منطقه مورد بررسی

آزادراه خرم‌آباد - پل زال، از نظر تقسیمات سیاسی جزو استان لرستان بوده و از نظر موقعیت جغرافیایی در ۳۳° ۱۰' ۱۱" تا ۳۳° ۲۶' ۳۳" عرض شمالی و ۴۸° ۱۱' ۱۲" تا ۴۸° ۰۹' ۱۰" طول شرقی قرار دارد (شکل ۱). این آزادراه، قسمتی از محور سراسری تهران - بندر امام است که در فاصله ۵۰۰ کیلومتری جنوب

1- Nailing

2- Sharma

3- Verma

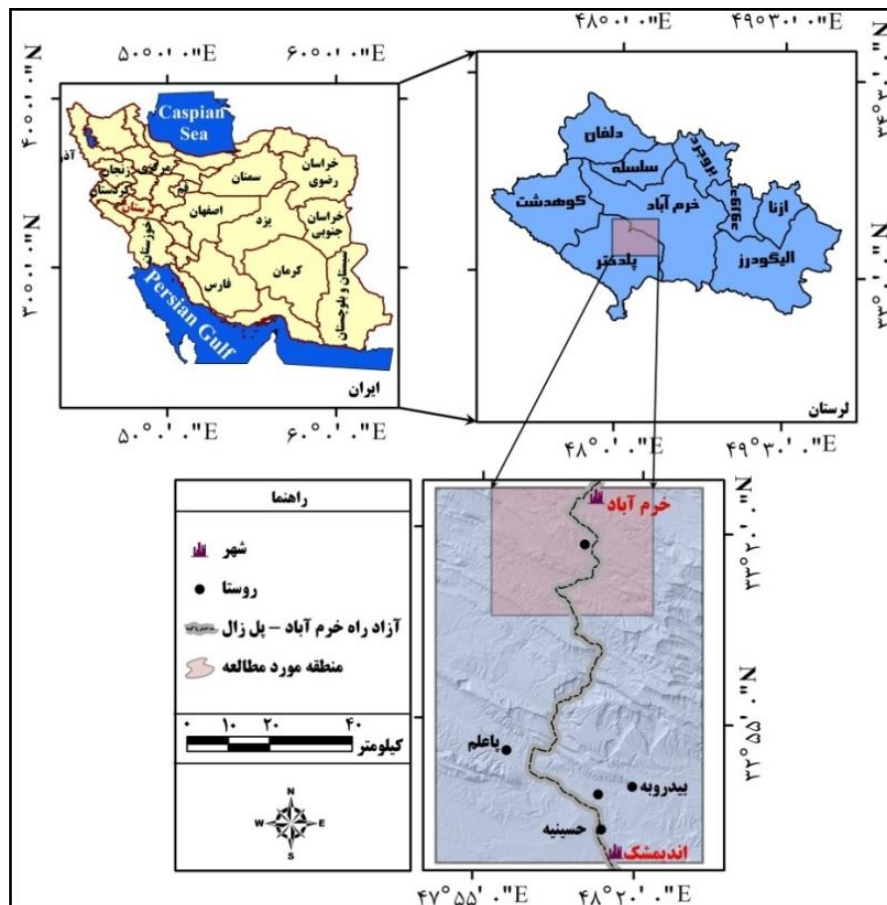
4- Oh & Lu

5- Meng

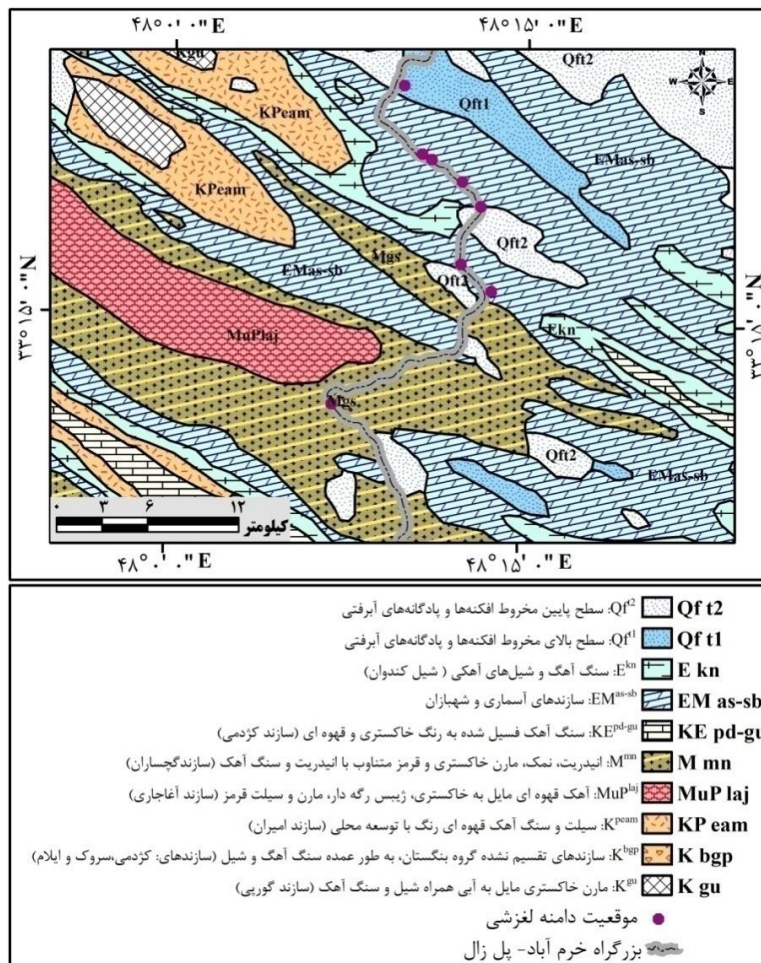
6- Particle Flow Code in Two Dimensions (PFC2D)

غربی تهران واقع شده است. پژوهش حاضر به محاسبه پایداری شیب دامنه‌های خاکی در ۴۰ کیلومتری ابتدای این آزادراه می‌پردازد. غالباً جاده به صورت بغل‌بری (ترانشه) در دل کوه احداث شده و در محل تلاقی با دره‌ها، راه از روی خاکریزها یا پل‌های ساخته‌شده عبور می‌کند. این پروژه ملی که از ارتفاعات زاگرس چین‌خورده با امتداد تقریبی شمالی جنوبی می‌گذرد، شهرستان خرم‌آباد را به اندیمشک وصل می‌کند. این آزادراه، در حد فاصل دو شهر خرم‌آباد و اندیمشک به طول ۱۰۴ کیلومتر از فاصله ۱۸ کیلومتری جنوب غربی شهرستان خرم‌آباد آغاز شده و با ساخت یک تقاطع غیر هم‌سطح در ۳/۵ کیلومتری روستای پل زال واقع در حدود ۶۰ کیلومتری شهرستان اندیمشک خاتمه می‌یابد. طول مسیر قبلی خرم‌آباد تا پل زال ۱۶۸ کیلومتر بود که با احداث این آزادراه، فاصله خرم‌آباد تا پل زال به میزان ۶۴ کیلومتر کاهش یافت. میانگین ارتفاع در منطقه مورد مطالعه ۱۶۰۳ متر است که بر پایه طبقه‌بندی دومارتن در دو اقلیم مدیترانه‌ای و نیمه‌خشک جای گرفته است.

