مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
پاییز و زمستان ۱۳۸۷، جلد اول، شماره ۳ و ٤، صفحه ۲۵ تا ۳٤

تثبیت زمین لغزش‌های خاکی با فن‌آوری SLS

محمدهادی داودی*[۱] وحید احدی‌عالی [۲]

دریافت مقاله : ۸۸/۷/۱۳ پذیرش مقاله : ۸۹/۳/۵

چکیده:

صرف‌نظر از معیارهای زیست‌محیطی، یکی از نکات مهم در تثبیت توده‌های لغزشی، اقتصاد مهندسی طرح است به نحوی که هزینه‌های اجرایی باید با ارزش اقتصادی توده و یا اهمیت کاربری آن هماهنگی داشته باشد. روش‌های رایج در تثبیت زمین لغزش‌ها عمدتاً پر هزینه بوده و برای توده‌های واقع در اراضی کشاورزی و منابع طبیعی فاقد توجیه اقتصادی می‌باشد. در این تحقیق سعی شده کاربرد تکنیک استفاده از محلول اشباع آهک saturated lime solution (SLS) که در سال‌های اخیر برای تقویت مقاومت برشی خاک‌ها ارائه شده است، در تثبیت توده‌های لغزشی خاکی مورد ارزیابی قرار گرفته و متدولوژی آن تدوین گردد.

در این مقاله، ضمن تشریح و بررسی کامل مراحل مختلف پژوهش شامل بررسی‌های صحرایی زیرسطحی، آزمایش‌های آزمایشگاهی، تهیه مدل عددی و تلفیق، نتایجی که در مورد یک توده لغزشی حاصل شده، مورد بحث و ارزیابی قرار می‌گیرد. در اولین مرحله، پس از شناخت لایه‌بندی توده، ویژگی‌های مقاومتی و مکانیکی خاک اندازه‌گیری و مقدار لازم برای افزایش مقاومت برشی خاک تعیین می‌گردد. در مرحله بعدی به کمک مدل‌های عددی، شرایط لازم برای پایدار شدن توده جستجو شده و بر اساس آن میزان SLS (محلول اشباع آهک) مورد نیاز محاسبه و به کمک مدل‌های عددی نحوه وارد کردن آن به خاک تعیین می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که این تکنیک در پروژه‌های عمرانی قابل استفاده بوده و با توجه به کم بودن هزینه‌های آن در مقایسه با روش‌های معمول، می‌تواند به عنوان یک گزینه قابل رقابت در فعالیت‌های تثبیت زمین لغزش مورد توجه جدی قرار گیرد.

کلید واژه‌ها: *تثبیت زمین لغزش، جریان در محیط متخلخل، مقاومت برشی، محلول اشباع آهک، مدل عددی*

۱- استادیار مرکز تحقیقات کم‌آبی و خشکسالی davoudi_h@yahoo.com
۲- کارشناس ارشد خاک و پی
* مسئول مکاتبات

مقدمه

در بسیاری از نقاط ایران به دلیل شرایط خاص زمین‌شناختی، توپوگرافی و آب و هوائی، خسارات قابل توجهی از بروز زمین لغزش گزارش می‌شود. برهم زدن گستره سیستم آب و خاک در طبیعت، تخریب جاده‌ها، بزرگراه‌ها، مناطق مسکونی، خطوط انتقال انرژی، سازه‌های مهندسی، تخریب پوشش گیاهی و زمین‌های کشاورزی، رسوب‌زائی سریع و وسیع در عرصه طبیعت، تسریع فرسایش و انتقال گسترده رسوبات به پشت سدها از جمله خسارات و خطرات مستقیم ناشی از این پدیده طبیعی است. روش‌های متعددی مانند تزریق، تزریق به صورت جت، شمع کوبی، زهکشی، انجماد، دیواره‌سازی و... برای تثبیت توده‌های ناپایدار انجام می‌شود. در توده‌های لغزشی و بزرگ مانند اراضی کشاورزی و یا اراضی بدون استفاده که از نظر اقتصادی، اجتماعی و... فاقد اهمیت باشند، استفاده از این روش گران‌قیمت بوده و از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نیست. استفاده از آهک به روش اختلاط خشک ویا دوغاب، علیرغم این که توسط بسیاری از محققین مانند Dallas et ،Rao & Shivananda (2005)، Puppala et. al. (2003) al. (2001)، Dallas (2000)، فرزانه و مصدق (۱۳۸٦) و تعداد زیادی از پژوهشگران دیگر برای خاک‌های ریزدانه توصیه شده است اما به دلیل عدم امکان جابجایی مصالح توده، قابل اجرا نیست. مطابق پژوهش انجام شده توسط داودی (۱۳۸٦) در صورتی آهک در آب حل شده و به صورت محلول اشباع آهک (saturated lime solution) از خاک عبور داده شود، موجب افزایش زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی آن می‌گردد. الوندکوهی(۱۳۸۵) میزان تأثیر حجم محلول اشباع آهک (SLS) بر دو پارامتر فوق را از طریق تهیه و اجرای مدل فیزیکی فرموله نمود. وی واحد حجم محلول عبوری را حجم خلل و فرج خاک (V_v)انتخاب نموده و نرخ افزایش زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی را به ازای واحد حجم محلول عبوری اندازه‌گیری کرد.

تحقیق حاضر روش جدیدی برای تثبیت توده‌های خاکی ناپایدار معرفی می‌نماید که مبتنی بر استفاده از SLS است. در این مقاله ضمن ارائه متدولوژی این فن‌آوری جدید، معایب و محاسن آن را به چالش می‌کشاند.

