

## مقایسه و ارزیابی روش‌های پایداری سازی زمین لغزش (مطالعه موردی: زمین لغزش کیلومتر ۱۹۴ راه آهن ملایر - کرمانشاه)

جهانگیر خزائی\* - استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی کرمانشاه، ایران  
مهدی قائمی - کارشناس ارشد مهندسی عمران گرایش خاک و پی، دانشگاه رازی کرمانشاه، ایران

پذیرش: ۱۳۹۴/۴/۲۷

وصول: ۱۳۹۳/۱۲/۲۴

### چکیده

گزارشات متعدّد وقوع زمین لغزش در کیلومتر ۱۹۴ پروژه راه آهن غرب در استان کرمانشاه، منجر به انجام تحقیق پیش روی در مورد علل و نحوه گسترش لغزش زمین در منطقه مذکور و مطالعه روش‌های پایداری سازی زمین لغزش گردید. در این پژوهش، به بررسی نقش جاده سازی در وقوع زمین لغزش و بررسی روش‌های مؤثر در پایداری سازی زمین لغزش و مقایسه عملکرد و کارایی روش‌های مذکور پرداخته شده است. در این تحقیق، با عملیات نقشه برداری، جابه جایی و حرکت نقاط معینی در محدوده زمین لغزش در فواصل زمانی مشخص نسبت به نقطه مبدا در خارج از محدوده لغزش طی ۴ ماه متوالی قرائت و کنترل گردید. آزمایش‌های شناسایی در محل، توسط کارشناسان پژوهشگاه بین‌المللی زلزله و آزمایشگاه فنی مکانیک خاک استان انجام گردید. مدل سازی سه بعدی زمین لغزش در نرم افزار **FLAC-3D** بر اساس نتایج نقشه برداری و حفر گمانه‌ها، انجام شد. برای پایداری سازی زمین لغزش از روش اصلاح هندسی شیب و نصب زه کش استفاده شده و شیروانی پس از اصلاح شیب مجدداً در نرم افزار، مدل و تحلیل گردید. نتایج مدل سازی شیب اصلاح شده نشان از کاهش میزان جابه جایی و پایداری شیب دارد. در ادامه، روش پیشنهاد شده توسط مهندس مشاور طرح نیز در نرم افزار مدل سازی و نتایج با روش اصلاح هندسی مقایسه شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که روش اصلاح هندسی نسبت به روش‌های دیگر در پایداری سازی زمین لغزش عملکرد بهتری دارد.

واژگان کلیدی: زمین لغزش، راه آهن ملایر - کرمانشاه، ضریب اطمینان، پایداری سازی شیب، اصلاح هندسی.

## مقدمه

زمین لغزش، یکی از عوامل از بین رفتن منابع طبیعی در مناطق کوهستانی است که در سراسر جهان همواره باعث خسارات سنگین جانی و مالی می‌شود (فعله‌گری و همکاران، ۱۳۹۲). بر اساس مطالعات انجام شده به وسیله شبکه موضوعی ژئوتکنیکی اروپا، زمین لغزش به تنهایی ۱۷ درصد از بلایای طبیعی جهان را به خود اختصاص داده است و میزان مرگ و میر ناشی از این پدیده، در طی سال‌های ۱۹۰۳ تا ۲۰۰۴ به ترتیب در آسیا ۲۹ درصد، آمریکا ۳۹ درصد، اروپا ۳۰ درصد، آفریقا ۱ درصد و اقیانوسیه ۱ درصد است (فعله‌گری و همکاران، ۱۳۹۲: ۲۲۸). بر اساس گزارش سازمان ملل، ضرر و زیان ناشی از زمین لغزش در کشورهای پیشرفته حدود ۱ تا ۲ درصد تولید ناخالص ملی آنهاست (لرویل<sup>۱</sup>، ۲۰۰۶). علاوه بر خسارات مالی، خسارات جانی نیز از دیگر پارامترهایی است که اهمیت زمین لغزش را بیان می‌دارد. شناسایی مکانیزم وقوع و عوامل مؤثر در زمین لغزش‌ها می‌تواند به تشخیص و پیشگیری از آنها کمک بسزایی کند. در این زمینه، تحقیقات بسیاری در سراسر دنیا انجام شده است. در این میان، ایران با توپوگرافی به طور عمده کوهستانی، فعالیت زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی زیاد، شرایط متنوع زمین‌شناسی و اقلیمی، عمده شرایط طبیعی را برای ایجاد طیف وسیعی از زمین لغزش‌ها داراست. از جمله عوامل طبیعی مؤثر در وقوع زمین لغزش‌ها می‌توان به عواملی همچون بارندگی، سنگ‌شناسی، شیب و مانند آن اشاره کرد (طالبی و نیازی، ۲۰۱۱)؛ اما از عوامل انسانی مؤثر در وقوع زمین لغزش می‌توان به اثر جاده‌سازی به عنوان یکی از عوامل تخریب اشاره نمود (کلارستاقی<sup>۲</sup>، ۲۰۰۲: ۵). در این خصوص، لارسن<sup>۳</sup> و پارکس<sup>۴</sup> (۱۹۹۷) طی پژوهشی در منطقه جنگلی به بررسی ارتباط مکانی وقوع زمین لغزش‌ها با جاده‌ها پرداختند و به این نتیجه رسیدند که جاده‌سازی تأثیر زمین لغزش را ۵ تا ۸ درصد بیشتر می‌کند. همچنین سا<sup>۵</sup> و مازاری<sup>۶</sup> (۱۹۹۶) در هند به بررسی نقش عوامل انسانی در وقوع زمین لغزش‌ها پرداختند و به این نتیجه رسیدند که وقوع زمین لغزش با عواملی مانند جاده‌سازی، رشد توریسم و افزایش فشار جمعیت، افزایش می‌یابد. سرکار<sup>۷</sup> و کانگو<sup>۸</sup> (۲۰۰۳) طی پژوهشی در منطقه هیمالیا با استفاده از GIS و RS به این نتیجه رسیدند که وقوع زمین لغزش‌ها با برخی از عوامل زمینی مانند جاده‌سازی، تراکم زه‌کشی و گسل در ارتباط می‌باشد. مارچند<sup>۹</sup> در ۱۹۸۲ و مارکوس<sup>۱۰</sup> در ۱۹۹۶ در زمینه تأثیر بارگذاری متناوب (زلزله) بر زمین لغزش تحقیق کردند. پان<sup>۱۱</sup> و همکاران در سال ۱۹۹۹ در مورد اثر شدت و مدت بارندگی در زمین لغزش تحقیقاتی داشته‌اند (مارک<sup>۱۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۵). از دیگر عواملی که در بروز زمین لغزش‌ها مؤثرند وجود سطح برشی موجود از قبل در جسم خاک است. در چنین مناطقی لغزش مجدد توده در اثر عواملی مانند افزایش سطح آب زیرزمینی، زلزله یا هر عامل دیگری که منجر به کاهش مقاومت خاک در منطقه تضعیف شده یا افزایش بارهای وارده گردد، اتفاق می‌افتد (صمیمی، ۱۳۸۱). نرم‌افزارهای متعددی برای

- 1- Lerouil
- 2- Kelarestaghi
- 3- Larsen
- 4- Parks
- 5- Sah
- 6- Mazari
- 7- Sarkar
- 8- Kanungo
- 9- Marchand
- 10- Marqus
- 11- Pun
- 12- Mark

پایداری سطوح شیب‌دار ارائه شده است. تعدادی از آنها دارای قابلیت مدل کردن توده خاک با استفاده از معیار موهر - کلمب و یا هوک براون را می‌باشند که نرم‌افزار FLAC-3D از این گونه می‌باشد (توه<sup>۱</sup>، ۲۰۰۵). منجزی<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۵)، به طراحی شیب نهایی بهینه معدن مس سونگو با استفاده از FLAC SLOP پرداختند و پایداری بحرانی‌ترین مقطع معدن و ضریب ایمنی دیواره را تعیین کردند. کالا<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۴) به آنالیز پایداری شیب با تکنیک مقاومت برشی کاهشی با استفاده از نرم‌افزار FLAC SLOP پرداختند که کارایی بالای این مدل را در شیب‌های مرکب تأیید کردند.

