مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
بهار و تابستان ۱۳۹٤، جلد هشتم، شماره ۱ و۲، صفحه ۱۳ تا ۳۳

بررسی سازوکار وقوع زمین لغزش گردنه صائین (جاده نیر- سراب) با نگرشی بر هیدرولوژی و شرایط ریخت شناسی منطقه

فرهاد شهیدی [۱]، غلامرضا شعاعی* [۲]، مصطفی محمدی واوسری [۳]،

دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۹/۱۲ پذیرش مقاله: ۹۵/۰۲/۰٤

چکیده

زمین‌لغزش ۱٦ خرداد سال ۱۳۸٤ در منطقه آتشفشانی گردنه صائین در حد فاصل جاده نیر-سراب، سبب تخریب ۳۵۰ متر از جاده مذکور شده است. عوامل مختلفی در ایجاد این زمین‌لغزش نقش داشته‌اند که از جمله می‌توان به عوامل زمین‌شناسی(ضخامت و بافت خاک، سنگ‌های سست و شیب دامنه) و آب‌های زیرزمینی اشاره نمود. برای مشخص نمودن عوامل مهم و اصلی تاثیرگذار در وقوع لغزش، پژوهشی مبتنی بر برداشت‌های صحرائی، آزمون‌های آزمایشگاهی، و مدلسازی عددی برنامه‌ریزی گردید. بدین ترتیب نیمرخ لغزش و خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی مواد در مدل قرار گرفتند. سپس تاثیر بارندگی بر اشباع شدگی خاک بررسی شد و با توجه به مقدار نفوذ آب باران مشخص شد که باید عامل محرک دیگری در این توده نقش داشته باشد. به این دلیل تاثیر تغییرات سطح آب زیرزمینی درون توده لغزش بر پایداری آن به دو روش مدلسازی تعادل حدی و عناصر محدود مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی‌های صحرائی و چینه‌شناسی نشان دادند که شرایط محلی زمین‌ریخت‌شناسی دیرین و وجود یک محدوده فروافتاده سبب زهکش شدن آب از منطقه بالادست به سمت توده لغزشی می‌گردد. بدین ترتیب، افزایش سطح آب زیرزمینی در محدوده توده لغزیده به دلیل بارندگی استثنایی فصل زمستان و بهار سال آبی ۸٤-۸۳ می‌تواند مسبب اصلی ایجاد زمین‌لغزش باشد.

کلید واژه‌ها: *زمین‌لغزش، زمین‌ریخت‌شناسی دیرین، شبیه‌سازی، مواد آذرآواری، آب زیرزمینی، گردنه صائین*

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
۲. استادیار گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، shoaei@modares.ac.ir
۳. دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

زمین‌لغزش به حرکت ثقلی توده‌ای از مواد سنگی، خرده‌سنگی یا خاکی گفته می‌شود (Varnes, 1978). نتایج آن ممکن است حوادث فاجعه‌باری باشد که به از بین بردن سکونتگاه‌های بشر در مناطق شهری منجر شوند. زمین‌لغزش‌ها ممکن است با تخریب سازه‌های زیربنایی مانند جاده‌ها، خطوط راه‌آهن، پل‌ها، سدها، فرودگاه‌ها، و گاهی ایجاد آسیب‌های برگشت ناپذیر برای میراث فرهنگی و طبیعی، و دیگر گنجینه‌های آسیب‌پذیر بشری، باعث خسارات اقتصادی بزرگی باشند. رشد جمعیت و افزایش شهرنشینی و توسعه مناطق کوهستانی، خطر وقوع انواع مختلف زمین‌لغزش‌ها را بیشتر خواهد کرد. زمین‌لغزش در ایران به عنوان یک حادثه طبیعی، سالیانه خسارات جانی و مالی فراوانی به کشور وارد می‌سازد. در یک برآورد اولیه، سالیانه ۵۰۰ میلیارد ریال خسارت‌های مالی از طریق زمین‌لغزش‌ها بر کشور تحمیل می‌شود و این در صورتی است که از بین رفتن منابع طبیعی غیرقابل بازگشت به حساب آورده نشوند (پارسایی و علیمحمدی، ۱۳۹۱).

فرآیند لغزش بر روی زمین‌های شیب‌دار عمل کرده و ممکن است باعث مسدود گشتن مسیر جاده‌ها و رودخانه‌ها شود و در بعضی مواقع که حجم مواد جابجا شده عظیم باشد، سدهای زمین‌لغزشی ایجاد می‌کند. از مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش می‌توان مناطق آتشفشانی را نام برد که وجود شرایط تجزیه هیدروترمالی قابل توجه و کانه‌زایی رسی در منطقه می‌توانند تاثیر زیادی بر فعالیت زمین‌لغزش‌های بزرگ داشته باشند(Hasegawa et al., 2009). از عواملی که باعث ایجاد و فعال شدن این پدیده می‌گردند می‌توان به فرسایش شدید در مسیر رودخانه‌ها و آبراهه‌ها، شیب زیاد واحدهای رسوبی و سنگی و عدم اتصال محکم بین واحدها و سنگ بستر، بارندگی شدید و افزایش فشار آب بین منفذی در رسوبات آبرفتی اشاره کرد. همچنین فعالیت‌های انسانی مانند خاک‌برداری و احداث راه‌ها، بارگذاری ناشی از ساخت‌وساز روی زمین‌های شیب‌دار و مستعد، قطع درختان و از بین بردن پوشش گیاهی منطقه، ورود آب ناشی از چاه‌های فاضلاب، استخرها، و آبیاری می‌توانند باعث فعال شدن و تسریع این پدیده شوند. در این میان مسیر سازه‌های خطی مانند جاده‌ها و خطوط راه‌آهن یکی از مناطق با فراوانی لغزش بالاست.

مطالعات زیادی بر روی ارزیابی تاثیرات جاده در وقوع گسیختگی‌ها انجام شده است(Swanson and Dyrness,1975; Coker and Fahey, 1993; Mosley, 1980; Reid, 1981; Sidle et al., 1985). یکی از تاثیرات جاده در ایجاد لغزش نقش آن در تغییر زاویه شیب است که با احداث آن شرایط برای جابجایی‌های بیشتر فراهم می‌شود. بزرگترین تاثیر جاده‌ها میزان فرسایش حجم خاک جابه‌جا شده بعد از ساخت می‌باشد (Gucinski et al., 2001). بزرگی زمین‌لغزش‌های مرتبط با جاده؛ به آب و هوا، زمین‌شناسی، توپوگرافی، هوازدگی، عمر جاده، تجارب ساخت پیمانکار و شدت بارندگی وابسته است (Gucinski et al., 2001). شکل و جنس سنگ بستر، لایه‌بندی، تغییرات سطح آب زیرزمینی (Jiu, 2005) و چینه‌شناسی (Sandro de Vita, 2006) نیز می‌توانند در وقوع زمین‌لغزش تاثیرگذار باشند. در تاریخ ۱۶ خرداد ماه ۱۳۸۴ و در ساعت ۲۱ زمین‌لغزش بزرگی در کیلومتر ۱۲ جاده نیر–سراب استان اردبیل به وقوع پیوست. محل وقوع این زمین‌لغزش در حاشیه غربی یکی از سرشاخه‌های رودخانه بالیخلو واقع شده است. به دنبال این زمین‌لغزش، ۶ دستگاه خودرو به داخل دره سقوط کرد و در اثر این حادثه ۱ نفر جان خود را از دست داد(شکل۱). همچنین، تقریباً ۳۵۰ متر از جاده ارتباطی نیر– سراب نیز به کلی تخریب شد(حفیظی و همکاران، ۱۳۸۹).

در این مقاله بر اساس مستندات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی، و به منظور توصیف رفتار و مکانیزم آغاز زمین‌لغزش و همچنین استفاده از داده‌های آن در امر پیش‌بینی درمناطق مشابه، زمین‌لغزش گردنه صائین به صورت عددی مدل‌سازی شده است.

اولین کاربردهای مکانیک محیط پیوسته و روش عناصر محدود برای مدلسازی زمین‌لغزش‌های عمیق به دهه ۱۹۷۰ باز می‌گردد (Kalkani and piteau, 1976) که توسط آن نقش

تغییرات سطح آب زیرزمینی در ارزیابی گسیختگی شیب بررسی گردیده است.

شکل۱. نمایی از زمین‌لغزش گردنه صائین که تخریب جاده و سقوط خودرو را نشان می‌دهد(هاشمی طباطبائی، ۱۳۸٤).

از آن زمان به بعد مقالات و نوشته‌های بسیاری در مورد شبیه‌سازی عددی دامنه‌های ناپایدار به چاپ رسیده است؛ (به عنوان مثال نقش مهم فشار منفذی آب زیرزمینی در تغییر شکل‌های عمیق شیب تحلیل شده است (Forlati et al., 2001)، لی (Li) در سال ۲۰۰۷ با تحلیل الاستو- پلاستیک پایداری شیب دقت روش عناصر محدود و تعادل حدی را بررسی کرده و به این نتیجه رسیده که در روش عناصر محدود به دلیل اینکه سطح لغزش پیش‌فرض وجود ندارد و محاسبات به صورت غیرخطی انجام می‌شود دقت بالاتر است، مدلسازی هیدرولوژیکی و ژئومکانیکی زمین‌لغزش در محیط ناهمگن نمونه‌ای از این مقالات می‌باشند (Tacher et al., 2005). هدف اصلی این مقاله به کار بردن تحلیل برگشتی از طریق روش معکوس برای سازوکار لغزش واقعی می‌باشد که به منظور کالیبره کردن یک مدل عددی برای لغزش بزرگ گردنه صائین انجام می‌شود. اگرچه این روش پیچیدگی پدیده فعل و انفعال بین خاک و آب را با صحت بالا شبیه‌سازی نمی‌کند، اما توانایی حل عددی معقول و سریع مدل پیش رو را دارد که یکی از ویژگی‌های مهم در روش تحلیل برگشتی است.

