

کنترل رانش رخ داده در کیلومتر ۸۰۰+۳۰۳ راه آهن میانه-اردبیل

مقاله علمی - پژوهشی

شیراز ارشدنژاد*، دانش آموخته فوق دکترا، دانشکده عمران، دانشگاه هنگ کنگ (HKU)، هنگ کنگ

مسعود قدیمی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تبریز، ایران

سهیلا کمالی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه آزاد تهران شمال، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: s_arshadnejad@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۲

صفحه ۲۱۴-۲۰۱

چکیده

در راه آهن میانه-اردبیل به علت وجود ساختار زمین‌شناسی ضعیف در بخش‌هایی از مسیر و در هنگام اجرا، زمین‌لغزشی در کیلومتر ۸۰۰+۳۰۳ به وقوع پیوست. در این پژوهش تلاش شد تا با بررسی دقیق محلی و انجام آزمایشات ژئوتکنیکی و همچنین آنالیز برگشتی با کمک مدلسازی کامپیوتری (به دو روش تعادل حدی و اجزای محدود)، علت وقوع زمین‌لغزش، ابعاد سطحی و عمق آن و پارامترهای ژئومکانیکی محیط مشخص شود. پس از درک این پارامترها، طرح‌های پایدارکننده متنوعی بررسی و تحلیل شدند و در نهایت دیوار خاک مسلح ژئوگریدی طراحی و اجرا شد. برای تعیین عمق لغزش ۳ ترانشه کوچک اکتشافی حفر شده و بر اساس جابجایی‌های رخ داده در لایه‌های زیرین که در دیواره ترانشه‌ها قابل رصد بودند، یک مدل ریاضی تجربی برای تخمین عمق لغزش بدست آمد. مدل مذکور و بررسی ترانشه‌ها انطباق خوبی با نتایج بررسی تغییرات مقاومت برشی در عمق خاک داشت. نتایج مدلسازی گودبرداری اولیه به منظور رسیدن به کد ارتفاعی بستر دیوار خاک مسلح با ضریب اطمینان کوتاه مدت (۱/۲۵) انجام شده و ضمن کسب پایداری مطلوب در دوره اجرایی، مطلوب بودن مقدار ضریب اطمینان یاد شده تایید شد. تحلیل پایداری دیوار خاک مسلح به همراه خاکریز راه آهن و تحت ۸ حالت مختلف شامل حالت زهکشی و حالت اشباع خاک با دو وضعیت استاتیکی و دینامیکی و همچنین با در نظر گرفتن دو حالت کلی بررسی پایداری در سطح قوس لغزش رخ داده اولیه و سطوح لغزش محتمل دیگر انجام شد. شاخص نفوذ استاندارد در رس متراکم محل نتایج بیش از مقدار واقعی را نمایش داد.

واژه‌های کلیدی: زمین لغزش، تحلیل برگشتی، تحلیل پایداری شیب، دیوار خاک مسلح

۱-مقدمه

مناسب و نقشه‌های اجرایی مربوطه تهیه شده و در نهایت، اجرا گردیده و پس از حصول اطمینان از عملکرد اجرایی طرح، عملیات خاکریزی بستر راه آهن در بالادست شیب، انجام شد. منطقه مورد مطالعه بخشی از زون زمین‌ساختی البرز- آذربایجان است. کهن‌ترین سنگ‌های منطقه میکاشیست‌هایی هستند که در بخش خاوری رخنمون دارند و به نظر می‌رسد که پی‌سنگ منطقه را تشکیل داده‌اند. با توجه به شواهد صحرایی موجود در محدوده نقشه زمین‌شناسی کیوی

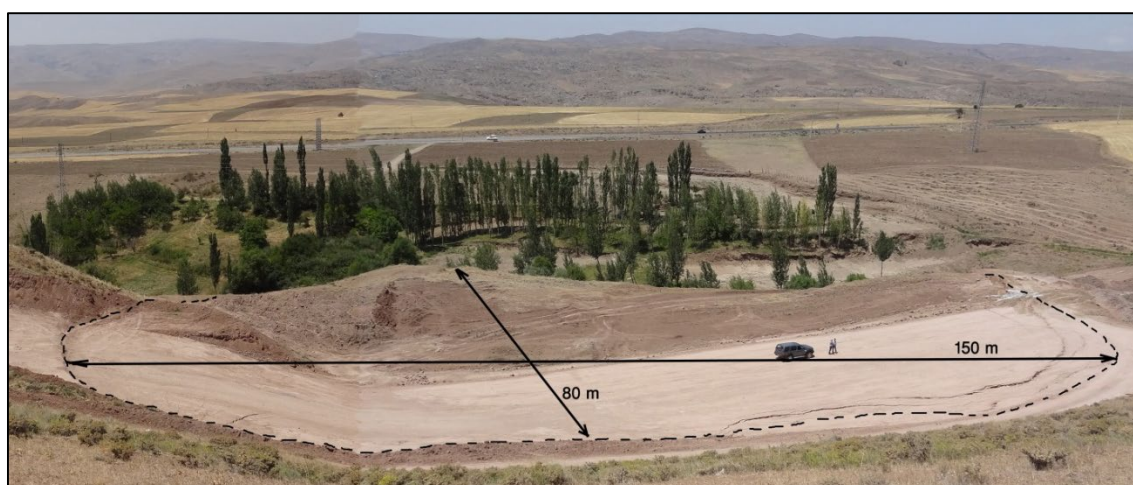
یکی از شاخه‌های راه آهن شمال غرب کشور، قطعه میانه به اردبیل است. این پروژه به صورت مسیر راه آهن یک خطه توسط وزارت راه و شهرسازی ایران (شرکت ساخت و توسعه زیربنای حمل و نقل کشور) تعریف شده است. پژوهش حاضر مربوط به بررسی و تحلیل یکی از رانش‌های طبیعی در دامنه پایین دست راه آهن میانه-اردبیل (قطعه چهارم) در کیلومتر ۸۰۰+۳۰۳ می‌باشد. این رانش قبل از آغاز عملیات خاکی در محل رخ داده و سبب شد تا پژوهش حاضر انجام شده، طرح

۱۳۸۹ بود و در اولین اقدام، ۶ ایستگاه نقشه برداری در محدوده رانش و بیرون محدوده (زمین با ثبات) احداث شد و هر ماه تغییر مکان‌های رخ داده ثبت گردید تا جابجایی‌های آن به دقت رصد شود. در اقدام بعدی و به منظور تشخیص علت رانش اقدام به حفر ۳ گمانه با عمق ۲۰ متر گردید که اطلاعات حاصل از آن‌ها نشانگر وجود لایه‌ای از رس در عمق ۳ تا ۵ متری با ضخامت ۲ متر بود. در آن مقطع زمانی روند تغییر مکان نزولی بود تا اینکه به سکون رسید (نمودار شکل ۱). اما با افزایش بارندگی‌ها در پاییز سال بعد حرکت لایه فوقانی دوباره آغاز شد. ابعاد ناحیه لغزش کرده ۸۰ در ۱۵۰ متر اندازه‌گیری شد. تصویر شکل ۲ ابعاد محدوده رانش کرده را نشان می‌دهد که مسیر راه آهن در امتداد بُعد بزرگ (۱۵۰ متری) در تصویر قابل تشخیص است. حداکثر ارتفاع افتادگی در لبه ناحیه لغزش کرده در سطح زمین طبیعی اولیه (تاج لغزش) ۱/۷۵ متر می‌باشد.