روش تحقیق

فن‌آوری جدیدی که در این تحقیق ارائه می‌شود مبتنی بر کاوش‌های زیرسطحی صحرایی، آزمایش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی توده می‌باشد. در این روش، انجام مطالعات ژئوفیزیکی و حفاری‌های ژئوتکنیکی به منظور شناخت توپوگرافی سنگ کف، ضخامت توده خاکی، لایه‌بندی و جنس لایه‌های خاک، اخذ نمونه‌های دست نخورده و به طور کلی شناسایی ساختار توده و لایه یا لایه‌های ضعیف ضروری می‌باشد. آزمون‌های آزمایشگاهی شامل تعیین رده خاک و ویژگی‌های رفتاری آن شامل دانسیته، رطوبت طبیعی، نفوذپذیری و مقاومت برشی آن در حالت طبیعی به روش برش مستقیم و یا سه محوری انجام می‌شود. هم‌چنین برای اصلاح توده بایستی آزمایش‌های آزمایشگاهی ویژۀ "تغذیه خاک با محلول اشباع آهک(SLS)" و آزمایش‌های مقاومت برشی برای تعیین رابطه "حجم محلول– مقاومت خاک" انجام شود. نتایج حاصل از این دو مرحله در تهیه مدل عددی مکانیکی و هیدرولیکی توده برای قبل، حین و پس از بهسازی استفاده می‌شود تا به کمک آن طرح اصلاح توده تعیین‌گردد.

در این مقاله نتایج انجام مراحل فوق در مورد زمین لغزش دنبلید شرقی ارائه و به بحث گذاشته می‌شود.

SLS که حاوی یون کلسیم است شفافیتی نزدیک به آب داشته و لذا نفوذ آن به خاک موجب انسداد حفرات خاک نمی‌شود. بنا بر گزارش داودی و همکاران (۱۳۸٦) نفوذ این محلول در طی مدت شصت روز هیچ تأثیری بر نفوذپذیری خاک نداشته است و لذا بدون استفاده از تجهیزات خاص و صرفاً تحت اثر نیروی ثقل به سهولت به توده وارد می‌شود. نحوۀ وارد نمودن SLS به توده، تابع لایه‌بندی توده است. چنانچه لایه ضخیمی در اعماق توده وجود داشته باشد که موجب ناپایداری توده شده و سطح یا ناحیه گسیختگی در آن متمرکز شده باشد، SLS از طریق حفر چندین حلقه چاه در عمق مورد نظر در دسترس لایه قرار داده می‌شود و در

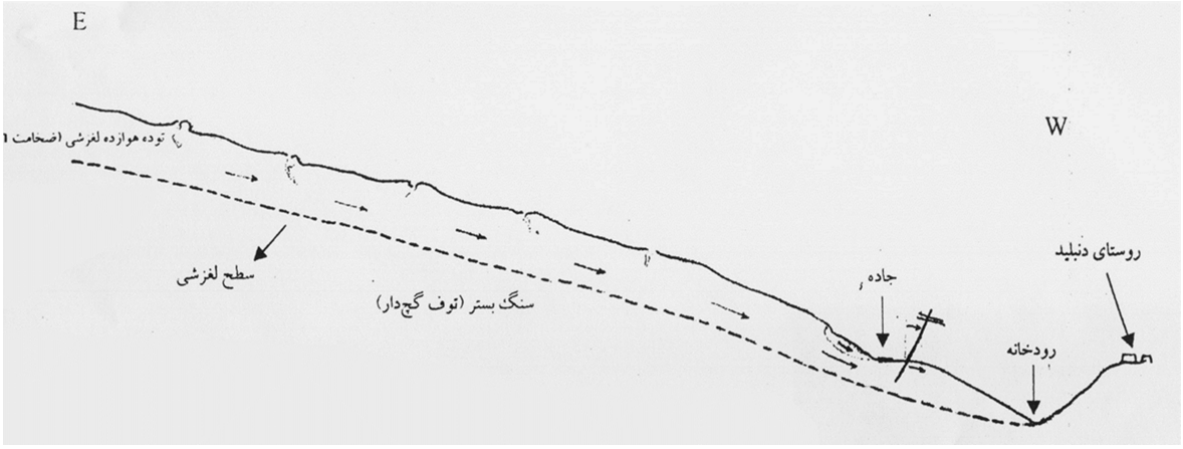
صورتی که تمامی توده ضعیف باشد، ترانشه‌هایی در امتداد خطوط تراز حفر و SLS در آنها ریخته شده تا به تمامی سطح و عمق توده نفوذ نماید.

معرفی ساختگاه

توده دنبلید شرقی، توده ناپایدار و فعالی است که در مجاورت روستای دنبلید در منطقه طالقان واقع شده است. طول گسیختگی توده مذکور حدود یک کیلومتر و عرض آن بیش از یک کیلومتر می‌باشد. در ربع انتهایی این توده، جاده آسفالته دسترسی به روستا قرار دارد و انتهای آن به یک آبراهه فرعی ختم می‌شود.

حرکت این توده ناپایدار از شرق به غرب و تا پایین‌دست جاده آسفالته دسترسی به روستای دنبلید ادامه دارد و این جاده را نیز با جابه‌جایی‌های تدریجی مواجه کرده است. این توده خزشی فاقد دیواره لغزشی است و به‌صورت مسطوی یا انتقالی عمل کرده و اسکارپ شاخصی در آن دیده نمی‌شود، اما آثار حرکت بطئی و تدریجی به صورت ترک‌های کششی که در سراسر توده عمود بر جهت حرکت گسترش یافته است ناپایداری توده را تأیید می‌نماید. هم‌چنین امواج و ترک‌های ایجاد شده در مسیر جاده و یا کج شدگی تیرهای برقی که در توده قرار گرفته‌اند و در عکس نیز به خوبی نمایان است مؤید فعالیت خزشی و بسیار تدریجی توده است (داودی و همکاران، ۱۳۸٤). شکل۱ پروفیل زمین‌شناسی توده را نمایش می‌دهد.