اگرچه تاکنون روش‌های متعددی در رابطه با پایداری‌سازی زمین‌لغزش‌ها توسط محققین مختلف ارائه و مورد استفاده قرار گرفته است لکن اجماع نظر واحدی در این خصوص وجود ندارد. رضانی و ابراهیمی (۱۳۸۸) طی تحقیقی بیان نمودند که کنترل زمین‌لغزش‌هایی که در اثر عوامل طبیعی شکل می‌گیرند اغلب به سادگی میسر نیست. در صورتی که زمین‌لغزش‌های ناشی از عوامل مصنوعی، مدیریت‌پذیرتر هستند. با این وجود با توجه به اثرات مرکب عوامل طبیعی و مصنوعی در وقوع این پدیده طبیعی در مناطق مختلف می‌توان از سیستم اطلاعات جغرافیایی برای تعیین مناطق حساس به فرسایش و ارزیابی آن استفاده نمود و همچنین با استفاده از نرم‌افزار GIS به تهیه نقشه پهنه‌بندی زمین‌لغزش پرداخت. انجام عملیات مربوط به کاهش آب زیرزمینی، زه‌کشی، جلوگیری از نفوذ آب، پایداری‌سازی سکوه‌های دامنه‌ای، احداث دیواره‌های حائل، جلوگیری از تخریب پوشش گیاهی و کاشت گیاهان بومی، ممانعت از فعالیت‌های ناصحیح انسانی، ممانعت از گسترش مناطق مسکونی و یا مراکز عمومی در مناطق مستعد مخصوصاً مناطق با پهنه‌های خطر بالا قبل از پایداری‌سازی آنها جلوگیری شود، شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و پهنه‌بندی زمین‌لغزش، کاهش سطوح شیب‌دار، تأسیس گروه مطالعاتی مستقل زمین‌لغزش و از همه مهم‌تر آموزش همگانی به ویژه ساکنان اطراف مناطق حساس به زمین‌لغزش به منظور توجه بیشتر به صدمات ناشی از آن و کاهش سرمایه‌گذاری در آینده می‌توان از وقوع زمین‌لغزش در سطح این مناطق پیشگیری نمود. همچنین جلوگیری از احداث غیر اصولی جاده‌ها است؛ لذا در این تحقیق با توجه به ابهامات موجود در خصوص روش مناسب و عملی جهت پایداری‌سازی زمین‌لغزش رخ داده در کیلومتر ۱۹۴ راه‌آهن ملایر - کرمانشاه ابتدا به مطالعه، تجزیه و تحلیل پایداری زمین‌لغزش رخ داده در کیلومتر ۱۹۴ راه‌آهن ملایر - کرمانشاه (حد فاصل منطقه آران کنگاور و روستای آهنگران صحنه) پرداخته می‌شود و سپس هندسه شیروانی در حالت‌های مختلف شامل: شیروانی وضع موجود (ناپایدار)، شیروانی با هندسه اصلاح شده (روش پیشنهادی در این تحقیق)، شیروانی اصلاح شده به روش پیشنهادی مهندس مشاور طرح و شیروانی مقاوم‌سازی شده با سیستم شمع با در نظر گرفتن مشخصات خاک تعیین شده توسط آزمایشگاه مکانیک خاک در نرم‌افزار FLAC 3D مدل‌سازی گردیده و نتایج مورد ارزیابی و با یکدیگر مقایسه می‌شوند تا در نهایت مناسب‌ترین روش پایداری‌سازی زمین‌لغزش انتخاب شود.

### معرفی منطقه مورد بررسی

پروژه راه‌آهن ملایر - کرمانشاه در حد فاصل شهر ملایر در استان همدان تا شهر کرمانشاه در حال اجرا است. در فاصله کیلومتر ۱۹۵-۱۹۰ این پروژه چند زمین‌لغزش رخ داده است (شکل ۱) که منجر به کندی روند اجرای پروژه گردید. یکی از فعالیت‌هایی که برای پایداری‌سازی این لغزش‌ها صورت گرفت، استفاده از روش

تراس‌بندی توسط مجری پروژه به منظور خاک‌برداری ایمن بود که متأسفانه به دلیل جنس سنگ‌های محل که عمدتاً از جنس سرپانتینیت<sup>۱</sup> بوده و در مجاورت هوا بلافاصله هوازده شده و ریزش می‌کنند، این روش مؤثر واقع نشد (شکل ۲). در این تحقیق به دنبال روشی بوده که ضمن اجرایی بودن، اثری طولانی مدت داشته، هزینه اجرایی بالایی به پروژه تحمیل نکند و مهم‌تر از همه، ایمنی لازم از نظر حرکت و لغزش را دارا باشد. موقعیت جغرافیایی پروژه در  $35^{\circ} 22'$ :  $34^{\circ}$  عرض شمالی و  $28/6^{\circ}$ :  $50^{\circ}$ :  $47^{\circ}$  طول شرقی است. از دیدگاه ساختاری منطقه در پهنه سندرچ - سیرجان قرار دارد. در گزارش پژوهشگاه زلزله آمده است که زمین‌لغزش مورد مطالعه در فاصله ۳/۵ کیلومتری گسل عهد حاضر واقع شده است که در این ساختگاه توده‌های سنگی



شکل ۱. وضعیت گسیختگی و سطح جدایش در تاج شیروانی



شکل ۲. وضعیت لغزش در شیروانی

سرپانتینیت با لایه‌های آبرفتی پله ایستوسن<sup>۱</sup> میانی پوشیده شده که به علت هوازدگی و خرد بودن در اثر تنش‌های زیرساختی از عوامل تشدیدکننده نبود استحکام هستند. در یک کیلومتری شمال پروژه<sup>۲</sup> واحدی وجود دارد که شامل سنگ‌های کنگومرایی و ماسه‌سنگی بوده که بر روی سنگ‌های الترابازیک<sup>۳</sup> با سطح تماس ناپیوسته از نوع آذرین پی قرار گرفته است. در فاصله ۲ کیلومتری شمال و ۵ کیلومتری جنوب سازندی از سنگ‌های آهکی دگرگون شده و در ۱ کیلومتری غرب واحدی از توالی شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌ها به صورت متناوب تشکیل شده است. رودخانه گاماسیاب با امتداد غرب به شرق با دبی ۰/۰۱ مترمکعب در ثانیه در شمال پروژه قرار دارد. همچنین نتیجه گزارش آزمایشگاه مکانیک خاک حاکی از آن است که پروفیل زمین از دو لایه تشکیل شده است که لایه سطحی از مصالح سست و ضعیف با عمق تقریبی ۲۵ متر تشکیل گردیده است، جنس عمده مصالح حاصل از حفاری را سنگ‌های بازیک به شدت دگرسان شده همراه با کانی‌های سرپانتین و آمفیبول<sup>۳</sup> با کیفیت بسیار پایین (R.Q.D=0) تشکیل داده است. البته در برخی لایه‌ها میزان شاخص کیفیت تا عدد ۵۰ نیز مشاهده شد اما عمده مصالح سست و با شاخص کیفیت صفر در گمانه‌ها به دست آمد. لایه زیرین سنگ مستحکم بوده به طوری که سطح لغزش در این لایه گسترش نیافته است. همچنین سطح آب زیرزمینی در عمق ۲۵ متری در سطح مشترک لایه سطحی با لایه زیرین مشاهده گردید. مشخصات لایه‌های خاک بر اساس گزارش آزمایشگاه به صورت زیر است:

لایه سطحی به ضخامت تقریبی ۲۵ متر دارای چسبندگی ۲۱ کیلوپاسکال، زاویه اصطکاک ۲۹ درجه و وزن مخصوص ۱۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب تخمین زده شده است. این مشخصات برای لایه زیرین متفاوت بوده و مقدار چسبندگی ۱۷۰ کیلوپاسکال، زاویه اصطکاک ۳۵ درجه و وزن مخصوص خاک در این لایه ۲۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب است.

همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است بر اساس برداشت‌های نقشه‌برداری زمینی از توده لغزشی، عرض توده لغزشی در جهت شرقی غربی برابر با ۱۶۰ متر، طول آن در جهت عمود بر شیب برابر با ۱۹۰ متر و اختلاف ارتفاع بین پنجه و راس شیب ناپایدار حدود ۹۰ متر است (قائم‌ی و خزائی، ۱۳۹۲). لازم به ذکر است که بر اساس مطالعات انجام شده توسط آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک (مدیریت استان کرمانشاه) و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله (۱۳۹۱)، مهم‌ترین علل وقوع زمین لغزش اشاره شده به صورت زیر گزارش شده است:

- ۱- باربرداری از پنجه شیب جهت اجرای خط راه‌آهن که به دلیل کاهش عامل مقاوم در پایداری شیب باعث فعال شدن لغزش گردیده است. این عامل مهم‌ترین علت وقوع این زمین لغزش می‌باشد.
- ۲- سست بودن جنس لایه سطحی که عمدتاً دارای شاخص کیفیت پایین است. ضمناً در حفاری‌هایی که توسط آزمایشگاه انجام شده است سطح آب زیرزمینی در سطح تماس لایه بالا و پایین مشاهده گردید که در تحریک لغزش مؤثر است.

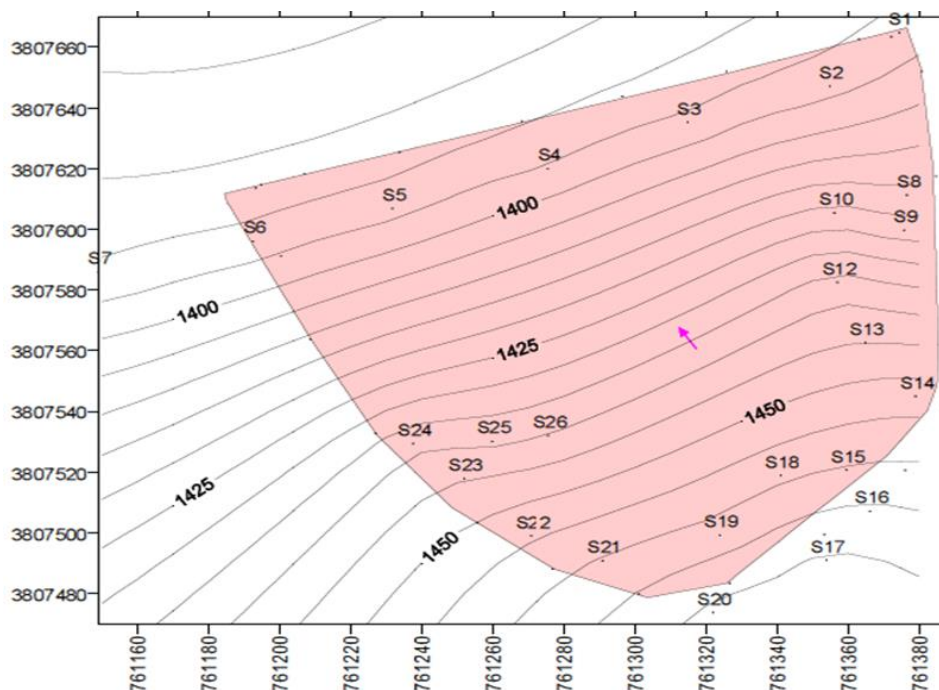
## مواد و روش‌ها

در این تحقیق به منظور مدل‌سازی و تحلیل پایداری شیروانی در حالت‌های مختلف از نسخه ۳ برنامه FLAC 3D استفاده می‌شود. هندسه شیروانی در حالت‌های مختلف شامل: شیروانی وضع موجود (ناپایدار)، شیروانی با

1- Pleistocene

2- Ultra Bazic

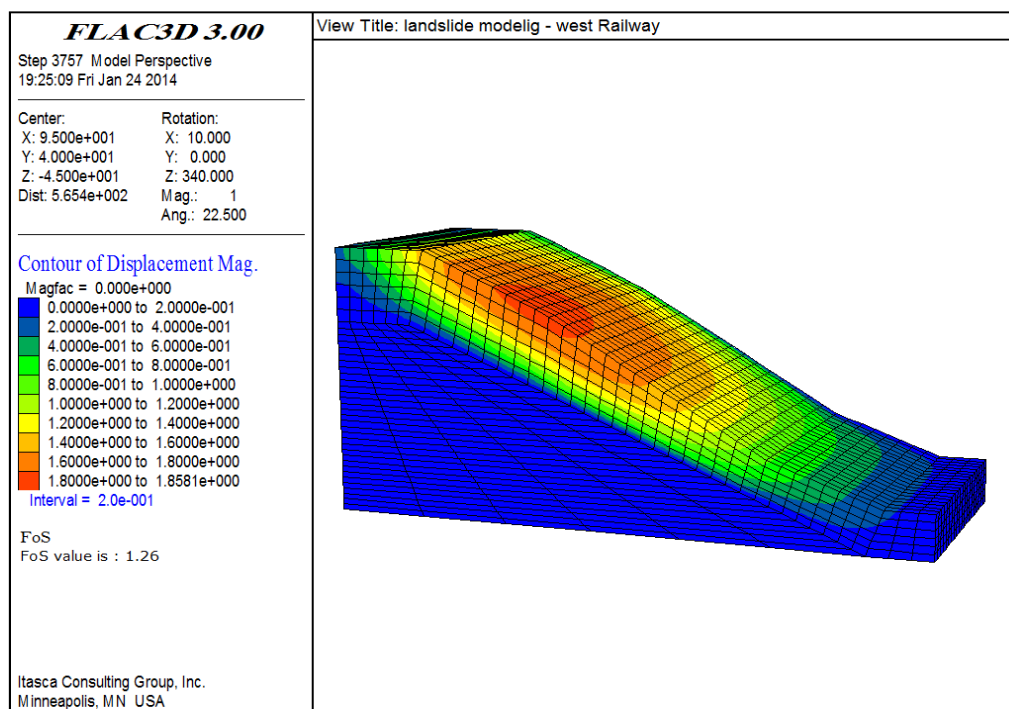
3- Amphibole



شکل ۳. ابعاد و موقعیت توده لغزشی ناپایدار

هندسه اصلاح شده (روش پیشنهادی در این تحقیق)، شیروانی اصلاح شده به روش پیشنهادی مهندس مشاور پروژه (مهندسین مشاور هگزا، ۱۳۹۱) راه آهن ملایر - کرمانشاه و شیروانی مقاوم سازی شده با سیستم شمع با در نظر گرفتن مشخصات خاک تعیین شده توسط آزمایشگاه مکانیک خاک در نرم افزار FLAC 3D مدل سازی گردید. مدل رفتاری مصالح خاکی موهر - کلمب<sup>۱</sup> که در مدل سازی شیروانی های خاکی بیشترین کاربرد را دارد انتخاب گردیده است. با توجه به تقارن موجود در شیروانی در راستای عمود بر شیب و به منظور کاهش حجم محاسبات نیمی از شیروانی مد نظر در نرم افزار مدل سازی و تحلیل شده است (شکل ۴). بدین ترتیب می توان جابه جایی و تغییر مکان را در وسط شیروانی نیز مشاهده نمود.

بر اساس مشاهدات و بازدیدهای محلی، مطالعه نتایج آزمایشگاه و شناخت جنس خاک و لایه بندی آن، روش اصلاح هندسی شیب به عنوان بهترین روش برای پایدارسازی این شیروانی معرفی شده است. از آنجا که شیروانی مورد نظر در منطقه مسکونی قرار ندارد لذا اجرای هرگونه عملیات اصلاحی بر روی شیب در جبهه های کاری متعدد امکان پذیر است بنابراین عملیات اصلاحی شیب خیلی هزینه بر نبوده و توجیه اقتصادی دارد و از نظر مدت زمان اجرا نیز خیلی زمان بر نیست. به منظور پایین بردن سطح آب زیرزمینی نیز به طوری که سطح آب زیرزمینی در لایه زیرین قرار گیرد باید سامانه زه کش های سطحی اجرا گردد. اصلاح هندسی در سه مقطع انجام می شود: مقطع اول تاج شیروانی است، بار موجود در تاج شیروانی به عنوان نیروی محرک در لغزش عمل می کند. با بررسی جنس لایه بالا و وضعیت هندسه تاج شیروانی در محل، خاک برداری به میزان ۵ متر در تاج شیب هیچ گونه مشکل اجرایی نداشته و نیز لایه سرپانتینیت در این محدوده مشاهده نشده لذا مشکل هوازدگی بعد از خاک برداری نیز در این مرحله وجود ندارد. شیروانی در سه منطقه دارای تغییر هندسه شیب می باشد به این صورت که ضخامت لایه بالا و شیب شیروانی در این سه محدوده تغییر کرده است.