۱. معرفی منطقه

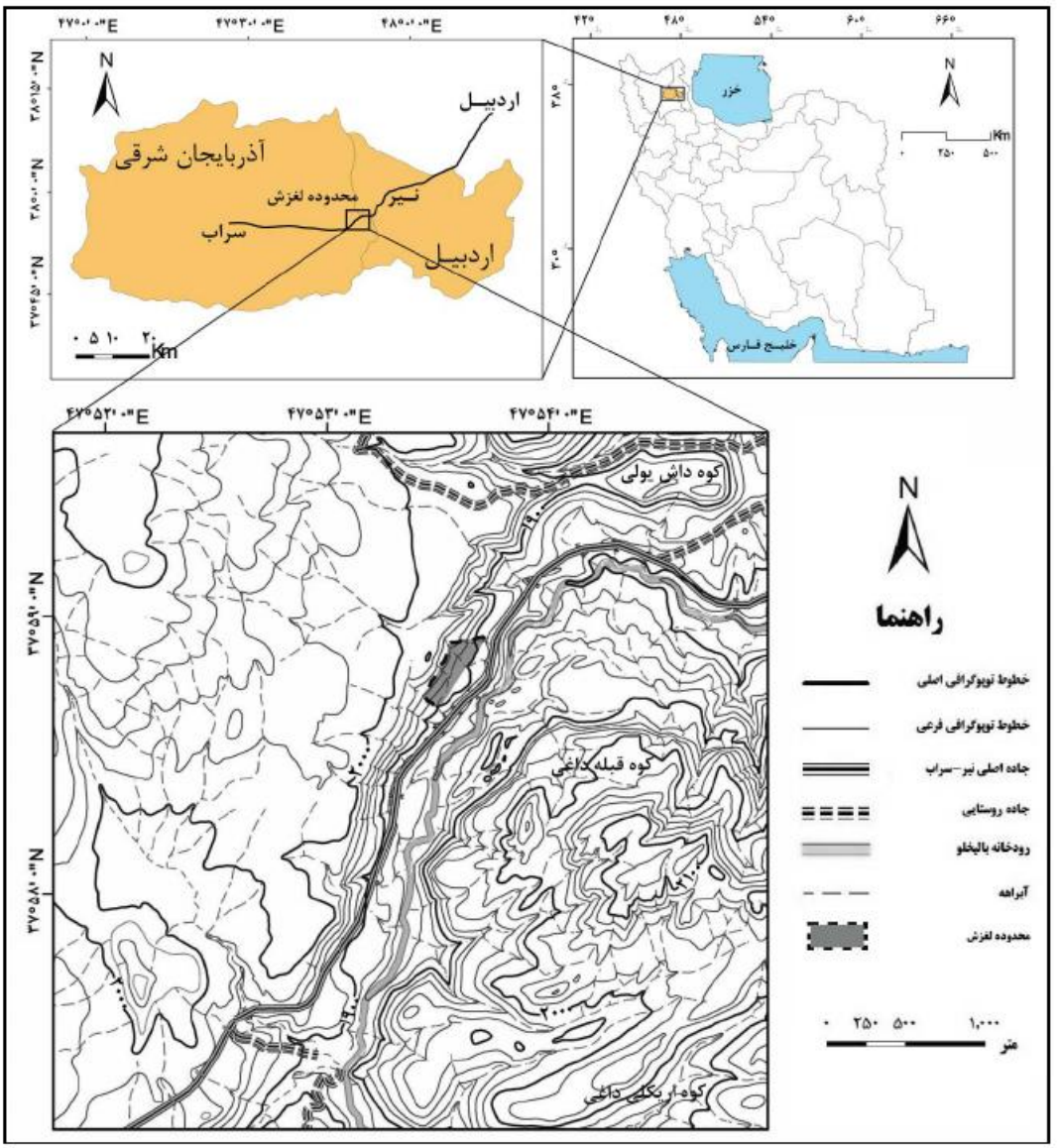
۲-۱. *موقعیت جغرافیایی*

منطقه مورد بررسی در ٤۷ کیلومتری اردبیل در محور مواصلاتی اردبیل-سراب بین دو روستای ایلانجوق و ساری-قیه و در گردنه صائین(بخشی از دامنه های جنوبی آتشفشان سبلان) قرار دارد(شکل۲). طول و عرض جغرافیایی این زمین‌لغزش "۳۵ ‘۵۳ °٤۷ و "٤۳ ‘۵۸ °۳۷ می‌باشد. این زمین‌لغزش در حاشیه غربی یکی از سرشاخه‌های رودخانه بالیخلو واقع شده است که با امتداد شمال‌شرقی-جنوب‌غربی از منطقه لغزش عبور می‌کند(شکل۲). وقوع این لغزش سبب شد نزدیک به ۱۰۰ میلیارد ریال خسارت به بار آید(حفیظی و همکاران، ۱۳۸۹). شیب منطقه لغزشی از ۱۵ تا ۲۸ درجه متغیر می‌باشد و ارتفاع لغزش از پرتگاه اصلی تا محل بارگذاری در اطراف رودخانه نزدیک به ۸۵ متر است. پهنای توده لغزیده ٦۰۰ متر و طول کلی آن ٤۰۰ متر است که مساحت کلی سطح لغزش تقریباً ۰/۲۵ کیلومترمربع می‌باشد. بلندترین ارتفاع منطقه ۲۱۲٤ متر و پست‌ترین نقطه که تراز رودخانه‌ی بالیخلو می‌باشد حدود ۱۸٤۰ متر از سطح دریا بلندا دارد. به دلیل زمین‌لغزش اخیر و عملیات جاده‌سازی، یک سد زمین‌لغزشی ایجاد شده و دریاچه‌ی مصنوعی و موقتی را پدید آورده است (قهرمانی، ۱۳۸٤).

۲-۲. *آب و هوا*

خصوصیات جغرافیایی و ارتفاع از عوامل مهم تاثیرگذار بر آب و هوا می‌باشند. بر اساس تقسیمات آب و هوایی کرپن-گایگر نوع آب و هوا در منطقه مورد پژوهش، استپی برفی با تابستان‌های گرم شناخته می‌شود(Kottek et al., 2006).

در زمستان، میانگین تغییرات دمایی در محدوده دمای بین ۱/۵ تا ۹ درجه سلسیوس و در تابستان بین ۱٤ تا ۳۵ درجه سلسیوس نوسان دارد. شدت بارندگی در نقاط مختلف حوضه متفاوت است و در نقاط با ارتفاع بالاتر که محل لغزش نیز یکی از آن‌هاست بیشترین مقدار را دارد.



شکل۲. موقعیت زمین‌لغزش گردنه صائین و راه‌های دسترسی به آن، به همراه نقشه ۱:۲۰،۰۰۰ توپوگرافی و موقعیت جغرافیایی زمین‌لغزش گردنه صائین در جاده اردبیل- سراب؛ (سازمان نقشه برداری کل کشور).

شهر سرعین با ارتفاعی مشابه با منطقه مورد مطالعه بیشترین مقدار بارش را که در حدود ٤٨٣ میلی‌متر درسال می‌باشد، داراست. بیشترین مقدار بارش مربوط به فصل بهار و کمترین آن مربوط به فصل تابستان برده است(شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان اردبیل، ۱۳۸۸).

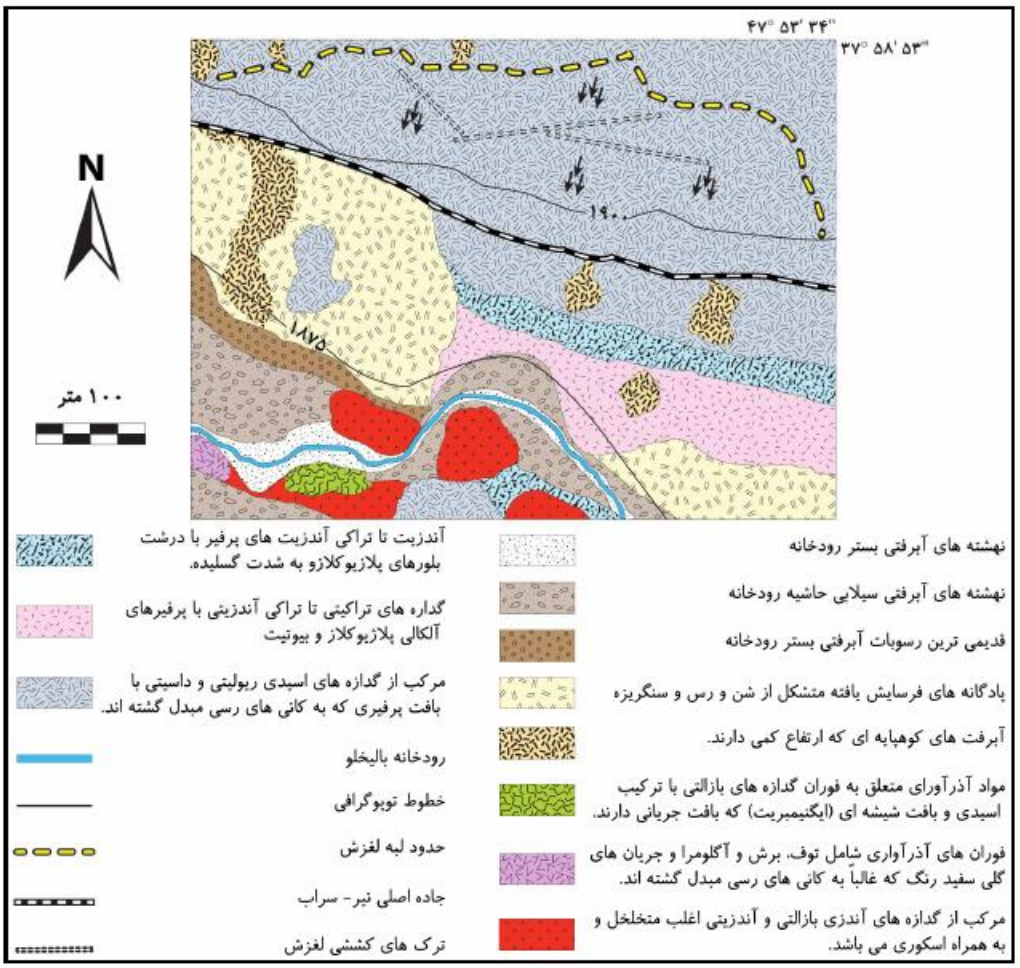
۲-۳. زمین‌شناسی

این منطقه از نظر زمین‌شناسی قسمتی از زون البرز- آذربایجان برده و در داخل زون آتشفشانی ترشیر-کواترنر قرار دارد(ستارزاده قدیمی و همکاران، ۱۳۸۰). واحدهای سنگی منطقه مورد مطالعه از تورف، بازالت، آندزیت، تراکیت و پرمیس تشکیل شده‌اند که در برخی مناطق واحدهای کواترنری آن‌ها را پوشانده‌اند. واحدهای بازالتی و آندزیتی در بالادست شیب قرار دارند که دارای درز و شکاف‌های زیادی برده و جهت شیب آن‌ها شمال‌غربی می‌باشد (شکل۳-الف). سنگ‌های پرمیس به سن الیگومیوسن قسمت مرکزی و شرق محدوده را پوشانیده است. این سنگ‌ها سست برده و نسبت به سنگ‌های مجاور(پیروکسن آندزیت و الیوین بازالت) بیشتر

تحت تاثیر فرسایش قرار گرفته‌اند، به طوری که در محل برخورد این سنگ‌ها در محل زمین‌لغزش یک پرتگاه طویل شکل گرفته است. علت سست بودن آن‌ها نیز مربوط به حفره‌دار بودن و هوازدگی شدیدی است که موجب ایجاد درز و شکاف در سنگ‌ها می‌شود. بیشترین رخنمون مربوط به سنگ بازالت الیوین‌دار و پیروکسن‌آندزیت(سنگ‌های خرد شده شکل ۳-الف) می‌باشد که تندشیب مشرف به جاده در محل وقوع لغزش از این سنگ‌ها تشکیل شده است(مددی، ۱۳۸۸). از تخریب سنگ‌های فوق در دامنه‌ها، مواد منفصلی که دارای دانه‌بندی ناهمگن هستند، به‌وجود آمده‌اند. در بیشتر قسمت‌های دامنه‌ای که جاده از آن عبور می‌کند سنگ‌های آذرین و آذرآواری، به‌شدت هوازده و احتمالاً دگرسان شده و عمق متوسط این مواد به بیشتر از ۵ متر می‌رسد(هاشمی طباطبایی، ۱۳۸٤). نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در مقیاسی بزرگتر و با جزئیات بیشتر تهیه شده که در شکل٤ قابل مشاهده می‌باشد. تقریباً تمام گسل‌های واقع در منطقه نسبتاً کوچک، اغلب پوشیده، با امتداد شمال‌شرقی-جنوب‌غربی و از نوع معکوس می‌باشند اما تعداد کمی از این گسل‌ها در عمق‌های بیشتری قرار دارند، و ضمن برقراری ارتباط با مناطق گرم درونی موجبات شکل‌گیری و فعالیت چشمه‌های متعدد آب‌گرم را فراهم می‌کنند، همچنین جابجایی قائم در دسته‌های الحاقی این گسل‌ها سبب شکل‌گیری برخی سیماهای زمین‌ریخت‌شناسی ویژه در این منطقه شده است(ستارزاده قدیمی و همکاران، ۱۳۸۰). آب‌هایی که از ارتفاعات سبلان سرازیر می‌شوند به دلیل نفوذپذیری بالای سنگ‌های آتشفشانی و اغلب از طریق شکستگی‌ها به طرف اعماق نفوذ می‌کنند و پس از طی زمان ماندگاری، قسمتی از این آب‌ها توسط سیستم‌های گسلی که در حاشیه‌ی فرورفتگی سراب- اردبیل قرار دارد، به سطح برمی‌گردند (رجایی و اصغری‌مقدم،۱۳۸۰). از آنجاکه سبلان در مرحله پس از فعالیت آتشفشانی خود برده و شرایط تکتونیک جدید در ناحیه هنوز در جریان است؛ در دامنه جنوبی سبلان (مکان تقریبی محل وقوع لغزش)، چشمه‌های گوگردی زیادی وجود دارد که آب آن‌ها در حدود ٤٠ درجه سانتیگراد حرارت دارد و تنها گواه فعالیت آتشفشان سبلان است(درویش‌زاده، ۱۳۷٤). رودخانه بالیخلو در جنوب شهر نیر که به طرف جنوب‌غربی امتداد یافته است بر روی یک گسل احتمالی جریان دارد (مددی، ۱۳۸۸). این گسل از شمال آب‌گرم برجلو می‌گذرد و دره‌ای که جاده جدید اردبیل-تبریز از آن می‌گذرد تقریباً مسیر این گسل را دنبال می‌کند.

