

# تحلیل و بررسی زمین لغزش پاهلت

علی ویس کرمی\*: دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی معدن گرایش استخراج (veiskaramiali@yahoo.com)  
حسین نوفرستی: استادیار گروه معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، خراسان جنوبی، ایران. (hnoferesty@birjand.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۵/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۶

## چکیده

حرکت در شیب‌ها تحت اثر جریان‌ها، زمین‌لغزش‌ها و واژگونی‌ها پدیده‌هایی هستند که در شیب‌های طبیعی و مصنوعی در صورت به وجود آمدن شرایط مناسب به وقوع می‌پیوندند. به همین منظور برای مقابله و دفع اثرات نامطلوب ناشی از این پدیده‌ها باید شیب‌ها به نحوی مطالعه شوند که در مرحله اول از وقوع چنین پدیده‌هایی در شیب‌ها جلوگیری کرد و در مرحله دوم در صورت وقوع این پدیده‌ها بتوان با پیش‌بینی مناسب اثرات نامطلوب بعد از ریزش را به حداقل ممکن رساند. برای این کار لازم است شیب‌ها قبل از اینکه ایجاد شوند، با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی منطقه، ژئومکانیک، شرایط آب و هوایی و اطلاعات هیدروژئولوژی منطقه تحلیل پایداری شوند. در منطقه پاهلت بعد از عریض‌سازی جاده شیبی ایجاد شده که بعد از گذشت چندین سال مواد تشکیل‌دهنده شیب در اثر زمین‌لغزش شروع به حرکت کرده و تقریباً وارد جاده شده‌اند. در این مقاله این پدیده توسط بررسی عکس‌های هوایی منطقه، تغییرات شرایط آب و هوایی منطقه و همچنین روش‌های ریاضی تحلیل پایداری شیب تحلیل شده است. در این مقاله کوشش شده روشی مناسب جهت پایداری این شیب ارائه شود.

کلمات کلیدی: حرکت در شیب‌ها، جریان، زمین‌لغزش، واژگونی، پاهلت، روش ریاضی.

## Study and analysis Pahlat landslide

Ali Veiskarami<sup>\*1</sup>, Hossain Nofere<sup>2</sup>

### Abstract:

Movement on slopes under titles such as flows, landslides, and topplings are phenomena that occur on natural and artificial slopes in the event of the creation of appropriate conditions. Therefore, in order to counteract and eliminate the adverse effects of these phenomena, slopes must be studied in such a way that in the first stage, the occurrence of such phenomena on slopes is prevented, and in the second stage, if this occurs Phenomena can be minimized with the proper prediction of adverse effects after thinning. To do this, it is necessary to make the slopes before they are created, taking into account geological information of the region, geomechanical information of the region, the weather conditions of the region and the hydrological information of the region. In the Pahlat area, after the road spread, a slope has been created, which, after several years, the slope material began to move and almost entered the road. In this paper, this motion has been analyzed by studying the aerial photos of the region, regional weather changes and mathematical methods of slope stability analysis. In this paper, we have tried to provide a suitable method for stabilizing this slope.

**Keywords:** *movement on slopes, flow, landslide, toppling, Pahlat, mathematical method.*

<sup>1</sup>Graduate Master of Mining Engineering, veiskaramiali@yahoo.com

<sup>2</sup>Assistant Professor, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand. hnoferesty@birjand.ac.ir

## ۱. مقدمه

طیف وسیعی از فعالیت‌های مهندسی نیازمند حفاری و برش توده‌های سنگی هستند؛ از جمله مهندسی عمران برای ایجاد آزاد راه‌ها، خطوط راه‌آهن و مهندسی معدن برای خارج کردن نهشته‌های معدنی از داخل زمین [۱]. نتیجه برش دادن توده‌های سنگ به وجود آمدن شیب‌هاست. بسته به بافت و ساختار مواد تشکیل دهنده شیب و با توجه به عدم پایداری شیب انواعی از حرکت‌ها در شیب اتفاق می‌افتد. با توجه به اینکه توده سنگ تشکیل دهنده شیب قوی یا ضعیف است، حرکت در شیب به ۳ صورت می‌تواند رخ دهد [۲]:

۱. شکست ساختاری کنترل شده که در این نوع شکست گسیختگی تنها در امتداد درزه‌ها یا سطوح لایه‌بندی و یا گسل‌ها اتفاق می‌افتد. از انواع این نوع شکست لغزش‌های گوه‌ای و صفحه‌ای هستند که بیشتر در مقیاس پله به وقوع می‌پیوندند. باید به این نکته اشاره شود که مهمترین پارامترهای ارزیابی پایداری شیب در این نوع شکست‌ها مقاومت و جهت ساختارهاست [۲].

۲. شکست با کنترل ساختاری جزئی که در این نوع شکست بخشی از گسیختگی در داخل توده سنگ و بخشی در داخل ساختارها رخ می‌دهد. این نوع شکست در مقیاس شیب‌های سراسری رخ داده و در آن مقاومت توده سنگ به همراه مقاومت و جهت‌گیری ساختار مهمترین پارامترها در ارزیابی پایداری شیب هستند [۲].

۳. شکست با کنترل ساختاری محدود که در این نوع شکست گسیختگی عمدتاً در داخل توده سنگ رخ می‌دهد. این نوع شکست در مقیاس شیب سراسری و در توده سنگی که به شدت برش خورده یا توده سنگی که حاوی مواد نرم یا به شدت هوازده باشد، رخ می‌دهد. در این نوع شکست مهمترین پارامتر در ارزیابی پایداری شیب مقاومت توده سنگ است [۲].

در ایجاد شیب‌ها علاوه بر قوی یا ضعیف بودن توده سنگ تشکیل دهنده شیب، عامل تأثیرگذار دیگر بر کنترل‌کننده‌های ساختاری افزایش ارتفاع شیب است. بعد از ایجاد شیب منطقه اطراف شیب بسته به ارتفاع شیب تنش‌زدایی می‌شود که این رهایی تنش با افزایش ارتفاع شیب شدیدتر می‌شود. نتیجه این تنش‌زدایی ایجاد ترک‌های کششی در شیب است که با بازشدگی این ترک‌ها و ترک‌های از قیل موجود در توده سنگ دوباره سنگ برجا تحت تنش قرار می‌گیرد. در نهایت این تغییرات ایجاد شده در توده سنگ شیب ممکن است باعث تغییر در کنترل‌کننده ساختاری شکست شیب شود [۳].