زمین‌لغزش دنبلید جنوب‌شرقی به صورت یک کانال بسیار عریض عمل نموده که در داخل آن قشر هوازده نهشته‌های ریزدانهٔ مارن توفی و گچی رو به پائین دست و در جهت نیروی ثقل بر اثر افزایش فشار آب حفره‌ای، حرکت می‌کند و به پایین دامنه به سمت آبراهه منتقل می‌شود. پی این توده که نقش کانال را ایفا می‌نماید، نهشته‌های مارن و توفی غیر آلتره است. این لغزش بعد از بارندگی‌های شدید و افزایش حساسیت خاک ریزدانه توفی، فعال می‌شود و از آنجایی‌که در مسیر حرکت خود در هیچ نقطه‌ای شیب زمین با کاهش زیاد مواجه نیست، این حرکت تا جاده و سپس رودخانه ادامه می‌یابد. در این لغزش، خاک دامنه، مشخصات مکانیکی ماده‌ای خمیرسان را دارا است و تمام بخش‌های خاک نسبت به هم جابه‌جایی حاصل می‌کنند. بارگذاری ناشی از تأثیر زمین لرزه، حرکت این توده را در شرایط مساعد و وجود فشار آب حفره‌ای کافی، سرعت می‌بخشد. فعالیت زمین‌لغزش دنبلید جنوب‌شرقی از نظر طبقه‌بندی لغزش‌ها، نوعی خزش به حساب می‌آید. تغییر شکل در این لغزش تند نیست و به آرامی انجام می‌شود. ضخامت آن کم ولی منطقه وسیعی را پوشانده است. این لغزش همواره در حال توسعه و بزرگتر شدن می‌باشد و تا زمانی که مانعی نظیر یک دره آن را متوقف نسازد گسترش آن ادامه می‌یابد. از سوی شمال این محدودیت در داخل یک درهٔ فرعی می‌باشد و حرکت و توسعه زمین لغزش از این جهت تقریباً



شکل ۱- پروفیل زمین‌شناسی توده لغزشی دنبلید شرقی (داودی و همکاران، ۱۳۸٤)

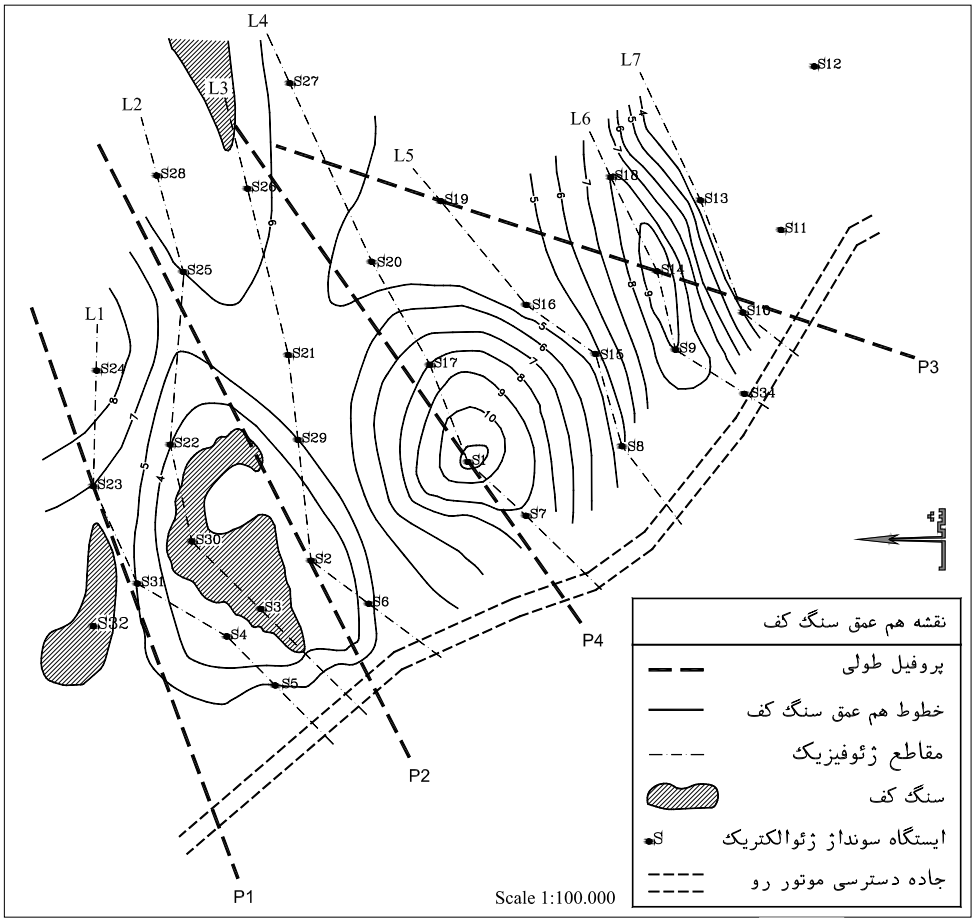
مسدود شده است. ضمن این‌که در این توده برجستگی‌های سفیدرنگی از توده‌های گچی و توفی دیده می‌شود که نشانه حرکت توده لغزشی به‌صورت ترکیبی است. در این برجستگی‌ها، زمین لغزش علاوه بر حرکت انتقالی، حرکت چرخشی نیز در بخش‌های مرتفع دارد (داودی و همکاران، ۱۳۸٤). شکل۲ که با استفاده از مطالعات ژئوفیزیکی تهیه شده، نقشه هم ضخامت سنگ کف را در توده نشان می‌دهد.