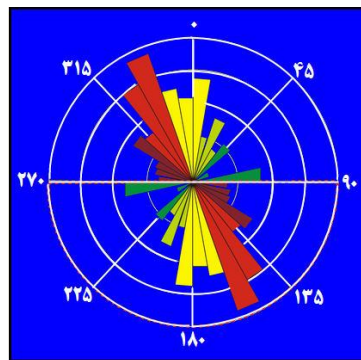
منطقه مورد مطالعه از دیدگاه زمین‌شناسی، بخشی از زاگرس چین‌خورده است. زاگرس چین‌خورده، دارای پهنایی حدود ۱۵۰ تا ۲۵۰ کیلومتر است که به موازات راندگی زاگرس قرار دارد. به طور کلی، روند ساختاری فعال و گسل‌های لرزه‌زا در منطقه مورد مطالعه امتداد شمال غربی - جنوب شرقی دارند (شکل ۲). سازندهای رخنمون‌یافته در گستره مورد مطالعه شامل سازند کنگلومرای کشکان (پالئوسن - ائوسن میانی)، سازند آهکی - دولومیتی آسماری - شهبازان، سازند مارن ژئوپس‌دار گچساران (میوسن زیرین)، سازند مارن و ماسه‌سنگ آغاچاری (میوسن بالایی - پلیوسن) و رسوبات جوان کواترنر است (شکل ۳).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه



شکل ۳. رز دیاگرام گسل‌های منطقه مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

در تحلیل پایداری شیب، تعیین فاکتور ایمنی اهمیت ویژه‌ای دارد. نرم‌افزار فلک^۱ بر اساس نظریه حد پایداری تهیه شده است که فاکتور ایمنی را می‌تواند تعیین کند. این برنامه، به کاربر فرصت می‌دهد که به آنالیز تنش برشی بپردازد و به طور خودکار، فرایندهایی که از نظر فیزیکی ناپایدار هستند را شبیه‌سازی کند و ضریب ایمنی را در اطراف نقطه پایدار به دست آورد و موقعیت شکست بحرانی (ریزش) را تعیین نماید (کالا^۲ و

1- Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC)

2- Kala

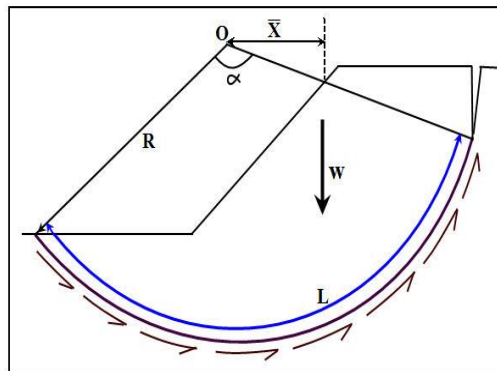
همکاران، ۲۰۰۴).

این نرم‌افزار، در گستره وسیعی از بررسی شرایط پایداری شیب‌ها و دیواره‌های خاکی به کار برده می‌شود و قادر به ایجاد شکل مرز شیب است که اجازه می‌دهد تا خیلی سریع شبکه‌بندی خطی، غیر خطی و شیب دامنه‌ها و دیواره‌های خاکی انجام گیرد و قابلیت وارد کردن چندین لایه از مواد، با جهت‌ها و ضخامت‌های متفاوت در مدل وجود دارد؛ همچنین این نرم‌افزار قادر است، خط پیزومتریک و سطح آب زیرزمینی و فضاهایی که توزیع فشار روزه‌ای وجود دارد را به منظور یکسان شدن تنش‌های مؤثر در مدل وارد و همچنین وزن مخصوص خشک و تر در محاسبه ضریب ایمنی تعریف شود (یوسف^۱ و همکاران، ۲۰۱۲). یکی دیگر از ویژگی‌های مهم مدل، قابلیت نصب ساختارهای تقویت‌کننده، همانند میخ‌ها و تراس‌بندی در شیب‌های مورد نظر است (طالبی و همکاران، ۱۳۹۲).

در این پژوهش، ابتدا 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، ϕ : زاویه اصطکاک داخلی خاک، γ_d : چگالی خاک و γ_w : چگالی مرطوب خاک بودند با مطالعات میدانی و نمونه‌برداری از خاک این دامنه‌ها استخراج و نمونه‌ها در اختیار آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک قرار گرفت. در این مطالعه، از شیوه آزمایش برش سه محوری تحکیم‌نیافته و زهکشی‌نشده استفاده شد. انجام موقعیت و زاویه داخلی^۲ (محاسبه‌های پایداری به صورت تقریب زدن و بر اساس روش نیروهای برشی) بنا نهاده شده است؛ سپس برای تعیین ضریب پایداری دامنه‌ها، این پارامترها در نرم‌افزار وارد و میزان ضریب پایداری برای هر دامنه با توجه به رابطه^۱، مشخص شد (آبرامسون^۳ و همکاران، ۲۰۰۲: ۴۱۷).

$$F_s = \frac{L}{\sum w \cdot \sin \alpha} \cdot \sum \left[\{ C b + (w - u b) \tan \phi \} \cdot \left\{ \frac{\sec \alpha}{L + \frac{\tan \alpha \cdot \tan \phi}{F}} \right\} \right] \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن؛ F_s : ضریب پایداری شیب (ضریب اطمینان)، L : اندازه وتر یا قوس هر قطعه به متر، α : زاویه سطح قطعه با افق به درجه، C : ضریب چسبندگی توده خاک برحسب کیلونیوتن بر متر مربع، b : عرض افقی هر قطعه به متر، w : وزن هر قطعه به نیوتن، u : فشار منفذی به کیلونیوتن بر متر مربع و ϕ : زاویه اصطکاک داخلی ذرات خاک به درجه است (شکل ۴).



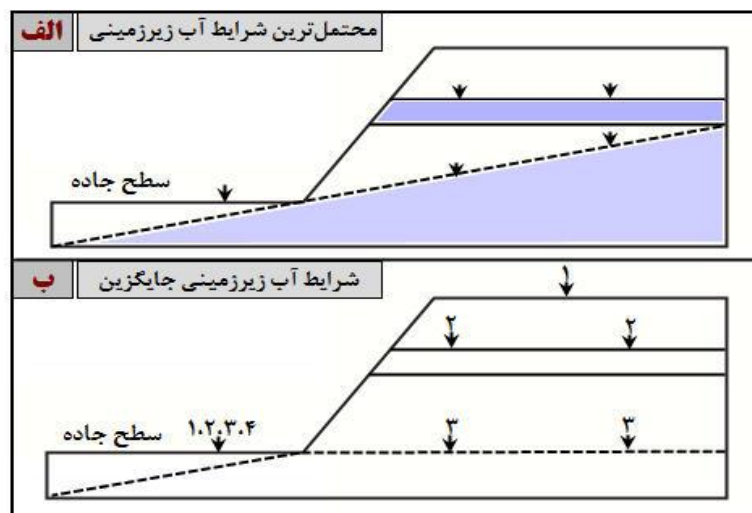
شکل ۴. نیروهای وارد شده به یک مقطع شیب دامنه (آبرامسون و همکاران، ۲۰۰۲: ۴۱۷)

- 1- Youssef
- 2- Slices
- 3- Abramson

به منظور تأثیر شرایط آب زیرزمینی در دامنه‌های لغزشی، چندین شرایط آب زیرزمینی محتمل برای دامنه مدل‌سازی شد که کمترین و بیشترین مقدار شرایط حدی که از لحاظ فیزیکی امکان دارد رخ دهد را به صورت مؤثری دربر گیرد. به دلیل توپوگرافی محلی و خصوصیات هیدرولیکی مواد موجود در دامنه، بالاترین وضعیت شرایط حدی مدل‌سازی شد که بسیار بزرگ‌تر از شرایط واقعی دامنه بود؛ لذا بدترین وضعیت ممکن را نشان می‌داد. بیشترین احتمال وضعیت آب زیرزمینی نیز مدل‌سازی شد که به صورت یک سطح آب زیرزمینی که به موازات دامنه از بالای سازند آسماری (آهک و دولومیت) تا قاعده دامنه جریان دارد و یک سطح آب زیرزمینی ثانویه معلق در بالای سازند کمابیش نفوذناپذیر شهبازان (شیل و مارن) قرار داشته و باعث اشباع‌شدگی این لایه می‌شود (شکل ۵).