با مقیاس یک به صد هزارم، سن این سنگ‌های دگرگونی قبل از میوسن است (سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۷۶). بالاترین واحد چینه‌ای در محل اجرای پروژه واحد چینه‌شناسی Q_{t2} می‌باشد. این واحد مربوط به رسوبات پادگانه‌های آبرفتی جوان و پهنه‌های آبرفتی است. این رسوبات از رس، رس ماسه دار، شن و قلوه سنگ تشکیل شده است. مسئله شایان توجه در این ناحیه، وجود زمین‌لغزش‌های بزرگ و کوچک فراوان در همه جای منطقه است. این زمین‌لغزش‌ها اغلب در داخل رسوبات ماسه‌سنگی و کنگلومرایی پالئوژن و یا بر روی بخش‌های هوازده سنگ‌های آتشفشانی ائوسن (سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۷۶) و در محل همبری این دو واحد صورت گرفته است و در بسیاری موارد خسارات جانی و مالی برای ساکنین ناحیه شده، بطوریکه برخی از روستاهای منطقه مثل قزل دره قدیم در مسیر حرکت این زمین‌لغزش‌ها از بین رفته است. اولین مشاهده ترک‌های ناشی از لغزش در دامنه تپه واقع در کیلومتر ۳۰۳+۸۰۰ در زمستان سال



شکل ۱. نمودار جابجایی‌های رصد شده با ۳ ایستگاه نقشه برداری



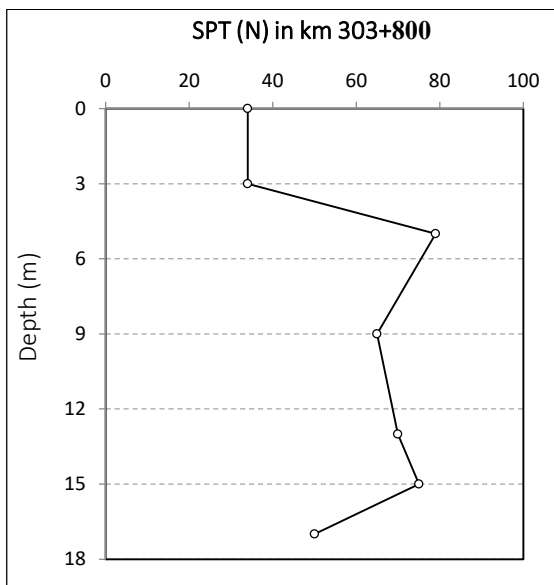
شکل ۲. محدوده رانش کرده در کیلومتر ۳۰۳+۸۰۰

۲- کاوش‌های صحرایی و آزمایشگاهی

بین مقاومت برشی زهکشی نشده و فشار موثر خاک سربار و شاخص خمیری خاک به صورت زیر ارائه کرده است.

جدول ۱. نوع و وزن حجمی لایه‌های خاک (کیلومتر ۳۰۳+۸۰۰)

توصیف	γ (t/m^3)	عمق (m)
رس با خاصیت خمیری بالا	۱/۸۷	۳-۰
ماسه لای‌دار با شن	۱/۸۷	۵-۳
رس با خاصیت خمیری بالا با ماسه	۱/۸۲	۹-۵
رس با خاصیت خمیری بالا با ماسه	۱/۸۴	۱۳-۹
لای ارتجاعی ماسه‌دار	۱/۸۶	۱۵-۱۳
رس با خاصیت خمیری پایین با ماسه	۱/۸۶	۱۷-۱۵
ماسه لای‌دار	۱/۸۷	۲۰-۱۷



شکل ۳. تغییرات مقدار آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) در عمق

به منظور تعیین عمق لغزش چند اقدام انجام شد. اولین اقدام حفر ۳ ترانشه کوچک با بیل مکانیکی در مرز محدوده رانش کرده بود. اقدام دوم، حفر ۳ گمانه اکتشافی به عمق ۲۰ متر درون محوطه قوس لغزش بود و آخرین اقدام نیز انجام مدلسازی عددی آنالیز برگشتی به منظور دقیق‌تر شدن نتایج آزمایشگاهی و انطباق بیشتر با محیط بود. با کمک بیل مکانیکی در سه نقطه از مرز ناحیه ترک خورده ترانشه‌هایی به عمق ۴ متر (با توجه به ماشین‌آلات موجود در محل) حفر گردید. ترانشه‌ها با عرض ۴ متر و طول ۶ متر و در راستای عمود بر مرز ترک خوردگی حفر شدند. بررسی‌های زمین‌شناسی نشان می‌دهد که منطقه مورد مطالعه پیشتر در پالئوژن دچار رانش شده است، اما رسوبات جدید روی ترک‌ها را پوشانده است. این بدان معنی است که در ناحیه مورد بررسی یک ترک، وجود داشته که سبب جذب و هدایت آب‌های سطحی به عمق لایه‌های خاکی می‌گردد. بر اساس مشاهدات حاصل از حفر ترانشه‌های یاد شده، مشخص شد که ضخامت لایه رسوب کرده جدید روی لغزش‌های پیشین، حدود ۴ متر است. نمونه‌برداری از لایه‌های خاک در اعماق مختلف حاکی از آن است که بخش عمده‌ای از خاک (بیش از ۷۰ درصد) حاوی رس و سیلت بوده مابقی ماسه ریزدانه است. جدول ۱ مشخصات خاک در یکی از گمانه‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس اندازه‌گیری‌های صحرایی حاصل از حفر یکی از گمانه‌های اکتشافی، نمودار شکل ۳ ترسیم شده که معرف مقدار پارامتر نفوذ استاندارد (SPT) (نشریه ۲۲۴ سازمان برنامه، ۱۳۸۰) نسبت به عمق می‌باشد.

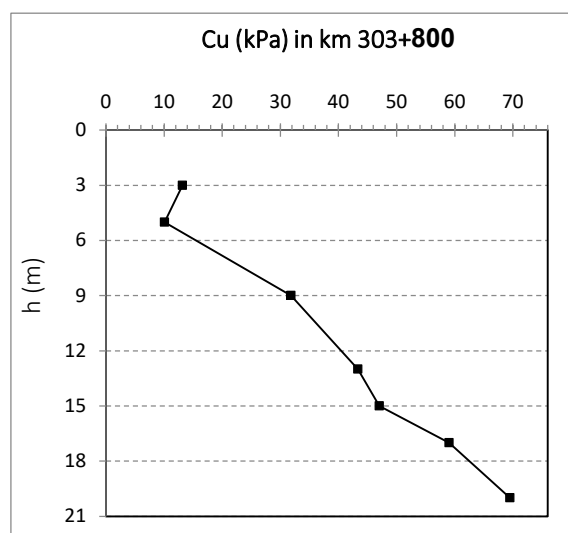
در رسوبات رسی که به طور عادی تحکیم یافته‌اند، مقاومت برشی زهکشی نشده خاک (چسبندگی) با افزایش فشار موثر خاک سربار افزایش می‌یابد (Skempton, 1986). اسکمپتون (Skempton & Henkel, 1953; Bowles, 1997) رابطه‌ای تجربی

$$C_u = p(0.11 + 0.0037 PI) \quad (1)$$

C_u : مقاومت برشی زهکشی نشده (کیلوپاسکال)

p : فشار موثر خاک سربار (کیلوپاسکال)

PI : شاخص خمیری خاک (درصد)



شکل ۴. تغییرات مقدار مقاومت برشی زهکشی نشده در عمق بر اساس شاخص خمیری و فشار موثر سربار (کیلومتر ۳۰۳+۸۰۰)

شکل ۵ و ۶ دو تا از ترانشه‌های اکتشافی حفر شده در مرز ترک خوردگی تاج رانش را نشان می‌دهند. برش زمین‌شناسی رصد شده در دیواره ترانشه‌ها اطلاعات با ارزشی در مورد چگونگی حرکت و میزان جابجایی‌های لایه‌های زیرین خاک بدست می‌دهد.