زمین‌لغزش‌ها از جمله حرکتی هستند که در شیب‌ها رخ می‌دهند. زمین‌لغزش‌ها مشتمل بر ۲ نوع هستند که در نوع اول صفحه لغزش مشخص بوده و در نوع دوم صفحه لغزش وجود ندارد و این صفحه به مرور زمان در داخل توده سنگ ایجاد می‌شود. نوع دوم از زمین‌لغزش‌ها به صورت استوانه‌ای در شیب‌ها رخ می‌دهند که در نمای ۲ بعدی به صورت دایره‌ای هستند. البته با توجه به همگن بودن یا نبودن محیط لغزش این نوع زمین‌لغزش می‌تواند

به ترتیب یکی از ۲ مورد با سطح لغزش دایره‌ای یا قاشقی باشد [۴].

برای تحلیل عددی زمین‌لغزش‌های بدون کنترل ساختاری از ۲ روش تعادل حدی و روش‌های عددی استفاده می‌شود [۱]. فلنیوس (۱۹۲۷) ابتدایی‌ترین روش را برای به دست آوردن ضریب اطمینان به روش باریکه‌های قائم ارائه کرد؛ ولی به دلیل صرفه نظر کردن از نیروهای بین قطعات ضریب اطمینان به دست آمده از دقت کافی برخوردار نبود [۵]. بیشاپ (۱۹۵۴) روش حل صحیح‌تری را نسبت به فلنیوس ارائه کرد. در این روش اثر نیروهایی که روی وجوه جانبی قطعات عمل می‌کنند هم تا حدودی در نظر گرفته می‌شود [۶]. جانبو (۱۹۷۳-۱۹۵۴) روش‌های ساده شده و عمومی چندی را به وجود آورد. روش عمومی جانبو خط اثری فرض شده برای نیروهای بین باریکه در نظر گرفت و معادلات تعادل را بر اساس آن حل کرد. تیلور (۱۹۴۸-۱۹۳۷) راهکاری ارائه داد که در آن بر شرط تعادل نیروها بیشتر تأکید شده است [۷]. اسپنسر (۱۹۷۳-۱۹۶۷) روشی ساده با دقت کافی ارائه کرد که با استفاده از فرآیندی پیچیده تعادل استاتیکی را با فرض اینکه برآیند نیروهای بین قطعه‌ای دارای شیب ثابت و نامعلوم هستند، محقق می‌کرد [۸]. مرگنسترن (۱۹۶۳) نمودارهایی برای پایداری شیب بالادست در هنگام تخلیه‌ی سریع مخزن ارائه کرد [۹].

در این مقاله برای تحلیل زمین‌لغزش از روش تعادل حدی و روش عددی المان محدود استفاده شده و برای این کار از نرم‌افزارهای Slide و Phase2 استفاده شده است. در این مقاله علاوه بر تحلیل نرم‌افزاری ریزش از منظر تغییرات شرایط آب و هوایی، عکس‌های هوایی مربوط به منطقه در طول چند سال اخیر که از آرشيو مجموعه تصاویر نرم‌افزار Google Earth تهیه شده‌اند، بررسی شده است.

## ۲. موقعیت جغرافیایی و وضعیت زمین شناسی منطقه

زمین‌لغزش مورد مطالعه در منطقه ویسیان و در فاصله ۳۰ کیلومتری جنوب غربی شهرستان خرم‌آباد اتفاق افتاده است (شکل ۱). منطقه دارای اقلیم نیمه مرطوب با تابستان گرم و زمستان معتدل است [۱۰]؛ از این رو یخبندان‌های فاحشی در منطقه وجود ندارد و بعد از هر بارندگی احتمال وقوع زمین‌لغزش وجود خواهد داشت. زمین‌لغزش مورد مطالعه با استفاده از عکس‌های هوایی طی چند سال رصد شده است، ولی مدل‌سازی‌های صورت گرفته برای زمین‌لغزشی است که در زمستان ۱۳۹۴ به وقوع پیوسته است (البته از زمان دقیق وقوع زمین‌لغزش اطلاع درستی در دسترس نیست). میزان بارندگی در منطقه مورد نظر طبق گزارش‌های اداره هواشناسی استان لرستان از یک مهر تا ۴ بهمن ۱۳۹۴ به میزان ۳۹۲٫۹ میلی‌متر بوده که این میزان بارندگی نسبت به دوره آماری مشابه ۱۱۷٫۷ درصد افزایش داشته است [۱۱]. با توجه به آنچه گفته شد، عامل اصلی این زمین‌لغزش می‌تواند ناشی از فشار منفذی آب زیرزمینی باشد.

از نظر سنگ شناسی ترانشه مد نظر در لایه آبرفتی عهد جدید<sup>۱</sup> که بر روی بستری از سنگ آهک آسماری انباشته شده، ایجاد شده است (شکل ۲). جنس لایه آبرفتی رسی بوده که جذب و نگهداری آب توسط این لایه شاید عامل دیگری بر زمین لغزش مورد نظر باشد.

ضخامت لایه آبرفتی متفاوت بوده و بیشتر بر روی دامنه‌های شیبدار مشاهده شده و به سمت ستیخ کوه این لایه ناپدید می‌شود. علاوه بر این با توجه به شکل (۳) منطقه در محدوده زمین لغزش برای تعیین ضخامت تقریبی لایه آبرفتی در نظر گرفته شده است. در منطقه یک آبرفتی مشاهده نمی‌شود و رخ‌نمون کنار جاده در اثر ایجاد ترانشه از سنگ آهک است. در منطقه ۲ تغییر رنگ خاک محیط از سفید به قرمز تیره و پوشانده شدن سنگ‌های آهکی نشانه آغاز لایه رسوبی است. در منطقه ۳ که منطقه وقوع زمین لغزش هم هست، بیشتر خاک دیده شده از جنس رس بوده و البته در این منطقه اثراتی از آهک فرسایش یافته که از نواحی بالاتر کوه توسط آب باران به سمت پایین حرکت کرده‌اند، هم مشاهده

می‌شوند که با توجه به برتری میزان رس در این تحقیق از آن‌ها صرف نظر شده است. در منطقه ۴ خاک مشاهده شده بیشتر از نوع آهک فرسایش یافته و به نظر فاقد رس است.