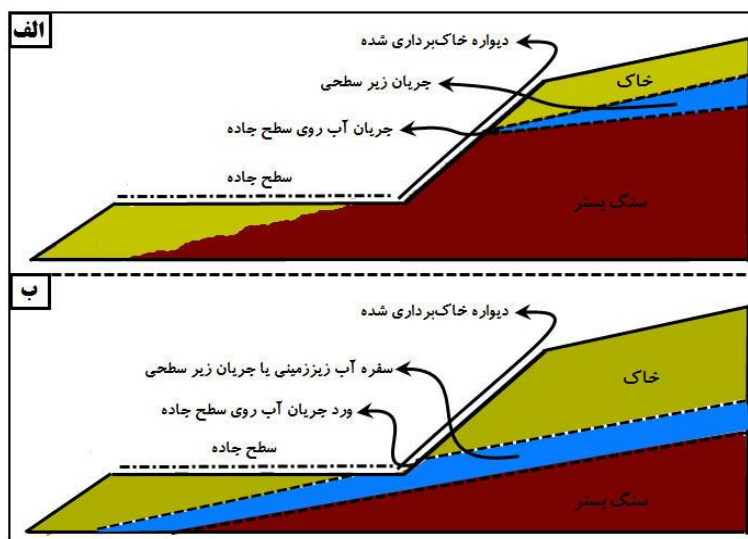
مطابق تحقیق بورگا^۱ و همکاران، احداث جاده و انجام عملیات خاک‌برداری سبب قطع جریان رواناب و جریانات زیرسطحی دامنه شده و این جریانات، به صورت رواناب در سطح دامنه خاک‌برداری و روی جاده جاری شده و سبب ناپایداری شیب دامنه‌های خاک‌برداری می‌شود که این امر، در منطقه مورد مطالعه به صورت شماتیک در شکل ۶ نشان داده شده است و یکی از عوامل محرک در ایجاد لغزش در منطقه مورد مطالعه است (بورگا و همکاران، ۲۰۰۵).

برای مشخص کردن چسبندگی ریشه برای دامنه‌های مورد بررسی، از مقادیر ارائه‌شده توسط کایاستا^۲ (۲۰۰۶) و وین^۳ (۲۰۰۷) که برای کاربری اراضی مختلف ارائه شده است، استفاده شد (جدول ۱). به منظور تهیه نقشه کاربری اراضی از فایل‌های رقومی که توسط سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰۰ تهیه شده است، استفاده گردید و نقشه کاربری زمین‌ها در محیط نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی^۴ تهیه شد (شکل ۷) که مقادیر چسبندگی ریشه با توجه به کاربری هر دامنه با توجه به جدول ۱ مشخص گردید.



شکل ۵. شرایط آب زیرزمینی مدل‌سازی‌شده در تحلیل پایداری دامنه‌ها؛ شکل الف: محتمل‌ترین وضعیت آب زیرزمینی؛ مناطق اشباع به صورت هاشورزده نمایش داده شده‌اند ب: سطوح پیژومتریک برای ۴ وضعیت آب زیرزمینی با فلش، از شماره ۱ تا ۴ نمایش داده شده‌اند.

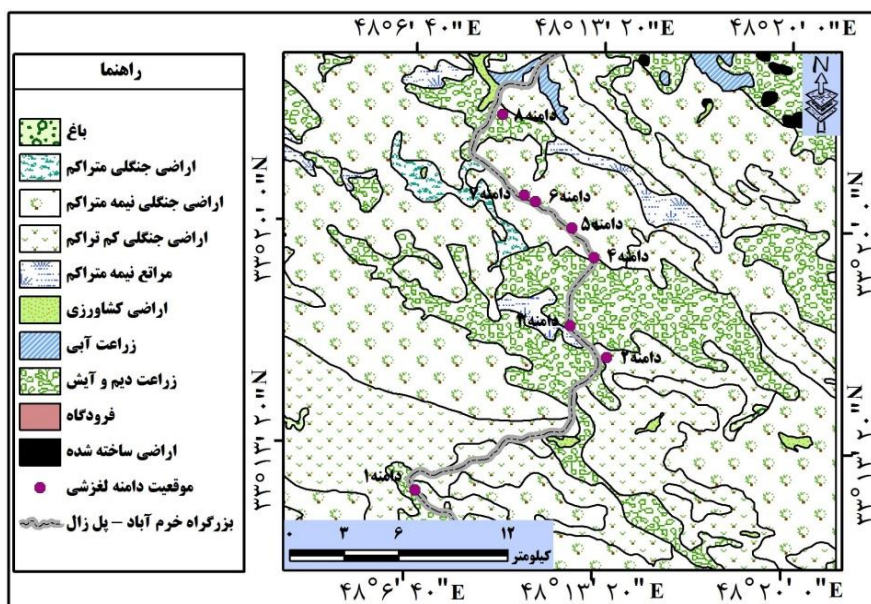
- 1- Borga
- 2- Kayasta
- 3- Vinh
- 4- Geographical Information System (GIS)



شکل ۶. شمایی مشابه وضعیت ورود آب‌های زیرسطحی به سطح چاده در منطقه مورد مطالعه
شکل الف: خاک‌های کم عمق ب: خاک‌های عمیق

جدول ۱. مقادیر شاخص چسبندگی ریشه برای کاربری زمین‌های مختلف (کاباستا، ۲۰۰۶: ۹۷؛ وین، ۲۰۰۷: ۷۳)

چسبندگی ریشه (کیلو نیوتن بر متر مربع)	نوع کاربری اراضی
۱	زمین‌های کشاورزی
۸	زمین‌های جنگلی
۰	روستاها و مناطق ساختمانی
۱	بوته‌زارها و تپه‌های بدون پوشش



شکل ۷. نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه

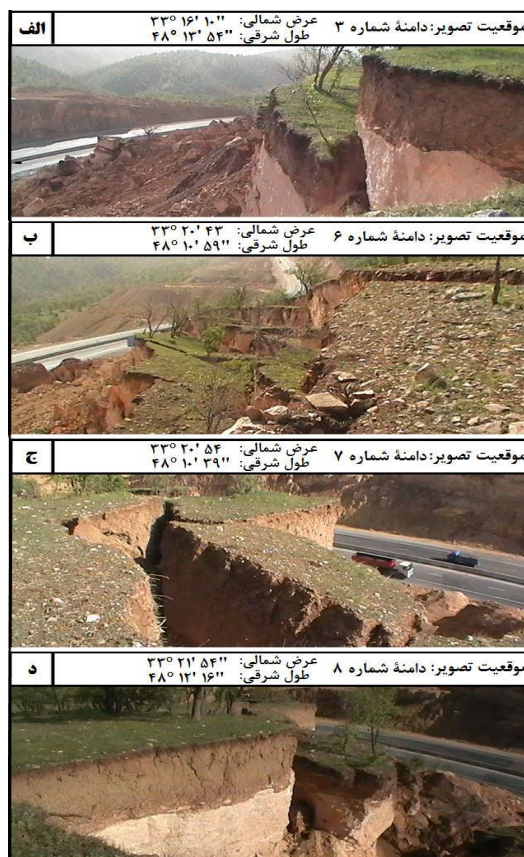
به منظور تعیین کلاس ناپایداری دامنه‌های مورد بررسی در این پژوهش بر اساس مقدار ضریب پایداری، از تقسیم‌بندی پک^۱ و همکاران (۱۹۹۸) استفاده شد (جدول ۲). این تقسیم‌بندی، بر اساس تعریف ریاضی ضریب اطمینان به دست آمده است.

