

زمین لغزش بزرگ دشتگان رودبار (مسیر آزادراه رشت - قزوین) بررسی علل و چگونگی پایدارسازی آن

سیدعبدالله اکرامی‌راد (کارشناس ارشد)
دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لنگرود

ابوالفضل اسلامی* (دانشیار)
گروه ژئوتکنیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

جواد زرافعی (استادیار)
گروه مهندسی سازه، دانشگاه گیلان

زمین لغزش کلان دشتگان رودبار با حجم ۱٫۵ میلیون متر مکعب در مسیر آزادراه رشت - قزوین، واقع در استان گیلان، در سال ۱۳۸۴ به وقوع پیوست که موجب مسدود شدن مسیر و وقفه‌ی طولانی در روند اجرایی آن شد. جنس مصالح در بخش فوقانی توده، ترکیبی از سنگ و خاک بوده که بر روی لایه‌ی از مخلوط رس و لای مستقر بر سنگ بستر قرار گرفته است. تحلیل پایداری مقطع با آنالیز برگشتی در حالت غیراشباع، قبل از لغزش حاکی از پایداری توده با ضریب اطمینان ۱٫۲ بوده است. تحلیل‌ها حاکی است که تراوش آب در بخش ریزدانه در رأس و ایجاد ترانشه (گودال) در پای شیب، به صورت توأمان، علل اصلی لغزش در دشتگان رودبار است. در این نوشتار، مجموعه راهکارهای پایدارسازی قبل از رانش توده - به منظور جلوگیری از وقفه‌ی طولانی در روند اجرایی پروژه - و نیز بعد از رانش توده - به منظور ادامه‌ی احداث آزادراه - مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ارزیابی‌های فنی، اقتصادی و اجرایی در هر دو حالت مؤید برتری گزینه‌ی دیوار حائل مهارشده به شمع‌های نگهبان در مقایسه با سایر روش‌هاست.

واژگان کلیدی: زمین لغزش بزرگ، پایداری شیب‌ها، آنالیز برگشتی، حائل‌سازی، شمع نگهبان.

۱. مقدمه

ایران است که به دلیل فعالیت لرزه‌خیزی و شرایط متنوع زمین‌شناسی، در بسیاری نقاط مستعد لغزش است. در چارچوب منطقه‌بندی زمین‌ساختی (تکتونیکی) ایران، این منطقه با بخش میانی ایران مرکزی و کوه‌های البرز و حوزه‌ی دریای خزر ارتباط دارد. کهن‌ترین تشکیلات در این ناحیه شیست‌های (شیل‌های) کمی دگرگون شده و شیست‌های غیر دگرگون متعلق به سازند کهر و گرانیت است که تشکیل‌دهنده‌ی مجموعه‌ی پی به قدمت پرکامبرین است.^[۱]

زمین لغزش مورد نظر در قسمت شرقی زمین لغزش قدیمی دشتگان، در کیلومتر ۲۹+۵۵۰ الی ۲۹+۸۰۰ آزادراه رشت - قزوین واقع شده است. زمین لغزش دشتگان مخلوطی از سنگ و خاک بوده که مواد سنگی آن از جنس توف، آگلومرای سبز و خاکستری، ایگنمیریت و توف‌های ایگنمیریتی قرمز و قهوه‌یی است، و قسمت بالادست دامنه نیز شامل رسوبات سیلابی و خاک‌های سطحی است. میزان هوازدگی بالا در منطقه، تأثیر به‌سزایی در فراهم‌کردن شرایط مناسب به‌منظور وقوع زمین لغزش داشته است. این مسیر قبل از گودبرداری کاملاً پایدار بوده، اما با ایجاد گودال و

بلایای طبیعی به‌عنوان بزرگ‌ترین دشمن طبیعی انسان، باعث کشته و مجروح شدن سالانه صدها هزار تن و بی‌خانمانی میلیون‌ها نفر در سراسر جهان می‌شود. بررسی گودال‌های موجود در مسیر آزادراه از مهم‌ترین مواردی است که در زمان احداث آزادراه باید بدان توجه داشت. درخصوص آزادراه‌ها با توجه به سرعت بالای حرکت خودرها، ریزش‌های جزئی در طول مسیر نیز می‌تواند بسیار خطرناک باشد. بر این اساس، و با در نظر گرفتن امنیت جانی رانندگان، مطالعه‌ی پایداری و تثبیت گودال‌ها با روش‌های متناسب با شرایط طرح ضرورت می‌یابد.

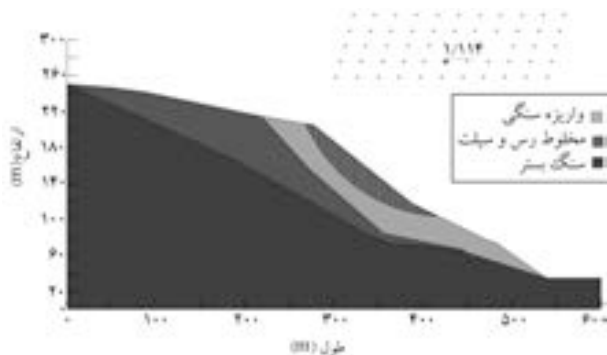
یکی از مناطق کوهستانی واقع در مسیر آزادراه رشت - قزوین، منطقه‌ی دشتگان رودبار است که بعد از احداث ترانشه - تحت تأثیر عوامل مختلف - شاهد زمین لغزشی بزرگ بود. منطقه‌ی مورد مطالعه بخشی از ارتفاعات البرز غربی، واقع در شمال

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۸۸/۹/۸، اصلاحیه ۱۳۸۹/۳/۲۴، پذیرش ۱۳۸۹/۱۰/۴.

جدول ۱. پارامترهای مقاومت برشی برای انجام آنالیزها-شرایط خاک با رطوبت طبیعی.

$\gamma_{wst} (\frac{KN}{m^3})$	$\gamma_d (\frac{KN}{m^3})$	W (%)	LL	PL	C (Kpa)	ϕ (درجه)	مدل رفتاری خاک	لایه
۲۲٫۸	۲۰٫۶	۶	-	-	۰	۴۰	موهر - کولمب	واریزه سنگی
۲۳٫۴	۲۱٫۴	۴	۳۴	۲۳	۲۰	۱۹	موهر - کولمب	مخلوط رس با سیلت
۲۲٫۲	۲۰٫۸	-	-	-	۴۰۰۰	۲۸	موهر - کولمب	سنگ بستر



شکل ۲. سطح لغزش بحرانی به دست آمده توسط نرم افزار.



شکل ۱. محل وقوع لغزش در نزدیکی دکل برق فشارقوی.