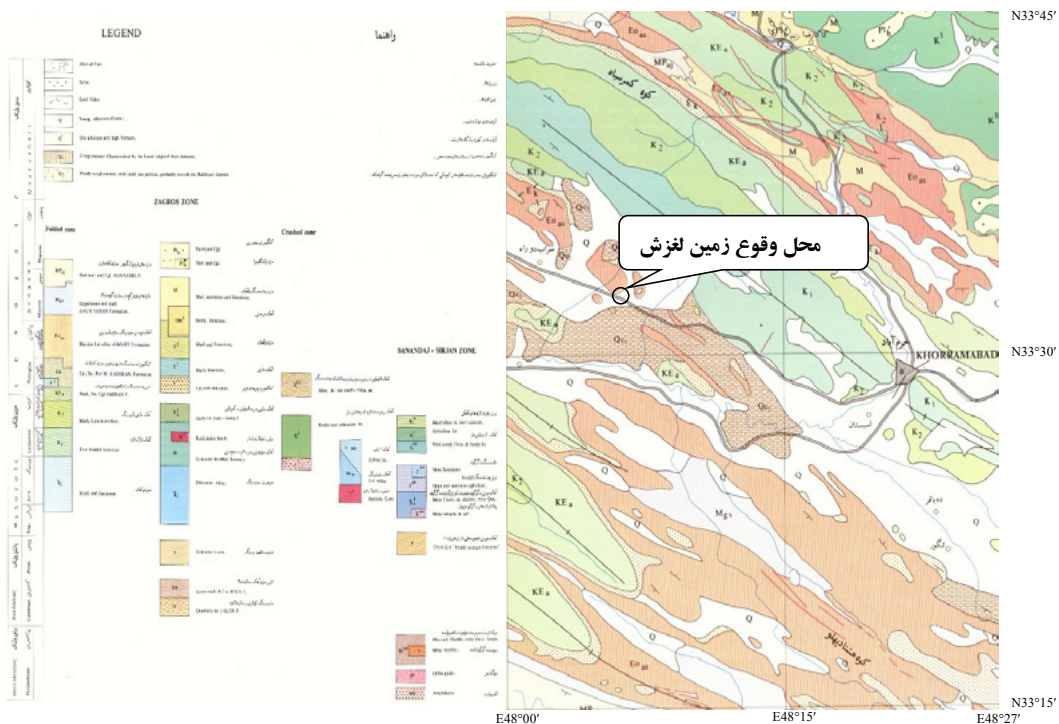
در تصاویر نشان داده شده به وضوح مشخص است که زمین لغزش مد نظر در منطقه ۳ که حاوی رسوبات رسی است با شدت بیشتری اتفاق افتاده است.

### ۳. توصیف زمین لغزش

ترانشه مورد نظر در راستای طرح تعریض جاده خرم‌آباد به پلدختر در سال ۱۳۸۸ و توسط اداره راه‌سازی شهرستان خرم‌آباد احداث شده است. این ترانشه دارای زاویه دامنه ۴۰ درجه و ارتفاع حدودی ۲۰ متر از پاشنه تا لبه حفاری شده است. البته سازندگان با ایجاد یک پله ایمنی کوشیده‌اند که ارتفاع و زاویه شیروانی را در ۲ پله سرشکن کنند؛ چرا که ایجاد پله ایمنی به پایدار ماندن شیب‌های خاکی کمک و آفری می‌کند.



شکل ۱- موقعیت زمین لغزش بر روی نقشه



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی شهرستان خرم‌آباد

ماه سال ۱۳۹۶ گرفته شده، دیده می‌شود که زمین لغزش گسترش یافته و حجم خاک جابه‌جا شده از دامنه به حدی است که تا حوالی جاده رسیده است (شکل ۷).

انتظار می‌رفت که حرکات ایجاد شده در دیواره طی سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰ در سال‌های بعد باعث ایجاد زمین لغزش قابل توجهی شود؛ ولی این اتفاق همان‌طور که در شکل ۶ (این عکس در خرداد ماه ۱۳۹۲ گرفته شده) مشاهده می‌شود، روی نداده است و می‌توان علت عدم ریزش را در کاهش نزولات جوی طی سال‌های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ نسبت به سال ۱۳۹۱ بیان کرد.

با بررسی عکس هوایی سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۷ منطقه روند رو به رشد زمین لغزش در طی این سال‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۴، ۵ و ۶).

تصویر شکل ۴ فروردین ماه سال ۱۳۸۹ گرفته شده که معادل یک فصل بارش منطقه پس از احداث ترانشه است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، حرکات در دامنه به حدی بوده که پله ایمنی تخریب شده است. تصویر شکل ۵ در خردادماه سال ۱۳۹۲ گرفته شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، تخریب گسترده‌تر شده و پله ایمنی به‌کل از بین رفته است. اما در تصویر شکل ۴ که در خرداد