گستره آذربایجان در طول تاریخ خود شاهد فعالیت‌های لرزه‌ای متعددی بوده است که گاهی این زمین‌لرزه‌ها سبب خسارات جانی و مالی قابل توجهی بوده‌اند. بررسی زمین‌لرزه‌های سال ۱۳۸٤ در منطقه (پژوهشگاه بین المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۹۲) نشان می‌دهد که نزدیکترین زلزله قبل از وقوع زمین‌لغزش گردنه صائین به ۲٤ اردیبهشت همان سال و در فاصله بالای ۲۰۰ کیلومتری، و نزدیکترین زلزله بعد از وقوع لغزش به یک روز پس از آن (یعنی ۱۷ خرداد) و در شعاع ۱۰۰ کیلومتری باز می‌گردد که از این نظر احتمال تاثیر زلزله بر وقوع لغزش بسیار کاهش می‌یابد.

شکل۳. الف)نمایی از لغزش(نگاه به سمت شمال)، ب)تُرف پرمیسی شده ، و ج)تُرف لیتیک دگرسان‌شده که به شدت سست بوده و اجزای آن به راحتی جدا می‌شوند.



شکل ٤. نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه(قهرمانی، ۱۳۸٤؛ با تغییرات)

۲. روش کار

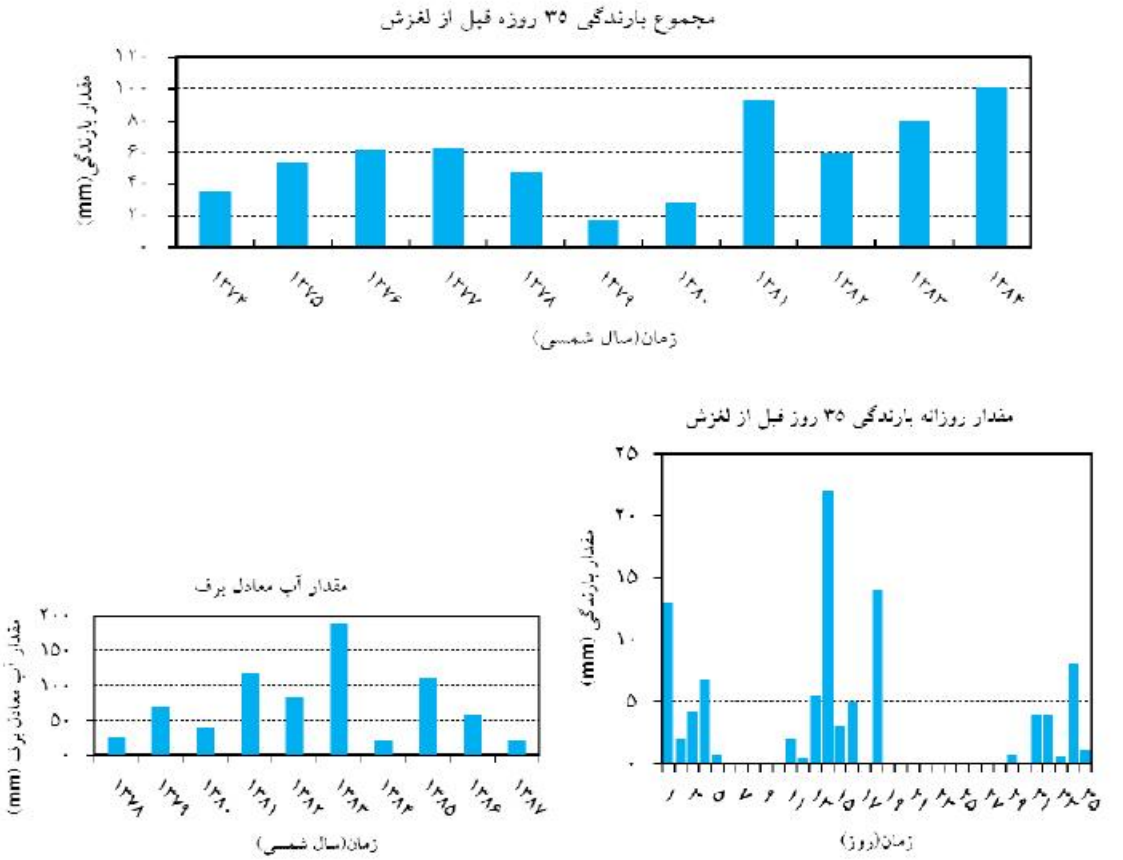
انجام مطالعه جامع بر روی سازوکار این زمین‌لغزش به سه بخش مطالعات و مشاهدات صحرایی، آزمون‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی(مدلسازی عددی) نیازمند است.

۳-۱. *مطالعات و مشاهدات صحرایی*

توده لغزیده شامل سنگ، قطعات آذرآواری از توف‌های سبلان و نهشته‌های واریزه‌ای می‌باشد. ساختار زمین‌شناسی منطقه به دلیل قرارگرفتن در یک محیط آتشفشانی از مواد ناهمسان و ناهمگن تشکیل شده است و احتمالاً شکستگی‌ها و منافذ در ارتباط با یکدیگر می‌باشند که تراوایی محیط با وجود شکستگی‌ها افزایش پیدا کرده است. همچنین بررسی‌ها نشان از وجود سطوح هاموکی(سطوح پشته‌ای شکلی که بر اثر وقوع بهمن‌های واریزه به وجود می‌آیند(Ui et al., 2000) و بیشتر در مناطق کوهپایه‌ای آتشفشان‌ها مشاهده می‌شوند (Reubi et al., 2005) در زمین‌های اطراف دارد که گویای وقوع لغزش‌های متعدد در گذشته می‌باشد و نشان‌دهنده مستعد بودن منطقه در این زمینه است (شکل۱. علامت پیکان سطوح هاموکی را نشان می‌دهد).

همراه با تطابق مطالعات ذکر شده، هنگام انجام برداشت‌های صحرایی، شواهد چینه‌ای مهمی مشاهده شد که به نظر می‌رسد از دلایل مهم ایجاد لغزش باشند. یک لایه کلیدی از جنس توف که رخنمون آن تنها در دو طرف لغزش قابل مشاهده است و در محل لغزش بیرون زدگی ندارد احتمالاً نشانه‌ای از وجود تغییر شیب این لایه و عبور آن از زیر مواد لغزیده می‌باشد. این لایه همان توف لیتیک احتمالاً دگرسان شده (شکل۳-ج و شکل۱۳-ه) است که در دو سوی لغزش در مسیر جاده قابل مشاهده و نمونه برداری می‌باشد(شکل۵).

شکل۵. لایه توف لیتیک و جهت شیب آن در الف)شمال‌شرقی لغزش(نگاه بسوی شمال‌غرب) و ب)جنوب‌غربی لغزش(نگاه بسوی شمال‌شرق)؛ این لایه در محدوده لغزش بیرون زدگی ندارد.



شکل٦. مقادیر بارش‌ها(بارندگی و برف) در سال‌های قبل از وقوع لغزش تا زمان رخداد لغزش(تصویر بالا) و مقدار بارندگی روزانه ۳۵ روز قبل از وقوع لغزش(تصویر پایین)(شرکت آب منطقه‌ای و اداره کل هواشناسی استان اردبیل، ۱۳۹۱)

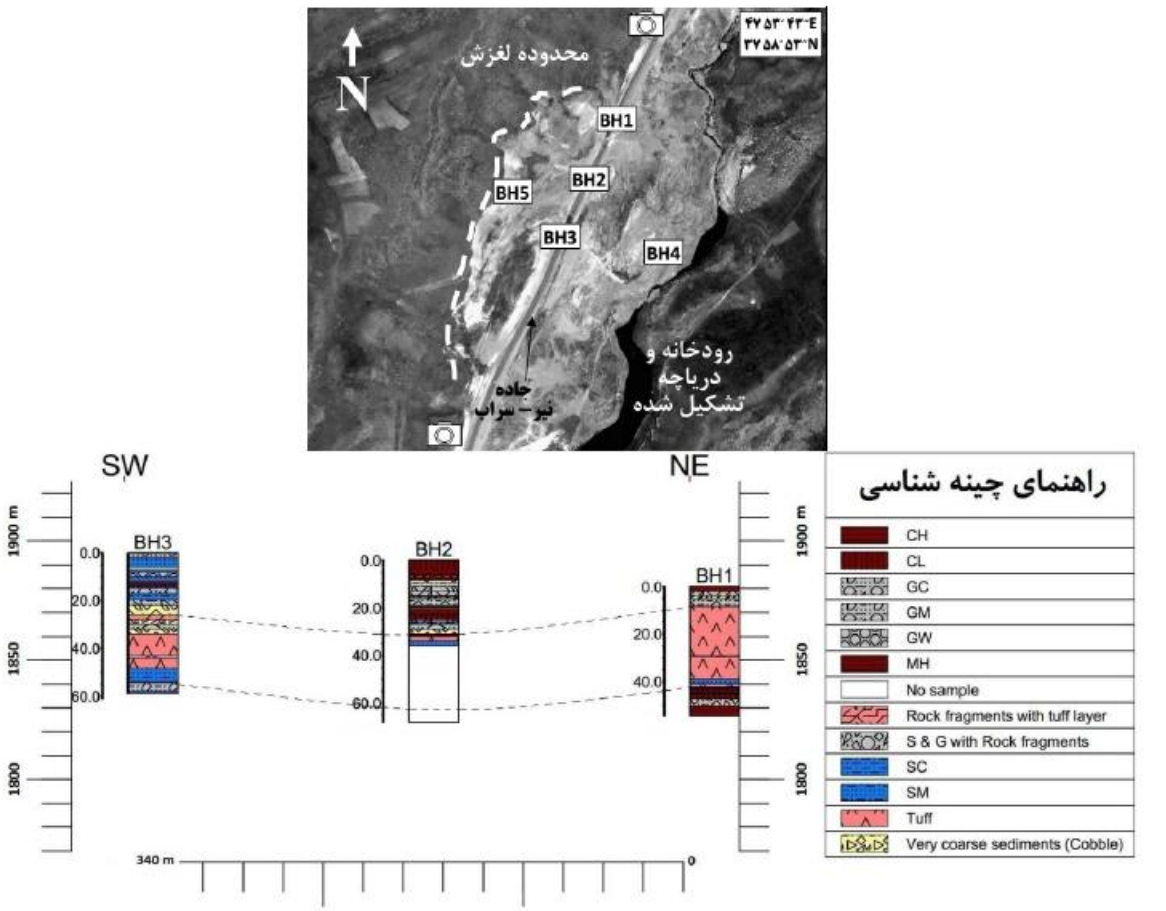
به نظر می‌رسد که این لایه با شیب ملایمی به سمت لغزش و در جهت جاده امتداد دارد و در زیر منطقه لغزشی ناپدید شده و مجدداً از سمت دیگر بیرون‌زدگی پیدا می‌کند. این لایه تراوا یک لایه نسبتاً نفوذ ناپذیر را در زیر مواد لغزیده ایجاد کرده و احتمالاً خود نیز جزئی از لغزش بوده است. بعلاوه بارندگی‌ها در منطقه منظم نیست، بنابراین این مطلب قابل توجه است که وقوع لغزش به احتمال زیاد با افزایش مقدار و شدت بارندگی‌ها ارتباط داشته است. به همین منظور به بررسی مقادیر بارش‌های(باران و برف) چند سال قبل از وقوع لغزش تا زمان بروز واقعه پرداخته، و نمودارهای آن در شکل ٦ آورده شده است.

در زمین‌لغزش گردنه صائین مواد به پایین دامنه جابه‌جا شده و علاوه بر تخریب جاده، به دلیل مسدود کردن مسیر رودخانه، دریاچه کوچکی نیز تشکیل داده‌اند. وجود آثاری از جاده قدیمی(شکل۷) بر روی توده لغزیده به وضوح این موضوع را نشان می‌دهد که جاده جابجایی قائمی معادل ۸ متر و جابجایی افقی معادل ۱۵ متر داشته است. برای بررسی دقیق‌تر و انطباق شواهد صحرایی اطلاعات ۵ گمانه حفاری شده در محل بررسی گردید و با استفاده از شواهد سطحی چینه‌ای، انطباق چینه‌شناسی لایه‌های درگیر در لغزش انجام پذیرفت. بدین منظور تمام داده‌های جمع‌آوری شده وارد نرم‌افزار Rockwork (RockWare co., ver. 15) گردید و سپس لاگ‌های هر گمانه به صورت جداگانه ترسیم و مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس نتایج، مقطع چینه‌شناسی به دست آمده در جهت جاده شواهد چینه‌شناسی موجود در سطح را بطور قابل قبولی تایید می‌نماید؛ یک لایه تراوا در زیر سطح لغزش قرار داشته و در دو طرف لغزش بیرون‌زدگی دارد.