شکل ۴. جابه‌جایی و ضریب اطمینان وسط شیروانی حالت ناپایدار

اول قرار گرفته که به دلیل حالت گرده مانند آن برای خاک‌برداری مناسب و در این روش برای پایداری مؤثر است لذا در این محدوده نیز خاک‌برداری با شیب ملایم انجام می‌گیرد به طوری که از لبه انتهایی تاج به صورت ملایم شروع و در انتهای اولین شکستگی، ارتفاع خاک‌برداری شده به حدود ۷ متر می‌رسد. در مقطع سوم باید به تقویت نیروهای مقاوم در پایداری شیب پرداخت لذا خاک‌ریزی به ارتفاع ۲ متر در پای شیب اجرا می‌شود. مصالح موجود جهت خاک‌ریزی نیز به میزان کافی در محل وجود دارد و از این لحاظ مشکلی وجود نداشته و هزینه اضافی به پروژه تحمیل نمی‌شود. همچنین جهت پایداری بیشتر شیب و جلوگیری از ریزش احتمالی مصالح در مسیر خط آهن، یک خاک‌ریز به ارتفاع ۲ متر در لبه پایین و انتهای پنجه شیب، در بالای خاک‌ریزی قبلی اجرا می‌شود که باید به وسیله غلتک متراکم شود. در انتها زه‌کش‌های سطحی با کمی فاصله از سطح جدایش به صورت کانال‌های زه‌کش اجرا می‌شود که هدف از اجرای آن پایین بردن سطح آب زیرزمینی به کمی پایین‌تر از سطح جدایش دو لایه است.

استفاده از سامانه شمع در پایدارسازی شیروانی به عنوان روشی جایگزین برای روش اصلاح هندسی همواره به عنوان یکی از راهکارهای مهندسی مطرح بوده است. از آنجا که بیشترین جابه‌جایی در میانه شیروانی رخ داده است بایستی تمرکز چینش شمع‌ها را در مرکز لغزش قرار داده تا اثر بیشتری بر کاهش میزان جابه‌جایی داشته باشد. گاناراتنه<sup>۱</sup> در کتاب طراحی روش پایدارسازی شیب به وسیله شمع، در مورد بهینه‌یابی محل شمع یکی از مناسب‌ترین محل‌ها برای چینش شمع را میانه شیروانی می‌داند (هانگ و همکاران، ۲۰۰۹). در این محدوده فاصله شمع‌ها را ۷ متر در نظر گرفته و با دور شدن از مرکز لغزش و کم شدن میزان جابه‌جایی این فاصله بیشتر شده و در نقاط با لغزش کمتر مانند پهلوهای شیروانی و نیز در

محدوده پایین شیروانی این فاصله به ۱۰ متر می‌رسد. این افزایش فاصله در هر دو جهت طولی و عرضی شیروانی رعایت می‌شود. همچنین قطر شمع نیز برابر ۱ متر انتخاب می‌شود. از آنجا که لایه بالا سست بوده و لایه پایین مستحکم است برای مهار شمع مطابق تحقیقات ریزه<sup>۱</sup> بیشترین مقدار بین ۳ متر و ۵ برابر قطر شمع (که در اینجا برابر با ۵ متر می‌شود) از کل طول شمع در لایه مستحکم زیرین قرار داده می‌شود (ریزه و همکاران، ۲۰۰۱)؛ بنابراین در این شیروانی ۵ متر از طول کل شمع را در لایه مستحکم زیرین قرار داده و با توجه به متغیر بودن ضخامت لایه طول شمع در نقاط مختلف از ۲۰ تا ۳۰ متر متغیر است. به منظور بیشتر شدن اثر هم‌پوشانی شمع‌ها از آرایش مثلثی<sup>۲</sup> استفاده شده است. همچنین به منظور اجرای شمع‌ها، یک خاک‌برداری سطحی (به ارتفاع حدود یک متر) در محل اجرای شمع‌ها در هندسه مدل لحاظ گردیده است.

به منظور صحت‌سنجی، مدل‌سازی شیروانی در نرم‌افزار توسط روش‌های تعادل حدی (نرم‌افزار ژئواسلپ<sup>۳</sup> از مجموعه نرم‌افزارهای ژئواستدیو<sup>۴</sup> نسخه ۲۰۰۷) در هر دو حالت ناپایدار و نیز پایدار شده به روش اصلاح هندسی تحلیل و آنالیز شدند؛ همچنین از آنجا که این تحقیق به صورت مطالعه موردی می‌باشد لذا مرجع معتبرتری برای اعتبارسنجی کار وجود دارد که وضعیت خود شیروانی در طبیعت است.

محل سطح جدایش شیروانی در نزدیکی تاج شیروانی واقع شده است که همین حالت در وضعیت تغییر شکل یافته در خروجی FLAC 3D نیز مشاهده گردید (شکل ۱). بیشترین جابه‌جایی به دست آمده از نرم‌افزار در حوالی میانه شیروانی می‌باشد که این وضعیت در بازدید از محل تأیید گردید.

همچنین به منظور بررسی بیشتر رفتار زمین‌لغزش پنج نقطه ثابت در نواحی مختلف از بالا تا پایین شیب نصب و طی مدت چهار ماه متوالی از شهریور تا دی ماه سال ۱۳۹۱ هجری شمسی در فواصل زمانی ده روزه اقدام به برداشت نقشه‌برداری این نقاط ثابت از نقطه‌ای خارج از شیروانی گردید که با مقایسه برداشت‌های متوالی و نیز مقایسه آخرین برداشت با اولین برداشت و نتایج حاصل از تحلیل مدل عددی در نرم‌افزار FLAC نتایج زیر به دست آمد:

- ۱- بیشترین جابه‌جایی مربوط به جهت (X) یعنی در جهت شیب و کمترین آن در جهت عمود بر شیب (Y) بود که نتایج خروجی نرم‌افزار نیز مؤید همین مطلب است.
- ۲- بیشترین میزان اختلاف برداشت اول با برداشت آخر که همان جابه‌جایی آن نقطه است مربوط به نقطه‌ای بود که در نزدیک مرکز شیروانی قرار داشت که تأییدکننده کنتور جابه‌جایی برنامه FLAC می‌باشد.
- ۳- میزان تغییر مکان‌های حاصل از برداشت در دی ماه و آذر ماه که بارندگی بیشتری داشتیم، بیشتر از ماه‌های دیگر بود که نشان از تأثیر بالا رفتن سطح آب زیرزمینی بر افزایش حرکت شیروانی و تحریک لغزش دارد و این نتیجه‌ای است که پس از پایین بردن سطح آب زیرزمینی و در نتیجه کاهش تغییر مکان‌ها در خروجی نرم‌افزار مشاهده گردید.
- ۴- نقاط ثابت واقع در پهلو شیروانی تغییر مکان نامحسوسی داشتند که در خروجی برنامه نیز همین نتیجه تأیید گردید.