نتایج آزمایشگاهی

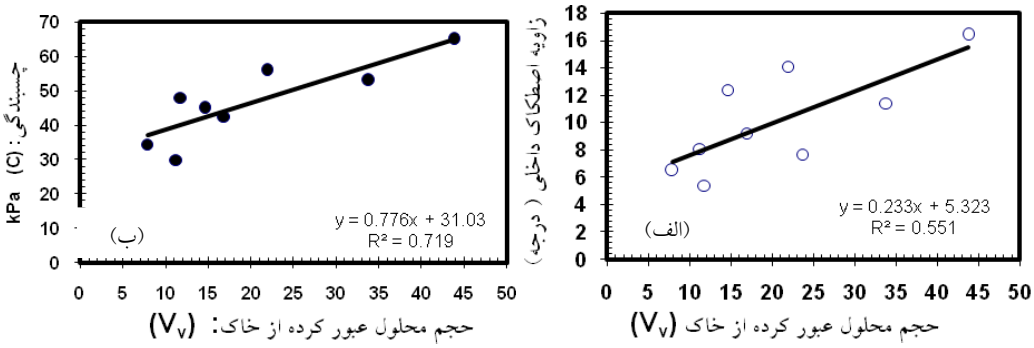
بر اساس آزمون های دانستیه در محل، متوسط وزن مخصوص خشک توده ۱۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و رطوبت طبیعی آن ٦٪ می‌باشد. نوع خاک، رس با درصد خمیری بالا (CH)، با حدود روانی و پلاستیک به ترتیب ٥٥/٤ و ۳۰/۳ درصد و نشانه خمیری بالا و به مقدار ۲٥ درصد است. چسبندگی خاک ۲٥/٦ کیلوپاسکال و زاویه اصطکاک داخلی آن ٥/٦ درجه اندازه‌گیری شده است (داودی، ۱۳۸٦).

الوندکوهی (۱۳۸٥) خاک توده لغزشی مورد نظر را با استفاده از یک مدل فیزیکی مورد بررسی قرار داده و از طریق نفوذ دادن محلول اشباع آهک (SLS) به مدت ٦۰ روز، تغییرات پارامترهای مقاومت برشی را در طی این مدت اندازه‌گیری کرد که نتایج آن به صورت نمودارهای شکل ۳ ارائه شده است.

بر اساس نتایج آزمایشگاهی فوق، در صورتی که محلول اشباع آهک که حاوی ۰/۱۳٪ آهک است از خاک عبور نماید یون‌های کلسیم موجود در آن، با ذرات خاک واکنش پوزولانی انجام داده و موجب سیمانتاسیون خاک می‌شود به نحوی که با عبور ٤٤ واحد حجمی SLS از خاک، چسبندگی آن به kpa ٦٥ و زاویه اصطکاک داخلی آن به ١٦ درجه افزایش می‌یابد.



شکل ۲ – نقشه هم‌عمق سنگ کف



شکل۳ - تغییرات زاویه اصطکاک داخلی (الف) و چسبندگی (ب) خاک به ازای حجم SLS عبور کرده از خاک (الوندکوهی،۱۳۸۵)

تهیه مدل عددی توده

با استفاده از نتیجه‌های آزمایشگاهی، مدل‌سازی عددی توده در سه قسمت انجام می‌شود. در ابتدا آنالیز برگشتی پایداری توده بر اساس تئوری تعادل حدی و با استفاده از نرم‌افزارهای معتبر مانند GeoStudio/Slope/w یا plaxis به منظور کنترل نتیجه‌های آزمایش‌های آزمایشگاهی و تدقیق پارامترهای مقاومت برشی فعلی خاک توده انجام می‌شود.

در دومین قسمت، که به منظور محاسبه کمیت مورد نیاز هر یک از پارامترها برای حصول به پایداری انجام می‌شود، مجدداً آنالیز پایداری برگشتی توده انجام می‌شود و طی آن زوج (φ, C) مورد نیاز برای پایدار ماندن توده در شرایط استاتیکی و شبه‌استاتیکی به‌دست می‌آید.

در این مرحله از نتیجه‌های مدل فیزیکی مشابه آنچه الوندکوهی (۱۳۸۵) انجام داده استفاده می‌شود. هم‌چنین مقدار SLS که باید به توده وارد شود تا (φ, C) توده به مقدار لازم ارتقا یابد، تعیین و محاسبه می‌گردد.

در سومین بخش، مدل تراوش SLS در توده بر اساس قانون دارسی و با استفاده از نرم‌افزارهای معتبر مانند GeoStudio/Seep/w یا plaxis تهیه می‌گردد و طی آن زمان لازم برای تراوش حجم محلول مورد نیاز محاسبه و هم‌چنین ابعاد، فواصل و تعداد ترانشه‌هایی که باید برای نفوذ دادن SLS احداث شود، بهینه‌سازی می‌گردد.

نتایج تحلیل پایداری برگشتی

همان‌طور که در جدول۱ مشاهده می‌شود، در رطوبت طبیعی و در حالت استاتیک مقطع P1 پایدار و سایر مقطع‌ها ضریب اطمینان رضایت بخشی ندارند، ولی درحالت شبه‌استاتیک مقطع‌های P4 و P3 قطعاً ناپایدار و مقطع‌های P2 و P1 در آستانه ناپایداری قرار دارند. وقتی خاک به حالت اشباع می‌رسد وضعیت خیلی حادتر شده و به دلیل افزایش وزن توده و افزایش لنگر واژگونی، ضریب اطمینان‌ها به صورت محسوس پائین می‌آید به طوری که تمامی مقطع‌ها در حالت شبه‌استاتیک ناپایدار می‌باشند.

با توجه به روند حرکت توده که عمدتاً به صورت حرکت‌های مقطعی کوتاه و هم‌زمان با فصل بارش می‌باشد، نتیجه‌گیری می‌شود که ویژگی‌های ژئوتکنیکی استفاده شده در آنالیز برگشتی اعم از پارامترهای مقاومت برشی و وزن مخصوص، تطابق خوبی با واقعیت داشته و می‌تواند مبنای محاسبه‌ها و تحلیل‌های بعدی قرار گیرد.