شکل۷. محدوده لغزش و مکان جاده قدیمی و جدید در محل لغزش(نگاه به سمت جنوب).
آسفالت جاده قدیمی بطور تقریباً دست نخورده جابجا شده است.

با توجه به مطالب گفته شده زمین‌لغزش گردنه صائین از لحاظ چینه‌شناسی(شکل۸) و زمین‌ریخت‌شناسی دیرین در یک فروافتادگی قرار گرفته است. همچنین به دلیل وجود فروافتادگی، وجود یک پهنه تقریباً مسطح در بالادست (شکل۲) و خردشدگی سنگ‌ها در بالای لغزش(شکل۳-الف) توده لغزیده بهترین مکان برای تجمع آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌باشد. به دلیل شیب‌دار بودن سنگ بستر، عمق زیاد دگرسانی، و وجود مواد منفصل در سطح موقعیت مناسبی برای وقوع زمین‌لغزش به وجود آمده است. البته احداث جاده و تغییر هندسه شیب نیز در تسریع ناپایداری بی‌تاثیر نبوده، که در این تحقیق به چگونگی تاثیر آن پرداخته نشده است.

شواهد چینه‌ای و سنگ‌شناسی بیان شده در این منطقه نشان می‌دهد که احتمالاً حرکت سریع آب زیرزمینی در منطقه لغزشی وجود داشته است و همچنین آب باران به سرعت از مدخل سنگ‌های خردشده بالادست لغزش به داخل زمین نفوذ می‌کند و بعد از یک دوره کوتاه به سمت پایین دست توده لغزشی جریان یافته و در آن بصورت بالاآمدگی سطح آب زیرزمینی ظاهر می‌گردد. نفوذ آب باران به داخل زمین و عبور آن از سنگ‌های خرد شده با تراوایی بالا باعث تغییر در خصوصیات مواد درگیر در لغزش شده و همچنین فشار آب منفذی بالایی را ایجاد کرده است. هوازدگی و دگرسانی هیدروترمال موجود در این منطقه می‌تواند یکی دیگر از دلایل ناپایداری فرق باشند.



شکل۸. محل قرارگیری گمانه‌ها نسبت به مکان لغزش و موقعیت لایه ترف را نشان می‌دهند (داده‌ها از مهندسین مشاور تردد راه، ۱۳۸٤).

وجود دو نوع حرکت لغزشی در منطقه قابل توجه می‌باشد که هر دو در ارتباط با لایه ترف مورد نظر بوده که یکی تقریباً از سنگ‌های به شدت هوازده تشکیل شده است و کم‌عمق می‌باشد (جنوب‌غرب لغزش، شکل ۳-الف) و دیگری به دلیل

ضخامت بالای خاک برده و عمدتاً از دگرسانی و هوازدگی مواد آذرآواری انباشته شده در این فرورفتگی زمین‌ریختی برجود آمده و به صورت متناوب و لایه‌ای با جریان‌های گلی یا لاهار همراه با قلوه‌های درشت فراوان حاصل از گدازه‌های سبلان قرار دارند و احتمالاً به دلیل بارندگی‌های زیاد چند هفته قبل از لغزش برده و عمیق‌تر می‌باشد(شمال شرق لغزش، شکل ۳-الف).

۳-۲. آزمون‌های آزمایشگاهی

داده‌های آزمایشگاهی به ۳ بخش تقسیم می‌شوند: ۱- داده‌هایی که نتیجه آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش است؛ ۲- داده‌هایی که از گزارش‌های مختلف مربوط به این لغزش استخراج شده است؛ و ۳- داده‌هایی که طی مرور مقالات به‌دست آمدند.

نمونه‌برداری از منطقه دو بخش نمونه‌های دست‌خورده و دست‌نخورده را شامل می‌شود. از نمونه‌های دست‌خورده برای انجام آزمایش‌های تعیین درصد رطوبت، دانه‌بندی، تعیین وزن واحد حجم ذرات خاک و برش مستقیم استفاده شده است و نمونه‌های دست‌نخورده برای تعیین چگالی طبیعی نمونه در محل و جهت ریمولد کردن نمونه‌های آزمایش برش مستقیم مورد استفاده قرار گرفتند. تمام نمونه‌های مورد نظر به دلیل عدم دسترسی به لایه‌های زیرین از پرتگاه لغزش(ارتفاع ۲۰ متر) و از محلی که نماینده کل توده لغزش باشد و دچار جابجایی و تخریب نشده است تهیه گردیدند. بعلاوه نمونه‌هایی نیز جهت مطالعه مقاطع میکروسکوپی و انجام آزمایش XRD تهیه شد. یکی از مهم‌ترین آزمایش‌های انجام شده دانه‌بندی مواد لغزش می‌باشد که علاوه بر تعیین اندازه ذرات و نوع خاک محل، مقدار مکش خاک(بر اساس خاصیت مویینه بین ذرات خاک)، و به طبع آن برآورد هدایت هیدرولیکی محیط غیراشباع نیز بر پایه داده‌های بدست آمده از نمودارهای دانه‌بندی (ضریب یکنواختی)، حد روانی (در صورت وجود) و استفاده از هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های مشابه در منابع مختلف(Saadatkhah et al, 2014; Park et al, 2013; Kim, D. et al, 2010) تعیین شده است. نمودار دانه‌بندی ترسیم شده دو نمونه که به نام‌های مواد نهشته شده (این مواد در واقع سنگ‌های آتشفشانی به شدت هوازده و احتمالا جابجاشده می‌باشند) و ترف لیتیک کریستالی(داده‌ها از مهندسین مشاور تردد راه، ۱۳۸٤)، نامیده شده‌اند در شکل ۹ مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج و استاندارد (ASTM-2002) آنجام آزمایش، نوع خاک(مواد نهشته شده) ماسه با دانه‌بندی خوب (SW) و ترف لیتیک کریستالی (CL) بدست آمده است.

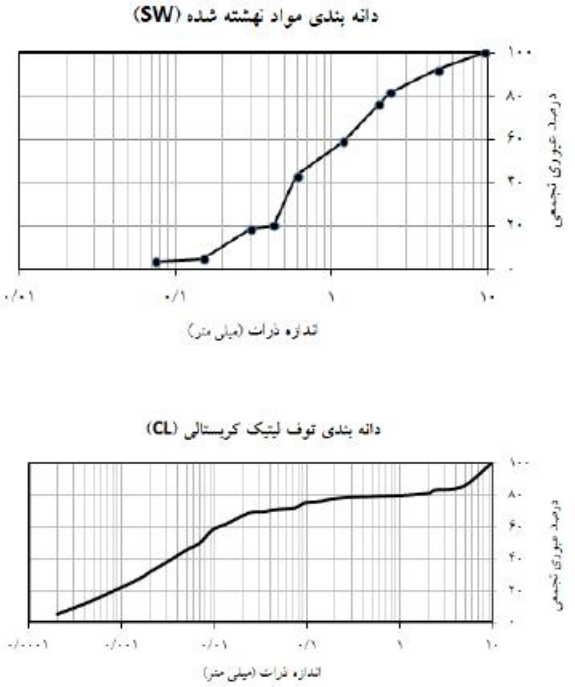
آزمایشی که در تعیین تخلخل مورد استفاده قرار گرفته است، تعیین وزن مخصوص حقیقی خاک می‌باشد که با استفاده از نمونه‌های دست‌نخورده چگالی طبیعی مواد در محل را بدست آورده و سپس از طریق روابط وزنی-حجمی خاک و درصد رطوبت، چگالی خشک خاک نیز تعیین شد. در نهایت با روابط موجود و وزن مخصوص حقیقی بدست آمده از آزمایش، پرکی(e) را محاسبه کرده و از روی آن تخلخل را می‌توان تعیین کرد. نتایج حاصل از این آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده است. یکی دیگر از آزمایش‌های مهم این تحقیق، آزمایش تعیین عوامل مقاومت برشی(برش مستقیم) است که به دو صورت رطوبت طبیعی و اشباع انجام شده است. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب نتایج مربوط به آزمایش برش مستقیم مواد نهشته شده و ترف لیتیک کریستالی را مشاهده می‌کنید. مطابق شکل ۱۰ چسبندگی و ضریب اصطکاک داخلی مواد لغزش(مواد نهشته شده) در حالت طبیعی($11/5\ KN/m^2$ و$34/6^\circ$) و در حالت اشباع($2\ KN/m^2$ و$33/82^\circ$) می‌باشد.

همچنین، با توجه به شکل ۱۱ می‌توان مقادیر چسبندگی و اصطکاک داخلی مربوط به ترف لیتیک کریستالی را نیز بدست آورد؛ که آن نیز به ترتیب در حالت طبیعی($4/1\ kN/m^2$ و20°) و در حالت اشباع($1/6\ kN/m^2$ و16°) می‌باشد.

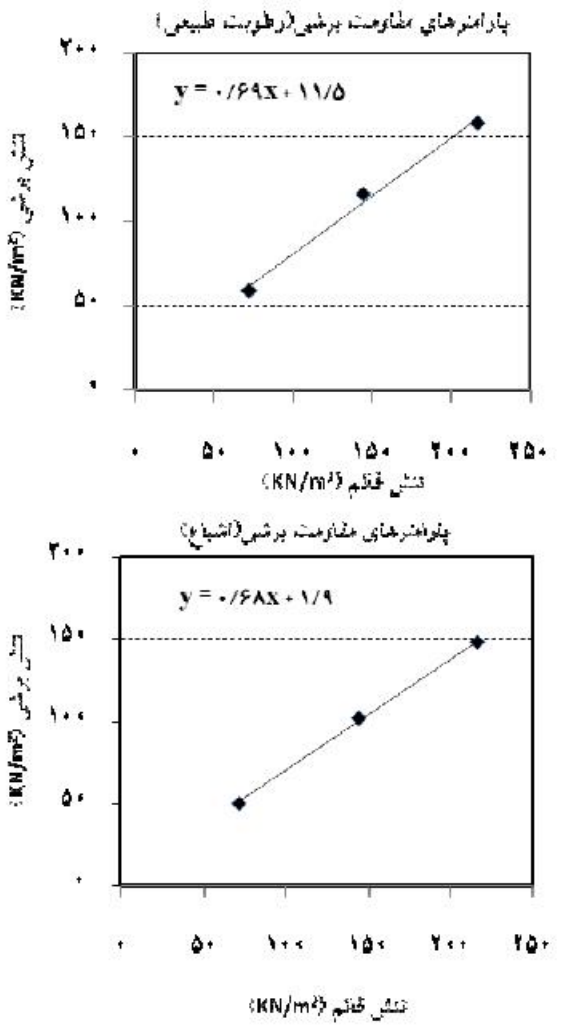
جدول۱. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده

نوع آزمایش / نمونه	مقدار رطوبت (%)	وزن واحد حجم خشک (kN/m^3)	وزن واحد حجم طبیعی (kN/m^3)	وزن واحد حجم اشباع (kN/m^3)	تخلخل (%)	G_s
مواد نهشته شده	۱۶/۹	۱۵/۹	۱۸/۶	۱۹/۳	۳۴/۹	۲/۵
	۱۶/۶	۱۵/۹	۱۸/۶	۱۹/۴	۳۵/۲	۲/۵
	۱۶/۵	۱۵/۹	۱۸/۶	۱۹/۴	۳۵/۴	۲/۵
توف لیتیک کریستالی*	۲۱	۱۶/۹	۲۰/۴	۲۰/۴	۳۶/۱	۲/۷
	۲۰	۱۷	۲۰/۴	۲۰/۴	۳۶/۵	۲/۷
	۲۱	۱۶/۹	۲۰/۴	۲۰/۴	۳۶/۸	۲/۷

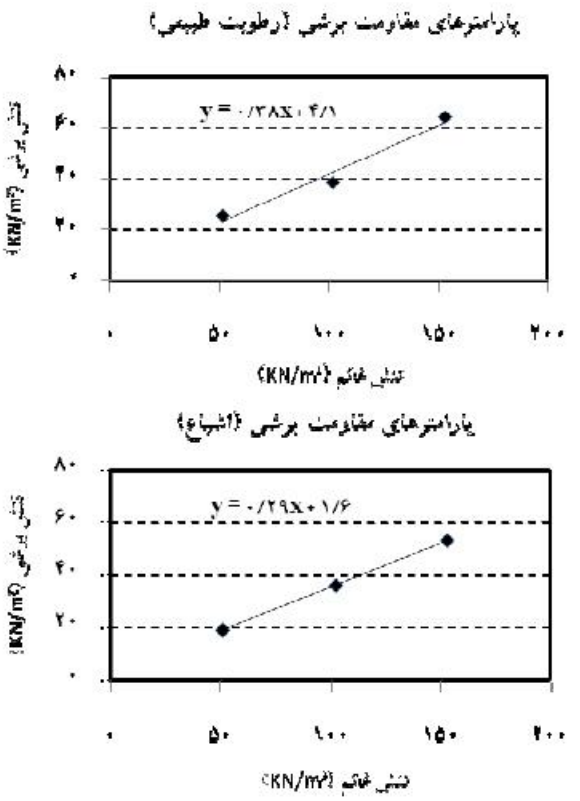
*مهندسین مشاور تردد راه، ۱۳۸۴



شکل۹. نمودار دانه‌بندی مواد نهشته شده لغزش(پرتگاه اصلی لغزش) مورد آزمایش(تصویر بالا) که با توجه به نتایج از نوع ماسه با دانه‌بندی خوب(SW) می‌باشد. نمودار دانه‌بندی توف لیتیک کریستالی(تصویر پایین)(داده‌ها از مهندسین مشاور تردد راه، ۱۳۸٤) که نوع خاک در آن رس با پلاستیسیته پایین(CL) تعیین شده است.