با کمک فرمول ۱ و مقادیر شاخص پلاستیک خاک (PI) که از نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک به روی نمونه‌های حاصل از حفر گمانه‌ها برای عمق‌های ۳، ۵/۵، ۹، ۱۳، ۱۵، ۱۷ و ۲۰ متری بدست آمده‌اند، نموداری ترسیم شده (شکل ۴) که بر اساس آن می‌توان مشاهده نمود که در عمق ۵/۵ متری کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت برشی خاک وجود دارد. این امر یکی از یافته‌های مستند برای تخمین عمق سطح لغزش است.



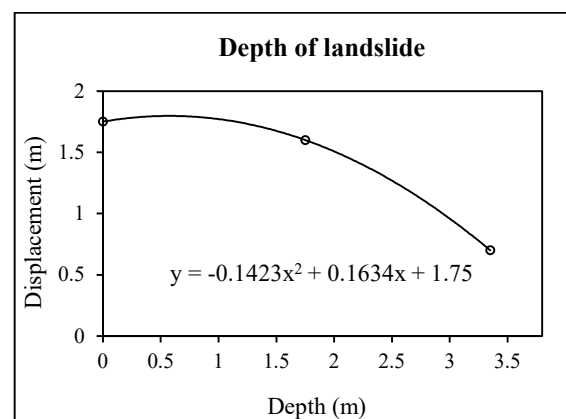
شکل ۵. مکانیزم جابجایی لایه‌ها در تاج رانش



شکل ۶. روند کاهش جابجایی قائم لایه‌ها نسبت به عمق

توانست معادله ریاضی و البته تجربی زون لغزش در این ناحیه را مشخص کند. با بررسی این نمودار می‌توان دریافت که در چه عمقی از سطح زمین، میزان جابجایی لایه برابر با صفر می‌شود. این عمق نشانگر کف سطح لغزش است. از آنجا که تعیین عمق دقیق سطح لغزش در طراحی سازه حائل و محل قرارگیری فونداسیون آن بسیار مهم است، مقدار بدست آمده از این معادله که صرفاً برای این مطالعه موردی مناسب است، باید با ضریبی تجربی، افزایش یابد. عمق فونداسیون یک سازه حائل مانند دیوار ژئوگریدی باید به اندازه‌ای پایین‌تر از سطح لغزش باشد که نیروی مقاوم لازم در جلوی آن در برابر لغزش دیوار (Das & Sobhan, 2014) فراهم شود. از دلایل مهم دیگری که لازم است تا این تصحیح صورت گیرد، محدودیت در نقاط بررسی شده (کفایت داده‌ها)، احتمال خطا در برداشت میدانی و همچنین وجود رفتار انیزوتروپ خاک است. بر اساس محاسبه با معادله تجربی در نمودار شکل ۷، عمق سطح لغزش معادل ۴/۲ متر تقریب زده شد. با توجه به نتایج گمانه اکتشافی (وجود لایه ضعیف در عمق ۵/۵ متری) و موقعیت مکانی آن نسبت به تراشه اکتشافی و شیب عمومی زمین (توپوگرافی) و لایه زیرین و دلایل مطرح شده از بابت طراحی سازه حائل، عمق سطح لغزش ۸ متر در نظر گرفته شد.

با توجه به شکل ۶، ملاحظه می‌گردد که لایه (۲) کنگلومرای سست قدیمی توسط یک رانش کهن، بریده شده و در سمت راست تصویر که همان لبه ترک رانش جدید است، مشاهده نمی‌شود. این بدان مفهوم است که رانش اخیر در محل رانش قدیمی به وقوع پیوسته است. نمودار شکل ۷ تغییرات دو پارامتر عمق و جابجایی قائم لایه خاک را نشان می‌دهد.



شکل ۷. تغییرات میزان جابجایی قائم لایه‌های خاک در برابر عمق

سه نقطه برداشت شده روندی نزولی و غیرخطی را نشان می‌دهند. رگرسیون غیرخطی از نوع تابع چند جمله‌ای درجه دوم

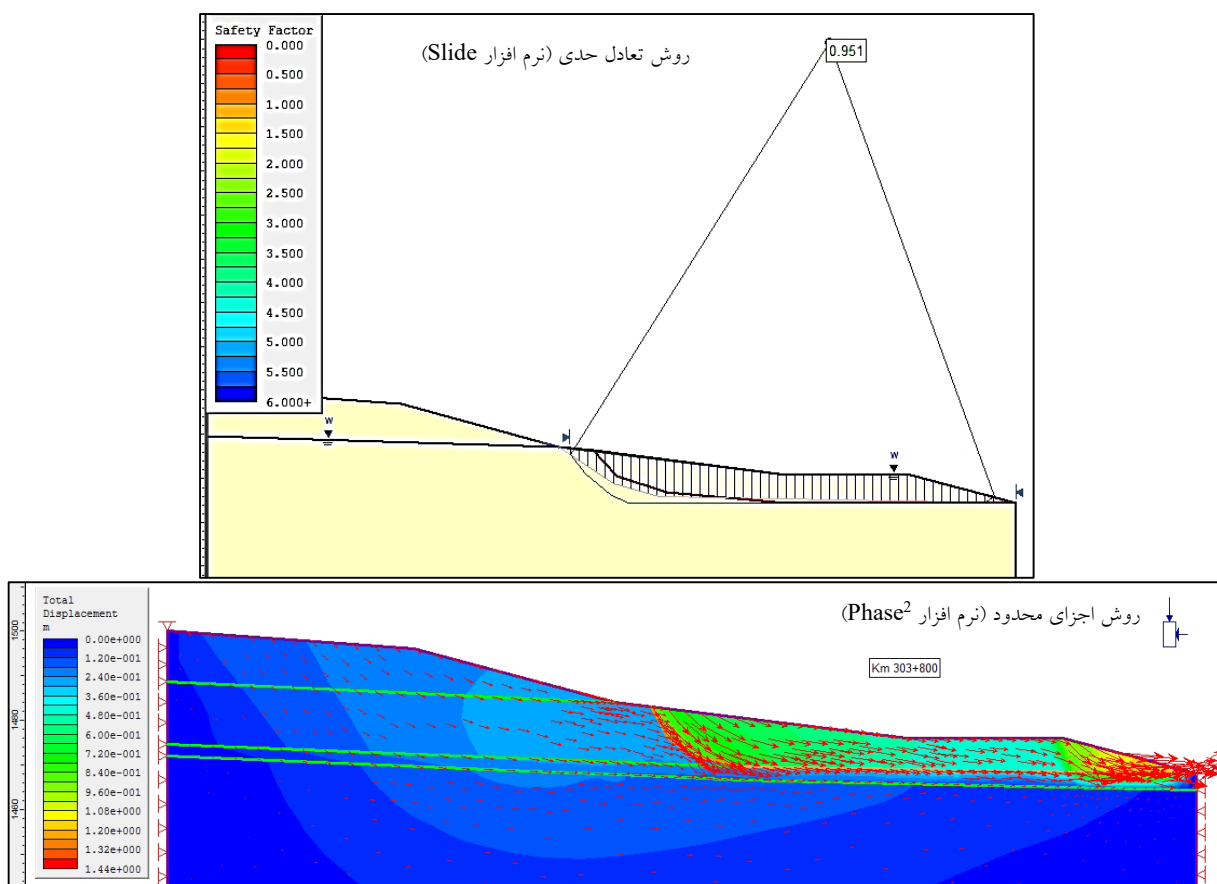
۳- تحلیل برگشتی به منظور تخمین دقیق تر پارامترهای ژئوتکنیکی