خاک‌ها، مطابق جدول ۱، به توده‌ی مورد نظر، آنالیز پایداری شیروانی در حالت گوه لغزش دایره‌یی (شکل ۲) صورت گرفته و کمینه ضرایب اطمینان (Min FS) در برابر پایداری توده توسط روش‌های جانبی اصلاح شده (۱۹۵۶)، بیشاب اصلاح شده (۱۹۶۰)، مورگنسترن - پرایس (۱۹۶۵) در جدول ۲ ارائه شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده در این مرحله، مشاهده می‌شود که کم‌ترین ضریب اطمینان (FS) در برابر پایداری توده در روش جانبی معادل ۱/۱۱۴ است که از پایدار بودن توده ($FS > 1$) حکایت دارد، اگرچه این ضریب اطمینان کم‌تر از معیارهای ژئوتکنیکی برای شیروانی (یعنی $FS < 1/5$) است؛ البته باید توجه داشت که این ضریب اطمینان برای آنالیز مقطع در حالت غیراشباع است. از سوی دیگر با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه در طول سالیان دراز، و نیز پایداری این توده و توده‌های مشابه در این سال‌ها علی‌رغم بارش‌های سنگین جوی، احتمال می‌رفت با در اختیار داشتن نتایج ژئوتکنیکی خاک‌ها در حالت اشباع، ضریب اطمینان در برابر پایداری بزرگ‌تر از ۱ و کم‌تر از مقدار به دست آمده در حالت قبل باشد.

۲.۲. آنالیز پایداری مقطع بعد از گودبرداری - خاک با رطوبت طبیعی

در این مرحله نیز با توجه به اطلاعات ژئوتکنیکی و مقطع بحرانی موجود، بعد از مدل‌سازی مقطع بحرانی و اختصاص مصالح، آنالیز پایداری مقطع در حالت خاک با رطوبت طبیعی و گوه لغزش دایره‌یی (شکل ۳) صورت گرفته و کم‌ترین ضرایب اطمینان در برابر پایداری توده در تمامی روش‌ها کم‌تر از ۱ بوده است. ضریب اطمینان به دست آمده توسط روش بیشاب از همه کم‌تر و معادل ۰٫۸۲۵ به دست آمده که

جدول ۲. ضرایب اطمینان به دست آمده از آنالیز مقطع اولیه قبل از گودبرداری برای احداث آزادراه.

M-P (۱۹۶۵)	Bishop (۱۹۶۰)	Janbu (۱۹۵۶)	Min FS
۱٫۲۷۸	۱٫۱۹۴	-	لنگر خمشی
۱٫۲۸۴	-	۱٫۱۱۴	نیروی برشی

خالی شدن پنجه، و در واقع با حذف تکیه‌گاه بخش ریزدانه‌ی توده، از زمستان سال ۱۳۸۳ شکاف‌هایی در قسمت بالادست زمین لغزش در نزدیکی محل دکل‌های برق فشارقوی ایجاد شد (شکل ۱) که به تدریج با گذشت زمان و تأثیر عواملی چون بارندگی، خاک‌برداری پاشنه و غیره در حدود شش ماه بعد، در خرداد ماه سال ۱۳۸۴ زمین لغزش بزرگ دشتگان رخ داد.

بر اثر وقوع این زمین لغزش حدود ۱/۵ میلیون متر مکعب خاک و سنگ در مدت تنها چند دقیقه به سمت پایین حرکت کرد که با صداهای مهیبی همراه بود و به صورت توده‌یی ناپایدار، ضمن مسدود کردن مسیر آزادراه در این محدوده، باعث جابه‌جایی زمین‌های کشاورزی و باغ‌های زیتون، ایجاد اختلال در امر کشاورزی و سقوط دکل برق فشارقوی در این منطقه شد. این حادثه، به‌عنوان چالشی بزرگ، منجر به عدم پیشرفت احداث آزادراه رشت - قزوین برای عبور از این ناحیه شد.

۲. تحلیل‌ها در خصوص علل وقوع زمین لغزش دشتگان

به‌منظور بررسی علل اصلی وقوع لغزش، با توجه به مقاطع موجود در حالات قبل و بعد از گودبرداری، و همچنین اطلاعات ژئوتکنیکی ارائه شده در جدول ۱ برخی آنالیزهای پایداری و برگشتی توسط نرم‌افزار Geoslope براساس روش‌های بیشاب، جانبی، مورگنسترن - پرایس در حالات گوه لغزش دایره‌یی و بلوکی انجام شد که در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.^[۳۲]

۱.۲. آنالیز مقطع قبل از گودبرداری - خاک با رطوبت طبیعی

با توجه به این که در این مرحله اطلاعات ژئوتکنیکی خاک‌ها فقط در حالت رطوبت طبیعی توسط آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و ترابری ارائه شده، انجام آنالیزهای مقطع فقط در حالت رطوبت طبیعی مقدور بود. هدف از آنالیزها در این مرحله، بررسی پایداری یا عدم پایداری توده قبل از گودبرداری بوده، لذا با مدل‌سازی مقطع توسط نرم‌افزار Geoslope و اختصاص مشخصات ژئوتکنیکی

جدول ۳. نتایج پارامترهای ژئوتکنیکی حاصل از آنالیز برگشتی - حالت اشباع.

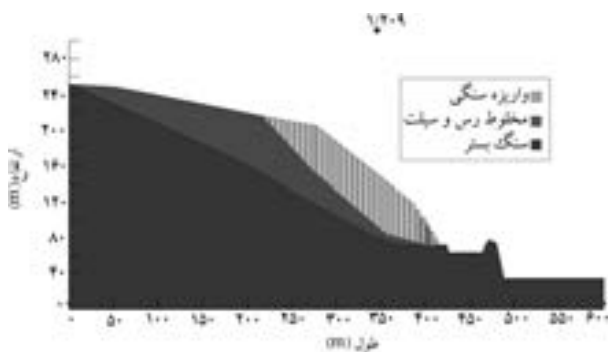
لایه	φ (درجه)	C (Kpa)
واریزه سنگی	۳۹	۰
مخلوط رس با سیلت	۱۷	۹
سنگ بستر	۲۸	۴۰۰۰

جدول ۴. ضرایب اطمینان به دست آمده از آنالیز برگشتی، بعد از گودبرداری (قبل لغزش) - حالت اشباع.

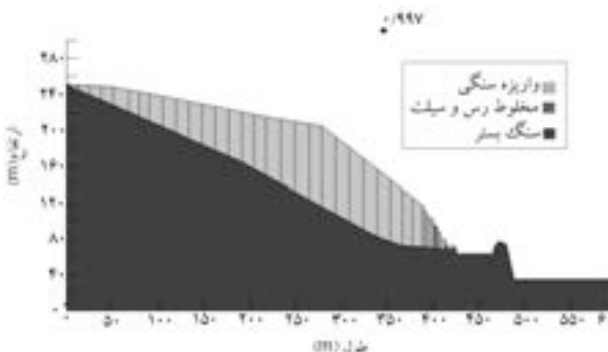
M-P (۱۹۶۵)	Bishop (۱۹۶۰)	Janbu (۱۹۵۶)	Min FS
۱٫۰۲۹	۱٫۰۴۵	-	لنگر خمشی
۱٫۰۲۸	-	۰٫۹۹۷	نیروی برشی