جدول ۲. طبقه‌بندی آسیب‌پذیری زمین لغزش (پک و همکاران، ۱۹۹۸؛ آندراد و سریوا، ۲۰۰۸)

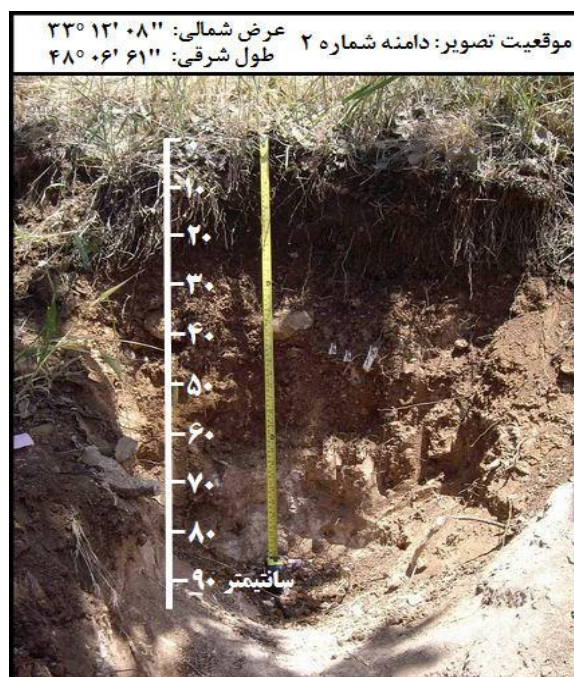
ضریب پایداری	کلاس آسیب‌پذیری زمین لغزش
۱/۵ < ضریب پایداری	آسیب‌پذیری زمین لغزش کم
۱/۲۵ < ضریب پایداری > ۱/۵	آسیب‌پذیری زمین لغزش متوسط
۱ < ضریب پایداری > ۱/۲۵	آسیب‌پذیری زمین لغزش زیاد
۱ < ضریب پایداری	آسیب‌پذیری زمین لغزش خیلی زیاد

نتایج

در این پژوهش، تحلیل پایداری در ۸ دامنه لغزشی مشرف به جاده انجام پذیرفت که تعدادی از تصاویر دامنه‌های لغزشی در منطقه مورد مطالعه در شکل ۸ نشان داده شده است. ابتدا برای اندازه‌گیری هر یک از پارامترها در هر دامنه، یک پروفیل (تا عمق سنگ بستر) حفر (شکل ۹) و پس از ارسال نمونه‌ها به آزمایشگاه خاک، پارامترهای مورد نیاز برای اجرای مدل پایداری دامنه اندازه‌گیری شدند (جدول ۳). نقشه‌های زمین‌شناسی، خاک‌شناسی و گمانه‌های حفرشده تا رسیدن به سنگ بستر در منطقه مورد مطالعه چنین نشان داد که سنگ بستر منطقه، مخلوط سنگ‌های آهکی و دولومیتی (آسماری) است و به طور عمده، شیل‌ها و مارن‌ها به صورت صفحات گسسته در اعماق مختلف خاک پراکنده بوده و در نتیجه با نفوذ رطوبت به آنها و به دلیل لغزنده بودن این لایه غیر قابل نفوذ، خاک روی آن سر خورده و موجب جابه‌جایی خاک می‌شود؛ همچنین آبیب^۱ و همکاران (۲۰۱۰)، کاهش خطر لغزش را در وهله اول بستگی به زهکشی شیب‌ها دانسته‌اند.



شکل ۸. تصاویری از دامنه‌های لغزشی در آزادراه خرم‌آباد - پل زال

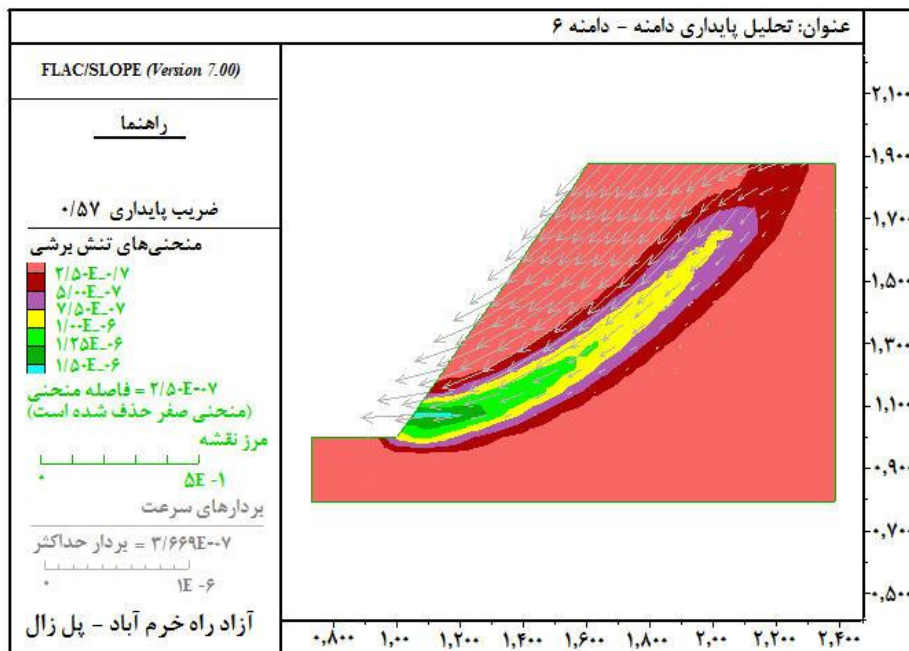


شکل ۹. تصویری از پروفیل نمونه برداری خاک در منطقه مورد مطالعه که در عمق ۹۰ سانتی متری به سنگ بستر برخورد کرده است.