بررسی‌ها و اندازه‌گیری‌های انجام شده حاکی از آن بود که رانش به علت اشباع شدگی یک لایه خاک رسی رخ داده است. با این وجود سعی شد تا علاوه بر اندازه‌گیری‌های انجام شده در خصوص عمق قوس لغزش، با تحلیل برگشتی (Helwany, 2007) به دو روش تعادل حدی (Slide, Ver. 6, 2012) و روش اجزای محدود (Phase², Ver. 7, 2010) اطمینان بیشتری از تخمین‌های مربوط به پارامترهای ژئومکانیکی خاک بدست آید.

در شکل ۸ می‌توان خروجی داده‌های دو مدل‌سازی فوق را ملاحظه نمود. خلاصه نتایج تخمین پارامترهای مکانیکی خاک در حالت اشباع و حالت زهکشی شده با کمک آنالیز برگشتی و گمانه‌های حفر شده در جدول ۲ درج شده است.

جدول ۲. خلاصه نتایج تخمین پارامترهای مکانیکی خاک

پارامترهای مکانیک خاک	حالت اشباع	حالت زهکشی شده
γ (kN/m^3)	۲۰	۱۸/۵
ϕ (Deg.)	۷	۲۷
C (kPa)	۸۵	۵



شکل ۸. تحلیل برگشتی به روش تعادل حدی و روش اجزای محدود

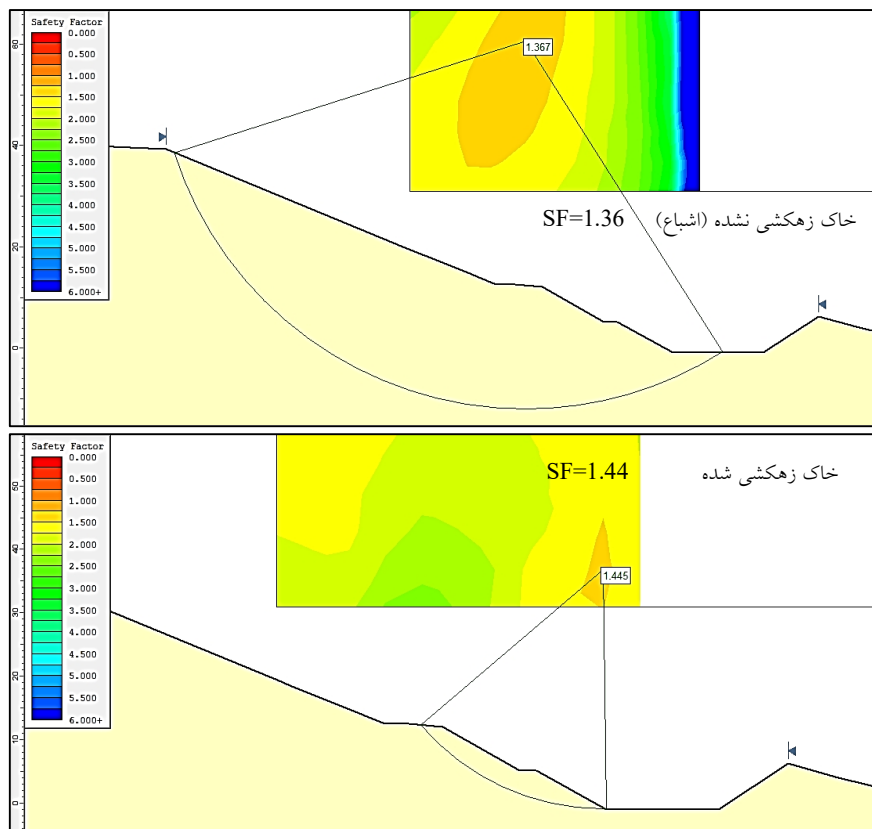
۴- طراحی دیوار خاک مسلح ژئوگریدی

با توجه به سازه‌های اجرا شده قبل و بعد از محل رانش، امکان جابجایی و تغییر در پلان مسیر راه‌آهن به منظور فاصله گرفتن از ناحیه رانش کرده فراهم نبوده و پایدارسازی ناحیه مذکور، تنها گزینه پیشرو بود. برای این منظور و با توجه به کیفیت خاک منطقه، توپوگرافی و ابعاد ناحیه لغزش کرده مناسب‌ترین روش، استفاده از دیوار حائل است. از میان انواع دیوارهای حائل گزینه

دیوار وزنی به علت ارتفاع زیاد (۱۳ متر) و عدم پایداری در برابر زلزله کنار گذاشته شد. دیوارهای وزنی برای شرایط لرزه‌ای متوسط (۰/۲۵g) تا زیاد و با توجه به کیفیت خاک بستر معمولن تا ارتفاع ۷ متر پایداری لازم را تامین می‌نمایند (Fellenius, 2009). گزینه دیگری با عنوان تعویض خاک و یا بهسازی خاک با آهک و سیمان نیز

مورد مطالعه لازم دانسته شد تا اثر خاکریز راه آهن و همچنین بار قطار بر پایداری کل سیستم مورد تحلیل قرار گیرد. به منظور ارائه یک طرح اجرایی کارآمد، پایداری دیواره موقت گودبرداری (ترانشه موقت) در حالت زهکشی شده و حالت اشباع (در صورتیکه اجرای پروژه در فصل بارندگی باشد) بررسی شد. با توجه به موقتی بودن ترانشه، ضریب اطمینان کوتاه مدت قابل قبول برای آن ۱/۲۵ است (AASHTO, 2017). با بررسی شیب‌های مختلف خاکبرداری، مشخص شد که ترانشه با دو پله با شیب یک به دو (۲۶/۵ درجه) و یک برم ۲ متری، پایداری موقت را با ضرایب اطمینان در دو حالت یاد شده به ترتیب برابر با ۱/۳۶ (حالت اشباع در فصل بارندگی) و ۱/۴۴ (حالت زهکشی شده) تامین می‌نماید (شکل ۹). در روند طراحی دیوار خاک مسلح ژئوگریدی با استفاده از آیین‌نامه آشتو (AASHTO, 2017) و اداره بزرگراه‌های آمریکا (FHWA, 2009) ابتدا به تحلیل پایداری داخلی (اجزای سازه) و سپس به تحلیل پایداری خارج و در نهایت به بررسی ظرفیت باربری پی دیوار پرداخته شده است. طراحی برای هر دو حالت اشباع و زهکشی شده خاک بستر و در دو وضعیت استاتیکی و دینامیکی انجام شد.