شکل ۳- روند تغییر ضخامت لایه آبرفتی



شکل ۴- عکس هوایی سال ۲۰۱۰ از منطقه زمین لغزش؛ حدود یک سال بعد از ایجاد ترانشه



شکل ۵- عکس هوایی سال ۲۰۱۳ از منطقه زمین لغزش



شکل ۶- عکس هوایی سال ۲۰۱۷ از منطقه زمین لغزش



شکل ۷- حرکت توده خاک به سمت جاده



شکل ۸- وجود درختان بلوط بر فراز ترانشه لغزش کرده

(۱)

$$FS = \left( \sum X / (1+Y / FS) \right) / (\sum Z + Q)$$

$$X = [c + (\gamma_r h - \gamma_w h_w) \tan \phi] (\Delta X / \cos \psi_b)$$

$$Y = \tan \psi_b \tan \phi$$

$$Z = \gamma_r h \Delta X \sin \psi_b$$

$$Q = \frac{1}{2} \gamma_w Z^2 (\alpha / R)$$

در رابطه (۱) فشار آب منفذی در هر قطعه،  $c$ ،  $\phi$  پارامترهای مؤثر مقاومت برشی خاک،  $\gamma_r$  وزن مخصوص توده سنگ،  $\gamma_w$  وزن مخصوص آب،  $h_w$  ارتفاع آب در قطعه مورد بررسی،  $h$  ارتفاع قطعه مورد مطالعه،  $R$  شعاع دایره لغزش بحرانی،  $a$  فاصله قائم بین مرکز دایره لغزش بحرانی و محل اعمال نیروی آب در ترک کششی،  $Z$  ارتفاع آب در ترک کششی،  $\psi_b$  زاویه شیب قاعده قطعه و  $\Delta X$  پهنای افقی هر قطعه است [۱]. از آنجایی که پیاده کردن روش‌های تعادل حدی برای دیواره‌های شیبدار با هندسه‌های پیچیده به روش دستی بسیار وقت‌گیر است، معمولاً از نرم‌افزارهای تجاری برای این منظور استفاده می‌شود [۱]. در مطالعه حاضر هم از نرم‌افزار اسلاید<sup>۵</sup> که توسط شرکت راک‌ساینس<sup>۶</sup> توسعه داده شده، استفاده شده است.

#### ۴-۲. روش تنش-کرنش

در ارزیابی سازه‌های ژئوتکنیکی اغلب استفاده از روش‌های تعادل حدی برای تحلیل مسئله کافی بوده و روش‌های عددی پیشرفته<sup>۷</sup> فقط برای بهبود بخشیدن و تکمیل کردن این ارزیابی‌ها به کار برده می‌شوند. اما در برخی موارد لازم است که ارزیابی دقیقی از تنش‌ها و کرنش‌های موجود در شیب یا خاکریزهای خاکی<sup>۸</sup> صورت پذیرد که در این موارد استفاده از روش‌های عددی نه تنها مطلوب، بلکه ضروری است [۱۵].

در این تحقیق از روش عددی المان محدود<sup>۹</sup> برای مدل‌سازی استفاده شده است. روش المان محدود

اما همان‌طور که گفته شد، در سال زراعی ۹۴ نزولات جوی نسبت به دوره آماری مشابه ۱۱۷٫۷ درصد افزایش داشته که این افزایش بارندگی باعث ایجاد ریزشی سهمگین در ترانشه مد نظر شده است (شکل ۸). البته باید به این نکته اشاره شود که با توجه به جنگلی بودن منطقه شاید یکی از عواملی که باعث کندی روند زمین‌لغزش شده، وجود ریشه درختان بلوطی است که بر فراز ترانشه مستقر هستند که متأسفانه این زمین‌لغزش موجب از بین رفتن آن‌ها هم شده است (شکل ۸).

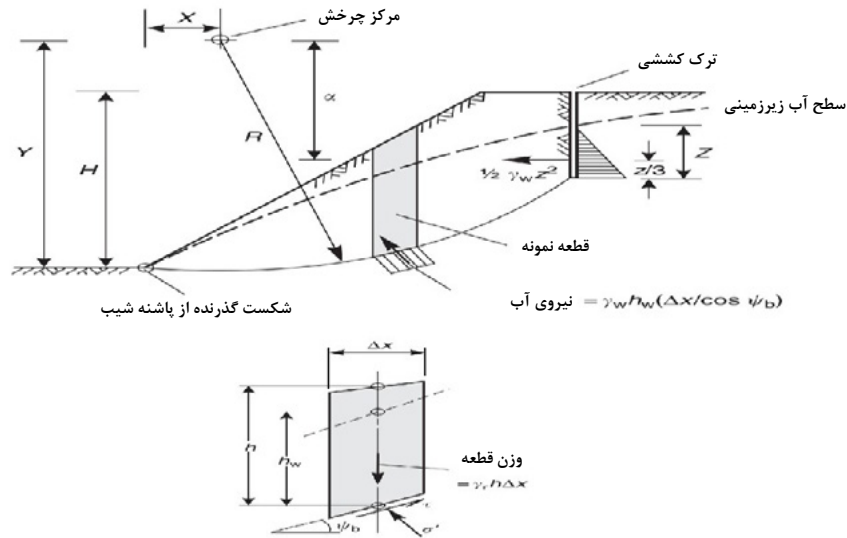
#### ۴. تحلیل زمین لغزش

برای تحلیل زمین‌لغزش‌ها روش‌های مختلف تجربی، گرافیکی و ریاضی وجود دارد. روش‌های ریاضی روش‌های جامع‌تری بوده و خود به ۲ گروه روش‌های تعادل حدی<sup>۲</sup> و تنش-کرنش<sup>۳</sup> تقسیم می‌شوند [۱۲]. روش‌های تعادل حدیدر عین کارایی نسبت به روش‌های تنش-کرنش ساده‌تر و قابل فهم‌تر هستند [۱۳].

#### ۴-۱. تعادل حدی

معمولاً در تمام روش‌های تعادل حدی توده خاک بالای سطح لغزش به قطعاتی قائم تقسیم می‌شود [۱۲]. نیروهای وارده بر هر قطعه جداگانه در شکل (۸) نشان داده شده است. روش‌های گوناگون تعادل حدی در زمینه فرضیات مربوط به معادلات تعادل نیروها و معادلات تعادل لنگرها حول نقطه مرکزی O اختلاف نظر دارند [۱۴].

در تحلیل زمین‌لغزش مورد نظر از روش ساده شده بیشاپ<sup>۴</sup> استفاده شد. در این روش از نیروی برشی بین قطعات صرف نظر شده و تلاش می‌شود تا با تغییر مابقی نیروهای وارده بر هر قطعه، معادلات تعادل لنگرها و تعادل نیروهای قائم برقرار شود. فاکتور ایمنی به روش سعی و خطا و از طریق رابطه (۱) جستجو می‌شود [۱].