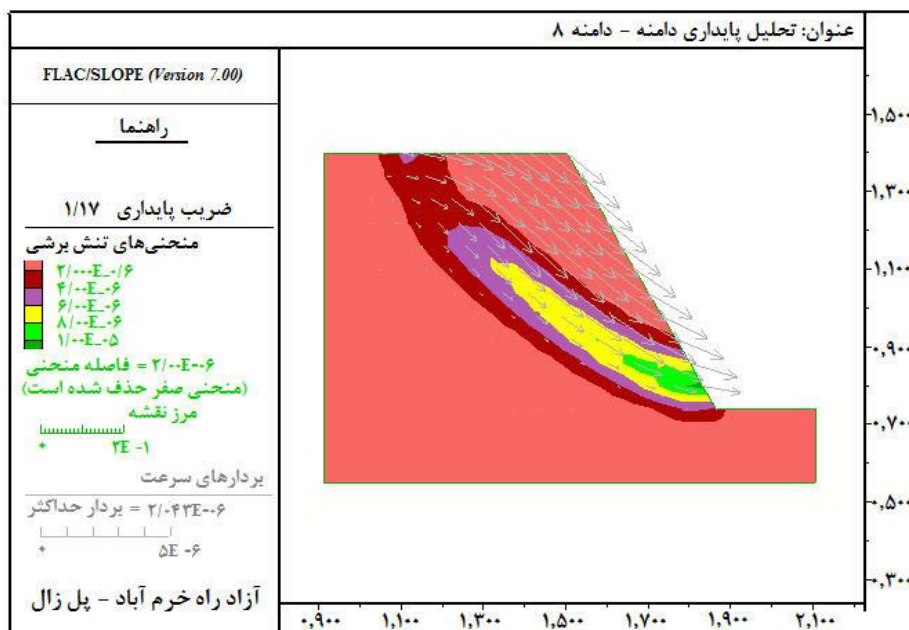
جدول ۳. پارامترهای مورد نیاز به منظور تعیین ضریب پایداری دامنه‌ها

دامنه	طول دامنه (متر)	شیب متوسط (درجه)	ارتفاع متوسط (متر)	تخلخل مؤثر (درصد)	چسبندگی خاک (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	زاویه اصطکاک داخلی خاک (بر حسب درجه)	چگالی خاک (بر حسب کیلونیوتن بر سانتی-متر مکعب)	چگالی مرطوب خاک (بر حسب کیلونیوتن بر متر مکعب)	چسبندگی ریشه (کیلونیوتن بر متر مکعب)
۱	۴۹/۵	۱۶/۵۲	۱۳۲۸	۳۱/۱۳۱	۰/۰۱	۲۳	۲۳۲۵	۱۹۷۹	۸
۲	۲۷	۲۶	۱۷۳۷	۳۹/۵۲	۰	۲۵	۱۹۸۷	۹۸۷	۸
۳	۲۹	۱۴/۲۵	۱۷۵۶	۴۱	۰/۰۱	۲۲	۱۳۵۶	۱۲۰۰	۱
۴	۳۸	۱۵/۲۷	۱۷۸۵	۳۷	۰/۰۱	۲۵	۱۲۵۴	۱۴۵۳	۸
۵	۴۹	۴۰/۱۹	۱۶۴۵	۳۶	۰/۰۱	۲۵	۳۶۵۱	۱۳۹۷	۸
۶	۳۶/۵	۱۶	۱۵۷۰	۳۵/۳۴	۰/۰۵	۲۱	۱۵۲۰	۱۸۷۹	۸
۷	۳۹	۱۰	۱۵۴۳	۲۴/۷۹	۰	۲۳	۱۲۱۰	۸۹۷	۸
۸	۸۳	۷/۱۴	۱۲۹۵	۳۱	۰/۰۲	۲۳	۱۳۸۷	۱۲۵۳	۱

سپس با استفاده از مدل پایداری دامنه در محیط نرم افزار فلک اسلپ^۱، ۸ دامنه لغزشی مورد مطالعه در این پژوهش مدل سازی و ضریب ایمنی برای هر یک از دامنه‌ها محاسبه شد. همان طور که در شکل ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود، ضریب پایداری برای دامنه ۶، معادل ۰/۵۷ و برای دامنه ۸، معادل ۱/۱۷ به دست آمده است که با توجه به طبقه‌بندی ارائه شده توسط پک و همکاران (۱۹۹۸)، دامنه ۶، در کلاس آسیب پذیری لغزش خیلی زیاد و دامنه ۸، در کلاس آسیب پذیری لغزش زیاد قرار می‌گیرد. در جدول ۴، میزان ضریب پایداری و کلاس آسیب پذیری هر یک از دامنه‌ها در برابر لغزش در منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۱۰. ضریب پایداری به دست آمده در دامنه ۶، با استفاده از نرم‌افزار فلک اسلپ

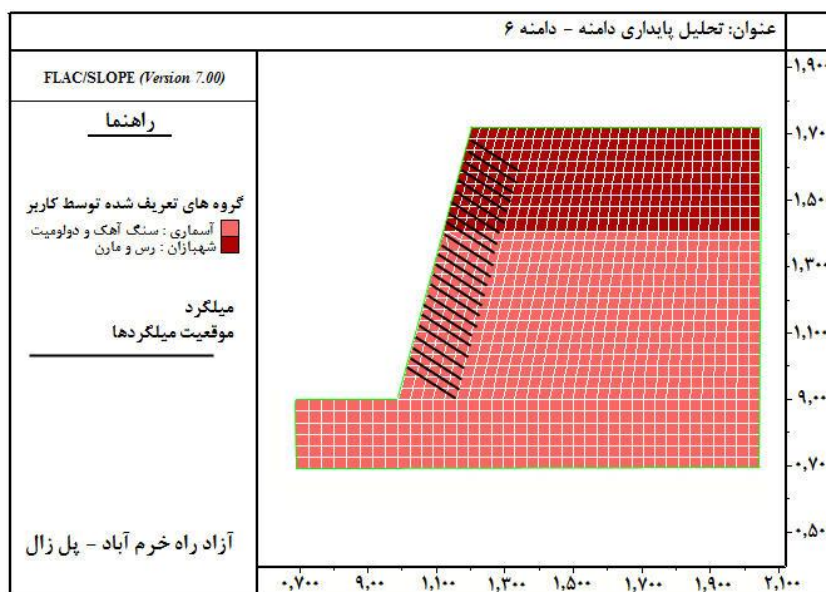


شکل ۱۱. ضریب پایداری به دست آمده در دامنه ۸، با استفاده از نرم‌افزار فلک اسلپ

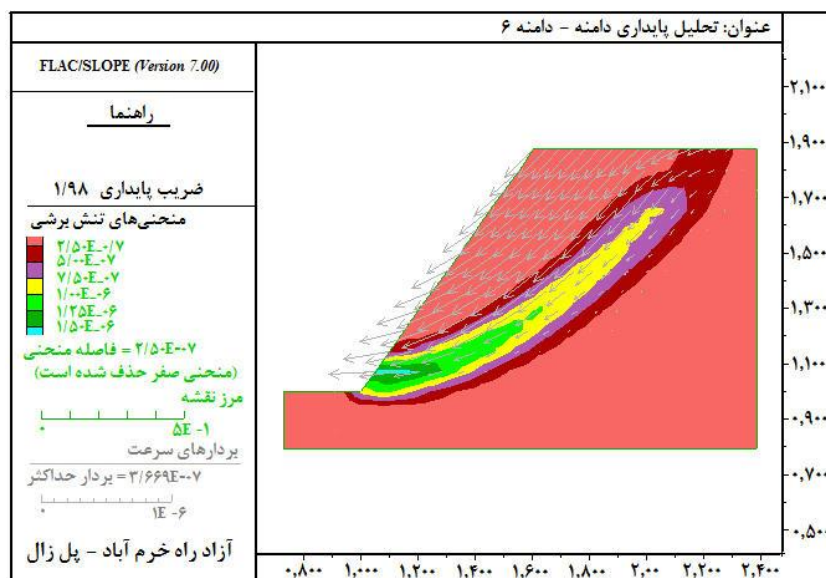
جدول ۴. کلاس ناپایداری دامنه‌ها بر اساس میزان ضریب پایداری