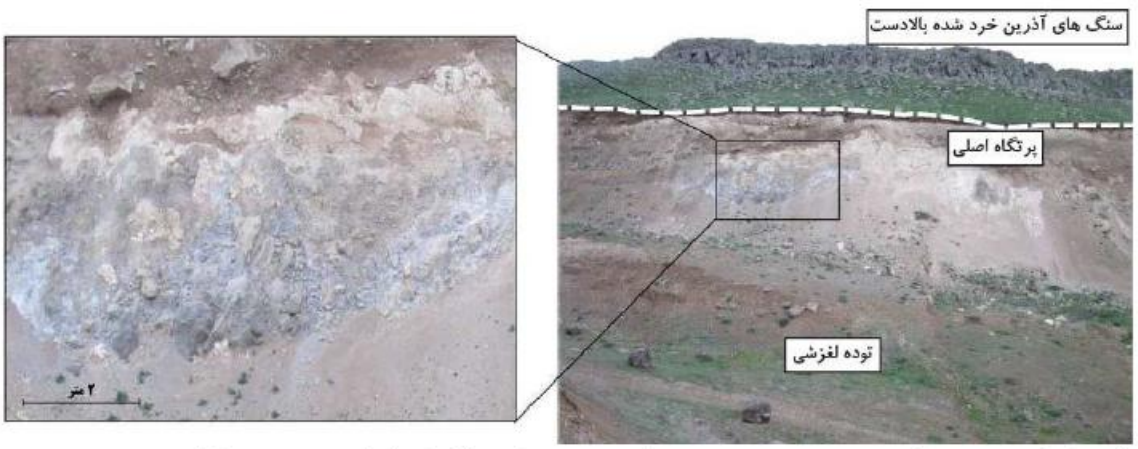


شکل۱۰. نمودار مقاومت برشی مواد نهشته شده در حالت رطوبت طبیعی محل و حالت اشباع که می‌توان از روی آن عوامل مقاومت برشی را بدست آورد.

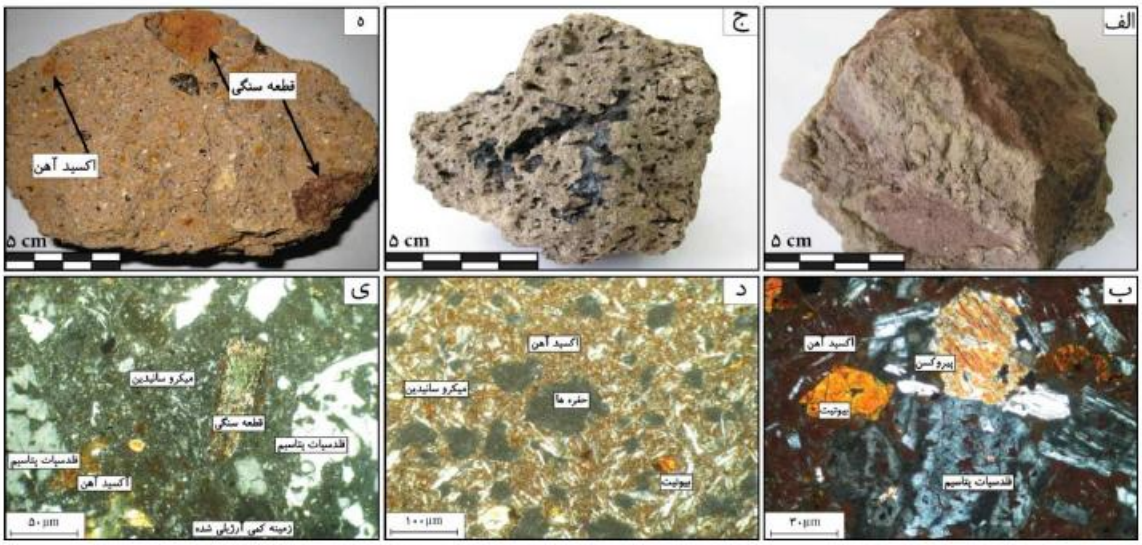


شکل ۱۱. نمودار مقاومت برشی تورف لیتیک کریستالی در حالت رطوبت طبیعی محل و حالت اشباع که می‌توان از روی آن عوامل مقاومت برشی را بدست آورد(داده‌ها از مهندسین مشاور تردد راه، ۱۳۸٤).

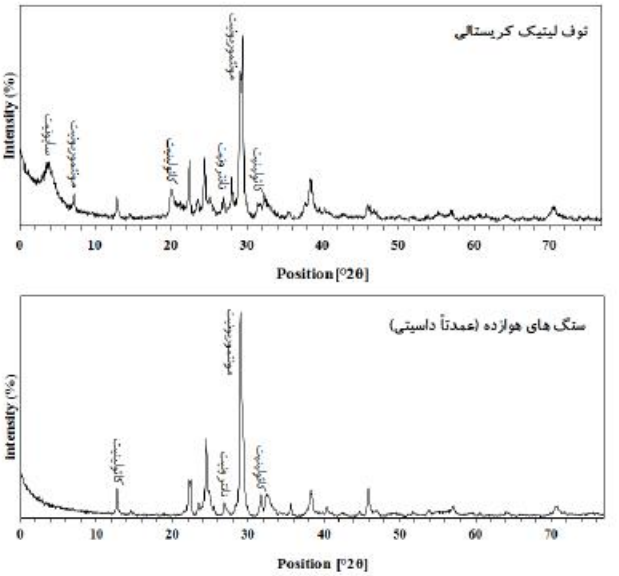
واحدهای سنگی و خاکی منطقه بر اساس نقشه زمین‌شناسی و گمانه‌های موجود از بالادست لغزش شامل سنگ‌های بازالتی و آندزیتی، سنگ‌های هوازده(تورف فروجنوس و داسیت)، لایه تورف لیتیک کریستالی، و سنگ بستر منطقه(سنگ‌های آتشفشانی اسیدی) هستند که در اطراف لغزش و پرتگاه اصلی بخوبی قابل مشاهده می‌باشند. این واحدها بطورکلی دچار هوازدگی شده و بوضوح این عامل در آن‌ها دیده می‌شود (شکل۱۲). اما نکته مهم در منطقه وجود یا عدم وجود دگرسانی است که علاوه بر هوازدگی در مقاومت مواد عمیق‌تر تاثیر می‌گذارد. در نتیجه مطالعه بر روی گمانه‌های حفاری شده، لایه تورف لیتیک کریستالی که در عمق ۱۵ متری در پرتگاه لغزش و در وسط لغزش در عمق ۳۰ متری و در پنجه در عمق ۲۰ متری قرار دارد به عنوان لایه کلیدی و تاثیرگذار در این لغزش شناسایی شد که احتمال وجود دگرسانی نیز در آن می‌رود. بطورکلی منطقه آتشفشانی سبلان دارای چشمه‌های آبگرم فراوانی می‌باشد که در اطراف لغزش و در شهرهای نزدیک به آن (نیر، سرعین و سراب) قرار دارند و آب تمام این چشمه‌ها حاوی مواد گوگردی بوده و نمی‌توان از تاثیر این آب‌ها بر این منطقه چشم پوشی کرد. بنابراین برای بررسی سنگ‌های منطقه از لحاظ هوازدگی و دگرسانی به مطالعه نمونه‌های دستی و میکروسکوپی(شکل۱۳) و نمودار XRD (شکل۱٤) پرداخته شد.



شکل ۱۲. هوازدگی شدید سنگ‌های تورف فروجنوس و داسیت در دیواره پرتگاه اصلی لغزش که در شکل بخوبی مشاهده می‌شود.



شکل۱۳. الف و ب)تراورتن فروجنوس که به دلیل وجود اکسیدآهن رنگ قرمز در آن بیشتر به چشم می‌آید، ج و د)تراورتن پرمیسی که حفرات آن در تصویر به خوبی دیده می‌شود و در قسمت‌هایی این حفرات با هم در ارتباط بوده و با موادی پر شده است، ه و ی) تراورتن لیتیک کریستالی که وجود قطعات سنگی و کانی‌های شاخص در تصویر نشان داده شده است.



شکل۱٤. نمودار XRD دو نمونه از سنگ‌های موجود در توده لغزشی که نشان دهنده وجود خانواده اسمکتیت (پیک احتمالا مونتموریلونیت) در آن‌ها می‌باشد و می‌تواند دلالت بر وجود محلول‌های دگرسان کننده(به دلیل وجود چشمه‌های آبگرم در اطراف) در گذشته دارد که بر این مواد تاثیرگذار بوده‌اند.

۳ ۳. شبیه‌سازی(مدلسازی عددی)

بطورکلی روش‌های عددی به دو منظور مورد استفاده قرار گرفته و قرار می‌گیرند؛ ۱- در جهت تفسیر حوادث و رخدادهای به وقوع پیوسته که برای یافتن علت اصلی حادثه بکار می‌روند و ۲- برای پیش‌بینی رفتار طبیعی مواد در یک پروژه عمرانی که این مواد می‌توانند شامل زمین، آب، و مصالح استفاده شده در پروژه باشد. در این پژوهش، مدلسازی با هدف اول و به منظور تفسیر وقایع رخ داده منجر به آغاز حرکت و ناپایداری شیب صورت پذیرفته است. تمام شبیه‌سازی‌های عددی موجود در این تحقیق به وسیله مجموعه المان محدود ZSoil Student Version, 2012، Rocscience Slide V. 5.014 و GEOStudio VADOSE/W V. 2007 انجام شده است. یکی از دلایل مهم انتخاب برنامه VADOSE توانایی این نرم‌افزار در دریافت مستقیم و کامل داده‌های بارندگی(مقدار بارندگی، درصد رطوبت نسبی و دما) و سادگی کار با آن می‌باشد که کار شبیه‌سازی بارندگی را آسان‌تر می‌کند. در ادامه به طور مختصر به معرفی بسته‌های نرم افزاری مورد استفاده در این تحقیق پرداخته شده است.