۴.۲. آنالیز برگشتی مقطع بعد از گودبرداری - حالت اشباع

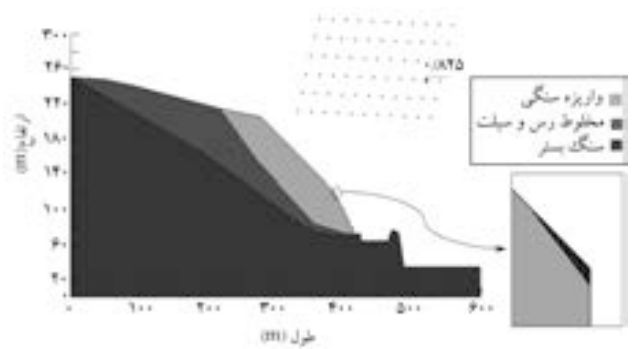
در این مرحله نیز همچون مرحله قبل با توجه به مشخص بودن ناحیه برشی و اطلاعات اولیه از پارامترهای خاک و با فرض ضخامت ناحیه برشی برابر ۵ سانتی متر، آنالیز برگشتی مقطع با اعمال سه سطح برش اجباری در محدوده ناحیه برشی صورت گرفته (شکل ۵) تا ضریب اطمینان در برابر پایداری توده محاسبه شود. چنانچه ضرایب به دست آمده در محدوده ۱ نباشد، آن قدر پارامترهای خاک را تغییر می دهیم تا توده به آستانه پایداری (FS = ۱) برسد. آنگاه پارامترهای



شکل ۴. بحرانی بودن گوه لغزش بلوکی در زیر واریزه سنگی - آنالیز برگشتی.



شکل ۵. آنالیز برگشتی مقطع با اعمال سطح لغزش اجباری در زیر مخلوط رس و لای.



شکل ۳. ناپایداری جزئی مشاهده شده در برم فوقانی زمین لغزش دشتگان بعد از گودبرداری.

بیانگر ناپایداری بخشی از توده است، اما این ناپایداری های بیشتر مربوط به محل برم ها در ناحیه یی کوچک است و علاوه بر این که ممکن است ریزش های جزئی را به همراه داشته باشد، بیانگر لزوم نصب مهارها در این مرحله از گودبرداری نیز هست. با توجه به آنچه که در واقعیت در محل توده رخ داده و وقوع رانش زمین بعد از مدت طولانی از زمان گودبرداری، این ضریب اطمینان ها در محل برم ها نمی تواند دلیل اصلی لغزش باشد. لذا بررسی سایر گوه های لغزش به طوری که بتواند بیان کننده سطح لغزش واقعی باشد، حاکی از وجود ضریب اطمینان بیش از ۱ برای توده است که کاملاً طبیعی به نظر می رسد؛ باید توجه داشت که نمی توان ریزش های جزئی در محل برم ها و متعاقباً به دست آمدن ضرایب اطمینان کم تر از ۱ برای آن ها را دلیلی بر ناپایداری کلی توده قلمداد کرد.

با توجه به این که هیچ گونه اطلاعات ژئوتکنیکی خاک ها در حالت اشباع در دسترس نبوده، ابتدا آنالیز برگشتی مقطع برای به دست آمدن مشخصات خاک ها صورت گرفته و در آخرین مرحله، مقطع فوق در حالت اشباع آنالیز شده و نهایتاً نتایج حاصله مورد مقایسه قرار گرفته است.

۳.۲. آنالیز برگشتی مقطع بعد از گودبرداری - حالت غیر اشباع

آنالیز برگشتی با توجه به فرضیات و رخدادهایی واقعی صورت گرفته است. در این مرحله با آگاهی از ناحیه ی برش خورده (گودشده) و نیز داشتن مشخصات ژئوتکنیکی خاک ها، آنالیز برگشتی مقطع انجام شد. باید توجه داشت که اگرچه ضخامت ناحیه برشی ناچیز است، این ضخامت دست کم بین ۳۰ تا ۵۰ سانتی متر خواهد بود. لذا با توجه به مشخص بودن ناحیه برشی، بعد از مدل سازی و اختصاص پارامترهای اولیه ی خاک به توده، سه سطح لغزش اجباری توسط گوه لغزش بلوکی در ناحیه ی برشی به ضخامت ۳۰ تا ۵۰ سانتی متر به خاک اعمال شد و پس از انجام آنالیز مقطع، ضریب اطمینان در برابر پایداری توده به دست آمد. چنانچه ضرایب اطمینان در برابر پایداری در محدوده ی ۱ (آستانه ی گسیختگی) نباشد، آن قدر پارامترهای خاک را در ناحیه ی برشی که در عمل رخ داده تغییر می یابد (مطابق جدول ۳) (مشروط بر آن که تغییر پارامترهای خاک بر پایه ی اصول علمی، نظیر اثر عوامل مختلف بر پارامترهای خاک باشد) تا ضرایب اطمینان به دست آمده توسط همه ی روش ها در محدوده ی ۱ باشد. اما در این مرحله شاهد بودیم که با وجود تغییرات زیاد پارامترهای خاک در ناحیه ی برشی، ضرایب اطمینان در برابر پایداری توده در محدوده ی ۱٫۲ است که از پایداری توده در حالت غیر اشباع حکایت دارد. در نهایت کمینه ضرایب اطمینان مطابق جدول ۴ ارائه شد. [۷-۴] کم ترین ضریب اطمینان در این مرحله با استفاده از روش جانبو معادل ۱٫۲۰۹ است، و مقطع بحرانی زیر واریزه سنگی است (شکل ۴).

خاک در هنگام لغزش، مطابق آخرین ویرایش پارامترها برای دست‌یابی به ضریب اطمینان ۱ بوده و می‌توان این پارامترها را با نتایج حاصل از آزمایش‌های مکانیک خاک مقایسه کرد.

از مقایسه‌ی این نتایج با پارامترهای آزمایشگاهی خاک در حالت غیراشباع و برخی پارامترهای اشباع موجود در خاک‌ها می‌توان گفت که پایداری توده در حالت خشک دور از انتظار نیست و این همان چیزی است که در محل سایت رخ داده، اما بعد از بارش و نفوذ آب باران در توده‌ی خاک، به‌خصوص در بخش ریزدانه، رانش خاک صورت گرفته است، زیرا با مقایسه‌ی بین نتایج پارامترهای اشباع خاک به دست آمده از آنالیز برگشتی (جدول ۳) و پارامترهای غیراشباع به دست آمده از آزمایشات مکانیک خاک مشاهده می‌شود که در حالت اشباع، پارامترهای مقاومت برشی در توده‌ی خاک کاهش می‌یابد؛ این کاهش پارامترها در بخش ریزدانه شدیدتر است. از طرف دیگر نتایج پارامترهای آزمایشگاهی خاک‌ها در حالت اشباع تنها در مورد برخی از خاک‌ها در اختیار بوده و مقایسه‌ی آن‌ها با نتایج حاصل از آنالیز برگشتی نشان‌گر تناسب خوب آن‌هاست. نتایج ضریب اطمینان به دست آمده توسط آنالیز برگشتی در جدول ۴ ارائه شده است.

برای بررسی بیشتر توده در این مرحله، علاوه بر ناحیه‌ی برشی که در عمل رخ داده، سطح لغزش اجباری در مرز بین واریزه سنگی و مخلوط رس و لای اعمال شد و آنالیزها با توجه به پارامترهای به دست آمده از آنالیز برگشتی در مرحله‌ی فوق صورت گرفته و کم‌ترین ضریب اطمینان در این حالت برابر ۱/۰۹ و بیش از ۱ به دست آمد. این نکته بیان‌گر آن است که محل بحرانی لغزش، همان ناحیه‌ی برشی قبلی، یعنی مرز بین رس و سنگ بستر است.