مورد بررسی قرار گرفت که با توجه ارتفاع زیاد خاکریزی، ضرایب اطمینان استاتیکی و دینامیکی را تامین نکرد. بنابراین دو گزینه دیوار خاک مسلح (ژئوگریدی) و دیوار بتن مسلح مورد تحلیل قرار گرفتند. برای اجرای هر دو گزینه لازم است تا عمقی بیشتر از عمق لغزش گودبرداری شده و دیواره موقت ایجاد شده نیز پایداری کوتاه مدت (تا اجرای کامل سازه حائل) داشته باشد. ارتفاع سازه مورد بحث ۱۳ متر اختیار شد (۴ متر پایین‌تر از عمق قوس لغزش) و طراحی با دو حالت خاک بستر اشباع و حالت زهکشی شده در دو وضعیت استاتیکی و دینامیکی انجام گردید. مقایسه اقتصادی دیوار خاک مسلح و دیوار بتن مسلح نشان داد که گزینه خاک مسلح هم از جنبه اقتصادی و هم از جنبه فنی ارجح است. دیوار خاک مسلح از انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردار بوده که در برابر نیروی دینامیکی (Jones, 2002; FHWA, 2009) مزیت مهمی محسوب می‌شود و از سویی دیگر اجرای آن آسان‌تر است. در مورد جانمایی موقعیت مکانی دیوار با هدف تامین پایداری در شرایط متفاوت بارگذاری و همچنین برداشتن توده خاک لغزش کرده، چند وضعیت مورد بررسی قرار گرفت و مناسبترین حالت، قرارگیری محل نمای دیوار تا لبه روسازی راه‌آهن به فاصله ۴۰ متری بود. با توجه به هندسه پروژه



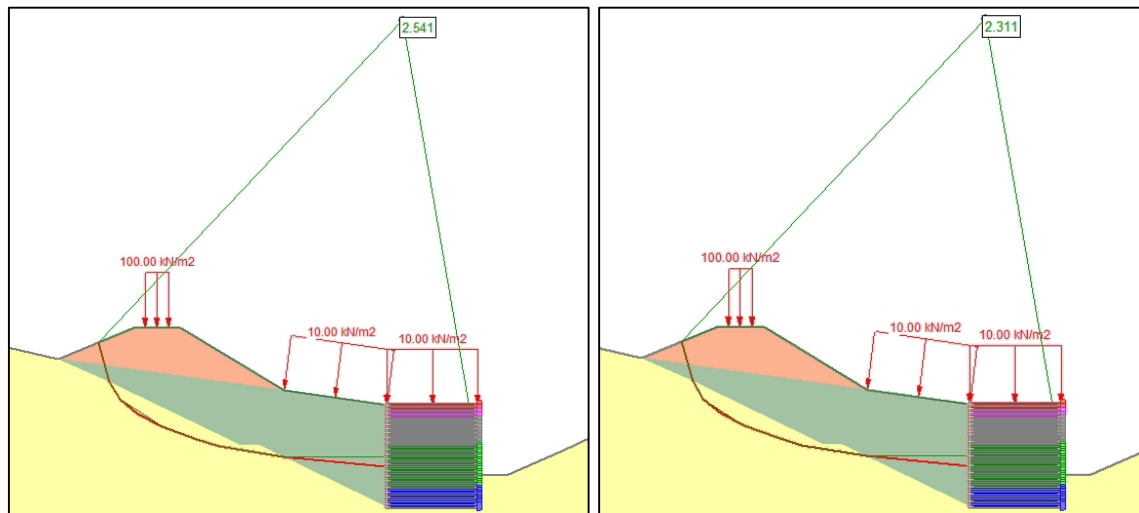
شکل ۹. تحلیل پایداری ترانشه موقت (در محل اجرای دیوار ژئوگریدی)

فرض اول شامل احتمال رخداد زمین لغزش در امتداد سطح لغزش کرده اولیه است و فرض دوم شامل وجود پیوستگی محیط و احتمال لغزش در سطحی جدید است. نتایج بدست آمده از تحلیل‌های انجام شده و ضرایب اطمینان مربوط به هر یک از شرایط ذکر شده در جدول ۳ درج شده است.

جدول ۳. ضرایب اطمینان در حالات مختلف

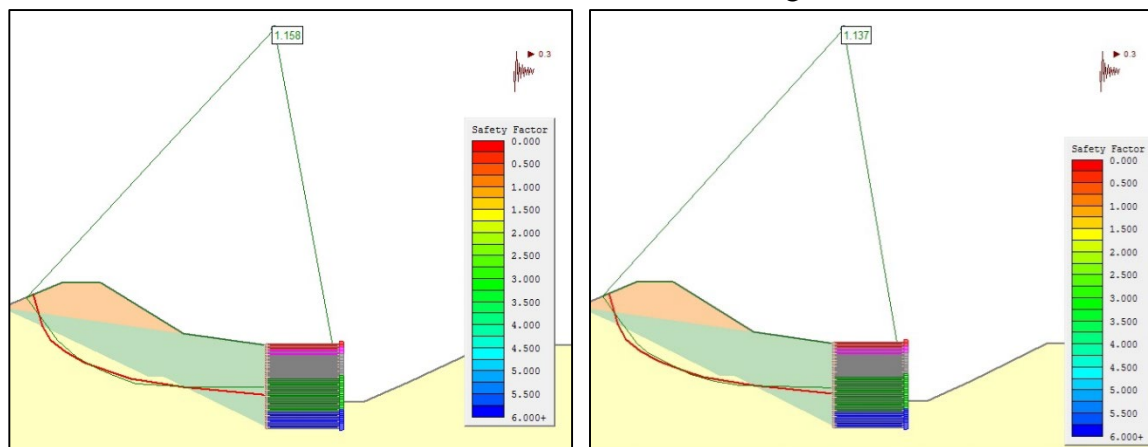
وضعیت محیط	قوس لغزش اولیه		قوس لغزش محتمل	
	استاتیکی	دینامیکی	استاتیکی	دینامیکی
زهکشی نشده (اشباع)	۲/۳۱	۱/۱۴	۱/۶۷	۱/۱۸
زهکشی شده	۲/۵۴	۱/۱۶	۱/۸۶	۱/۲۴

ارتفاع دیوار ۱۳ متر و عرض آن ۱۱/۵ متر و طول دیوار ۱۸۰ متر می‌باشد. بنابر توصیه مراجع معتبر ژئوتکنیکی از جمله AASHTO & FHWA شتاب زلزله تنها به صورت مولفه افقی و به اندازه نصف مقدار اولیه اعمال می‌شود. اما در اینجا به سبب حساسیت پروژه و نزدیکی دیوار به خاکریز راه‌آهن، در تحلیل پایداری کلی، مقدار کل شتاب اعمال شده است. ضرایب اطمینان قابل قبول در دو حالت استاتیکی و دینامیکی به ترتیب برابرند با ۱/۵ و ۱/۱۲۵ (AASHTO, 2017). به منظور بررسی رفتار مجموعه دیوار خاک مسلح و خاکریز راه آهن در دراز مدت عوامل محیطی قطعی و محتمل مانند بار قطار و بار ناشی از دپوی خاک کشاورزی، برف، لودر و کامیون، روی ناحیه مسطح فوقانی دیوار در نظر گرفته شده است. اشکال ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ نتیجه تحلیل پایداری به روش اصلاح شده بیشاپ (Bishop, 1955; Bishop & Bjerrum, 1960) را با دو فرض کلی نشان می‌دهند.