شکل ۸ - نمایش شماتیکی یک قطعه و نیروهای وارده بر آن [۱]

K: ماتریس سختی

D: ماتریس جابه‌جایی (مجهول مسئله)

F: ماتریس بارهای وارده

این ماتریس برای تک‌تک المان‌ها تشکیل و در نهایت ماتریس کلی مدل تشکیل می‌شود و حل کل معادلات به صورت همزمان انجام می‌شود [۱۷].

### ۳-۴. ایجاد مدل هندسی دامنه و انتخاب ویژگی‌های ژئوتکنیکی

برای تعیین وضعیت هندسی دامنه لغزش کرده از تصاویر ماهواره‌ای نرم‌افزار GOOGLE EARTH استفاده شد. همچنین با مراجعه به محل و با استفاده از GPS برداشت‌های کنترلی انجام شد. وضعیت دامنه در آستانه و پس از لغزش هم به کمک اندازه‌گیری‌های انجام شده با GPS، متر و همچنین تصاویر ماهواره‌ای مشخص شد. با استفاده از این اطلاعات در ابتدا مدل اولیه ۲ بعدی دامنه که مربوط به قبل از انجام فعالیت راه‌سازی است، در نرم‌افزار SLIDE 6 ایجاد شد.

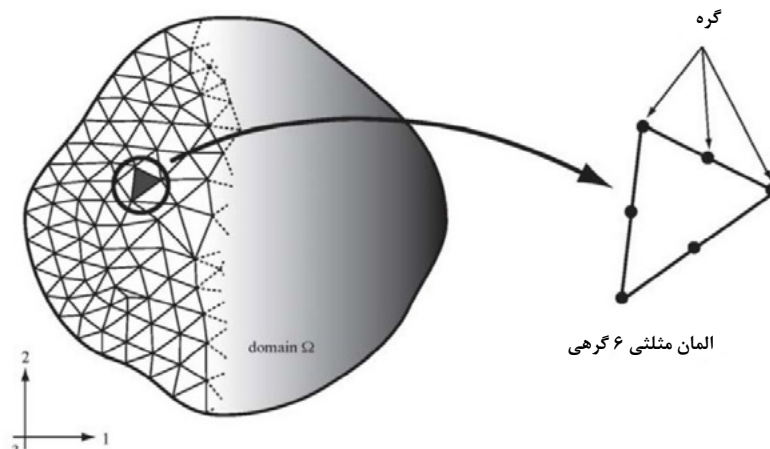
برای تکمیل مدل به شیب، امتداد لایه‌بندی و خواص ژئوتکنیکی لایه‌ها نیاز بود. شیب و امتداد لایه‌ها توسط قطب‌نما

نسبت به روش تعادل حدی دارای مزایایی از جمله مدل کردن شیب‌ها با درجه واقع‌گرایی بسیار بالا (هندسه پیچیده، بارگذاری‌های متناوب، حضور تقویت‌کننده‌ها، عملکرد آب، قوانینی برای رفتارهای پیچیده خاک) و بهینه کردن تصویرسازی تغییرشکل‌های ایجاد شده در شیب است [۱۳].

در روش المان محدود مدل به عنوان محیطی پیوسته در نظر گرفته می‌شود و در صورت لزوم ناپیوستگی‌ها به صورت مجزا و به تعداد محدود با المان‌های ویژه به نام المان فصل مشترک شبیه‌سازی می‌شوند. محدوده مدل یعنی زمین دربرگیرنده به تعداد محدودی المان تقسیم می‌شود که از طریق نقاط گرهی در گوشه‌های المان‌ها به هم متصل هستند (شکل ۹) [۱۶]. در روش المان محدود ارتباط هندسی و فیزیکی بین تمام المان‌های یک مدل به صورت یک مسئله ریاضی با معادلات ماتریسی انجام می‌شود. فرم کلی معادلات ماتریسی به صورت رابطه (۲) است [۱۷]:

$$[K] [D] = [F] \quad (2)$$

که در آن:



شکل ۹ - نمایش تصویری روش المان محدود در ۲ بعد [۱۸].

جدول ۱ - مشخصات ژئوتکنیکی لایه‌های منطقه و دیوار حفاظتی

رنگ لایه	شیب (درجه)	وزن مخصوص ( $kN/m^3$ )	$\phi$ (درجه)	C ( $kN/m^2$ )	نوع لایه بندی
طوسی	۰	۲۰	۱۸.۶۴	۳۸.۷۵	آبرفت
سبز	۰	۲۷	۴۲.۱۵۷۳	۴۰.۶۹۳	آهک

که در طول فصول خشک سال عملاً خبری از جابه‌جایی توده سازنده ترانشه نیست.

برخلاف نتیجه‌ای که در شرایط خشک به دست آمد، در مورد نتیجه حاصل از اجرای مدل در شرایط مرطوب نتایج کاملاً متفاوت است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، فاکتور ایمنی مقداری کمتر از یک دارد که این نشانه غلبه نیروهای محرک لغزش بر نیروهای مقاوم در برابر لغزش است. نکته قابل تامل در نتایج حاصل این است که با وجود فاکتور ایمنی پایین عملاً لغزش صورت گرفته‌آنی نبوده و به مرور زمان در حال گسترش است. همان‌طور که پیشتر بیان شد، شاید این روند کند ناشی از تغییرات ریزش‌های جوی در طول سالیان متمادی و حتی تغییر در نوع بارندگی‌هاست که از بارندگی‌های کند با نفوذ بالا در حال تغییر به بارندگی‌های تند با قدرت نفوذ کم هستند. البته به مسلح بودن مواد سازنده ترانشه به وسیله ریشه درختان بلوط هم باید توجه شود؛ چرا که این ریشه‌ها از عوامل کاهش نیروهای محرک لغزش به حساب می‌آیند.