جدول۲. داده‌های استفاده شده در مدل‌ها

نوع داده	مواد نهشته شده*	توف لیتیک*	سنگ هوازده**	بازالت درزه‌دار**	سنگ آتشفشانی**
ضریب الاستیک(KN/m^2)	۱۱۰	۲۰۰	۱×۱۰^{۵}	۵×۱۰^{۸}	۱×۱۰^{۹}
وزن واحد حجم طبیعی(KN/m^3)	۱۸/٦	۲۰/٤	۲۳	۲۵	۲۵
وزن واحد حجم اشباع(KN/m^3)	۱۹/٤	۲۰/٤			
محتوای رطوبت(٪)	۱٦/۵	۲۱	۰	۰	۰
چسبندگی(KN/m^2)	۲	۱/٦	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰
زاویه اصطکاک داخلی(°)	۳۳	۱٦	٤۰	٦۰	٦۰
ضریب نفوذپذیری(m/s)	٤×۱۰^{-٤}	۱×۱۰^{-۷}	۱×۱۰^{-٤}	۱×۱۰^{-۲}	۱×۱۰^{-۹}
چگالی ویژه(G_s)	۲/۵۲	۲/۷۱			
ضریب پواسون(ν)	۰/۳	۰/۲۵	۰/۳	۰/۲۵	۰/۲

* : آزمایش‌های انجام شده و مهندسین مشاور تردد راه، (۱۳۸٤)

** : (Anon, 1979a; Grecek, 2007; Goodman, 1989; Meier et al., 2013; Rodrigo delPotro and Hürlimann, 2008)

۳ ٤. شبیه‌سازی(مدلسازی عددی)

بطورکلی روش‌های عددی به دو منظور مورد استفاده قرار گرفته و قرار می‌گیرند؛ ۱- در جهت تفسیر حوادث و رخدادهای به وقوع پیوسته که برای یافتن علت اصلی حادثه بکار می‌روند و ۲- برای پیش‌بینی رفتار طبیعی مواد در یک پروژه عمرانی که این مواد می‌توانند شامل زمین، آب، و مصالح استفاده شده در پروژه باشد. در این پژوهش، مدلسازی با هدف اول و به منظور تفسیر وقایع رخ داده منجر به آغاز حرکت و ناپایداری شیب صورت پذیرفته است. تمام شبیه‌سازی‌های عددی موجود در این تحقیق به وسیله مجموعه المان محدود ZSoil Student Version, 2012، Rocscience Slide V. 5.014 و GEOStudio VADOSE/W V. 2007 انجام شده است. یکی از دلایل مهم انتخاب برنامه VADOSE توانایی این نرم‌افزار در دریافت مستقیم و کامل داده‌های بارندگی(مقدار بارندگی، درصد رطوبت نسبی و دما) و سادگی کار با آن می‌باشد که کار شبیه‌سازی بارندگی را آسان‌تر می‌کند. در ادامه به طور مختصر به معرفی بسته‌های نرم افزاری مورد استفاده در این تحقیق پرداخته شده است.

۳-۳-۱. GEOStudio 2007

این نرم افزار در مجموع شامل ۸ قسمت مختلف برای بررسی و مطالعه موضوعات و شرایط متفاوت شامل SLOPE/W، SEEP/W، SIGMA/W، QUAKE/W، TEMP/W، CTRAN/W، AIR/W و VADOSE/W می‌باشد که در این پژوهش از برنامه VADOSE/W جهت شبیه‌سازی میزان نفوذ بارندگی استفاده شده است.

این مجموعه یک برنامه عناصر محدود تخصصی جهت تحلیل و آنالیز شرایط آب و هوایی(بارندگی، دما، رطوبت) و فعل و انفعال آن با محیط(نفوذ، حرکت و تراوش) می‌باشد که می‌تواند در بسیاری از مسائل مهندسی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین این برنامه قادر است که محیط اشباع، غیراشباع، و تاثیر مقدار پوشش گیاهی(در صورت وجود داده‌ها) را نیز شبیه‌سازی کند. بعلاوه می‌توان از طریق آن میزان تبخیر و تعرق را نیز در محاسبات وارد کرد. در زیر رابطه پایانی مورد استفاده در این برنامه که برای تخمین میزان اشباع شدگی براساس خواص مویینگی ذرات خاک بکار گرفته شده، آمده است.

$$S_e = 1 - \left[\left(\frac{h_{co}}{\psi}\right)^2 + 1\right]^m \exp\left[-m\left(\frac{h_{co}}{\psi}\right)^2\right] \qquad (1)$$

که در آن، S_e درجه اشباع شدگی که بر اثر نیروهای مویینه بوجود می‌آید، h_{co} میزان بالاآمدگی آب در حالت مویینه به سانتی‌متر که در خاک‌های درشت دانه و ریزدانه به دو روش

مختلف محاسبه می‌شود و بر اساس اطلاعات نمودارهای دانه بندی بدست می‌آید، ψ، مکش خاک که از طریق روابط حاصل از دانه بندی خاک، مویینگی، حد روانی و مقادیر ثابتی که از حوصله این بحث خارج است بدست می‌آید، و m، عامل برازشی است که توزیع اندازه منافذ و شکل و موقعیت محتوای آب حجمی در ناحیه مویینه را کنترل می‌کند.

Rocscience SLIDE V. 5.014 .۲-۳-۳

این نرم افزار یک برنامه پایداری شیب دوبعدی برای ارزیابی پایداری صفحات گسیختگی دایره‌ای یا غیر دایره‌ای در شیب‌های خاکی یا سنگی است. SLIDE یک نرم افزار با کاربری ساده است، و همچنین می‌توان در آن مدل‌های پیچیده را ایجاد و به سرعت تحلیل کرد. بارگذاری خارجی، آب زیرزمینی و ساپورت(تکیه گاه) به شیوه‌های گوناگون می‌توانند مدل شوند. نرم افزار SLIDE پایداری سطوح لغزش را با استفاده از روش‌های تعادل حدی قطعه عمودی تحلیل می‌کند. روش‌های تحقیقی، در یک شیب مشخص شده می‌توانند برای تعیین مکان سطح لغزش بحرانی بکار روند. در زیر رابطه کلی بکار رفته در تحلیل این نرم افزار آورده شده است.

$$FS = \frac{1}{\sum_i W_i.\sin\alpha_i}.\sum_i \frac{c_i.b_i+(W_i-u_i.b_i).\tan\varphi_i}{\cos\alpha_i+\frac{\tan\varphi_i.\sin\alpha_i}{FS}} \qquad (۲)$$

ZSOIL Student V. 2012 .۳-۳-۳

این نرم افزار یک برنامه عناصر محدود است که از سال ۱۹۸۲ در لوزان سوئیس توسط شرکت ZACE و تحت سرپرستی توماس زیمرمن تولید، اما از سال ۱۹۸۵ وارد بازار و برای کامپیوترهای شخصی قابل استفاده شده است. این برنامه تا سال ۲۰۰۲ تنها به صورت دوبعدی ارائه شده بود و از این سال بصورت سه‌بعدی نیز عرضه شد. امروزه این نرم افزار در بسیاری از کارهای دانشگاهی و پروژه‌های مهندسی بکار برده می‌شود. یکی از قابلیت‌های این برنامه تحلیل پایداری برای ارزیابی معقول ضرایب اطمینان و سطوح گسیختگی در اغلب هندسه‌های مسائل معمول(البته با توجه به خصوصیات مواد) می‌باشد. روابط زیر، چگونگی تحلیل و محاسبه تنش و جابجایی در روش المان محدود دو بعدی را نشان می‌دهند.

$$\sigma_{ij,j} + b_i = 0 \qquad (۳)$$

رابطه (۳)، رابطه تعادل است که در آن σ، تنش در دو بعد و b، نیروی وارد بر پیکره (Body force) می‌باشد.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(u_{i,j} + u_{j,i}\right) \qquad (٤)$$

در رابطه(٤)، که رابطه تغییرشکل- جابجایی است ε، تغییر شکل و u، جابجایی را نشان می‌دهد.

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - Sp\delta_{ij} \qquad (٥)$$

رابطه بالا نحوه محاسبه تنش موثر را نشان می‌دهد و در آن σ' تنش موثر، σ، تنش کل، S، ضریب اشباع شدگی، p، فشار آب منفذی، و δ، تابع شکل می‌باشد.

$$q_i = -k^*_{ij}\left(-\frac{p}{\gamma_F} + z\right), j \qquad (٦)$$

رابطه (٦)، رابطه جریان می‌باشد و در آن، q_i، فلاکس، k^*_{ij}، تراوایی در حالت غیراشباع است و از مقدار هدایت هیدرولیکی در حالت اشباع و نسبت اشباع شدگی بدست می‌آید، p، فشار، γ_F، وزن واحد حجم سیال که در اینجا آب است و z نیز میزان ارتفاع آب می‌باشند.

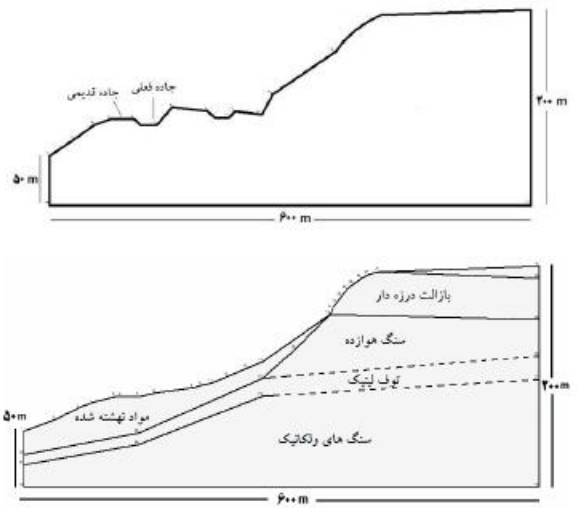
سایر روابط موجود در نرم‌افزار ZSOIL شامل معادله ساختاری، رابطه پیوستگی، رابطه شرایط مرزی، رابطه شرایط اولیه و ... هستند که کنترل کننده شرایط اجرای مدل می‌باشند.

در تمام نرم‌افزارها یکی از مهم‌ترین قسمت‌های پروژه بخش هندسه طرح می‌باشد که در محاسبات نقش مهمی را ایفا می‌کند. مقطع عرضی مورد نیاز برای شبیه‌سازی دوبعدی لغزش صائین براساس برداشت‌های صحرایی ارائه شده است. استفاده از توپوگرافی و نیمرخ حال حاضر لغزش، به دلیل دستکاری‌های زیاد (از جمله خاک‌برداری به منظور پایدارسازی) غیرممکن می‌باشد (شکل ۱۵- تصویر بالا) و باید شرایط مدل به شرایط قبل از وقوع لغزش نزدیک‌تر باشد.

به همین سبب، جهت به دست آوردن نیمرخ مورد نظر اقدام به برداشت‌های صحرایی(مترکشی و شیب‌سنجی) شده است تا با بدست آوردن نقاط شاخص لغزش و چند نقطه مبنا هندسه قبل از لغزش بازسازی شود (شکل ۱۵-تصویر پایین).

چندین عامل می‌توانند در وقوع لغزش تاثیرگذار باشند اما با توجه به داده‌های موجود از جمله اطلاعات گمانه‌هایی که در بالا ارائه شد یکی از عوامل محتمل لغزش می‌تواند زمین‌ریخت‌شناسی دیرین باشد، همچنین در اکثر مقالات و گزارش‌ها، تاثیر بارندگی و نوسانات آب زیرزمینی از عوامل بروز زمین‌لغزش ذکر شده‌اند. بنابراین در این مقاله سعی بر این است که به بررسی نقش عوامل یاد شده پرداخته شود.

در ابتدا شبیه‌سازی لغزش تنها با استفاده از نیمرخ بدست آمده از داده‌های گمانه‌ها و ویژگی‌های مهندسی و هیدرولیکی مواد لغزش(جدول۲) تحت تاثیر نیروی گرانش انجام گردید و ناپایداری با ضریب اطمینان قابل قبول (پایین) مشاهده نشد.



شکل۱۵. نیمرخ تهیه شده طی برداشت‌های صحرایی(تصویر بالا) و نیمرخ اولیه جهت استفاده در مدل با استفاده از برداشت صحرائی و نقشه توپوگرافی منطقه(تصویر پایین).

به همین منظور و با توجه به اینکه لغزش پس از یک دوره به نسبت طولانی بارندگی رخ داده است برای تعیین میزان تاثیر مستقیم این بارندگی‌ها و میزان نفوذ آب به داخل توده خاک و سنگ خردشده و اشباع شدگی مواد درگیر در لغزش، اطلاعات بارندگی ۳۵ روز قبل از وقوع این زمین‌لغزش (شکل ٦) وارد نرم‌افزار VADOSE گردیدند.