۳. راهکارهای پایدارسازی زمین‌لغزش دشتگان رودبار

بعد از بررسی علل اصلی وقوع زمین‌لغزش دشتگان رودبار، مجموعه راهکارهای پایدارسازی توده قبل از لغزش برای تسریع در مدت زمان بهره‌برداری آزاد راه و جلوگیری از هزینه‌های اضافی و همچنین بعد از لغزش به‌منظور ادامه احداث آزاد راه مورد بررسی قرار گرفت. این راهکارها شامل خاک‌برداری و سبک‌سازی از رأس توده، احداث دیوار حائل مهار شده به سنگ بستر توسط تاندون‌های کششی و دیوار حائل مهار شده به شمع‌های ثانویه نگهدارنده مستقر در بالا دست زمین‌لغزش دشتگان بوده که در ادامه مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. [۹۸]

۱.۳. خاک‌برداری و سبک‌سازی همگام با برم‌سازی

راهکار فوق با هدف حفظ مسیر مصوب و به‌عنوان متداول‌ترین روش در پایدارسازی شیروانی‌ها، با استفاده از تئوری کاهش سربار در رأس توده و کاهش عوامل ایجاد کننده تنش برشی در خاک صورت می‌گیرد. [۴] عملیات خاک‌برداری از بالای توده آغاز شده، و برای کاهش حجم عملیات خاکی و صرفه‌جویی در هزینه‌ها خاک‌برداری با ایجاد برم‌هایی با شیب ۱:۱ (قائم: افقی) صورت گرفته و می‌بایست حجم قابل ملاحظه‌ی از خاک به مکانی دیگر - در فاصله‌ی حدود ۱۰ کیلومتری از منطقه‌ی رانش یافته - انتقال پیدا می‌کرد که به لحاظ اقتصادی بسیار هزینه‌بر بود. نکته‌ی قابل توجه در مورد شکل بهینه‌ی گودبرداری و عبور از توده‌های عظیم لغزنده آن است که همانند آنچه در طبیعت رخ می‌دهد - شیب‌های ناپایدار به صورت طبیعی و به‌شکل گوه‌های سه‌بعدی با مقاطع هذلولی و دایروی تشکیل شده و پایدار می‌شوند - نحوه‌ی خاک‌برداری و برم‌سازی به‌منظور پایدارسازی توده نیز مطابق با ساختار

طبیعی منطقه به‌شکل پلکان‌های آملی‌تاتری خواهد بود که البته شکل و شیب پایدار طبیعی گودها، دلیل و توجیه علمی داشته و با مدل‌های تحلیلی سه‌بعدی قابل اثبات است.

به‌منظور بررسی پایداری مقطع نهایی راهکار فوق در این مرحله، آنالیز پایداری مقطع توسط نرم‌افزار Geoslope براساس روش تعادل حدی و روش قطعات برای تحلیل پایداری استاتیکی و شبه‌استاتیکی صورت گرفت. با توجه به این که نفوذ آب در خاک یکی از علل اصلی وقوع لغزش بوده، زهکشی سطحی توده به‌منظور جلوگیری از نفوذ آب در خاک الزامی است. آنالیزهای پایداری مقاطع در حالت غیر اشباع با استفاده از پارامترهای ژئوتکنیکی مندرج در جدول ۱ بررسی شده است.

آنالیز پایداری مقطع ابتدا در حالت استاتیکی با برداشت خاک از رأس توده تا رسیدن به ضریب اطمینان لازم براساس معیارهای ژئوتکنیکی ($FS = 1/5$) انجام شد و سپس به دلیل فعالیت لرزه‌خیزی شدید در منطقه، آنالیز شبه‌استاتیکی مقطع براساس زلزله‌ی مبنای طرح - یعنی زلزله‌ی ۳۱ خرداد سال ۶۹ رودبار - انجام شد. ضریب شتاب افقی زلزله (K_h) مورد استفاده در تحلیل‌های نرم‌افزاری براساس آیین‌نامه‌های معتبر اروپایی و نیز آیین‌نامه‌ی ۲۸۰ ایران معادل نصف بیشینه شتاب حرکت زمین و با توجه به زلزله‌ی ۷/۲ ریشتری ۳۱ خرداد سال ۶۹ رودبار برابر $g/175$ است. [۱۰-۱۱] بعد از انجام آنالیزهای پایداری در شرایط استاتیکی و شبه‌استاتیکی، سطوح لغزش بحرانی (شکل ۶) و نتایج ضرایب اطمینان برای قبل و بعد از لغزش (جدول ۵) ارائه، و میزان حجم خاک‌برداری مورد نیاز به‌منظور رسیدن به پایداری در حالات قبل و بعد از لغزش محاسبه شد که حاکی از ضرورت برداشت حدود ۶۵ درصد خاک روی سنگ بستر در زمان قبل لغزش و حدود ۷۵ درصد خاک در زمان بعد از لغزش است که با توجه به حرکت توده به سمت جلو بعد از رانش حجم عملیات خاکی در حدود ۱۰ درصد افزایش یافت.