سطح لغزش داده‌شده در شکل ۱۱ نشانه یک لغزش بزرگ تراز لغزشی است که در حال حاضر در ترانشه به وقوع پیوسته است. ترک‌های کششی مشاهده شده در محدوده زمین لغزش این قطعیت را به وجود می‌آورد که این لغزش هنوز فعال بوده و احتمال اینکه در آینده گسترش یابد هم وجود دارد (شکل ۱۲).

زمین لغزش‌های چرخشی با توجه به سطح لغزش و توده لغزنده به انواع زیر تقسیم می‌شوند [۱۹]:

لغزش از بستر: این نوع لغزش در امتداد قوسی که تمام شیب را فرا می‌گیرد، اتفاق می‌افتد. خاک نرمی که بر روی لایه‌ای از خاک سفت قرار داشته باشد، مستعد این نوع از لغزش است.

لغزش از پنجه: این نوع لغزش در امتداد قوسی که از پنجه شیب عبور می‌کند، اتفاق می‌افتد.

و مشاهده صحرایی تعیین شد. خواص ژئوتکنیکی هم بر اساس مشاهدات و برآورد صحرایی و همچنین کمک‌گرفتن از بانک اطلاعات ژئوتکنیکی نرم‌افزار ROCKDATA انتخاب شدند. شیب، امتداد لایه‌ها و خواص ژئوتکنیکی در جدول (۱) ارائه شده است.

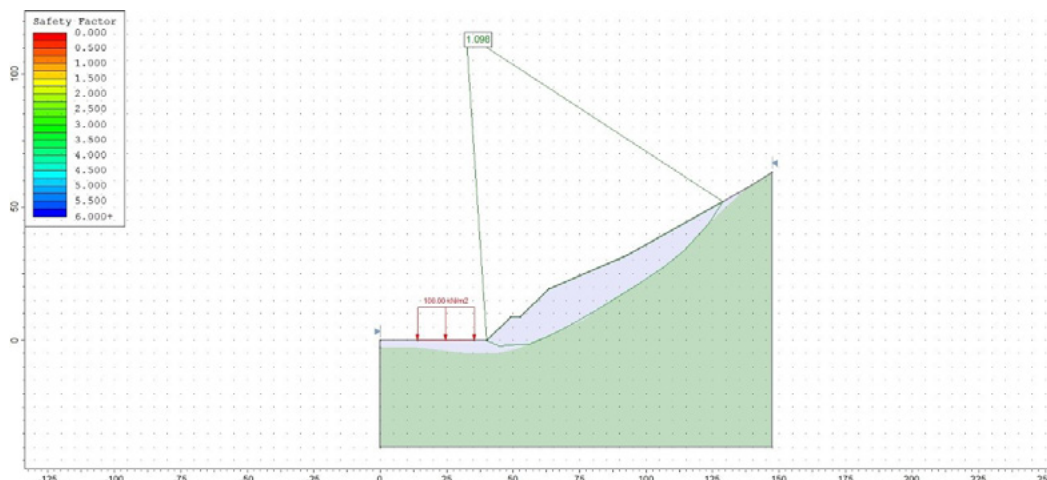
با توجه به آنچه در بخش‌های قبل در مورد زمان زمین لغزش و بارندگی‌های صورت گرفته در منطقه مورد نظر گفته شد، حضور آب زیرزمینی در دامنه و نقش مؤثر آن در ریزش قطعی است. به همین دلیل ضریب فشار آب زیرزمینی RU در لایه‌های مختلف دامنه معادل ۰.۲۵ اعمال شد.

با توجه به شرایط اقلیمی منطقه که دارای ۲ دوره ۶ ماهه با بارندگی و بدون بارندگی است، مدل‌های ساخته شده ابتدا در شرایط خشک و سپس در شرایط مرطوب اجرا و نتایج به طور همزمان در این مقاله آورده شده‌اند. به علاوه در مدل‌های ساخته شده در محل عبور جاده - به خاطر زیرسازی صورت گرفته در هنگام احداث جاده و به خاطر تردهای فراوانی که در این مسیر صورت می‌گیرد - نیروی گسترده‌ای معادل با ۱۰۰ kPa به عرض جاده اعمال شده است.

متأسفانه از وضعیت ترک‌های کششی قبل از رخ دادن زمین لغزش اطلاعی در دسترس نبود؛ برای همین در این تحقیق از اعمال ترک‌های کششی در مدل‌های ساخته شده خودداری شده است.

## ۵. بحث و بررسی نتایج

با توجه به شکل ۱۰ که نتیجه اجرای مدل در حالت خشک است، فاکتور ایمنی به دست آمده برای مدل ۱.۰۹۸ است. با فرض پایداری مدل برای فاکتورهای ایمنی بالاتر از یک این نتیجه نشان‌دهنده پایدار بودن مدل است. بر این اساس می‌توان گفت

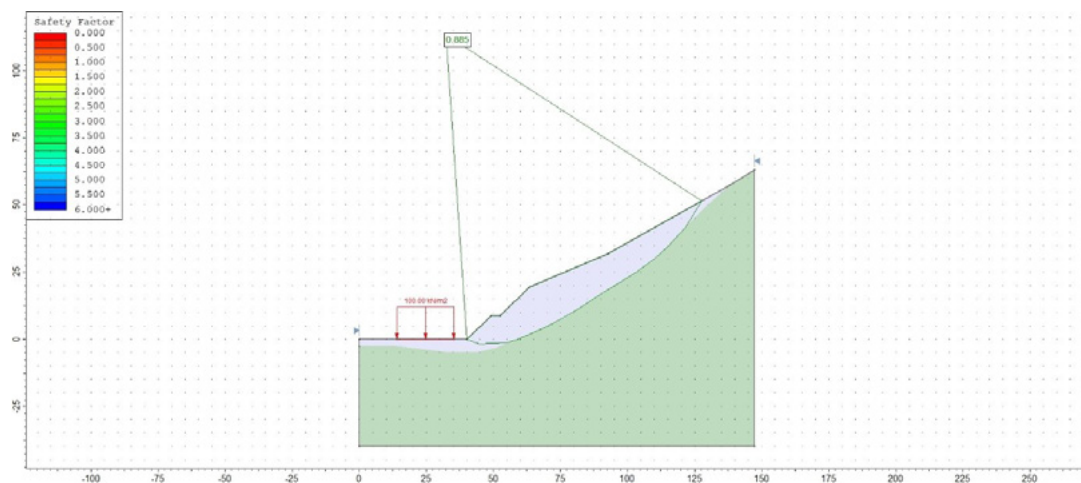


شکل ۱۰- فاکتور ایمنی، سطح لغزش و عمق نهایی سطح لغزش محاسبه شده برای زمین لغزش توسط نرم‌افزار Slide