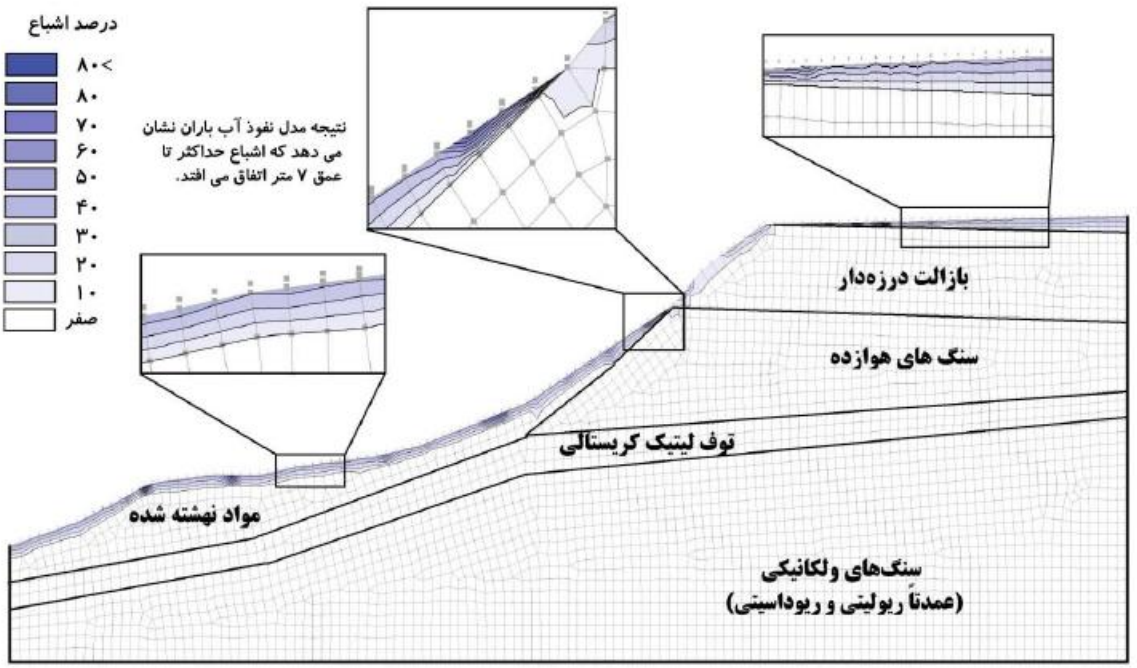
شبیه‌سازی‌ها نشان دادند(شکل ١٦) که مقدار بارندگی در منطقه و در زمان وقوع لغزش، توانایی نفوذ به داخل توده و در پی آن اشباع کردن توده را تا سطح احتمالاً بسیار عمیق لغزش(حداکثر ۳۰ متر) و ایجاد لغزشی با این عمق را به تنهایی ندارد. هر چند که به دلیل نزدیک شدن میزان رطوبت خاک و سنگ هوازده درگیر در لغزش به حدود اشباع در اعماق ۷-۳ متر، لغزش‌های سطحی و کوچک محتمل می‌باشند. بدین ترتیب، عامل اصلی و مسبب لغزش را باید در جای دیگر جستجو نمود.

با توجه به سیستم شکستگی‌ها و درزه‌های بسیار در توده‌های آتشفشانی سبلان(رجایی و اصغری مقدم، ۱۳۸۰) به احتمال زیاد باید بارندگی‌ها را نه تنها در واحد زمان، بلکه در واحد مساحت حوضه آبخیز بالادست توده لغزشی مورد بررسی قرار داد. مدت زمان بارش‌ها و مساحت زیاد حوضه آبخیز بالادست لغزش(۱۵۰۰ هکتار) می‌تواند بر تغییرات سطح آب زیرزمینی تاثیر گذار باشد. همچنین نباید از میزان بارش برف در منطقه چشم‌پوشی کرد، زیرا ذوب برف‌های منطقه بخصوص کوه سبلان در فصل بهار می‌تواند در بالا آمدن سطح آب زیرزمینی موثر باشد. محاسبه آب معادل برف(شکل ٦) نشان می‌دهد که در زمستان سال ۱۳۸۳(۳ ماه پیش از وقوع لغزش) مقدار نزولات جوی بصورت برف استثنائی بوده است. فعالیت چشمه‌های موجود در اطراف محل لغزش در گردنه صائین و در این فصل گواه این مدعاست.

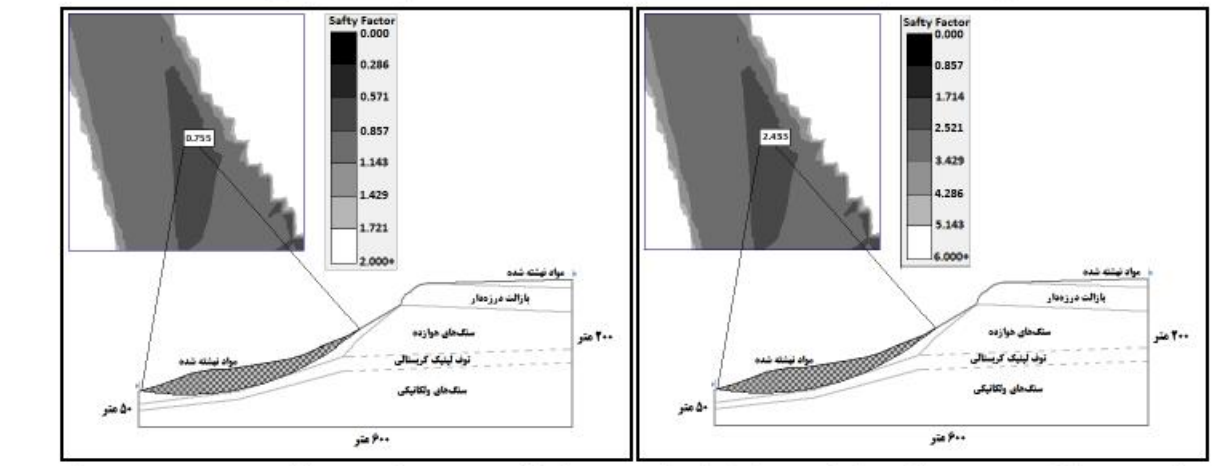
به منظور بررسی تاثیر تغییرات سطح آب زیرزمینی در وقوع زمین‌لغزش گردنه صائین، با تغییر سطح آب زیرزمینی و اعمال آن در مدل، پایداری شیب لغزش با استفاده از نرم‌افزار SLIDE بررسی گردید(شکل ۱۷).

به دلیل آنکه در شبیه‌سازی پایداری انجام شده، روش تعادل حدی مورد استفاده برده است و همچنین تعیین سطح لغزش برای مدل توسط کاربر انجام می‌شود، احتمالاً نتایج دقت

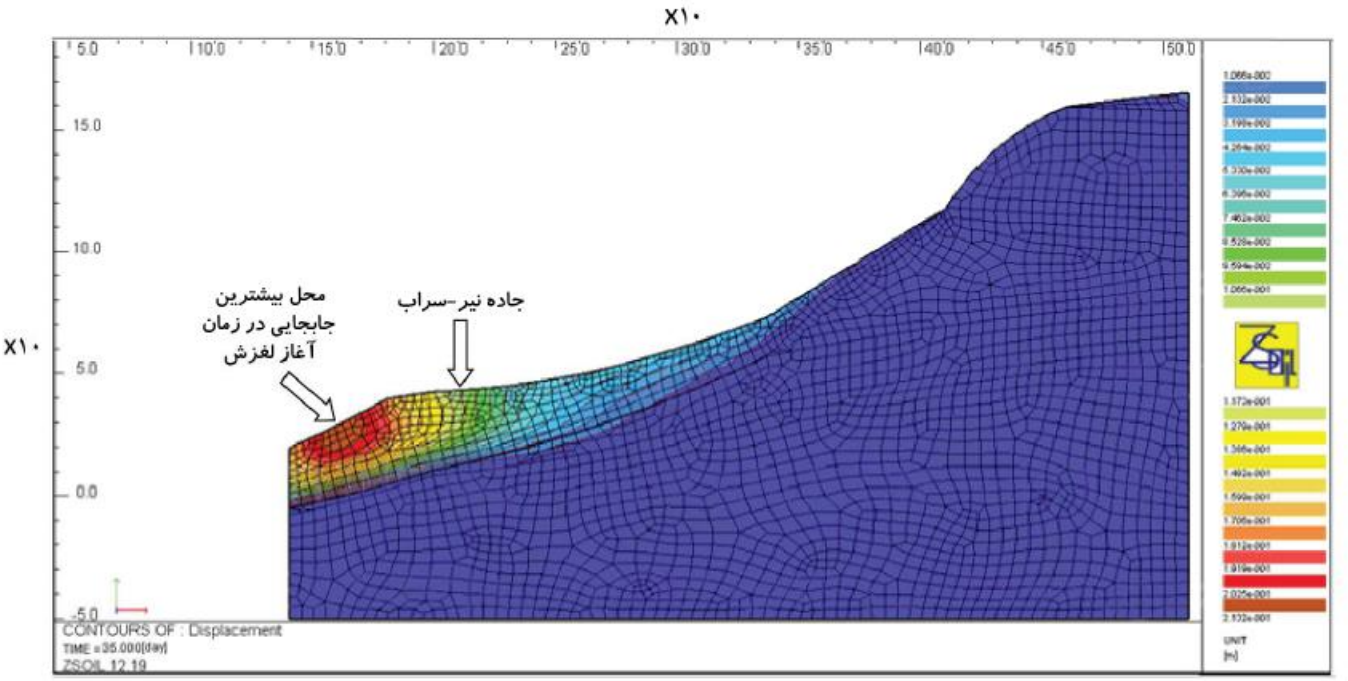
بالایی نداشته باشد (البته برای محاسبات طراحی مانند شیروانی‌ها کافی است) و نقطه آغاز لغزش را نمی‌توان برآورد نمود. به همین منظور با داده‌های به‌دست آمده از هندسه لغزش و خصوصیات مهندسی خاک، پایداری شیب مذکور به وسیله نرم‌افزار ZSOIL نیز شبیه‌سازی گردید(شکل۱۸) تا هم دو مدل با هم مقایسه شوند و هم صحت نتایج بدست آمده را تایید نماید. این مدل با استفاده از روش عناصر محدود به شبیه‌سازی احتمال ناپایداری و جابجائی عناصر کوچک خاک پرداخته و هرگونه ناپایداری و جابجایی موضعی را مدل می‌نماید و عملاً نیاز به تعریف سطح لغزش پیش‌فرض ندارد. نتایج مدل شبیه‌سازی شده در ZSOIL نشان دادند که آغاز لغزش به علت حرکت ابتدایی پاشنه لغزش می‌باشد که به دلایل مختلفی از جمله تجمع آب و بالا رفتن فشار آب منفذی در پایین لغزش اتفاق افتاده است. همچنین حداکثر میزان جابجایی اولیه در آغاز لغزش در مدل بیش از ۲ متر بدست آمده است.



شکل۱۶. نتیجه شبیه‌سازی ۳۵ روز بارندگی که نشان دهنده نفوذ کم آب باران می‌باشد.



شکل۱۷. ضریب اطمینان نسبتا بالای مواد لغزش قبل از اعمال تاثیر سطح آب زیرزمینی(تصویر بالا) نتیجه شبیه‌سازی پایداری با سطح آب زیرزمینی ۱۰ متر بالای لایه توف(تصویر پایین) حداکثر عمق لغزش ۳۰ متر می‌باشد.



شکل۱۸. نتیجه شبیه‌سازی حاصل از نرم‌افزار ZSOIL که مکان و میزان جابجایی در آغاز لغزش را نشان می‌دهد (بیشترین جابجایی در حد ۲ متر می‌باشد).

بحث و نتیجه‌گیری

بررسی مناطقی که از لحاظ زمین‌شناسی و زمین‌ریخت‌شناسی مستعد وقوع زمین‌لغزش هستند در تمام پروژه‌های عمرانی به‌ویژه سازه‌های خطی امری ضروری می‌باشد. اگر منطقه مورد نظر دارای شواهد متعدد رخداد زمین‌لغزش‌های قدیمی باشد، اهمیت این مسئله دوچندان می‌شود. زمین‌لغزش ۱٦ خرداد سال ۱۳۸٤ که در منطقه آتشفشانی (گردنه صائین) در حدفاصل جاده نیر-سراب رخ داده مثال خوبی برای این مطلب است. عوامل مختلفی در ایجاد این زمین‌لغزش نقش داشته‌اند که از جمله می‌توان به عوامل زمین‌شناسی(سنگ‌شناسی و ساختار زمین‌شناسی)، ضخامت و بافت خاک و سنگ‌های سست، شیب دامنه، و بالاخره آب‌های زیرزمینی اشاره نمود. شواهد زمین ریخت شناسی قدیمی منطقه و بررسی‌های چینه‌شناسی در اطراف شیب لغزیده نشان می‌دهند که به احتمال زیاد لغزش گردنه صائین در یک فروافتادگی قدیمی[1] واقع شده است.