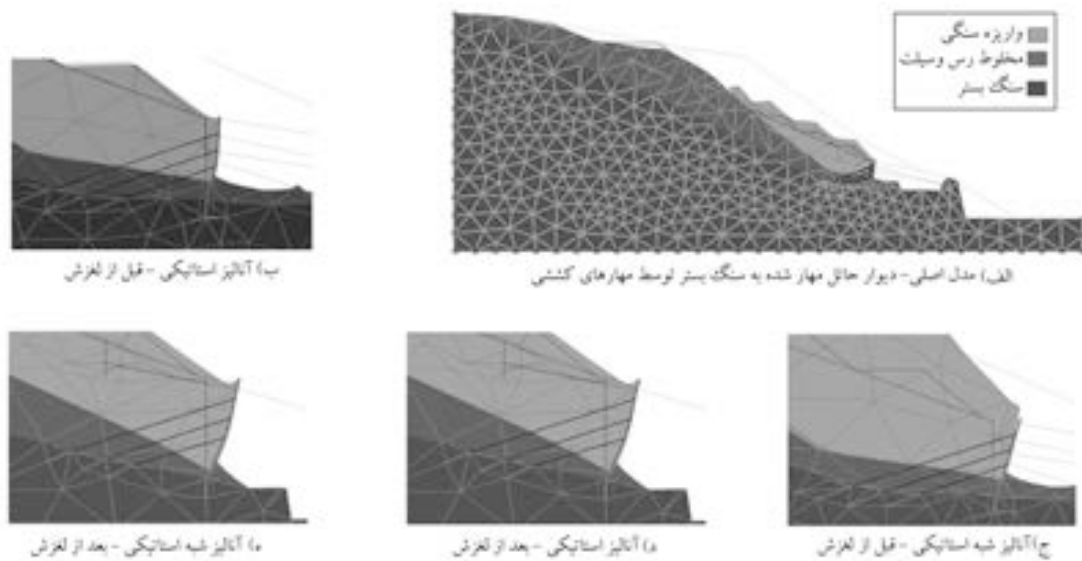
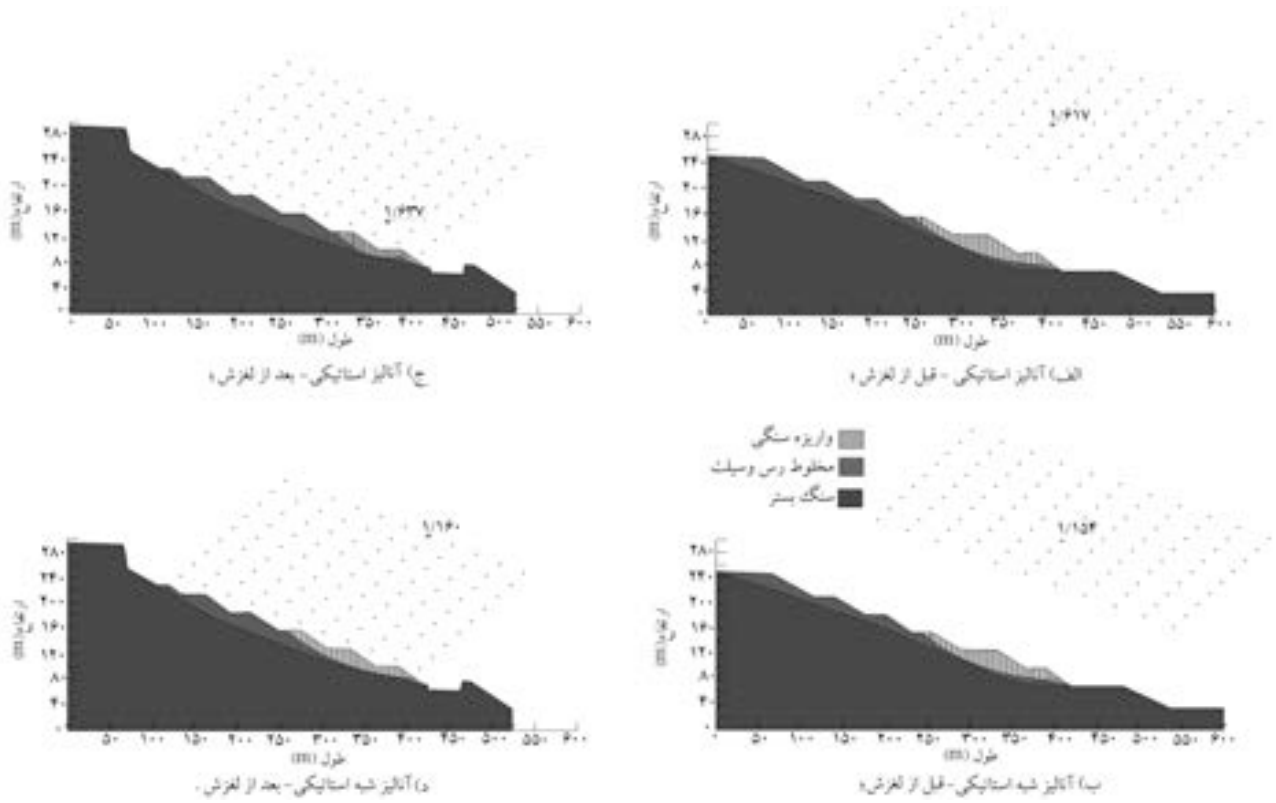
۲.۳. احداث دیوار حائل مهار شده به سنگ بستر توسط مهارهای کششی

به دلیل حجم زیاد خاک رانش‌یافته در واحد عرض و اعمال نیروهای رانشی بسیار زیاد در سطوح لغزش بحرانی و از سوی دیگر کاهش قابل ملاحظه‌ی حجم عملیات خاکی نسبت به راهکار قبلی، پایدارسازی توده توسط دیوارهای حائل صلب سازه‌ی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این روش به‌منظور کاهش طول دیوار و دست‌یابی به طول قابل اجرای آن، ابتدا بخشی از خاک در محل احداث دیوار حائل برداشته شده و سپس دیوار حائل صلب ایجاد می‌شود. در مرحله‌ی بعد برای تکمیل احداث آزادراه، برداشت خاک جلوی دیوار ضرورت می‌یابد که این امر باعث کاهش نیروهای مقاوم و افزایش جابه‌جایی انتهای فوقانی دیوار می‌شود. لذا برای مقابله با جابه‌جایی‌های غیر مجاز انتهای فوقانی دیوار و واژگونی دیوار در برخی مقاطع، مهارسازی دیوار توسط مهارهای کششی لازم است، به طوری که در مرحله‌ی قبل از رانش حدود یک‌سوم دیوار و در مرحله‌ی بعد از رانش کل دیوار نیاز به مهارسازی دارد. نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی راهکار پیشنهادی فوق، برای پایدارسازی توده در مراحل قبل و بعد از رانش، و تغییر شکل‌های حاصل از آن‌ها به ترتیب در شکل ۷ و جدول ۶ نشان داده شده است.

نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی مطابق شکل‌های ۸ و ۹ برای قبل و بعد لغزش نشان می‌دهد که ارتفاع میانگین دیوار برای رسیدن به پایداری، قبل از رانش بین ۱۶ تا ۱۸ متر و بعد از رانش - با افزایش حدود ۲۵ درصد - به ۲۰ تا ۲۲

جدول ۵. ضرایب اطمینان به دست آمده از آنالیز پایداری مقطع برای خاک برداری توده.

بعد از لغزش				قبل از لغزش				نوع تحلیل	
Ordinary	Bishop	Janbu	M-P	Ordinary	Bishop	Janbu	M-P		
۱٫۶۲۴	۱٫۷۰۸	-	۱٫۷۰۶	۱٫۶۲۳	۱٫۶۷۱	-	۱٫۶۷۳	آنالیز استاتیکی	لنگر خمشی
-	-	۱٫۶۳۷	۱٫۷۰۵	-	-	۱٫۶۱۷	۱٫۶۷۳		نیروی برشی
۱٫۱۶۷	۱٫۲۱۱	-	۱٫۲۱۳	۱٫۱۶۲	۱٫۲۰۷	-	۱٫۲۱۷	آنالیز شبه استاتیکی	لنگر خمشی
-	-	۱٫۱۶۰	۱٫۲۱۴	-	-	۱٫۱۵۴	۱٫۲۳۳		نیروی برشی



جدول ۶. نتایج خروجی تحلیل‌های عددی - دیوار حائل مهارشده به سنگ بستر توسط مهارهای کششی.