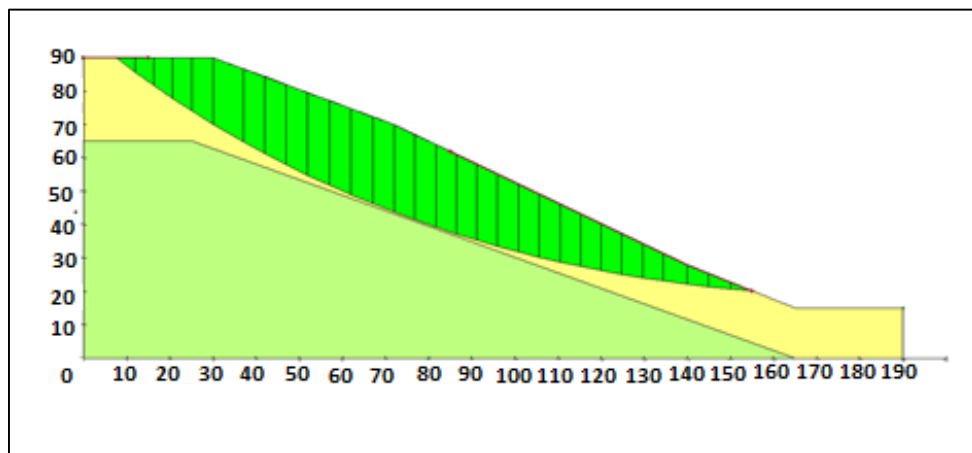


لغزش رخ داده در این شیروانی عمیق بوده و عمق لغزش در مدل ساخته شده در برنامه نیز تا سطح تماس دو لایه بالا و پایین ادامه یافته است. نتایج ارائه شده توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله نیز بیان داشت که عمق لغزش تا سطح تماس دو لایه بالا و پایین پیش می‌رود و این مطلب تأییدی است بر درستی مدل‌سازی و نتایج به دست آمده در تحقیقی که انجام شده است.

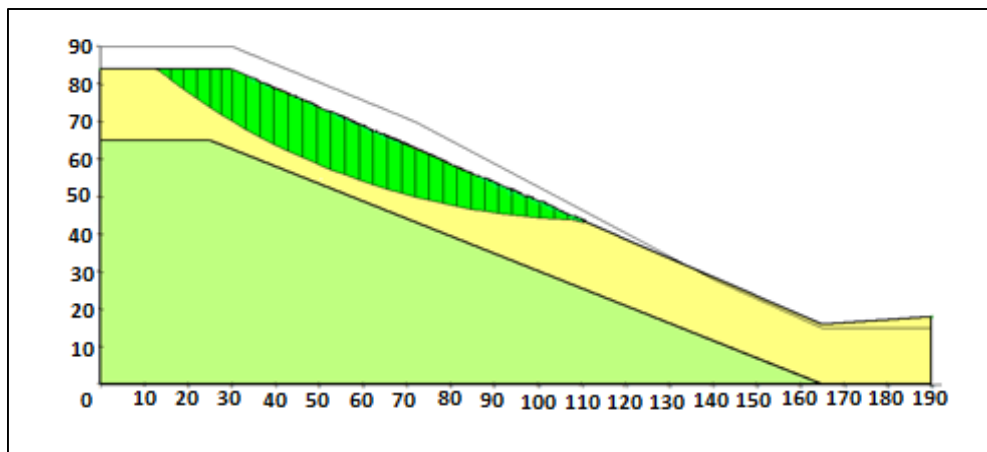
در ادامه، صحت‌سنجی توسط نرم‌افزار اسلوپ نیز انجام شد که ضریب اطمینان ۱/۱۵ برای حالت ناپایدار به دست آمد که به عدد ۱/۲۶ به دست آمده از FLAC بسیار نزدیک است و برای حالت پایدار شده به روش اصلاح هندسی ضریب اطمینان ۱/۵۴ از برنامه ژئواسلوپ به دست آمد که به عدد ۱/۶۱ حاصل از نرم‌افزار بسیار نزدیک است. همچنین شکل سطح لغزش محتمل در برنامه ژئواسلوپ در دو حالت ناپایدار و پایدار همان‌طور که در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود شباهت زیادی به کانتور لغزش به دست آمده از برنامه FLAC 3D دارد.

### نتایج

آنالیز شیروانی موجود در نرم‌افزار FLAC 3D، میزان جابه‌جایی ماکزیمم ۱۸۵ سانتی‌متر و ضریب اطمینان پایداری شیب ۱/۲۶ را نشان داد. بالا بودن میزان جابه‌جایی نشان از ناپایدار بودن شیروانی در این حالت دارد که این وضعیت در شکل ۷ نشان داده شده است.



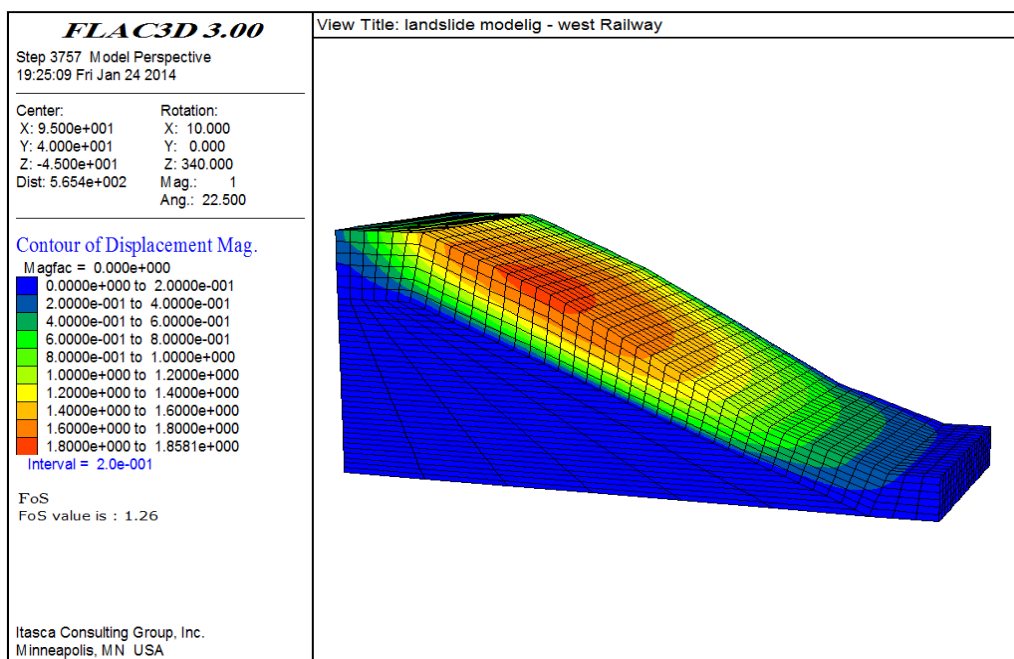
شکل ۵. وضعیت گسیختگی شیروانی در برنامه ژئواسلوپ در حالت ناپایدار



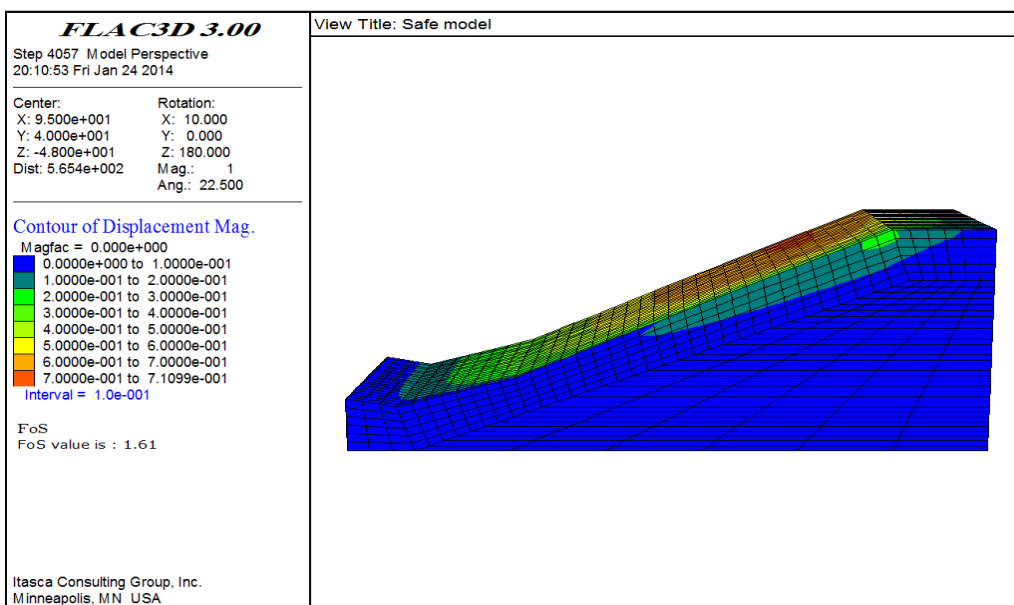
شکل ۶. وضعیت گسیختگی شیروانی در برنامه ژئواسلوپ پس از اعمال روش اصلاح هندسی

مدل سازی شیب پس از اصلاح هندسی به روش پیشنهادی در این تحقیق که قبلاً شرح داده شد، مجدداً انجام گردید و از همان مشخصات مصالح برای خاک استفاده شد. خروجی نرم افزار نشان از کاهش میزان جابه جایی تا ۷۱ سانتی متر و افزایش ضریب اطمینان به عدد ۱/۶۱ دارد و نشان می دهد روش استفاده شده مؤثر بوده است (شکل ۸).