است که بر جاده وارد می‌شود؛ چرا که با اجرای مدل بدون بارگذاری جاده نتیجه به صورت شکل ۱۳ تغییر می‌کند. در ادامه برای ارزیابی نتایج به دست آمده از نرم افزار Slide و تکمیل کردن تحلیل‌های حرکات دامنه ترانشه، مدل ساخته شده در نرم افزار Slide به نرم افزار Phase انتقال داده شده و نتایج آن در شکل ۱۴ آورده شده‌اند. همان طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود،

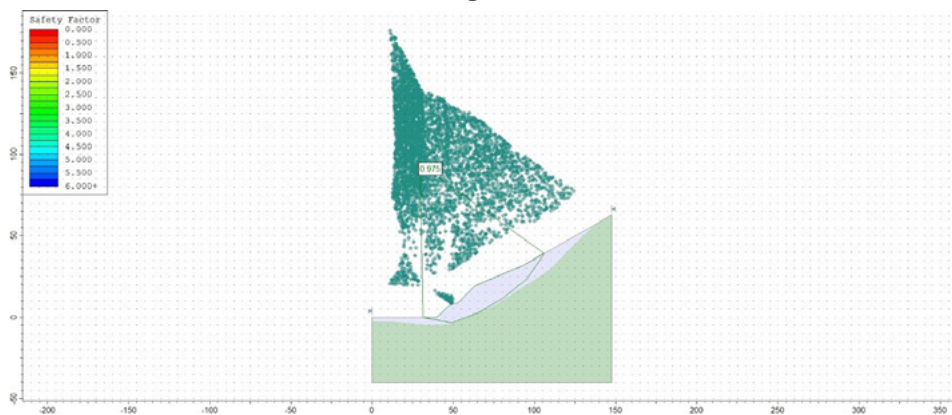
لغزش شیب: این نوع لغزش در امتداد قوسی که از داخل شیب می‌گذرد، اتفاق می‌افتد. زمین لغزش مد نظر همان طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، از نوع لغزش از پنجه بوده که تصویر شکل ۱۱ مؤید این موضوع است. البته وقوع این گونه از زمین لغزش در این ترانشه شاید در اثر باری



شکل ۱۱- فاکتور ایمنی و سطح لغزش مدل در شرایط مرطوب



شکل ۱۲- ترک‌های کششی مشاهده شده در محدوده ترانشه



شکل ۱۳- سطح لغزش بعد از حذف بارگذاری جاده

نتایج تحلیل عددی معادل با تحلیل تعادل حدی هستند. تشابه جواب‌های هر ۲ تحلیل دال بر صحت مدل‌سازی است. برای جلوگیری از این زمین‌لغزش راه حل‌های متفاوتی در دسترس بودند. یکی از این راه‌ها که در این مقاله پایداری شیب با آن ارزیابی شده است، روش میخکوبی خاک<sup>۱۰</sup> است. تراکم پیشنهادی میخ‌ها برای این شیب ۲\*۲ بوده و طول هر میخ ۱۵ متر در نظر گرفته شده که به طور عمود بر رخساره‌های شیب اعمال شده‌اند. در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که با اعمال الگوی میخکوبی بر روی شیب مرطوب اندازه فاکتور ایمنی از ۰.۸۸۵ به ۱.۰۲۶ افزایش می‌یابد و این به معنای ایجاد پایداری نسبی در شیب است.

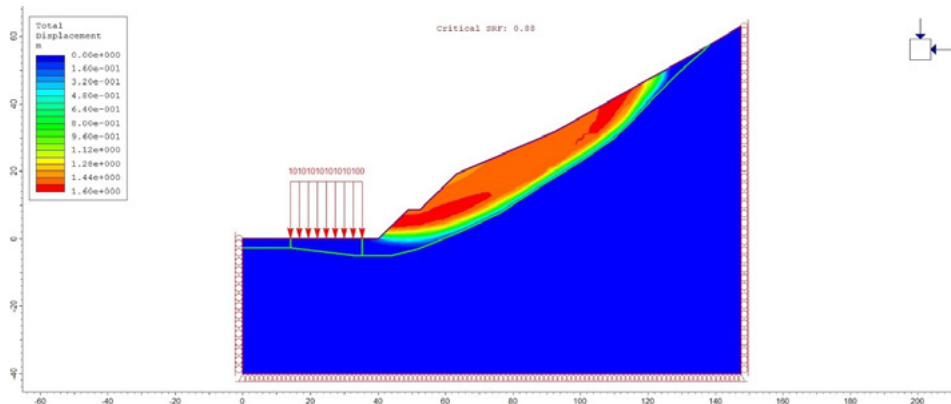
## ۶. نتیجه‌گیری

با توجه به تحلیلی که برای زمین‌لغزش یادشده صورت گرفت، مشخص شد که این زمین‌لغزش در فصل‌های با بارندگی فاکتور ایمنی کمتر از یک دارد که نتیجه آن حرکت توده خاک بر روی سطح لغزش است. البته این حرکت به دلایلی از جمله منقطع بودن فصل‌های بارندگی و وجود ریشه درختان بلوط خیلی کند انجام شده است. وجود ترک‌های کششی در لبه بالایی زمین‌لغزش و سطح لغزش به دست‌آمده از تحلیل نرم‌افزاری این یقین را ایجاد کرد که زمین‌لغزش هنوز کامل نشده و به مرور زمان در حال کامل شدن است. همچنین نشان داده شد که در صورت استفاده از