پارامتر مورد مطالعه		قبل از لغزش		بعد از لغزش	
تحلیل استاتیکی	تحلیل شبه استاتیکی	تحلیل استاتیکی	تحلیل شبه استاتیکی	تحلیل استاتیکی	تحلیل شبه استاتیکی
۵۹ mm	۴۴۵ mm	۶۶ mm	۹۳۴ mm	بیشینه جابه‌جایی در توده‌ی خاک	
۳۱ mm	۶۹ mm	۶۶ mm	۱۶۹ mm	بیشینه جابه‌جایی در انتهای فوقانی شمع	
۲۳۵ ton	۱۰۵ ton	۳۶۳ ton	۲۰۸ ton	نیروی محوری شمع‌ها	
۱۷۱ ton	۲۳۹ ton	۲۱۷ ton	۲۴۷ ton	نیروی برشی شمع‌ها	
۴۵۲ ton-m	۵۶۲ ton-m	۶۵۳ ton-m	۷۶۷ ton-m	لنگر خمشی شمع‌ها	
۶۲٫۴ ton	۸۲٫۹ ton	۸۱٫۹ ton	۱۴۲٫۲ ton	نیروی محوری مهارها	
۱٫۶۵	۱٫۳۲	۱٫۵۲	۱٫۵۱	ضریب اطمینان در برابر پایداری توده	

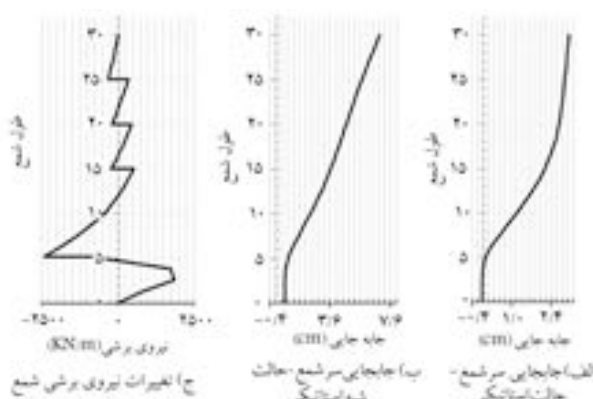
۳.۳. احداث دیوار حائل مهارشده به شمع‌های نگهبان مستقر در

قسمت فوقانی

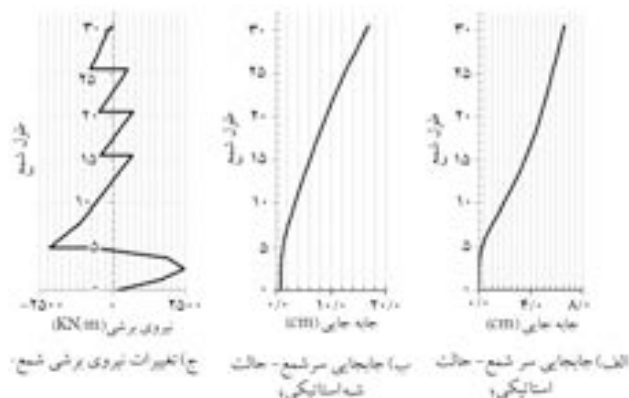
این راهکار ضمن کاهش قابل ملاحظه‌ی حجم عملیات خاکی به‌منظور مقابله با مشکل نصب مهارهای کششی با طول زیاد بررسی شد. تفاوت اصلی آن با راهکار قبلی، نوع سیستم اتخاذشده برای جلوگیری از جابه‌جایی‌های غیرمجاز انتهای فوقانی دیوار است. در این روش مجدداً بخشی از خاک بالای توده به‌منظور دست‌یابی به طول اجرایی دیوار برداشته شده و سپس بعد از حفاری اقدام به احداث سازه‌ی دیوار حائل می‌شود. برای جلوگیری از جابه‌جایی‌های غیرمجاز انتهای فوقانی دیوار، ابتدا یک سری شمع‌های کوتاه در بالادست زمین‌لغزش دشتگان مستقر شده و برای سپس دیوار حائل اصلی توسط ناندون‌های کششی به آن‌ها مهار می‌شود. برای بررسی پایداری هر یک از مراحل اجرایی راهکار پیشنهادی فوق، مدل‌سازی مقطع با تقسیم‌بندی آن به فازهای مختلف اجرایی انجام شد. سپس بعد از بررسی پایداری هر یک از مراحل اجرایی در حالت استاتیکی، آنالیز پایداری شبه‌استاتیکی آخرین مرحله‌ی اجرایی مقطع با اعمال ضریب شتاب افقی برابر $g/1.75$ انجام شد، که نتایج حاصل از تغییر شکل‌های ناشی از آنالیزهای پایداری در شکل ۱۰ و خروجی نیروهای المان‌های سازه‌ی در جدول ۷ برای مراحل قبل و بعد از لغزش آمده است.^[۱۲]

مجدداً تغییر شکل‌های داخلی توده و همچنین انتهای فوقانی دیوار مطابق اشکال ۱۱ و ۱۲ در حالت شبه‌استاتیکی بیش از حالت استاتیکی بود، اما جابه‌جایی انتهای فوقانی دیوار، با مهارسازی آن به زیر ۱٪ ارتفاع دیوار کنترل شده است. از سوی دیگر با توجه به حرکت توده بعد از رانش به سمت جلو و از بین رفتن بافت سیمانی خاک، میزان جابه‌جایی انتهای فوقانی دیوار و همچنین نیروها و لنگرهای داخلی المان‌های سازه‌ی افزایش یافته است.

طول میانگین دیوار برای پایداری‌سازی توده در مراحل قبل و بعد از لغزش و همچنین میزان حجم عملیات خاکی ثابت نگه داشته شد، و فقط نحوه‌ی مهارسازی تغییر یافت، به‌طوری‌که طول میانگین شمع‌های ثانویه برای مهارسازی دیوار حائل در زمان قبل لغزش در حدود ۶٫۵ متر و بعد از لغزش دشتگان حدود ۶ تا ۸ متر بوده و ارتفاع متوسط مهارها بین دیوار حائل و شمع‌های ثانویه در زمان‌های قبل و بعد از لغزش به ترتیب حدود ۷ و ۸٫۵ متر بوده است.



شکل ۸. نمودارهای تغییر شکل و نیروی برشی دیوار حائل (شمع)، قبل از لغزش.

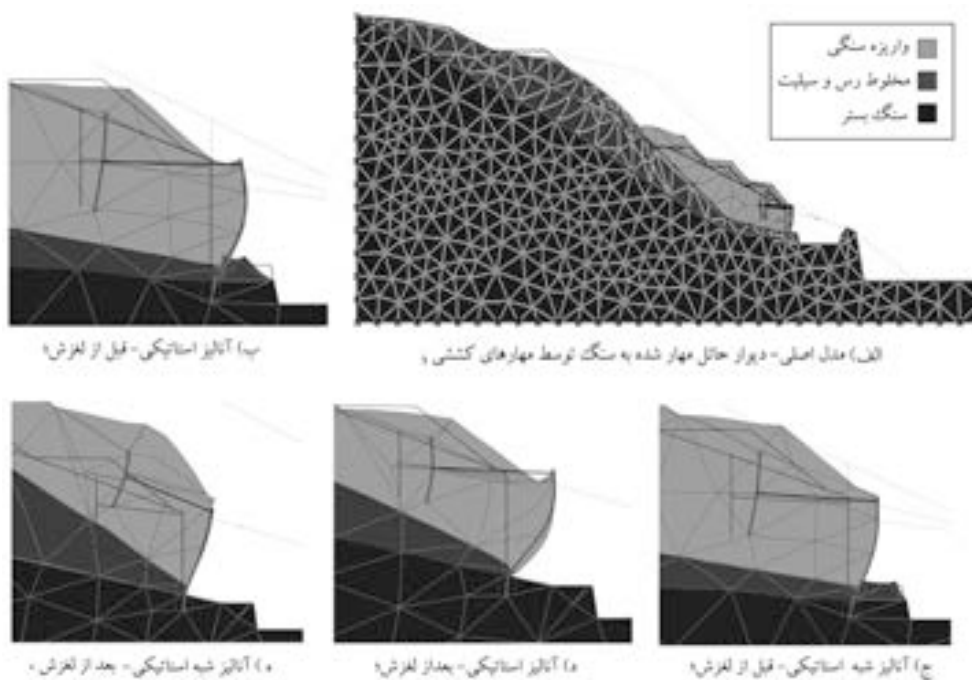


شکل ۹. نمودارهای تغییر شکل و نیروی برشی دیوار حائل (شمع)، بعد از لغزش.