الف) استاتیکی زهکشی شده SF=2.54

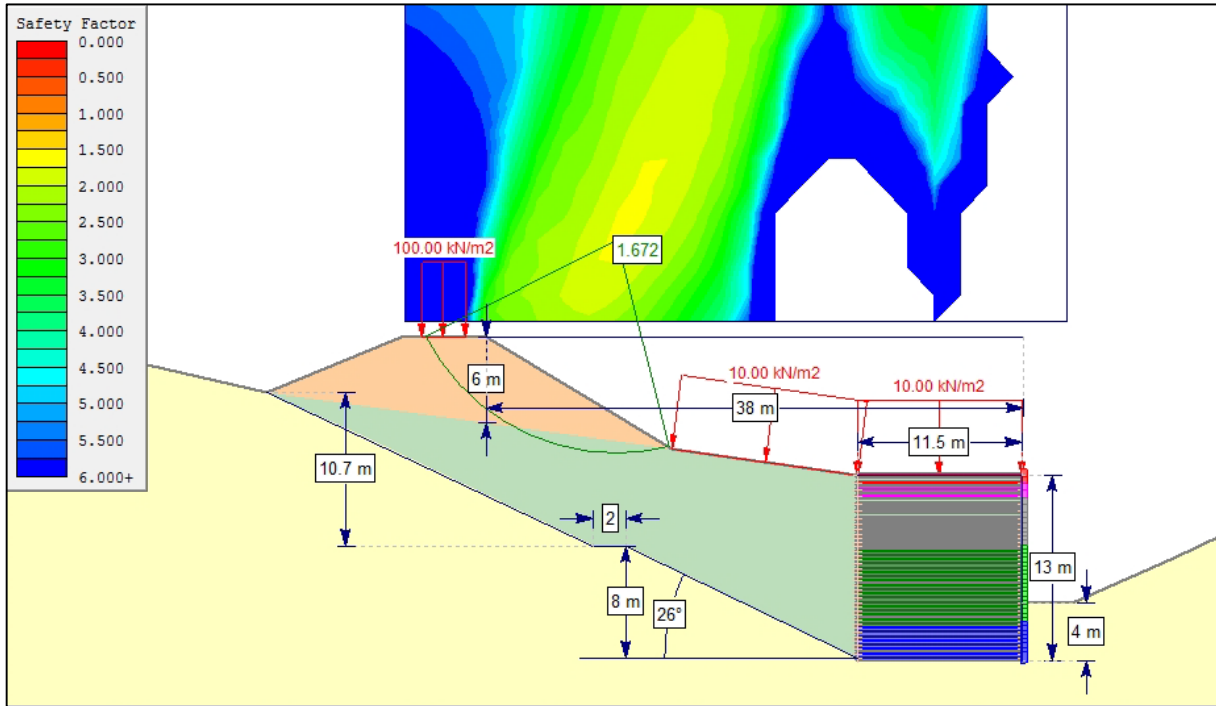
ب) استاتیکی زهکشی نشده (اشباع) SF=2.31



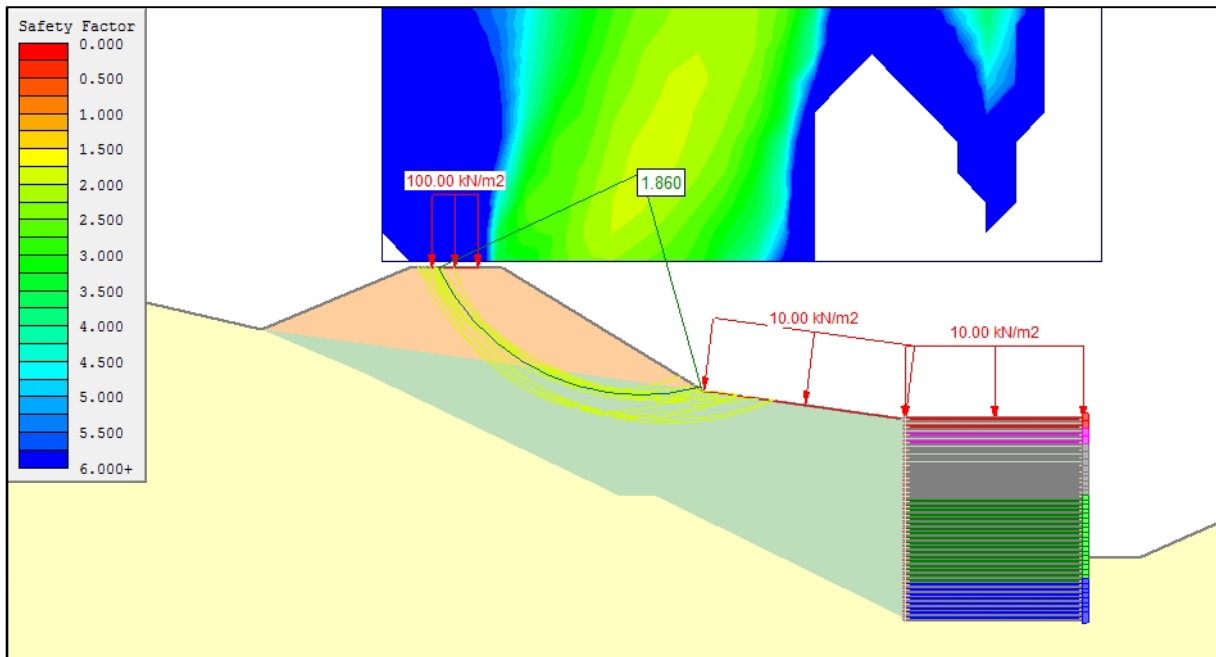
ت) دینامیکی زهکشی شده SF=1.16

د) دینامیکی زهکشی نشده (اشباع) SF=1.14

شکل ۱۰. تحلیل پایداری دیوار خاک مسلح در مجاورت خاکریز راه‌آهن برای قوس لغزش رخ داده