نتایج تحلیل پایداری پس از اصلاح توده

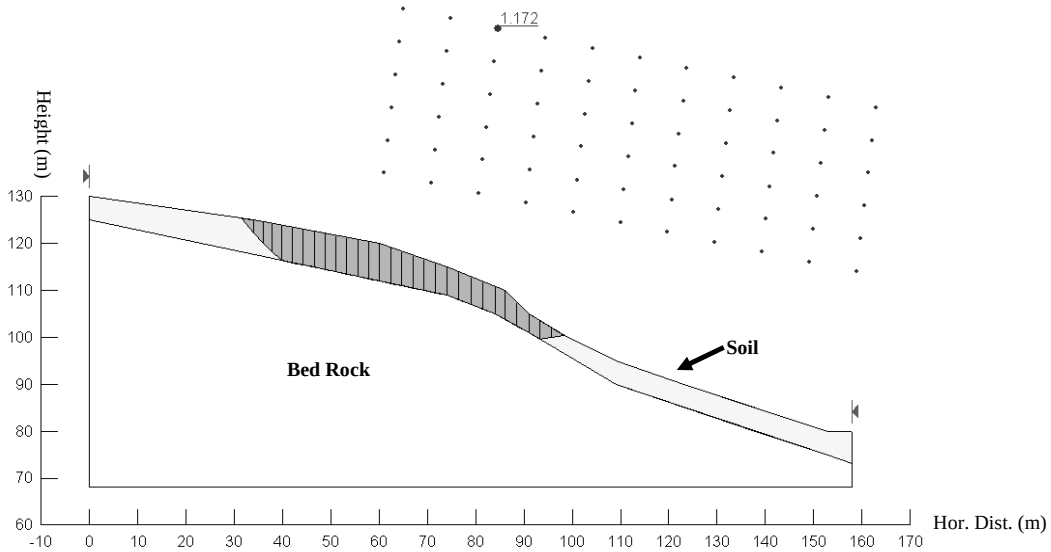
در اصلاح خاک با تغذیه SLS، میزان افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک، تابع حجم تغذیه محلول می‌باشد، لذا برای حصول پایداری باید از روش آزمون و خطا استفاده نمود تا زوج (φ, C) که بتواند حداقل ضرایب اطمینان پایدار ۱/۵ و ۱/۱۵ به‌ترتیب برای حالت‌های استاتیک و شبه استاتیک را تامین نماید به‌دست آید. به عنوان مثال، نتایج پروفیل P2 در جدول ۲ و شکل ٤ ارائه شده است.

جدول ۱- ضرایب اطمینان پایداری مقطع‌های P1 الی P4 در شرایط موجود در دو حالت رطوبت طبیعی و اشباع در حالت‌های استاتیک و شبه استاتیک

	P1		P2		P3		P4	
حالت بارگذاری / رطوبت	استاتیک	شبه استاتیک	استاتیک	شبه استاتیک	استاتیک	شبه استاتیک	استاتیک	شبه استاتیک
طبیعی	۱/۵۹	۱/۰٤	۱/٤۱	۱/۰۱	۱/۳۰	۰/۸۹	۱/٤	۰/۹۱
اشباع	۱/۳٦	۰/۸۹	۱/۱۹	۰/۸٦	۱/۱۱	۰/۷٦	۱/۲	۰/۷۸

جدول ۲- ضرایب اطمینان پایداری مقطع‌های P2 با خاک اصلاح شده به ازای زوج‌های متفاوت (φ, C) درحالت‌های استاتیک و شبه استاتیک با رطوبت اشباع

پارامترهای مقاومت برشی	C=35 , φ =6.5		C=33 , φ =5.9		C=36 , φ =6.8	
حالت بارگذاری	استاتیک	شبه استاتیک	استاتیک	شبه استاتیک	استاتیک	شبه استاتیک
ضریب اطمینان پایداری	۱/۵۹	۱/۱٤	۱/٤۸	۱/۱۰	۱/٦٤	۱/۱۷



شکل ٤- ضریب اطمینان برای مقطع P2 (در امتداد شمال شرق-جنوب غرب) با خاک اصلاح شده و با فرض c=36 kpa در حالت شبه‌استاتیک

نتایج مدل هیدرولیکی

نحوه نفوذ SLS در توده و دبی آن در هر یک از مقاطع P1 الی P4 توسط مدلی که با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio/Seep/w تهیه شده مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به این‌که لایه ضعیف خاصی در توده مورد نظر وجود ندارد و کل توده نیاز به تقویت دارد لذا باید از ترانشه‌هایی که در امتداد خطوط تراز حفر خواهد شد برای وارد کردن SLS استفاده نمود. اولین نکته‌ای که باید روشن شود، تأثیر عمق و عرض ترانشه بر دبی نفوذی به توده می‌باشد. بدین منظور ترانشه‌هائی با عمق و عرض‌های متفاوت به مدل وارد گردید و تاثیر آن بر دبی بررسی شد. نتایج نشان داد که با توجه به زیاد بودن طول ترانشه‌ها، ابعاد مقطع آن تأثیر چندانی در دبی نفوذ کرده به خاک ندارد. بنابراین پیشنهاد می‌شود با توجه به نکات و سهولت

اجرایی، از ترانشه‌هایی به عرض۱ متر و عمق ۱/۵ متر که یک متر آن با SLS پر شده و نیم متر هم به عنوان عمق آزاد (Free Board) خالی بماند، استفاده شود.