دامنه	ضریب پایداری	کلاس آسیب‌پذیری زمین لغزش
۱	۱/۳۸	آسیب‌پذیری زمین لغزش متوسط
۲	۱/۶۰	آسیب‌پذیری زمین لغزش کم
۳	۱/۱۱	آسیب‌پذیری زمین لغزش زیاد
۴	۱/۴۳	آسیب‌پذیری زمین لغزش متوسط
۵	۱/۹۷	آسیب‌پذیری زمین لغزش کم
۶	۰/۵۷	آسیب‌پذیری زمین لغزش خیلی زیاد
۷	۰/۹۲	آسیب‌پذیری زمین لغزش خیلی زیاد
۸	۱/۱۷	آسیب‌پذیری زمین لغزش زیاد

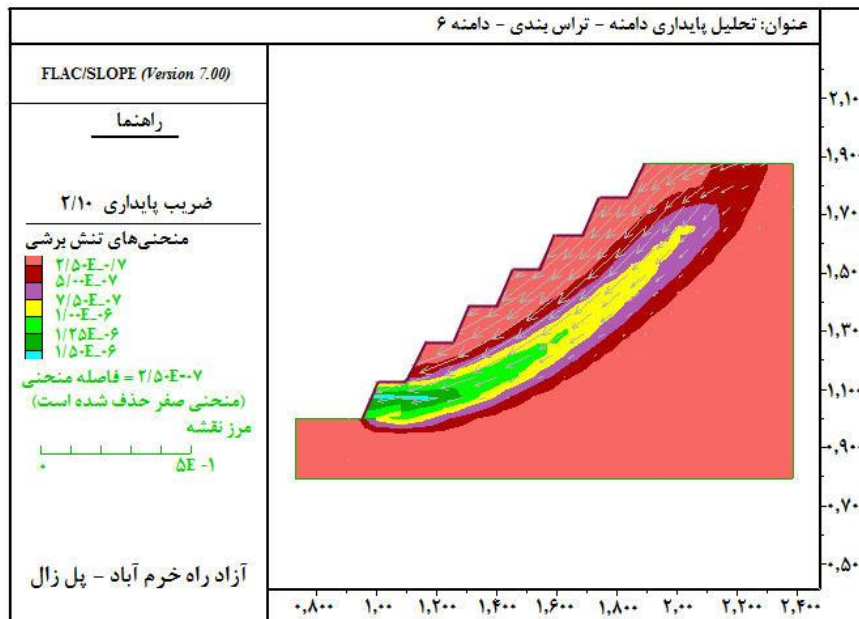
در این پژوهش، برای شبیه‌سازی دامنه‌های ناپایدار میخ‌کوبی‌شده در محیط نرم‌افزار فلک اسلپ از ۲۳ میلگرد با قطر ۲۰ میلی‌متر و طول ۷ متر و زاویه ۳۰ درجه نسبت به افق با فواصل ۱/۵ متر استفاده شد. به علت اینکه تحلیل‌ها در این پژوهش به صورت دو بعدی است، فرض بر این است که تمامی میخ‌ها با فواصل یکسان در امتداد یکدیگر در جهات افقی و عمودی قرار گرفته‌اند؛ همچنین نتایج پژوهش‌ها نشان داده که بهینه‌ترین موقعیت قرارگیری میخ‌ها در وسط دامنه‌ها است، چراکه در تحلیل‌های عددی، بیشترین تغییر مکان در وسط شیب مشاهده و اندازه‌گیری شده است. شکل ۱۲، عملیات شبیه‌سازی میخ‌کوبی دامنه ۶ را نشان می‌دهد که باعث افزایش ضریب پایداری دامنه از ۰/۵۷ به ۱/۹۸ شده است. با توجه به طبقه‌بندی آسیب‌پذیری زمین‌لغزش ارائه‌شده توسط پک و همکاران (۱۹۹۸)، دامنه ۶، با عملیات میخ‌کوبی از کلاس آسیب‌پذیری خیلی زیاد (۱) ضریب پایداری) در کلاس آسیب‌پذیری کم (۱/۵) ضریب پایداری) قرار می‌گیرد (شکل ۱۳).



شکل ۱۲. شبیه‌سازی شبکه‌بندی دامنه میخ‌کوبی‌شده در دامنه ۶



شکل ۱۳. ضریب پایداری به دست آمده در دامنه میخ‌کوبی‌شده ۶



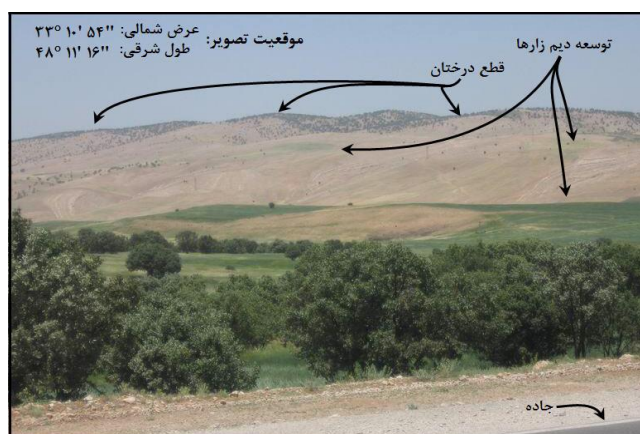
شکل ۱۴. محاسبه ضریب پایداری دامنه تراس‌بندی شده در دامنه ۶

همان‌طور که در شکل ۱۴، مشاهده می‌شود عملیات تراس‌بندی بر روی دامنه ۶، باعث افزایش ضریب پایداری در این دامنه از مقدار ۰/۵۷ به ۲/۱۰ شده است. با توجه به طبقه‌بندی آسیب‌پذیری زمین‌لغزش ارائه‌شده توسط پک و همکاران (۱۹۹۸)، عملیات تراس‌بندی روی این دامنه باعث افزایش پایداری دامنه شده و در کلاس آسیب‌پذیری کم (۱/۵) ضریب پایداری قرار می‌گیرد.