در روش پیشنهادی مهندس مشاور پروژه ابتدا از بالادست شیب به منظور تعدیل شیب، برداشت واریزه ها و کاهش نیروهای محرک و خاک برداری انجام می شود که این خاک برداری بیشتر در ناحیه ای که قبلاً جابه جایی بیشتری داشته یعنی میانه شیب و نیز واریزه هایی که به پایین شیب جابه جا شده اند اجرا می شود. پس



شکل ۷. نتایج مدل سازی تحلیلی برای شیب ناپایدار



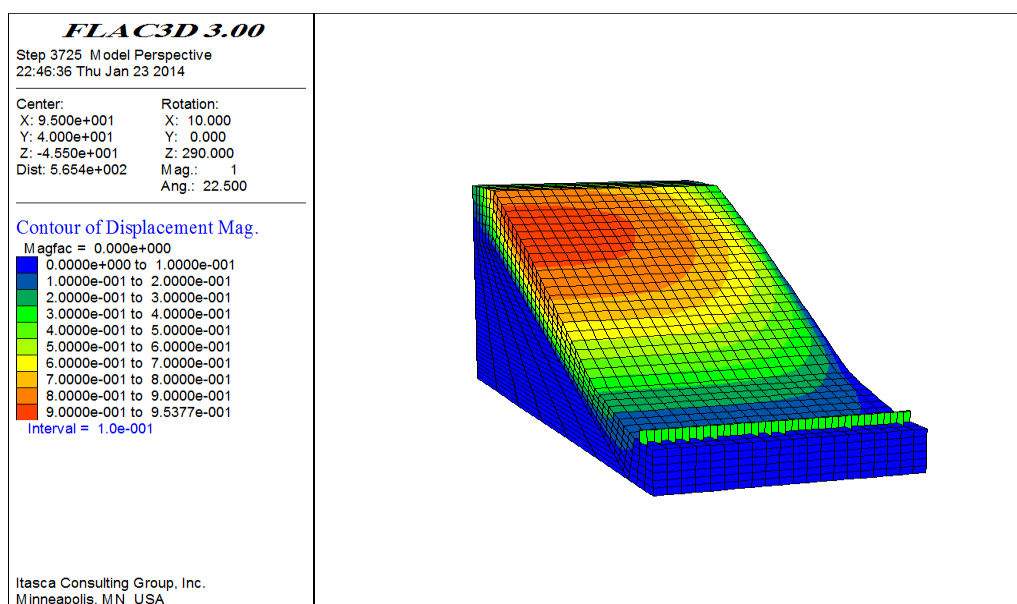
شکل ۸. نتایج مدل سازی تحلیلی پس از اصلاح هندسی

از خاک برداری، یک گالری بتنی به منظور عبور مسیر راه‌آهن اجرا می‌شود. هدف از این گالری جلوگیری از ریزش واریزه‌ها در مسیر راه‌آهن و تا حدی افزایش نیروی مقاوم در پای شیب است و به صورت یک گالری از بتن مسلح اجرا می‌شود. برای مدل کردن گالری، دیوار کناری که در سمت شیروانی قرار گرفته را به صورت یک دیوار بتنی به عرض ۶۰ سانتی‌متر مدل کرده و مشخصات بتن مسلح به دیوار اعمال می‌شود. همچنین برای تماس این دیوار با خاک یک سطح مشترک<sup>۱</sup> بین خاک و بتن لحاظ می‌شود (شکل ۹).

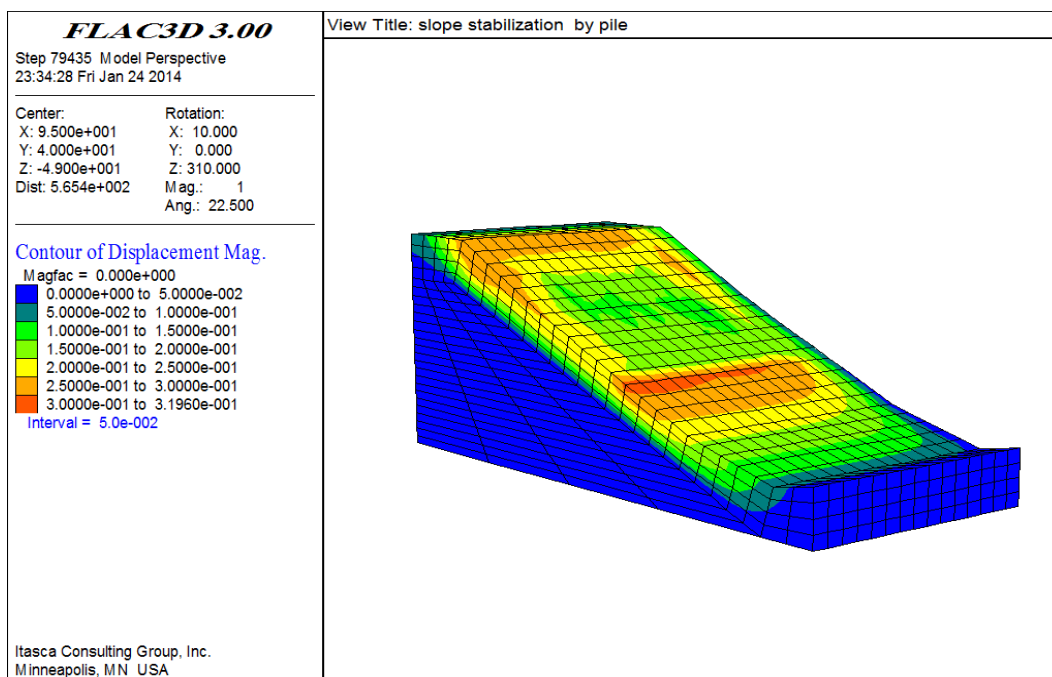
با توجه به سطح لغزش به دست آمده از مدل‌سازی، حجم تقریبی مصالح جابه‌جا شده در این حالت به وسیله نرم‌افزار اتوکد محاسبه گردید که این مقدار حدود ۵۰۰۰۰ مترمکعب به دست آمد، بنابراین حداقل فاصله این دیوار از پای شیب باید ۷ متر و ارتفاع حداقل آن باید ۵ متر باشد تا بتواند حجم مصالح ریزشی را پشت خود تحمل کند بدون اینکه ارتفاع این مصالح از ارتفاع دیوار بیشتر شود. در شکل (۹) نتیجه مدل‌سازی و وضعیت جابه‌جایی‌ها مشاهده می‌شود.

برای مدل‌سازی سیستم شمع در پایدارسازی شیروانی به عنوان روشی جایگزین برای روش اصلاح هندسی همانند حالات قبل ابتدا در نرم‌افزار FLAC هندسه شیروانی ساخته و مدل رفتاری و خصوصیات خاک به آن اختصاص می‌یابد. سپس شرایط مرزی همانند حالت‌های قبل اعمال می‌شود و سطح آب زیرزمینی نیز یک متر بالاتر از سطح مشترک دو لایه در نظر گرفته می‌شود تا حالت بحرانی‌تری داشته باشد و در ادامه، مدل آنالیز می‌شود. در این حالت، نیمی از شیروانی را مدل کرده و تعداد ۴۸ شمع برای پایدارسازی استفاده شده که کافی است؛ بنابراین برای کل شیروانی باید تعداد ۹۶ عدد شمع با همان آرایش توضیح داده شده در بالا استفاده کرد. نتایج حاصل از این مدل‌سازی در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.