برای نفوذ دادن SLS به خاک، می‌توان به جای احداث یک ترانشه برای هر مقطع، چندین ترانشه درترازهای متفاوت حفر کرد. شکل ۵ یک شمای عمومی از ترانشه‌هایی که در امتداد خطوط تراز حفر شده‌اند را برای دو حالت مختلف نمایش می‌دهد. در شکل۵-الف ترانشه‌ها به صورت غیر همزمان اجرا می‌شود. عملیات اجرایی با حفر اولین ترانشه در پایین دست آغاز شده و پس از نفوذ دادن SLS به ناحیه پایین دست آن به مقدار لازم، ترانشه‌های بالاتر یکی بعد از دیگری حفر شده و توده تقویت می‌شود.

در این حالت ترانشه تغذیه‌کننده بازه پائین‌تر می‌تواند نقش ترانشه زهکش بازه بالاتر را ایفا نماید. اما در شکل ۵-ب ترانشه‌ها به طور همزمان اجرا می‌شوند. این امر علاوه بر تسریع در اصلاح خاک، موجب می‌شود که محلول وارد شده به توده به صورت یکنواخت‌تر توزیع گردد و لذا با توجه به اثراتی که فاصله مبدا تغذیه بر میزان اصلاح خاک دارد، پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در توده از یکنواختی بیشتری برخوردار گردد. در این حالت لازم است که در انتهای پائین‌دست هر بازه و در مجاورت ترانشه تغذیه کننده بازه پائین‌دست، یک ترانشه زهکش حفر گردد تا محلولی که بازه را طی کرده و به انتهای آن رسیده، جمع‌آوری و از منطقه دور شود.

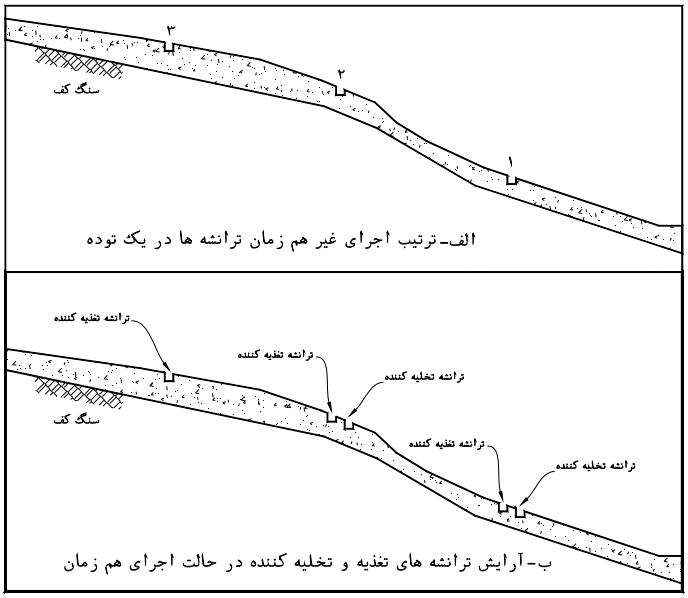
عوامل تعیین کننده تعداد و موقعیت ترانشه‌ها عبارتند از:

الف) تغییر شیب ناگهانی سنگ کف: از آنجایی که دبی نفوذ SLS به خاک علاوه بر نفوذپذیری خاک، تابع گرادیان هیدرولیکی و لذا شیب توده است در محل‌هایی که شیب افزایش ناگهانی عمده می‌یابد یک ترانشه تغذیه در نظر گرفته می‌شود.

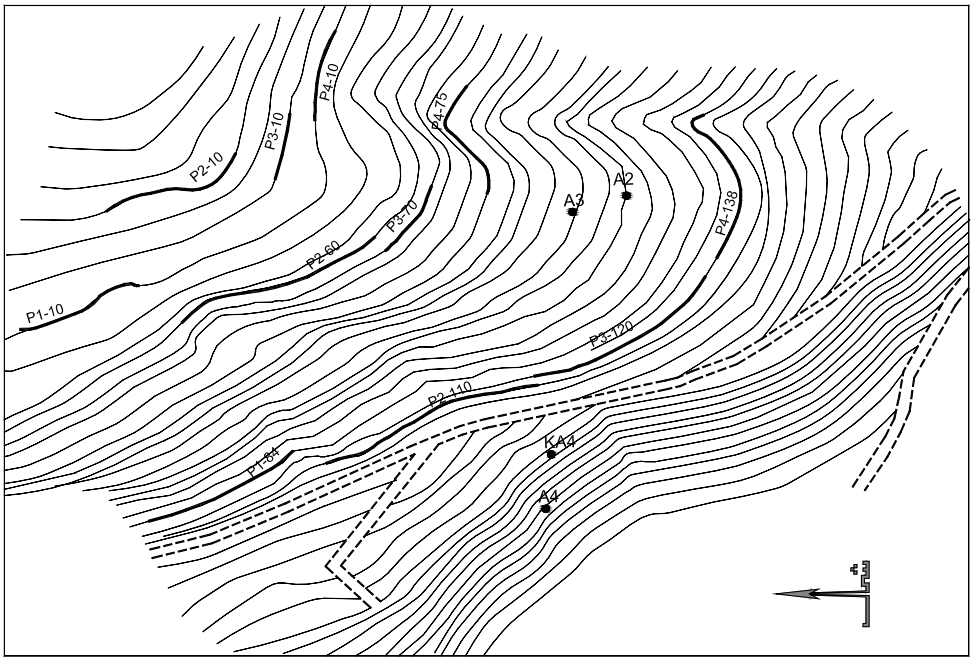
ب) افزایش ضخامت لایه‌ها: در بازه‌هائی که ضخامت زیاد است به دلیل این‌که زمان بیشتری برای عبور محلول مورد نظر نیاز است، بهتر است یک ترانشه جدید احداث شود.

با عنایت به موارد فوق، مطابق شکل٦ در طول هر یک از مقاطع P1 الی P4، ۲ الی۳ ترانشه با سطح مقطع ۱/۵×۱ در نظر گرفته شد.