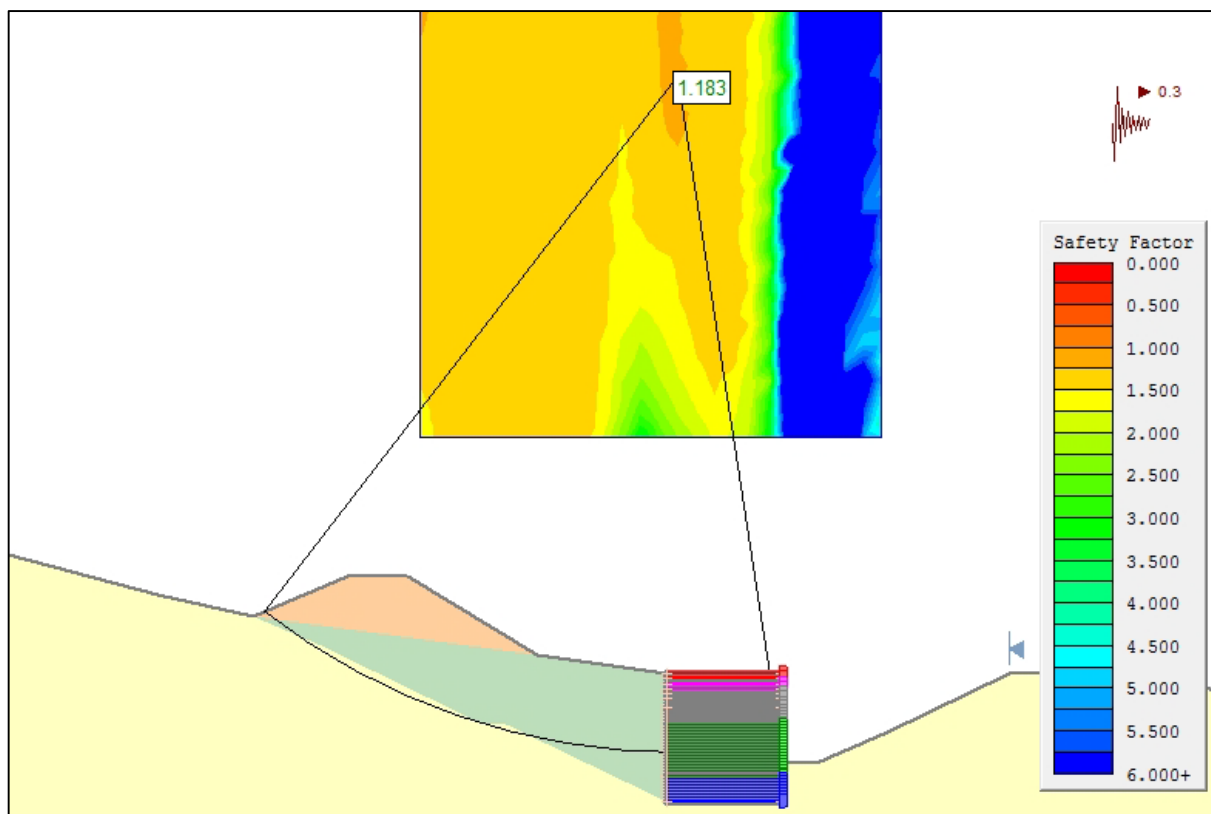


الف) استاتیکی زهکشی نشده (اشباع) $SF=1.67$

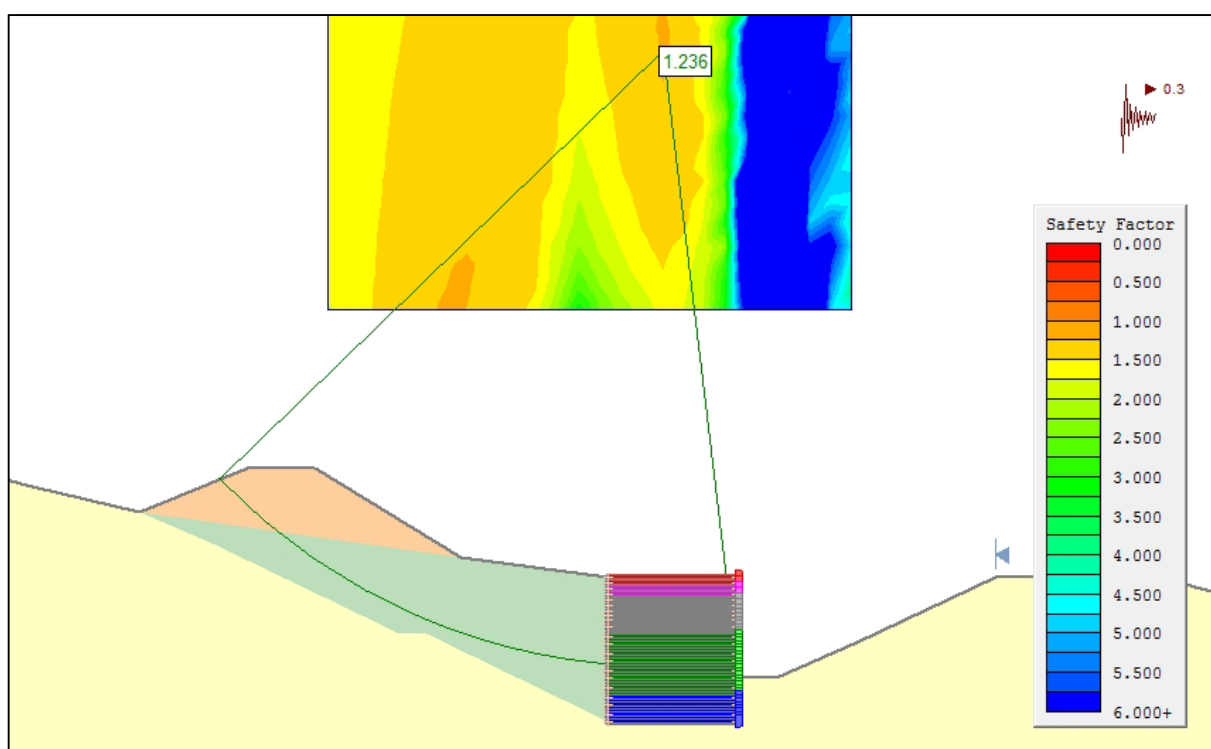


ب) استاتیکی زهکشی شده $SF=1.86$

شکل ۱۱. تحلیل پایداری دیوار خاک مسلح در مجاورت خاکریز راه آهن برای قوس لغزش محتمل (حالت استاتیکی)



ج) دینامیکی زهکشی نشده (اشباع) $SF=1.18$



د) دینامیکی زهکشی شده $SF=1.24$

شکل ۱۲. تحلیل پایداری دیوار خاک مسلح در مجاورت خاکریز راه آهن برای قوس لغزش محتمل (حالت دینامیکی)

عملیات اجرایی به پایان رسید. شکل ۱۳ تصویر ماهواره‌ای شامل موقعیت راه‌آهن و دیوار حائل را در نمای پلان نمایش می‌دهد. اشکال ۱۴ و ۱۵ دو نمای پایین و بالای دیوار را نشان می‌دهند.

با توجه به نتایج بررسی‌های میدانی و آزمایشگاهی، آنالیزهای برگشتی و مدلسازی مجموعه دیوار حائل خاک مسلح ژئوگریدی و خاکریز راه‌آهن (تحت شرایط مختلف بارگذاری) طرح اجرایی نهایی و نقشه‌های مربوطه تهیه و ترسیم شدند و در مدت ۶ ماه



شکل ۱۳. دیوار حائل اجرا شده در مجاورت خاکریز راه‌آهن



شکل ۱۴. نمای گابیونی دیوار خاک مسلح ژئوگریدی کیلومتر ۳۰۳+۸۰۰



شکل ۱۵. نمایی از خاکریز روسازی شده راه آهن کیلومتر ۳۰۳+۸۰۰

۵- نتیجه گیری

انتظار داشت که مقادیر بدست آمده از آزمون نفوذ استاندارد (*SPT*)، از مقدار مورد انتظار همین پارامتر در زمان رانش بیشتر باشند. علاوه بر این مشاهده دیواره ترانشه اکتشافی و لایه‌های جابجا شده انطباق خوبی با نتایج بررسی تغییرات مقاومت برشی در عمق خاک (شکل ۴) دارد. بنابراین پارامتر شاخص نفوذ استاندارد در این محل که حاوی خاک‌های ریزدانه است،

پژوهش انجام شده در این مقاله منتهی به ارائه یک طرح اجرایی و عملیاتی شدن آن گردید. مبنای این پژوهش، بررسی‌ها و اندازه‌گیری‌های میدانی، آزمایشگاهی و انجام مدلسازی‌های کامپیوتری به روش تعادل حدی و اجزای محدود بوده است. دستاورد آن شامل موارد زیر است. با توجه به تغییر مقدار رطوبت خاک در زمان انجام آزمایش و زمان رخ دادن رانش، می‌توان

انجام شده و تجربه بدست آمده در محل حاکی از پایداری مطلوب در دوره اجرایی و مطلوب بودن مقدار ضریب اطمینان یاد شده بود. در دوره اجرایی، چندین بارندگی رخ داد و هیچگونه ناپایداری در ترانشه موقت بوجود نیامد. هندسه این ترانشه موقت شامل شیب ملایم دیواره‌ها (۲۶ درجه) با دو پله ۸ و ۱۰ متری بود.