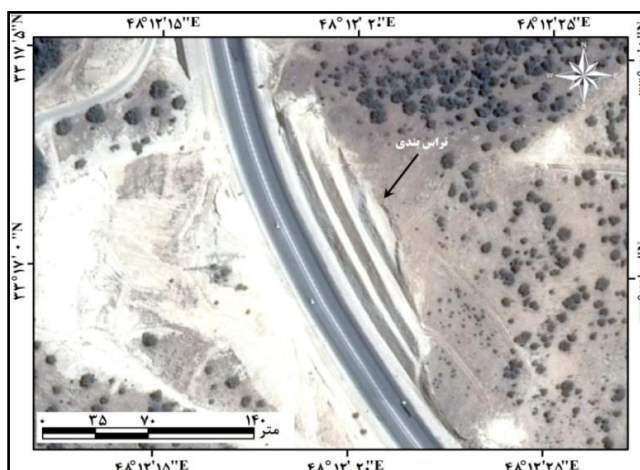
بحث

بر اساس اطلاعات استخراج‌شده درباره ضریب پایداری دامنه‌های مورد بررسی در آزاد راه خرم‌آباد - پل زال، بر اساس مدل تحلیل پایداری شیب و مقایسه آن با شرایط واقعی، می‌توان نتیجه گرفت که دامنه‌های ۲ و ۵ که بر اساس جدول ۴، در کلاس ناپایداری کم قرار گرفته‌اند، یا به عبارت دیگر، پایدار محسوب شده‌اند (۱/۵) ضریب پایداری) و دامنه‌های ۱ و ۴ که در کلاس آسیب‌پذیری متوسط قرار دارند (۱/۲۵) ضریب پایداری) (۱/۵) نباید لغزش مشاهده شود، پس می‌توان استدلال کرد که در طبیعت این دامنه‌ها به خودی خود امکان لغزش نیست، اما وجود عواملی مصنوعی مانند جاده‌سازی و تغییرات کاربری در ایجاد لغزش در این دامنه‌ها مؤثر بوده است (شکل ۱۵). ترانشه‌زنی (جاده‌سازی) در شیب‌های ناپایدار با کاهش طول شیب و در پی آن، افزایش مقدار شیب دامنه از عوامل اصلی ایجاد لغزش در منطقه مورد مطالعه است. جاده‌سازی باعث کاهش طول شیب و افزایش مقدار شیب دامنه می‌شود و همچنین نبود زهکشی مناسب برای تخلیه آب اضافی زیرسطحی دامنه در فرایند جاده‌سازی، باعث افزایش میزان رطوبت خاک به اندازه اشباع (افزایش فشار منفذی) و افزایش وزن توده خاک و کاهش چسبندگی شده و در نهایت باعث افزایش نیروهای محرک و در نتیجه، کاهش قابل توجهی در مقاومت خاک می‌شود (فعله‌گری و همکاران، ۱۳۹۲؛ کانگ و همکاران، ۲۰۱۵). احداث جاده و انجام عملیات خاک‌برداری، سبب قطع جریان رواناب و جریان‌های زیرسطحی دامنه شده و این جریانات، به صورت رواناب در سطح دامنه خاک‌برداری و روی جاده جاری شده و سبب ناپایداری شیب دامنه‌های خاک‌برداری می‌شود (طالبی و همکاران، ۱۳۹۲؛ یوسف و همکاران، ۲۰۱۲؛ هیگن و همکاران، ۲۰۱۱). نقشه‌های زمین‌شناسی، خاک‌شناسی و گمانه‌های حفرشده تا رسیدن به سنگ بستر در منطقه مورد

مطالعه چنین نشان داد که سنگ بستر در منطقه، مخلوط سنگ‌های آهکی و دولومیتی (آسماری) است و به طور عمده شیل‌ها و مارن‌ها به صورت صفحات گسسته در اعماق مختلف خاک پراکنده بوده و در نتیجه با نفوذ رطوبت به آنها و به دلیل لغزندگی این لایه غیرقابل نفوذ، خاک روی آن سر خورده و موجب جابه‌جایی خاک می‌شود. اقدامات حفاظتی، مانند میخ‌کوبی و تراس‌بندی با افزایش نیروهای مقاوم در رابطه با افزایش ضریب پایداری و همچنین کاهش نیروهای محرک، می‌تواند بر پایداری دامنه‌ها بیفزاید (آبرامسون و همکاران، ۲۰۰۲: ۴۳۱)، به طوری که عملیات میخ‌کوبی و تراس‌بندی با افزایش ضریب پایداری و کاهش نیروهای محرک می‌تواند باعث پایداری دامنه‌های مستعد لغزش شود (فعله‌گری و همکاران، ۱۳۹۲). با بررسی پژوهش‌های مختلف در این زمینه (مگ و همکاران، ۲۰۱۳؛ اسدی و حشمتی، ۱۳۹۰؛ علیپور مازندرانی و همکاران، ۱۳۹۲؛ کانگ و همکاران، ۲۰۱۵؛ اوه و لیو، ۲۰۱۵؛ فن و لو، ۲۰۰۸؛ کالا و همکاران، ۲۰۰۴)، ضرایب اطمینان به دست آمده در این پژوهش در مقایسه با سایر تحقیقات و تحلیل‌های عددی، نشان‌دهنده صحت نتایج این تحقیق است. طبق نتایج به دست آمده، عملیات میخ‌کوبی در دامنه ۶، با کلاس آسیب‌پذیری خیلی زیاد، باعث افزایش ضریب پایداری از مقدار ۰/۵۷ به ۱/۹۸ و عملیات تراس‌بندی بر روی این دامنه، باعث افزایش ضریب پایداری به مقدار ۲/۱۰ شد. شکل ۱۶ تأثیر تراس‌بندی کردن دامنه‌ها در جلوگیری از زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵. قطع درختان بلوط و توسعه دیم‌زارها در زمین‌های پرشیب مشرف به آزادراه



شکل ۱۶. تأثیر پلکانی کردن دامنه‌ها در جلوگیری از زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه (تصویر ماهواره‌ای کونیک برد سال ۲۰۱۳)

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به تجزیه و تحلیل پایداری هشت دامنه لغزشی مشرف به آزادراه خرم‌آباد - پل زال و راهکارهای پایدارسازی آنها با استفاده از نرم‌افزار فلک اسلپ پرداخته شد و به منظور افزایش ضریب پایداری این دامنه‌ها، دو نوع عملیات حفاظتی (میخ‌کوبی و تراس‌بندی) در یکی از دامنه‌های لغزشی مدل‌سازی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که ترانشه‌زنی (جاده‌سازی) در شیب‌های ناپایدار با کاهش طول شیب و به دنبال آن، افزایش مقدار شیب دامنه، از عوامل اصلی ایجاد لغزش در منطقه مورد مطالعه است. نتایج نشان داد بین پارامترهایی که مشخصات فیزیکی مدل را تعیین می‌کنند، وزن مخصوص خاک اثر بیشتری دارد که بیانگر این واقعیت است که وزن دامنه بیشترین تأثیر را بر ناپایداری دامنه‌ها داشته است. با توجه به اینکه وزن دامنه پارامتری تأثیرگذار بر ناپایداری آن است، اقدامات تثبیت دامنه باید برای کاهش و مهار وزن توده خاک عمل کند که روش تراس‌بندی در منطقه مورد مطالعه امکان کاهش وزن شیب و کاهش ارتفاع توده لغزشی را فراهم می‌کند. بدین‌صورت، افزون بر کم شدن تنش اعمالی در قسمت تاج که تنش‌ها هم‌راستا با سطح لغزش هستند، این وزن به قسمت پنجه منتقل می‌شود و به عنوان یک عامل مقاوم در برابر لغزش عمل خواهد کرد. تحلیل‌های عددی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار نشان داد که تراس‌بندی دامنه‌ها می‌تواند ضریب اطمینان در برابر لغزش را به نحو چشمگیر افزایش داده و خطرات آسیب‌دیدگی سازه‌های پایین‌دست را افزایش دهد؛ لذا با توجه به نتایج پژوهش، ضریب ایمنی و بازدهی روش تراس‌بندی که برای پایداری شیب‌ها در نرم‌افزار فلک تأیید شد، روشی مناسب با نتایجی مطمئن و قابل قبول است؛ از سوی دیگر، هزینه کمتر و سادگی اجرا، روش تراس‌بندی، مناسب‌ترین روش برای پایدارسازی دامنه‌های لغزشی در منطقه مورد مطالعه خواهد بود؛ همچنین اجرای میخ‌کوبی در دامنه‌ها نیازمند هزینه‌های بالا به منظور خرید میلگرد و حمل‌ونقل آن و نیز نیروی متخصص اجرایی است. باید در نظر داشت در این روش، در صورت ایراد خسارت به دامنه لغزشی، به علت فعالیت زمین لغزش، ترمیم قسمت‌های آسیب‌دیده بسیار دشوار است؛ همچنین می‌توان با ترکیب این روش‌ها با کاربرد مناسب روش‌های بیومهندسی، به پایدارسازی دامنه‌ها و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی کمک کرد.