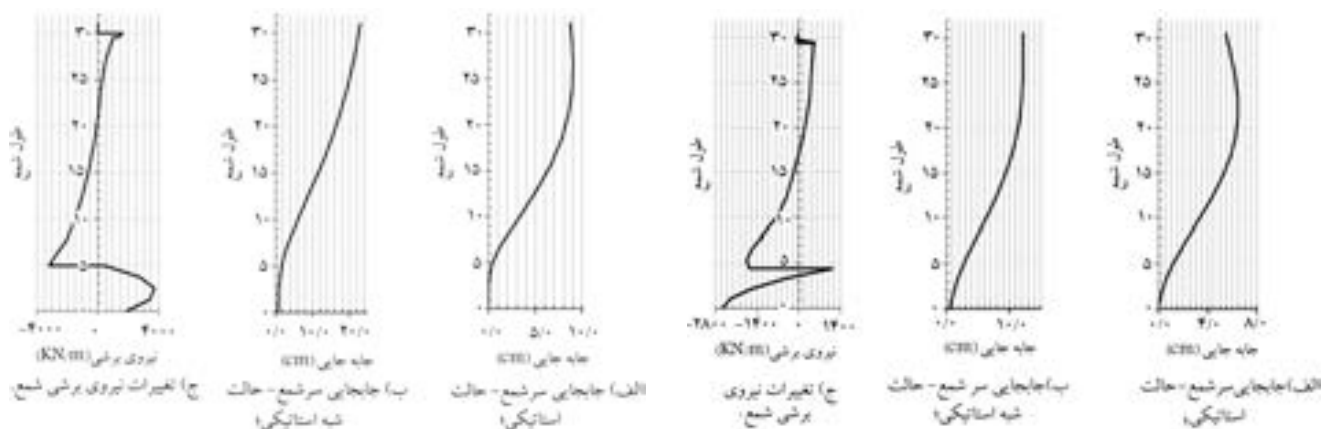
متر رسیده و ضخامت دیوار نیز ۱٫۵ متر است. یکی از معضلات اصلی این راهکار طول زیاد مهارهاست که بین ۳۵ تا ۵۰ متر است و با توجه به ناپایداری بیشتر توده بعد از رانش، نصب مهارها برای کنترل جابه‌جایی‌ها با مشکلات جدی‌تری مواجه است. همان‌طور که بیان شد، هدف از بررسی این راهکار کاهش قابل ملاحظه‌ی حجم عملیات خاکی و رساندن آن به حدود نصف مقدار قبلی است.^[۱۲]

جدول ۷. نتایج خروجی تحلیل‌های عددی دیوار حائل مهارشده به شمع‌های نگهبان مستقر در قسمت فوقانی.

بعد از لغزش		قبل از لغزش		پارامتر مورد مطالعه
تحلیل شبه استاتیکی	تحلیل استاتیکی	تحلیل شبه استاتیکی	تحلیل استاتیکی	
۹۳° mm	۹۳ mm	۴۴۸ mm	۶۷ mm	بیشینه جابه‌جایی در توده‌ی خاک
۲۳° mm	۹° mm	۱۲۲ mm	۶۴ mm	بیشینه جابه‌جایی در انتهای فوقانی شمع
۴۴۴ ton	۲۴۱ ton	۱۵۰ ton	۱۶۹ ton	نیروی محوری شمع‌ها
۳۷° ton	۳۲۴ ton	۲۵۶ ton	۱۹۱ ton	نیروی برشی شمع‌ها
۱۴۱۴ ton-m	۱۰۴۴ ton-m	۶۲° ton-m	۴۹۳ ton-m	لنگر خمشی شمع‌ها
۱۶۳٫۸ ton	۵۷٫۹ ton	۵۹٫۵ ton	۵۸٫۴ ton	نیروی محوری مهارها
۱٫۴°	۱٫۴۵	۱٫۲۱	۱٫۶°	ضریب اطمینان در برابر پایداری توده



شکل ۱۰. مش تغییر شکل یافته بعد از آنالیزهای پایداری.



شکل ۱۱. نمودارهای تغییر شکل و نیروی برشی دیوار حائل (شمع)، قبل از لغزش. شکل ۱۲. نمودارهای تغییر شکل و نیروی برشی دیوار حائل (شمع)، بعد از لغزش.

۴. بحث و مقایسه

برای حذف این مشکل راهکار سوم یعنی مهارسازی دیوار حائل به شمع‌های ثانویه مستقر در قسمت فوقانی توده پیشنهاد شد. در نهایت با ملاحظات فنی، اقتصادی و اجرایی راهکار سوم به‌عنوان گزینه‌ی برتر در مراحل قبل و بعد لغزش تشخیص داده شد. چنان که اشاره شد هدف از راهکارهای پایدارسازی توسط سیستم‌های حائل صلب مقابله با حجم عملیات خاکی بالا بود که در این راستا با کاهش حدود ۵۰ درصدی حجم عملیات خاکی مواجه شد.

نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی برای بررسی علل اصلی وقوع لغزش نشان داد که توده‌ی دشتگان قبل از گودبرداری در حالت اشباع و غیراشباع، با توجه به پایدار بودن آن در طول سالیان دراز، پایدار است. در ادامه برای بررسی علل اصلی وقوع لغزش، پایداری توده بعد از گودبرداری در حالت خاک با رطوبت طبیعی تحلیل شد؛ نتایج حاصله حاکی از ناپایداری جزئی در محل برم فوقانی با ضریب اطمینان ۰/۸۹۶ بوده، اما نمی‌تواند دلیل اصلی وقوع زمین‌لغزش دشتگان باشد. از سوی دیگر با توجه به مشخص بودن ناحیه‌ی برش‌خورده، آنالیز برگشتی مقطع بعد از گودبرداری حاکی از پایدار بودن مقطع در ناحیه‌ی برشی در شرایط خاک با رطوبت طبیعی بوده است. این بدان معناست که گودبرداری و حذف تکیه‌گاه بخش ریزدانه نمی‌تواند به‌تنهایی علل اصلی وقوع لغزش باشد. آنالیز برگشتی مقطع در شرایط خاک اشباع نشان داد که تراوش آب در بخش ریزدانه تأثیر به‌سزایی در ناپایداری توده داشته است اما به دلیل پایداری مقطع قبل از گودبرداری در حالت اشباع می‌توان گفت که عامل اصلی رانش، نفوذ آب در خاک و کاهش شدید پارامترهای مقاومتی بخش ریزدانه‌ی خاک، و حذف تکیه‌گاه آن بر اثر گودبرداری بوده هرچند عواملی همچون گسل‌ها و شکستگی‌ها و سنگ‌شناسی سست منطقه و از سوی دیگر هم‌راستایی مسیرهای زهکشی منطقه با جهت لغزش از دیگر عوامل تأثیرگذار در وقوع زمین‌لغزش دشتگان است.