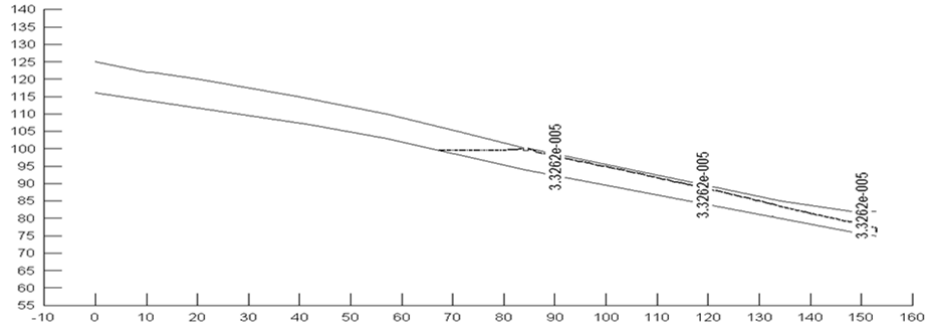
لازم به ذکراست که افزایش بیش از حد تعداد ترانشه‌ها تاثیر چندانی در مقدار جریان نفوذی نداشته و از طرف دیگر موجب خواهد شد که محلول اشباع آهک در سطح خاک جریان یافته و هدر رود. شکل۷ نتایج مدل عددی را برای بازه ٨٤ متری انتهایی مقطع P1 نمایش می‌دهد که با دبی $۳/۲۳\times۱۰^{-۵}$ متر مکعب بر ثانیه در واحد طول ترانشه تحت نفوذ SLS قرار گرفته است.



شکل ۵- نحوه اجرای ترانشه‌ها در حالت هم‌زمان و غیرهم‌زمان در یک مقطع فرضی از توده ناپایدار



شکل٦- تعداد و موقعیت ترانشه‌ها در نقشه توپوگرافی



شکل ۷- دبی جریان و محدوده اشباع شده توسط ترانشه تغذیه کننده درفاصله x=84 در مقطع P1 (ترانشه P1-84)

حجم SLS و زمان نفوذ دادن آن به خاک

بر اساس (φ, c) مورد نیاز خاک برای ایجاد پایداری در توده که در جدول۲ ارائه شده است، حجم SLS مورد نیاز بر حسب حجم حفرات خاک از روابط ارائه شده در شکل۳ محاسبه می‌شود. لذا بر اساس موقعیت هر ترانشه و ناحیه تحت پوشش آن، با منظور نمودن تخلخل خاک، حجم محلول بر حسب مترمکعب محاسبه می‌شود. آنگاه با توجه به نفوذپذیری خاک و دبی عبوری، زمان لازم برای تثبیت توده محاسبه می‌شود. در صورتی که ترانشه‌های هر مقطع به‌طور هم‌زمان اجرا نشود، با جمع زمان مورد نیاز برای بازه‌های هر مقطع، زمان لازم برای پایدارسازی آن مقطع به‌دست می‌آید. جزئیات محاسبات برای مقطع P1 به عنوان مثال در جدول۳ ارائه شده است. زمان اصلاح توده تحت پوشش این مقطع در حالت اجرای هم زمان ترانشه ها ٤٩٨ روز و در صورت اجرای غیر هم زمان ترانشه ٨٤٧ روز خواهد بود. دبی مورد نیاز برای حالت های فوق به ترتیب $۳/۹۸\times۱۰^{-۲}$ و $۲/۱۲\times۱۰^{-۲}$ متر مکعب بر ثانیه است. نتایج سایر مقاطع در جدول٤ خلاصه شده است.

بر اساس جدول فوق، توده ناپایدار خاکی دنبلید شرقی طالقان به حجم ۲۵۵ هزار مترمکعب، بر اساس فن‌آوری

جدول ۳- محاسبه حجم SLS مورد نیاز و زمان لازم برای پایدارسازی در محدوده مقطع P1

ترانشه	جسبندگی مورد نیاز برای پایداری (کیلوپاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی مورد نیاز برای پایداری (درجه)	حجم محلول مورد نیاز (Vr)	تخلخل (%)	طول ترانشه (m)	حجم خلل و فرج خاک ترانشه(m3)	حجم محلول مورد نیازبرای ترانشه(m3)	دبی عبوری از دروازه(m3/s)	زمان مورد نیاز برای عبور محلول(روز)
P1-10	۲۵	٦/۵	۵/۱۱	٪۵۰	۵٦	۱۷۸۰۸	۹۰۹۹۹	۲/۱۲E-۰۲	٤۹۸
P1-84	۲۵	٦/۵	۵/۱۱	٪۵۰	۵٦	۱۱۰۰٤	۵٦۲۲۰	۱/۸٦E-۰۲	۳٤۹

جدول ٤- حجم SLS و زمان مورد نیاز برای پایدار سازی مقاطع P4, P3, P1

مقطع	P_2			P_3			P_4		
بازه	P_2-۱۰	P_2-٦۰	P_2-۱۱۰	P_3-۱۰	P_3-۷۰	P_3-۱۲۰	P_4-۱۰	P_4-۷۵	P_4-۱۳۸
طول(m)	۵۲	۵۲	۵۲	۸۵	۸۵	۸۵	۲۵	۲۵	۲۵
دبی عبوری از بازه $10^{-2}m^3/s$	۱/۸۲	۲/۱٦	۱/۸۲	۲/۲۹	۲/۲۹	۵/۷۰	۱/۲۵	۱/۵٤	۱/٦۱
زمان لازم برای عبور حجم SLS لازم (day)	٤۷۲	۲۳۱	۲٦۷	٦۰۳	٤۷٤	۵۳٦	۵۸۵	۵٦۹	٤٦٤
زمان لازم برای اجرای غیر هم زمان (day)	۹۷۰			۱٦۱۳			۱٦۱۸		
زمان لازم برای اجرای هم زمان (day)	٤۷۲			٦۰۳			۵۸۵		