بنظر می‌رسد که لایه‌ای از تورف آتشفشان سبلان که در پرتگاه اصلی لغزش مشاهده نمی‌شود (اما بیرون‌زدگی‌های آن در دوطرف لغزش و در ترانشه جاده قابل مشاهده است)، سنگ کف لغزش را برجود آورده باشد. از آنجائیکه ضخامت این لایه به صورت غیرعادی در زیر زمین لغزش صائین متغیر (در تمام گمانه ها ضخامت لایه تورف یکسان نیست) و بسیار کم (گمانه شماره۲) می‌باشد، احتمالا بخشی از خود این لایه نیز در فرآیند لغزش درگیر بوده است. بعلاوه، بدلیل حفر این گمانه‌ها بعد از وقوع لغزش و وجود لایه تورف در گمانه میانی توده لغزشی، نمی‌توان سطح لغزش را پایین‌تر از این لایه تصور نمود. البته به دلیل نبود لایه‌بندی منظم در این منطقه (بدلیل آتشفشانی بودن و نیز شدت هوازدگی) نمی‌توان به داده‌های یک گمانه[2] استناد نمود؛ بنابراین مدل پایداری بر مبنای لغزش بر روی این لایه تورف هوازده آرژیلیتی شده طراحی گردید. بدین ترتیب، به احتمال زیاد چنین فروافتادگی سبب زهکش شدن آب‌های سطحی و نیز زیرسطحی از منطقه

1. Paleo-depression

2.BH1

بالادست و در طول زمان به سوی محل زمین‌لغزش گردنه صائین شده، و در نتیجه باعث تشکیل زون هوازده آتشفشانی مستعد چنین لغزش بزرگی گردیده است.

بررسی دقیق زمین‌ریخت‌شناسی دیرین در مناطق آتشفشانی مستعد لغزش، دارای اهمیت بالایی است. یکی از عوامل ایجاد استعداد بالای لغزش، تغییر ناگهانی ضخامت خاک و سنگ در محل لغزش باشد. البته وجود زمین‌لغزش‌های قدیمی(وجود سطوح هاموکی) در محل حاکی از آن است که منطقه مستعد وقوع لغزش بوده و احتمالاً احداث جاده محرک اولیه وقوع آن بوده است. همچنین به دلیل دگرسان شدن(آرژیلیتی شدن) لایه تراورتن در زیر توده لغزشی و نیز خردشدگی کمتر آن نسبت به سنگ‌های دیگر موجود در محل، ممکن است این لایه به عنوان مانعی در مقابل نفوذ آب عمل کرده و بنابراین موجب شکل‌گیری یک زون اشباع با عمق نسبتاً زیاد شده باشد.

عدم توجه به مسئله مهم تجمع آب از بالادست به سمت توده لغزشی و تجمع آن بر روی لایه کلیدی تراورتن در زمان احداث جاده و نیز در مطالعات پایدارسازی توده لغزشی پس از وقوع زمین‌لغزش سال ۱۳۸٤، باعث شده است که بعد از گذشت تقریبا یک دهه از عملیات پایدارسازی و خاک‌برداری، بخشی از لغزش به دلیل عدم پیش بینی شرایط هیدرولوژیکی توده در حال نشست بوده و باعث ایجاد ترک‌هایی در سطح جاده جدید شده است. ذکر این نکته ضروری است که وجود یک لایه کلیدی در منطقه(مانند تراورتن مورد نظر) می‌تواند در پیش‌بینی زمین‌لغزش‌های آینده در آن منطقه و مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

مشاهدات صحرایی، چینه‌شناسی و آتشفشانی در منطقه نشان می‌دهد که افتادگی‌های مشابه با وجود لایه‌های کلیدی مانند تراورتن لیتیک دگرسان شده می‌تواند نشانگر پتانسیل خطر در امتداد مسیرها در جاده‌های کوهستانی اطراف آتشفشان‌ها باشد. همچنین با توجه به اطلاعات موجود از زمین‌لرزه‌های کشور، زمین‌لرزه هیچ نقشی در وقوع این لغزش نداشته است. شبیه‌سازی زمین‌لغزش گردنه صائین در این پژوهش نشان داد که این امر می‌تواند به صورت موفقیت‌آمیزی در پروژه‌های مختلف پایداری شیب در مناطقی که دارای شرایط زمین‌شناسی مشابهی هستند نیز بکار رود و این شبیه‌سازی به عنوان یک مدل کالیبره شده برای منطقه صائین در نظر گرفته می‌شود که می‌تواند در نقاط دیگر استان که احتمال وقوع لغزش وجود دارد، برای ارزیابی پایداری شیب مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

اداره کل هواشناسی استان اردبیل، داده‌های باران‌سنجی ایستگاه نیر و سرعین

امامی، م، ۱۳۷۹. ماگماتیسم در ایران. انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کل کشور.

پارسایی، ل، و علیمحمدی، ص، ۱۳۹۱. زمین‌لغزش در ایران، انتشارات جهاد دانشگاهی.

پژوهشگاه بین المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله(سایت اینترنتی)، داده‌های زلزله تمام نقاط کشور به تفکیک زمان.

حفیظی، م، عباسی، ب، اشتری تلخستانی، ا، ۱۳۸۹. بررسی زمین‌لغزش گردنه صائین اردبیل به منظور تأمین ایمنی راه با روش ترموگرافی الکتریکی دوبعدی و سه بعدی. مجلهٔ فیزیک زمین و فضا، شماره۱: ۲۸-۱۷.

درویش زاده، ع، ۱۳۷٤. آتشفشان شناسی. انتشارات دانشگاه پیام نور.

رجایی، م، اصغری‌مقدم، ا، ۱۳۸۰. هیدروژئوشیمی و ژئومتری چشمه‌های آب معدنی و آب‌گرم دامنه‌ی جنوب‌شرقی سبلان(سرعین و بوشلی). مجموعه مقالات پنجمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.

سازمان نقشه برداری کل کشور، ۱۳۹۲. نقشه ۱:۲۰۰۰۰ توپوگرافی

ستارزاده قدیمی، ی، قیطانچی، م، محمدی، ا، ۱۳۸۰. فعالیت لرزه‌ای قابل توجه در ناحیه‌ی سرعین واقع در جنوب‌غربی آتشفشان سبلان. مجموعه مقالات پنجمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.

شاه‌بیک، ا، ۱۳۷۲. زمین‌شناسی ایران؛ آب‌های معدنی و گرم. سازمان زمین‌شناسی کشور.

شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان اردبیل، ۱۳۹۱. داده‌های باران‌سنجی ایستگاه‌های نیر، سرعین و یامچی و برف‌سنجی صائین.

شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان اردبیل، ۱۳۸۸. گزارش آماربرداری منابع آب سطحی و زیرزمینی در محدوده مطالعاتی اردبیل.

قهرمانی، ا، ۱۳۸٤. گزارش پایدارسازی و تثبیت زمین‌لغزش گردنه صائین(محور نیر- سراب) در استان اردبیل. اداره کل راه و شهرسازی استان اردبیل.

مددی، ع، ۱۳۸۸. بررسی ناپایداری ژئومورفولوژیک گردنه صائین(بین شهر نیر و سراب، منطقه آذربایجان) با استفاده از روش آنبالاگان. مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره ۳۷: ۹٤-۷۷.

مهندسین مشاور تردد راه، ۱۳۸٤. گزارش عملیات حفاری و مطالعات مکانیک خاک منطقه رانشی صائین(محور نیر- سراب). اداره کل راه و ترابری استان اردبیل.

هاشمی طباطبائی، س، ۱۳۸٤. گزارش مقدماتی زمین‌لغزش محور مواصلاتی نیر-سراب. بخش ژئوتکنیک مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

Anon, 1979a. Classification of rocks and soils for engineering geological mapping rock and soil materials. Bulletin of the Internatinal Association of Engineering Geology, 19: 71-364.

Coker, R.J., Fahey, B.D., 1993. Road related mass movement in weathered graniteGolden Downs and Motueka Forests, New Zealand: A note. Journal of Hydrology (N.Z.), 31: 65–69.

Del Potro, Rodrigo, and Hürlimann, M., 2008. Geotechnical classification and characterisation of materials for stability analyses of large volcanic slopes. Engineering Geology, 98: 1–17.

Forlati, F., Gioda, G., Scavia, C., 2001. Finite element analysis of a deep-seated slope deformation. Rock Mechanic and Rock Enginneing, 34: 135–159.

Gercek, H., 2007. Poisson's ratio values for rocks. Rock Mechanics and Mining Sciences: An International Journal, 44: 1–13.

Goodman, R.E., 1989. Introduction to rock mechanic. John wiley and sons, 562p.

Gucinski, H., Furniss, M.J., Ziemer, R.R., and Brookes, M.H., 2001. Forest roads: a synthesis of scientific information. Forest Service Pacific Northwest Research Station: U.S. Department of Agriculture, Portland, 103 pp.

Hasegawa, S., Dahal, R.K., Yamanaka, M., Bhandari, N.P., Yatabe, R., Inagaki, H., 2009. Causes of large landslides in the Lesser Himalaya of central Nepal. Enviromental Geology, 57: 1423–1434.

Jackson, J., 1992. Partitioning of Strike-slip and convergent motion between Eurasia and Arabia in Eastern Turkey and Caucasus.Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 97(B9): 12471-12479. (DOI: 10.1029/92JB00944).

Jiu, J., Jiao, 2005. Confined groundwater zone and slope instability in weathered igneousrocks in Hong Kong. Engineering Geology, 80: 71-92.

Kalkani, E.C., Piteau, D.R., 1976. Finite element analysis of toppling failure at Hell's Gate Bluffs, British Columbia. Environmental and Engineering Geoscience 13(4):315-327.

Kim, D., Im, S., Lee, S.H., Hong, Y., Cha, K., 2010. Predicting the Rainfall-Triggered Landslides in a Forested Mountain Region Using TRIGRS Model. Science Press and Institute of Mountain Hazards and Environment, 7: 83–91.

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F., 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. MeteorologischeZeitschrift, 15(3): 259-263.

Li, X., 2007. Finite element analysis of slope stability using a nonlinear failure criterion. Computers and Geotechics, Vol.34: 127–136.

Meier, J., Moser, M., Datcheva, M., Schanz, T., 2013. Numerical modeling and inverse parameter estimation of the large-scale mass movement Gradenbach in Carinthia (Austria).ActaGeotechnica, 8: 355–371.

Mosley, M.P., 1980. The impact of road erosion in the Dart Valley. Forestry, 25: 184–198.

Park, D.W., Nikhil, N.V., Lee, S.R., 2013. Landslide and debris flow susceptibility zonation using TRIGRS for the 2011 Seoul landslide event. Natural Hazards and Earth System Science, 13: 2833–2849.

Reid, L.M., 1981. Sediment production from gravel-surfaced forest roads, Clearwater basin. University of Washington of Fisheries Research Institute, 247p.

Reubi, O., Ross, P.S., White, J.D.L., 2005. Debris Avalanche deposits associated with large igneous province volcanism: An example from the Mawson Formation, central Allan Hills, Antarctica. Geological Society of America Bulletin, 117: 1612-1627.

Saadatkhah, N., Kassim, A., Lee, L.M., 2014. Hulu Kelang, Malaysia regional mapping of rainfall-induced landslides using TRIGRS model. Arabian Journal of Geoscience, 8(5): 3183–3194.

Sandro de Vita, 2006. Cyclical slope instability and volcanism related to volcano-tectonism in resurgent calderas: The Ischia island (Italy) case study. Engineering Geology, 86: 148-165.

Sidle, R.C., Pearce, A.J., O'Loughlin, C.L., 1985. Hillslope stability and land use. Water Resource Monograph, vol.11: American Geophysical Union, Washington D.C., 140 p.

Swanson, F.J., Dyrness, C.T., 1975. Impact of clearcutting and road construction on soil erosion by landslides in the western Cascade. Oregon. Geology, 3: 393-396.

Tacher, L., Bonnard, Ch., Laloui, L., Parriaux, A., 2005.Modelling the behaviour of a large landslide with respect to hydrogeological and geomechanical parameter heterogeneity. Landslide, 2: 3-14.

Ui, T., Takarada, S., Yoshimoto, M., 2000.Debris Avalanches In Sigurdsson. Encyclopedia of Volcanoes, San Diego: Academic Press

Varnes, D. J., 1978.Slope movement types and processes.

Westaway, R., 1994. Present-day kinematics of the Middle East and Eastern Mediterranean. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 99 (B6): 12071-12090

Z_Soil 2012. User manual. Zace Services Ltd Report 1985-2012. Lausanne, Elmepress International