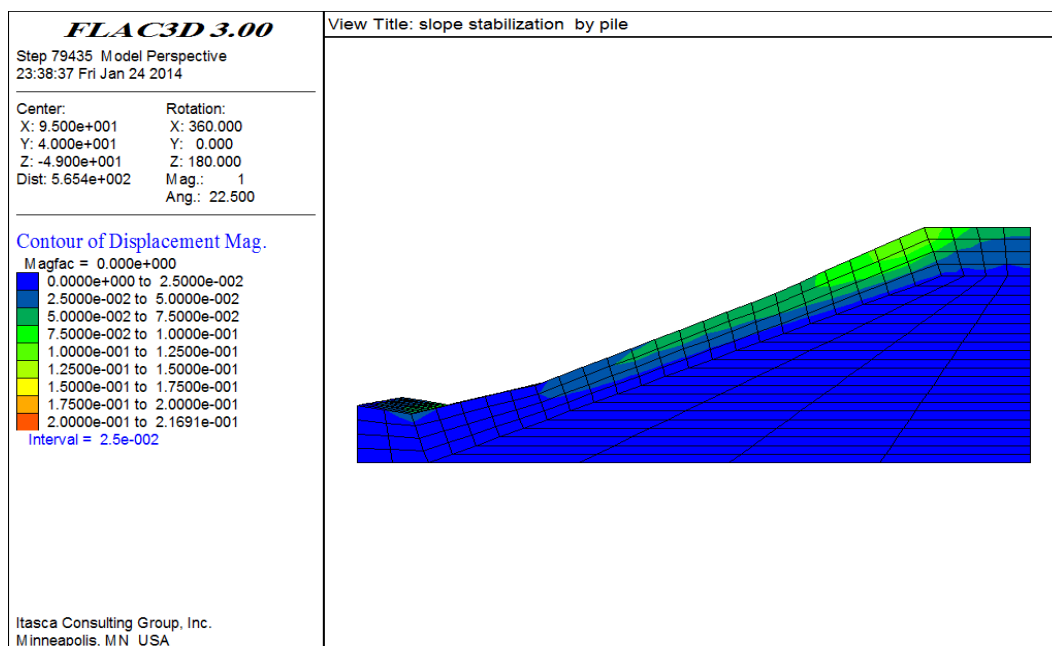
همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود بیشترین جابه‌جایی عمقی زمین لغزش حدود ۳۰ سانتی‌متر است و در کناره مرکز تقارن زمین لغزش بیشترین محدوده در رده جابه‌جایی ۲۰-۱۵ سانتی‌متر قرار دارد و جابه‌جایی در سطح تماس دو لایه برابر با صفر شده است.



شکل ۹. میزان جابه‌جایی شیروانی و دیوار بر اساس طرح مهندس مشاور پروژه



شکل ۱۰. جابه‌جایی میانه شیروانی پایدار شده با شمع



شکل ۱۱. جابه‌جایی پهلو شیروانی پایدار شده با شمع

## بحث

به منظور بررسی مجاز بودن میزان جابه‌جایی‌های محاسبه شده از مدل‌سازی در نرم‌افزار FLAC 3D، پس از مطالعه در آیین‌نامه‌های مختلف، از آیین‌نامه کد لغزش کالیفرنیا (C.G.S) که توسط سازمان نقشه‌برداری آمریکا تدوین شده است و به عنوان یک مرجع معتبر مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده گردید. در دسته‌بندی انجام شده برای ایمن بودن زمین‌لغزش از نظر میزان جابه‌جایی، این آیین‌نامه بیان می‌دارد در صورتی که جابه‌جایی یک شیروانی در اثر زمین‌لغزش بین ۱۰۰-۳۰ سانتی‌متر باشد می‌توان با یک قضاوت

مهندسی آن را مجاز و ایمن دانست (لین<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۸). از آنجا که حداکثر جابه‌جایی در این شیروانی ۷۱ سانتی‌متر به دست آمده نیازمند قضاوت مهندسی است. در مورد قضاوت مهندسی می‌توان از دسته‌بندی دیگر این آیین‌نامه استفاده کرد. در این آیین‌نامه و همچنین اصول ذکر شده توسط کوچی ساسا<sup>۲</sup> و پائولو کانوتی<sup>۳</sup> (ساسا و همکاران، ۲۰۱۰) شیروانی با ارتفاع ۱۰۰-۵۰ متر در دسته لغزش با خطر کم طبقه‌بندی شده‌اند و از آنجا که شیروانی مورد بررسی دارای ارتفاع ۹۰ متر است، لذا در این دسته قرار می‌گیرد. همچنین در هر دو مرجع ذکر شده در بالا حداقل ضریب اطمینان برای پایداری شیب در حالت آنالیز سه بُعدی را برابر با ۱/۵ دانسته‌اند و با توجه به عدد ۱/۶۱ برای ضریب اطمینان که توسط برنامه FLAC به دست آمد، قضاوت مهندسی ایمنی شیروانی اصلاح شده را تأیید می‌کند. همچنین مائوسونگ هانگ<sup>۴</sup> تغییر مکان تا ۱۰۰ سانتی‌متر را در یک شیروانی ایمن و مجاز می‌داند (هانگ و همکاران، ۲۰۰۹). لذا با توجه به توضیحات داده شده، روش اصلاح هندسی که برای پایداری این شیروانی انتخاب و تحلیل شد، روشی مناسب با نتایجی مطمئن و قابل قبول است. از سوی دیگر، میزان جابه‌جایی به دست آمده برای شیروانی پایدار شده به روش اصلاح هندسی، مطابق دسته‌بندی کد لغزش کالیفرنیا خطر زمین لغزش را در کلاس ایمن قرار می‌دهد (لرویل، ۲۰۰۶) که نشان از تأیید روش مذکور دارد.

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده شد در کانتور جابه‌جایی دیوار با دو رنگ سبز روشن در گوشه سمت چپ که در حقیقت وسط شیروانی در پایین شیب است و سبز کمی تیره‌تر در گوشه سمت راست تصویر که پهلو شیروانی می‌باشد، مشخص شده است. بنابراین میزان جابه‌جایی در محل دیوار گالری در وسط دیوار حدود ۵۰-۴۰ سانتی‌متر و در قسمت‌های کناری حدود ۴۰-۳۰ سانتی‌متر است که در صورت فعالیت زمین لغزش می‌تواند موجب ایجاد خساراتی به ضلع کناری گالری شود. همچنین حداکثر جابه‌جایی شیروانی در این حالت، کمی بیش از ۹۵ سانتی‌متر به دست آمده است و همان‌طور که مشاهده می‌شود تقریباً در ناحیه میانه شیروانی و در قسمت قرمز رنگ واقع شده است. از نظر ایمنی پایداری بایستی توجه نمود که حداکثر میزان جابه‌جایی کمتر از ۱۰۰ سانتی‌متر به دست آمده، لذا در این وضعیت نیز میزان جابه‌جایی مجاز ولی در لبه مرز نایمن قرار دارد که با روش‌هایی مانند تعبیه زه‌کش می‌توان از مرز نایمن فاصله گرفت.

بیشترین میزان جابه‌جایی زمین لغزش در مدل‌سازی سامانه، استفاده از شمع حدود ۳۲ سانتی‌متر است و مربوط به پایین شیب در محدوده قرمز رنگ می‌شود که در آنجا شمع قرار ندارد. خاطر نشان می‌شود چینه شمع‌ها از فاصله ۲۰ متری از لبه تاج شیروانی شروع شده و تا فاصله ۱۰۰ متری آن یعنی محدوده‌ای با طول ۸۰ متر در جهت شیب ادامه دارد. همچنین در ده متر ابتدا و انتهای پهلوها شمعی تعبیه نشده است و در واقع محدوده سبز رنگ شکل ۱۰ که تقریباً در میانه شیروانی قرار دارد و به شکل مربع در زیر محدوده زرد رنگ قرار دارد منطقه‌ای است که شمع‌ها در آن محدوده قرار گرفته‌اند.