۵. نتیجه‌گیری

زمین‌لغزش دشتگان رودبار، در منطقه‌ی کوهستانی آزادراه رشت - قزوین به وقوع پیوست. جنس مصالح در بخش فوقانی توده، ترکیبی از سنگ و خاک بوده که بر روی لایه‌ی از مخلوط رس و لای مستقر بر سنگ بستر قرار دارد. این مسیر قبل از گودبرداری کاملاً پایدار بوده، اما با ایجاد برش و خالی‌شدن پنجه و در واقع حذف تکیه‌گاه بخش ریزدانه‌ی توده، از زمستان سال ۱۳۸۳ با ایجاد شکاف‌هایی در قسمت بالادست زمین‌لغزش، حدود شش ماه بعد، در خردادماه سال ۱۳۸۴ زمین‌لغزش بزرگ دشتگان رخ داد.

نتایج حاصل از آنالیزهای پایداری، حاکی از پایداری توده در حالت غیراشباع در زمان‌های قبل و بعد از گودبرداری بود، اما نتایج حاصل از آنالیز برگشتی در حالات اشباع و غیراشباع نشان داد که ناحیه‌ی برش‌خورده، مرز بین رس و سنگ بستر بوده و علت اصلی رانش، تراوش آب در بخش ریزدانه (کاهش شدید پارامترهای مقاومت برشی بخش ریزدانه) و حذف تکیه‌گاه بخش ریزدانه بر اثر گودبرداری است. احداث دیوار حائل صلب مهارشده به شمع‌های کوتاه‌تر مستقر در بالادست توده (دیوار حائل پشت‌بنددار)، گزینه‌ی برتر برای پایدارسازی توده است، زیرا از یک سو نسبت به گزینه‌ی اول، با کاهش حدود ۵۰ درصدی حجم عملیات خاکی و حمل آن به خارج منطقه مواجه است و از سوی دیگر با توجه به عمیق بودن سطح لغزش و فاصله‌ی زیاد بین سطح فوقانی توده و سنگ بستر از حفاری‌های عمیق به‌خصوص در سنگ بستر و اجرای مهارهای با طول ۳۵ تا ۵۰ متر جلوگیری شده و موجب صرفه‌جویی زیاد اقتصادی می‌شود. ارتفاع دیوارهای حائل صلب در زمان قبل از رانش بین ۱۶ تا ۱۸ متر بوده و بعد از رانش با افزایش حدود ۲۵ درصد به ۲۰ تا ۲۲ متر می‌رسد، اما میزان حجم عملیات خاکی به نصف کاهش یافته است. بهترین زمان برای پایدارسازی توده، قبل از احداث آزادراه و قبل از رانش توده بوده، زیرا از ایجاد وقفه‌ی طولانی در احداث آزادراه و بهره‌برداری آن، و نیز هزینه‌های اضافی به‌وجود آمده به‌طور چشمگیری جلوگیری می‌شود.

با توجه به این که نفوذ آب در توده‌ی خاک یکی از عوامل اصلی وقوع لغزش است، زهکشی سطحی برای ممانعت از ورود آب در داخل توده‌ی خاک، مکمل راهکارهای پیشنهادی برای پایدارسازی توده است. بهترین زمان برای پایدارسازی توده قبل از وقوع رانش است، زیرا از ایجاد وقفه‌ی طولانی در روند اجرایی احداث آزادراه رشت - قزوین جلوگیری می‌کند.

برای پایدارسازی توده ابتدا گزینه‌ی خاک‌برداری و برم‌سازی بررسی شد، اما با توجه به شرایط خاص پروفیل لایه‌های توده‌ی خاک، میزان حجم عملیات خاکی در حالت قبل و بعد از لغزش به ترتیب ۶۵ و ۷۵ درصد خاک روی سنگ بستر بود. به دلیل بالا بودن حجم عملیات خاکی، راهکارهای پایدارسازی توده توسط سیستم‌های حائل صلب سازه‌ی مورد بررسی قرار گرفت. برای کنترل تغییر مکان‌های این سیستم‌ها و همچنین اقتصادی‌کردن نوع سیستم پایداری‌کننده، مهارسازی آن توسط تاندون‌های کششی به سنگ بستر و به شمع‌های نگهبان ثانویه مستقر در قسمت فوقانی توده مورد ارزیابی قرار گرفت، به طوری که مهارسازی توسط تاندون‌های کششی به سنگ بستر مشکلات اجرایی نصب مهارهای با طول زیاد به‌خصوص بعد از رانش مواجه شد.

منابع

۱. خسروتهرانی، خسرو «چینه‌شناسی پرکامبرین و پالئوژئیک»، جلد اول، مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران (۱۳۶۴).
۲. کمک پناه، علی «پایدارسازی شیب‌ها»، مؤسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، چاپ اول (۱۳۷۳).
3. Brand, E.N. "Stabilization of deep cuts in unstable

slopes" Proc. Fifth International Symposium on Landslides. pp. 867-872 (1988).

4. Cornforth, D.H. "Landslides in practice", John Wiley & Sons, Inc (2005).

5. Farooq, K.; Orense, R.P. and Towhata, I. "Evaluation of shear strength parameters for rain-induced slope instabilities", 16th International Conference on Soil Me-

- chanics and Geotechnical Engineering (16ICSMGE), pp. 2511-2514 (2005).
6. Schuster, R.L. and Krizek, R.J. "Landslides, analysis and control", Transportation Research Board, National of Sciences, Washington, Special Report 176 (1978).
 7. Zaruba, Q. and Mencl, V. "Landslide and their control", *Printed in Czechoslovakia, 2 th, 3* (1982).
 ۸. اسلامی، ابوالفضل «مهندسی پی، طراحی و اجرا»، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران، چاپ اول (۱۳۸۵).
 ۹. کمک پناه، علی؛ منتظر قائم، سعید و چدنی، امیرجعفر، «روش‌های تحلیلی در ارزیابی پایداری شیب‌های طبیعی»، جلد سوم پهنه‌بندی زمین لغزه در ایران، موسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، چاپ اول (۱۳۷۱).
 ۱۰. «آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله - استاندارد ۲۸۰۰»، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران، ویرایش دوم، چاپ چهاردهم (۱۳۸۲).
 11. Ingles, J.; Darrozes, J. and Soula, J. "Effects of the vertical component of ground shaking on earthquake-induced landslide displacements using generalized Newmark analysis", *Engineering Geology*, **86**, pp.134-147 (2006).
 12. Ketan, H.; Trivedi, P.E. and Anthony Mazzo, P.E. "Secant pile walls-design, construction and case history", 31st Annual Conference on Deep Foundations, Washington, DC (2006).
 13. Nimbalkar, S. and Choudhury, D. "Sliding stability and seismic design of retaining wall by pseudo-dynamic method for passive case", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **27**, pp. 497-505 (2007).