SLS، با استفاده از ۱۵۳۰ تن آهک که در ۲۵۰ هزار مترمکعب آب حل شده، با صرف هزینه‌ای در حدود ۸۳۰ میلیون ریال، طی ٦۰۳ روز تثبیت خواهد شد. چنانچه از روش ترانشه‌ای غیرهم‌زمان استفاده شود، این مدت به ۱٦۱۸ روز افزایش می‌یابد. این روش که حداقل به‌هم ریختگی را در طبیعت ایجاد می‌نماید و به دلیل آن که از نظر شیمیایی نیز تغییری در خاک ایجاد نمی‌نماید، با اصول حفظ محیط زیست مطابقت داشته و اصطلاحاً environment friendly می‌باشد. از این روی در اراضی جنگلی و مرتعی و یا دیم‌زارهای کشاورزان، این روش می‌تواند با حداقل اثرات منفی مورد استفاده قرار گیرد.

میزان مصرف آهک در این روش بسیار پایین است به نحوی که در زمین لغزش دنبلید طالقان، فقط ۰/٤٦٪ وزن خاک، آهک مصرف شده است. این مقدار در مقایسه با درصدهای رایج مصرف آهک در اصلاح خاک که حدود ۳-٦٪ است بسیار کم‌تر است و علاوه بر کاهش هزینه‌ها، موجب جلوگیری از تخریب محیط زیست در اثر حضور ماده قلیایی آهک خواهد شد.

اجرای تکنیک پیشنهادی، در مقایسه با بسیاری از تکنیک‌های رایج پایدارسازی، نیازمند به تجهیزات و ماشین‌آلات خاص نیست و به همین دلیل هزینه‌های اجرایی آن کمتر است.

نتیجه‌گیری

- فن‌آوری SLS با راندمان بسیار بالا از آهک استفاده می‌نماید. میزان مصرف آهک در این زمین لغزش بسیار پایین است و حداکثر به ۰/۵ درصد وزنی خاک محدود می‌شود.

- فن‌آوری SLS به دلیل این‌که حداقل به هم‌خوردگی را در طبیعت ایجاد می نماید، روش مناسبی برای پایدارسازی توده‌های لغزشی است.

- با استفاده از این روش می‌توان پارامترهای مقاومت برشی خاک توده را به میزانی که لازم است افزایش داده و تـوده را پایدار نمود.
- تعداد و موقعیت ترانشه‌ها تـابع سـه عامـل: تغییـر شـیب ناگهانی سنگ کف، عمق و حجم خاک در حد فاصـل بـین دو ترانشه است
- نحوه اجرای ترانشه‌ها می‌تواند به دو صورت هـم‌زمـان و مجزا باشد.
- چنانچه ترانشه‌هـای تغذیـه کننـده در ترازهـای متفـاوت، هم‌زمان با هم اجرا شوند لازم است در انتهای هر بـازه و در مجاورت ترانشه تغذیه کننده یک ترانشه تخلیـه کننـده نیـز حفر گردد.
- در صورتی که ترانشه‌های تغـذیه کننـده به طـور غیـر هم‌زمان اجـرا شوند توصیه می‌شود که از پائین ترین ترانشه شروع شود.
- ابعاد ترانشه‌های تغذیه کننـده تـأثیر چنـدانی در سـرعت عملیات اصلاح کننده ندارد.
- سطح مقطع مناسب، اقتصادی و سهل‌الاجرا برای ترانشه‌های تغذیه کننده دارای عرض یک متر و عمق ۱/۵ متر می‌باشد.

منابع

الوندکوهی، ح.، ۱۳۸۵، "افزایش مقاومت برشی خاک در یک توده طبیعی لغزشی با استفاده از چاهک‌های حاوی آب‌وآهک"، پایان نامه کارشناسی ارشد مکانیک خاک و پی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، ۱۳۰ ص

داودی م.ه.، ۱۳۸٦، "افزایش مقاومت برشی خاک به کمک محلول اشباع آهک"، مرکز تحقیقات کم‌آبی و خشکسالی، گزارش طرح تحقیقاتی، ۲۰۱ ص.

داودی، م.ه.، غیومیان، ج.، میرصانعی، ر.، عطایی، ا.، ۱۳۸٤، "طبقه بندی زمین لغزش‌های فعال با هدف کاربردی تعیین روش تثبیت در مطالعه موردی حوضه آبخیز طالقان‌رود"، چهارمین کنفرانس زمین‌شناسی‌مهندسی و محیط‌زیست دانشگاه تربیت مدرس، ص ۳۳۵ – ۳۲۵

فرزانه ا. مصدق ع.، ۱۳۸٦، "بررسی آزمایشگاهی تثبیت خاک بستر راه کرمان- زنگی‌آباد با استفاده از آهک و RRP"، سومین کنگره ملی مهندسی عمران، تبریز، ص ۲۵۳.

Dallas N. little 2000. Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates volume3: Mixture design and testing protocol for lime stabilized soils, prepasred for the national lime association.

Dallas N. little and F. A. M, Shafee Yusuf. 2001. Examle problem illustrating the application of the national lime association design and testing protocol (mdtp) to ascertain engineering properties of lime-treated subgrades for mechanistic pavement design/analysis.

Puppala, A. J., Wattanasanticharoen E.and Hoyos L. R., 2003, Ranking of Four Chemical and Mechanical Stabilization Methods to Treat Low-Volume Road Subgrades in Texas, Journal of the Transportation Research Board, Volume 1819B, pp. 63-71

Rao S. M. and Shivananda P., 2005, Role of curing temperature in progress of lime-soil reactions, Geotechnical and Geological Engineering, Volume 23, Number 1, pp. 79-85