با بررسی شکل ۱۱، مشاهده می‌شود بیشترین جابه‌جایی پهلوها بین ۱۲/۵-۱۰ سانتی‌متر است و بیشترین محدوده در پهلو شیروانی مربوط به کنتور ۷/۵-۵ سانتی‌متر می‌شود. یعنی شیروانی در این حالت در دسته شیروانی‌های ایمن حتی بدون قضاوت مهندسی قرار می‌گیرد و حتی ساخت سازه‌های مسکونی نیز در

1- Lynn  
2- Kuji Sassa  
3- Paolo Kanutti  
4- Maosong Huang

پایین دست شیب هیچ گونه مشکلی به وجود نمی آورد اما نباید فراموش کرد که اجرای شمع مشکلات اجرایی خود را داشته و مستلزم صرف هزینه های بالا است و این در حالی است که روش اصلاح هندسی در این شیروانی تأمین کننده پایداری مورد انتظار بوده و تغییر مکان را به حد مجاز می رساند و هزینه اجرایی پایین تری نسبت به سامانه شمع دارد. در جدول ۱ نتایج به دست آمده از تحلیل های انجام شده توسط مدل سازی در نرم افزار FLAC 3D جهت مقایسه بین میزان حداکثر جابه جایی و وضعیت پایداری در گزینه های مختلف پایداری سازی زمین لغزش به طور خلاصه ارائه شده است.

### نتیجه گیری

نتایج خروجی این تحقیق نشان داد که میزان جابه جایی حداکثر در روش پیشنهاد شده توسط مهندس مشاور پروژه بیشتر از این مقدار در روش اصلاح هندسی است. همچنین اجرای گالری نیازمند هزینه های بالا جهت خرید بتن و میل گرد، حمل و نقل آن و نیز نیروی متخصص اجرایی است. باید در نظر داشت در صورت ایراد خسارت به دیواره گالری، به علت فعالیت زمین لغزش، ترمیم قسمت های خسارت دیده که از جنس بتن مسلح است کار دشواری می باشد. در طرح پیشنهادی مهندس مشاور پروژه در خصوص آب های سطحی و نیاز به زه کشی راهکاری ارائه نگردیده در حالی که می دانیم بالا آمدن سطح آب زیرزمینی باعث افزایش تغییر مکان شیروانی می شود. همچنین استفاده از شمع جهت پایداری سازی با وجود کاهش چشمگیر تغییر مکان، هزینه بر بوده و نیازمند صرف زمان زیادی است و نیز اجرای شمع در شیب دارای مشکلاتی از نظر اجرایی می باشد.

با توجه به اینکه روش اصلاح هندسی خیلی هزینه بر نبوده و ایمنی و بازدهی آن در مدل سازی تحلیلی انجام شده در نرم افزار FLAC 3D تأیید شد و همچنین با توجه به اینکه در این روش، شرایط طبیعی محیط حفظ شده و کمترین دخالت در طبیعت صورت می گردد لذا روش اصلاح هندسی مناسب ترین روش جهت پایداری سازی این شیروانی خواهد بود. در روش پیشنهادی اصلاح هندسی همراه با زه کشی، هزینه اجرایی طرح پایین تر است، جابه جایی ها کمتر بوده و امکان وارد شدن خسارت به خاکریز کمتر و در صورت ایجاد خسارت، ترمیم آن آسان تر است. همچنین می توان با ترکیب این روش با روش های بیومهندسی مانند کاشت گیاه وتیور گراس<sup>۱</sup> در دامنه، بر پایداری شیروانی افزود.

### سپاسگزاری

در پایان لازم است از زحمات سرپرست محترم دستگاه نظارت مقیم پروژه راه آهن غرب کشور جناب آقای مهندس محسن کتابی که راهنمایی های بی دریغ ایشان کمک بسزایی در پیش برد این تحقیق بود و همچنین از شرکت مهندسی مشاور هگزا (مهندس مشاور پروژه) به خاطر در اختیار قرار دادن اسناد فنی و گزارشات پروژه تقدیر و تشکر گردد.

جدول ۱. مقایسه میزان جابه جایی در حالات مختلف

وضعیت شیروانی	حالت طبیعی	پایداری سازی به روش اصلاح هندسی و زه کش	پایداری سازی به روش مشاور (اصلاح هندسی و اجرای گالری)	پایداری سازی با سیستم شمع
میزان جابه جایی (Cm)	۱۸۵	۷۱	۹۵	۳۲
وضعیت پایداری	ناپایدار	پایدار	پایدار	پایدار

## منابع

- آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک (مدیریت استان کرمانشاه) (۱۳۹۱) گزارش عملیات حفاری ترانشه لغزشی کیلومتر ۵۰۰+۱۹۴ قطعه ۵/ب راه‌آهن غرب کشور، شماره گزارش ۳۵۸/۰۶/۱۰۰۹۰۰۶.
- رضائی، بهمن؛ ابراهیمی، هدی (۱۳۸۸) زمین لغزش و راهکارهای تثبیت آن، فصلنامه جغرافیایی آمایش، ۲ (۷)، صص. ۱۳۹-۱۲۹.
- صمیمی، مسعود (۱۳۸۱) بررسی زمین لغزش باریکان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: نادر شریعتمداری، دکترای خاک و پی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.
- فعله‌گری، محسن؛ طالبی، علی؛ کیااشکوربان، یاسر (۱۳۹۲) بررسی اثر جاده‌سازی در وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل پایداری دامنه FLAC SLOP (مطالعه موردی: حوضه آب‌خیز سد ایلام)، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۰ (۱)، صص. ۲۴۰-۲۲۷.
- قائمی، مهدی (۱۳۹۲) تحلیل عددی و پایداری‌سازی زمین لغزش با توجه ویژه به زمین لغزش رخ داده در قطعه ۵ راه‌آهن ملایر - کرمانشاه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: جهانگیر خزائی، دکترای خاک و پی، دانشگاه رازی، کرمانشاه.
- Cala, M., Flisiak, J., Tajdus, A. (2004) **Slope Stability Analysis with Modified Shear Strength Reduction Technique**, 9th International Symposium on Landslides, Landslides: Evaluation and Stabilization, pp. 1085-1090.
- Huang, M., Can-Qin J. (2009) Strength Reduction FEM in Stability Analysis of Soil Slopes Subjected to Transient Unsaturated Seepage, **Competers and Geotechnics**, 36 (1-2), pp. 93-101.
- Kelarestaghi, A. (2002) **Investigation of Effective Factors on Landslide Occurrence, Case Study of Tajan Dam Drainage Basin**, Sari, M.Sc. Thesis, Tehran University, 120 p. (Translated In Persian).
- Larsen, M.C., Parks, J.E. (1997) How Wide is a Road? The Association of Roads and Mass Wasting in a Forested Montana Environment, **Earth Surface Processes and Landforms**, 22, pp. 835-845.
- Lerouil, S. (2006) Natural Slope and Cuts: Movement and Failure Mechanisms, **Geotechnique**, 51 (3), pp. 197-243.
- Lynn M.H., Peter B. (2008) **the Landslide Handbook**, USGS.
- Mark J.T., David J.W. (2005) **Review of Stability Berm Alternatives for Environmentally Sensitive Areas**, Center for Transportation Research and Education Iowa State University.
- Monjazi, M., Heidari, M., Rezakhah, M., Masoomi, A. (2005) **Designing the Final Slop Optimized of Copper Sungun. Conference of Iran Mine Engineering**, the University of Tarbiat Modares, 120-128. (Translated In Persian).
- Sassa, K., kanuti, P. (2010) **Landslides Disaster Risk Reduction**, google.com.
- Sah, M.P., Mazari, R.K. (1996) Antropogenically Accelerated Mass Movement, Kulu Valley, Himachal Pardesh, India, **Geomorphology**, 26(21), pp. 123-138.
- Sarkar, S., Kanungo, D.P. (2003) **Landslides in Relation to Terrain Parameters**, A remote sensing and GIS approach, www.gisdevelopment.net.
- Talebi, A., Niazi, Y. (2011) Investigation of Ability of Physically Based Hydrological Model for Shallow Landslides Analysis in Natural Slopes, **Iran Natural Resources**, 3, pp. 64-74. (Translated In Persian).
- Teoh, E.A. (2005) **Numerical Modeling of Complex Slope Using FLAC/SLOP**, bachelor Thesis, University of Southern Queensland Faculty of Engineering and Surveying, 110 p.