۶- سپاسگزاری

برای انجام این پروژه پژوهش محور نیاز به حمایت فنی و تامین مالی بابت انجام مطالعات، آزمایش‌های ژئوتکنیک، عملیات خاکی و ساخت دیوار ژئوگریدی از سوی شرکت ساخت توسعه زیربناهای حمل و نقل کشور به عنوان متولی ساخت راه‌آهن میانه-اردبیل بود، که این مهم به بهترین شکل انجام شده و بدین وسیله از این نهاد اجرایی کشور و به ویژه دفتر فنی مطالعات راه‌آهن قدردانی می‌شود. علاوه بر این از آقای مهندس جعفرزاده از شرکت مهندسی مشاور اتحادراه بابت زحمات میدانی این پژوهش قدردانی می‌شود.

به تنهایی نمی‌تواند پارامتری قاطع برای تعیین عمق لغزش باشد. به منظور تعیین عمق لغزش، در مرز ترک خوردگی در سطح زمین، ۳ ترانشه کوچک اکتشافی با کمک بیل مکانیکی حفر شده و بر اساس جابجایی‌های رخ داده در لایه‌های زیرین که در دیواره ترانشه‌ها قابل رصد کردن بودند، یک مدل ریاضی تجربی و محلی (برای این محل) بدست آمد که برای تخمین عمق لغزش از آن استفاده شد. گزینه‌های مختلفی از جمله بهسازی خاک، اجرای دیوار وزنی، دیوار بتن مسلح و دیوار خاک مسلح ژئوگریدی بررسی شدند و در نهایت گزینه دیوار ژئوگریدی با ارجحیت بالاتر، انتخاب شد. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته برای ناحیه رانشی مورد بحث در کیلومتر ۳۰۳+۸۰۰، گزینه نهایی، اجرای دیوار خاک مسلح ژئوگریدی به ارتفاع ۱۳ متر، عرض ۱۱/۵ متر و طول ۱۸۰ متر (با فاصله ۴۰ متری از راه‌آهن و موازی با آن) می‌باشد. طراحی دیوار بر اساس آیین‌نامه آشتو (AASHTO) و اداره بزرگراه‌های آمریکا (FHWA) انجام شد. لایه‌های ژئوگریدی مورد استفاده از بالا به پایین با کدهای ۵۵/۳۰، ۸۰/۳۰، ۱۱۰/۳۰، ۱۶۰/۳۰ و ۲۰۰/۳۰ می‌باشند. نتایج مدلسازی گودبرداری اولیه به منظور رسیدن به کد ارتفاعی بستر دیوار خاک مسلح با ضریب اطمینان کوتاه مدت و معادل ۱/۲۵

۷- مراجع

-FHWA, (2009). Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes, FHWA-NHI-10-024, 332-333.
 -Helwany, S., (2007). Applied Soil Mechanics with ABAQUS Applications, John Wiley & Sons, Inc.
 -Jonse, C., (2002). Guide to reinforced fill structure and slope design, geoguide 6, Geotechnical engineering office civil engineering department the government of the Hong Kong special administrative region, 239-240.
 -Skempton, A.W., Henkel, D.J., (1953). The Post-Glacial Clays of the Thames Estuary at Tilbury and Shellhaven, 3rd ICSMFE, Vol. 1, 302-308.
 -Skempton, A.W., (1986). Standard Penetration Test procedures, *Journal of Geotechnique*, Vol. 36, No. 3, 425-447.
 -Rocscience, Inc., (2010). *Phase²* software, Ver. 7, Canada.
 -Rocscience, Inc., (2012). *Slide* software, Ver. 6, Canada.

-سازمان زمین‌شناسی کشور (۱۳۷۶). نقشه زمین‌شناسی اردبیل با مقیاس (۱:۱۰۰۰۰۰) توسط خداینده و امینی فضل.
 -سازمان برنامه و بودجه کشور، (۱۳۸۰). نشریه ۲۲۴، دستورالعمل آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) در مطالعات ژئوتکنیک، ۱۹-۲۰.
 -AASHTO, (2017). LRFD Bridge design specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials, 1781-1782.
 -Bishop, A.W., (1955). The use of slip circle in the stability analysis of earth slope, *Journal of Geotechnique*, Vol. 5, No. 1, 7-17.
 -Bishop, A.W., Bjerrum, L., (1960). Stability coefficients for earth slopes, *Journal of Geotechnique*, Vol. 10, No. 4, 129-147.
 -Bowles, J., E. 1(997). Foundation analysis and design, McGraw-Hill Companies, Inc. 1206-1207.
 -Das, B. M., Sobhan, Kh., (2014). Principles of Geotechnical Engineering, *Cengage Learning*, 766-767.
 -Fellenius, B.H., (2009). Basics of foundation design, *Electronic Edition*. www.Fellenius.net, 346-347.

Control of a Landslide that Occurred at Km 303+800 of the Mianeh-Ardabil Railway

*Shobeir Arshadnejad, Post-Doc., Grad., Civil Engineering Faculty, Hong Kong University,
Hong Kong.*

Masoud Ghadimi, M.Sc., Grad., Technical Faculty, Tabriz University, Iran.

Soheila Kamali, M.Sc., Grad., Earth Sciences Faculty, North Tehran Azad University, Iran.

E-mail: s_arshadnejad@yahoo.com

Received: April 2025- Accepted: November 2025

ABSTRACT

In Mianeh-Ardabil railway, due to the weak geological, a landslide occurred during implementation at km 303+800. In this research, an attempt has been made to determine the cause of the landslide, its surface dimensions and depth, and the geotechnical parameters of the field by means of detailed local investigation and geotechnical tests, as well as a back analysis by computer modeling (EL and FEM). After understanding these parameters, various stabilizing designs were investigated and analyzed, and finally a geogrid reinforced soil wall was designed and implemented for this purpose. In order to determine the depth of the slip's surface, three small exploratory trenches were excavated and based on the layers displacements that could be observed in the trench walls, an experimental mathematical model was obtained. The model and observations was in good agreement with the results of the study of the changes in shear strength with soil depth. The results of the initial excavation modeling were carried out to reach the elevation code of the reinforced soil wall base with a short-term safety factor (1.25). The experience gained on site indicated the desired stability during the implementation period and the safety factor was sufficient to ensure the temporary slope stability. The stability analysis of the reinforced soil wall along with the railway embankment was done under 8 different states, (drainage and un-drained soil in two static and dynamic conditions with two general states: the stability analysis on the initial landslide's surface and other possible landslide surfaces).

Keywords: Landslide, Back Analysis, Analysis of Slope Stability, Reinforced Soil Wall