منابع

- اسدی، مهدی؛ حشمتی، علی‌اکبر (۱۳۹۰) مقایسه ضریب اطمینان شیروانی خاکی مسلح به روش‌های مختلف، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، دانشگاه سمنان، صص. ۸-۱.
- جانعلی‌زاده چوبستی، عسکر؛ حقیقی، فرشیدرضا؛ برارپور، محمد؛ طهماسبی‌پور، عباس (۱۳۹۰) کاربرد ژئوتکستایل در پایدارسازی زمین لغزش (مطالعه موردی: زمین لغزش بستر جاده منطقه شارقلت شیرگاه)، اولین همایش منطقه‌ای مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد جویبار، صص. ۲۸-۲۵.
- حشمتی، علی‌اکبر؛ شکیب‌آباد، سعید (۱۳۹۰) تحلیل سه‌بعدی پایداری شیروانی‌های خاکی به روش کرنش و اسکوپلاستیک با رفتار الاستوپلاستیک، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، دانشگاه سمنان، صص. ۷-۱.
- رضانی ابراهیمی، بهمن؛ ابراهیمی، هدی (۱۳۸۸) زمین لغزش و راهکارهای تثبیت آن، جغرافیایی آمایش محیط، ۷ (۳)، صص. ۱۱۸-۱۱۰.
- زمانی لنجانی، مهدی؛ علیپور مازندرانی، ناصر؛ یوسفی، مهدی (۱۳۹۲) مسلح کردن شیب خاکی با مهار و میخ‌کوبی و

- تحلیل آنها با استفاده از نرم افزار Plaxis و Slopw، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی، صص. ۹-۱.
- طالبی، علی؛ دستورانی، محمدتقی؛ ایران نژاد، محمدحسین (۱۳۹۲) نقش جنگل بلوط در پیشگیری از زمین لغزش شهرستان اردل در استان چهارمحال و بختیاری)، **علوم و مهندسی آبخیزداری ایران**، ۴ (۳)، صص. ۲۶-۱۹.
- عامل سخی، سیاوش؛ منافی، مسعود (۱۳۹۲) تحلیل پایداری استاتیکی و شبه استاتیکی شیروانی های خاکی مسلح به ژئوفابریک، **مهندسی عمران و محیط زیست**، ۴۳ (۴)، صص. ۹۶-۸۷.
- علیپور مازندرانی، ناصر؛ یوسفی، مهدی؛ پرویزی، منصور (۱۳۹۲) ارزیابی تثبیت شیروانی های خاکی جهت افزایش پایداری شیب با دو نوع مسلح کننده مهار و نیل، **اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران**، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی، صص. ۱۰-۱.
- فعله گری، محسن؛ طالبی، علی؛ کیاشکوربان، یاسر (۱۳۹۲) بررسی اثر جاده سازی در وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل پایداری دامنه FLAC SLOP (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سد ایلام)، **پژوهش های آب و خاک**، ۱ (۲)، صص. ۲۴۰-۲۲۷.
- Abebe, B., Dramis, F., Fubelli, G., Umer, M., Asrat, A. (2010) Landslides in the Ethiopian Highlands and the Rift Margins, **African Earth Sciences**, 56 (4-5). pp. 131-138.
- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., Boyce, G. M. (2002) **Slope Stability Concepts, Slope Stabilisation and Stabilisation Methods**, Second Edition, Published by John Willey and Sons, Inc.
- Andrade, P. S., Saraiva, A. (2008) Rock Block Sliding Analysis of a Highway Slope in Portugal, **10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes**, Xi'an, China.
- Baillifard, F., Jaboyedoff, M., and Sartori, M. (2003) Rockfall Hazard Happening Along a Mountainous Road in Switzerland Using a GIS-Based Parameter Rating Approach, **Natural Hazards and Earth System Sciences**, 3 (1), pp. 431-438.
- Borga, M., Tonelli, F., Dalla Fontana, G., Cazorzi, F. (2005) Evaluating the Influence of Forest Road on Shallow Landsliding, **Ecological Modeling**, 187 (1), pp. 85-98.
- Cala, M., Flisiak, J., Tajdus, A. (2004) Slope Stability Analysis with Modified Shear Strength Reduction Technique, **9th International Symposium On Landslides**, pp. 1085-1090.
- Cova, T. J., Conger, S. (2009) **Transportation Engineering, In Handbook of Transportation Engineering**, Mc Graw Hill, New York.
- Fan, C. C., Luo, J. H. (2008) Numerical Study on the Optimum Layout of Soil-Mailed Slopes, **Computers and Geotechnics**, 35 (4), pp. 585-599.
- Hack, R., Alkema, D., Kruse, G. A., Leenders, N., Luzi, L. (2007) Influence of Earthquakes on the Stability of Slopes, **Engineering Geology**, 91 (1), pp. 4-15.
- Huiqin, H. E., Shaocai, L. I., Hailong, S., Yang, T. (2011) Environmental Factors of Road Slope Stability in Mountain Area Using Principal Component Analysis and Hierarchy Cluster, **Environmental Earth Sciences**, 62 (1), pp. 55-59.
- Kang, F., Han, S., Salgado, R., Li, J. (2015) System Probabilistic Stability Analysis of Soil Slopes Using Gaussian Process Regression with Latin Hypercube Sampling, **Computers and Geotechnics**, 63 (3), pp. 13-25.
- Kayasta, P. (2006) **Slope Stability Analysis GIS on a Regional Scale**, Master Thesis in Physical Land Resources, Virje University Brussel.
- Meng, M., Cao, P., Zhang, K. (2013) Jointed Rock Slopes Stability Analysis using PFC2D, **Conference: Geo-Congress (Geotechnical Special Publication)**, pp. 574-581.
- Oh, S., Lu, N. (2015) Slope Stability Analysis Under Unsaturated Conditions: Case Studies of Rainfall-Induced Failure of Cut Slopes, **Engineering Geology**, 184 (2), pp. 96-103.

- Pack, R. T., Tarboton, D. G., Goodwin, C. N. (1998) The SINMAP Approach to Terrain Stability Mapping, **Proceedings of 8th Congress of the International Association of Engineering Geology**, Vancouver, British Columbia, Canada, pp. 1157-1165.
- Sharma, R. K., Kumar, V., Sharma, N., Rathore, A. (2012) Slope Stability Analysis Using Software GEO5 and C Programming, **International Conference on Chemical, Ecology and Environmental Sciences**, pp. 182-186 .
- Verma, D., Kainthola, A., Thareja, R., Singh, T. N. (2013) Stability Analysis of an Open Cut Slope in Wardha Valley Coal Field, **Geological Society of India**, 81 (2), pp. 804-812.
- Vinh, B. L. (2007) **Regional Slope Instability Zonation Using Different GIS Techniques**, Master Thesis in Physical Land Resources, Vrije Universiteit Brussel.
- 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, **Geography and Geology**, 2 (3), pp. 48-70.