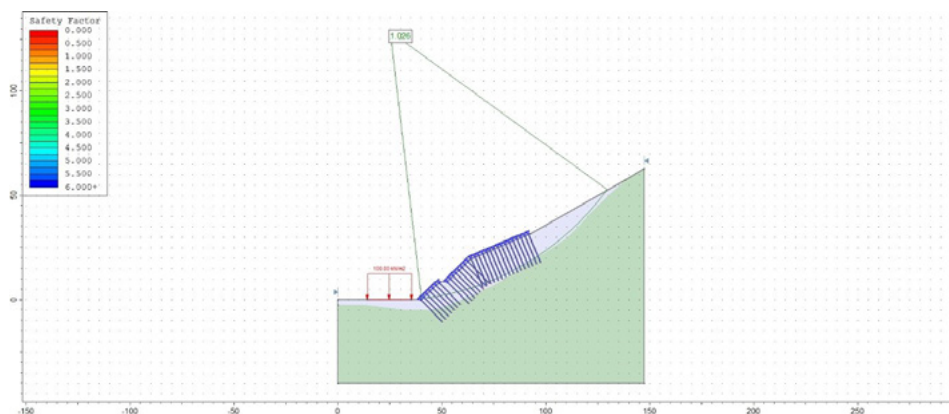
میخ‌های خاکی به عنوان تجهیز نگهداری سطح ترانشه فاکتور ایمنی به طور چشمگیری افزایش می‌یافت و حتی در فصول با بارندگی مقدار فاکتور ایمنی به بالاتر از یک می‌رسید. پیش‌مطالعات دقیق زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی و آب و هوایی منطقه، تحلیل‌های نرم‌افزاری و اجرای یک سیستم نگهداری مناسب می‌توانست از وقوع این زمین‌لغزش جلوگیری کند. اما متأسفانه علاوه بر اینکه در جهت پیشگیری اقدامی انجام نشده، هم‌اکنون که زمین‌لغزش نمایان شده و با چشم غیرمسلح قابل دیدن است، در جهت کاهش خطرات احتمالی ناشی از گسترش آن هنوز اقدام نشده است.

## پی‌نوشت

1. Alluvium
2. Limit Equilibrium Method
3. Stress-Strain Method
4. Bishop's simplified method
5. SLIDE
6. Rocscience
7. Advanced Numerical Methods
8. Embankments
9. Finite Element Method
10. Soil Nailing



شکل ۱۴- SRF محاسبه شده و سطح لغزش به وجود آمده در مدل



شکل ۱۵- وضعیت شیب بعد از اعمال میخ‌ها

16. T. Scheldt, "Comparison of Continuous and Discontinuous Modelling for Computational Rock Mechanics," This thesis has been submitted to Department of Geology and Mineral Resources Engineering Norwegian University of Science and Technology, 2002.
17. D. V. Hutton, Fundamentals Of Finite Element Analysis, New York: MC Graw Hill companies , 2004.
18. A. Bobet, "Numerical Methods in Geomechanics," The Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 35, no. 1B, pp. 27-48, 2010.
۱۹. م. بودهو و م. یوسفزاده فرد، مکانیک خاک و پی، تبریز: انتشارات دانشگاه تبریز، ۱۳۸۵.
۱. D. C Wyllie and C. W Mah, Rock Slope Engineering CIVIL AND MINING, New York: Spon Press, 2004.
2. J. Read and P. Stacey, Guidelines for open pit slope design, Australia, New Zealand and South Africa : CSIRO PUBLISHING, 2009.
۳. و. هوسترولید و م. کوچتا، طراحی و برنامه‌ریزی معادن روباز، تهران: دانشگاه صنایع و معادن ایران، ۱۳۸۳.
۴. برنامه تهیه ضوابط و معیارهای معدن - وزارت صنایع و معادن، "دستورالعمل تحلیل پایداری و پایدارسازی شیب‌ها در معادن روباز" ،سیمای دانش، تهران، ۱۳۸۹.
۵. م. وفائیان، سدهای خاکی و سنگریز، اصفهان: جهاد دانشگاهی واحد دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳ آذر ۱۳۹۱.
6. A. W. Bishop, "The use of the slip circle in the stability analysis of slopes," in First Technical Session : General Theory of Stability of Slopes, 21, September, 1954.
- ۱.۷. نوری دلاور و ا. فرازمند، "اصول پایداری و روش‌های تحلیل و آنالیز شیروانی‌ها"، در چهارمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، معماری و توسعه شهری، تهران، دسامبر ۲۰۱۶.
8. E. Spencer, "A Method Of Analysis Of The Stability Of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces," Geotechnique, vol. 17, pp. 11-26, 1967.
9. N. Moregenstern, "No Access Stability Charts for Earth Slopes During Rapid Drawdown," Géotechnique, vol. 13, no. 2, pp. 121-131, June 1963.
۱۰. م. لشنی‌زند، ب. پروانه و ف. بیرانوند، "پهنه بندی اقلیمی استان لرستان با استفاده از روش‌های آماری و تعیین مناسب‌ترین روش تجربی" ، فصل‌نامه جغرافیای طبیعی، سال چهارم، شماره ۱۱، pp. ۸۹-۱۰۶، بهار ۱۳۹۰.
۱۱. مرکز تحقیقات اداره کل هواشناسی استان لرستان، "سوز و سیل"، نشریه داخلی اداره کل هواشناسی استان لرستان، فصل‌نامه شماره ۳۲، pp. ۷-۵، پاییز ۱۳۹۴.
12. Y. Cheng and C. Lau, Slope Stability Analysis and Stabilization: New Methods and Insight second edition, Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014.
13. C. Matthews, Z. Farook and P. Helm, "Slope stability analysis - limit equilibrium or the finite element method?," Ground Engineering, pp. 22-28, 2014.
14. O. C. Rickard and N. Sitar, "bsLOPE: A Limit Equilibrium Slope Stability Analysis Code for iOS," Geotechnical Engineering Report No. UCB/GT/12-01, Department of Civil and Environmental Engineering, UC Berkeley, Berkeley, CA, 94720, 2012.
15. R. Chowdhury, P. Flentje and G. Bhattacharya, Geotechnical Slope Analysis, Boca Raton, London, New York, Leiden: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010.