

پایش تغییرات غلظت کاتیون‌ها در آب‌های نشتی پای لغزش‌ها بمنظور استفاده در اعلام پیش‌هشدار گسیختگی شیب‌ها

ایمان کرمانی^۱، ضیاءالدین شعاعی^{۲*}

دریافت مقاله: ۹۰/۷/۶ پذیرش مقاله: ۹۰/۱۱/۵

چکیده

بلاای طبیعی از جمله زمین‌لغزش‌ها هر ساله خسارات زیادی را به اماکن عمومی و اموال مردم وارد کرده و در بعضی مواقع نیز همراه با خسارات جانی می‌باشند. توسعه تحقیقات و شناخت کامل‌تر رفتار لغزش‌ها اثبات نموده است که پیش‌بینی زمان وقوع اغلب آن‌ها امکان‌پذیر است. تحقیق پیرامون چگونگی پیش‌بینی زمان وقوع لغزش‌ها یکی از مهم‌ترین تلاش‌های محققین در دهه‌های اخیر بوده است. این پیش‌بینی‌ها تا کنون کمک‌های بسیار زیادی به مدیران منطقه‌ای جهت کاهش اثرات مخرب زمین‌لغزش‌ها نموده است.

در ترکیب شیمیایی خاک‌های حاصل از هوازدگی واحدهای مختلف زمین‌شناختی، عناصر مختلفی وجود دارند که متناسب با نوع تشکیلات زمین‌شناسی متغیر می‌باشند. آب‌های زیرزمینی که در جهت شیب هیدرولیکی از طریق مجاری موجود در خاک جریان دارند، به مرور زمان در تعامل با محیط اطراف خود عناصر قابل انحلال را در خود حل کرده و از محیط خارج می‌نماید. با گذر زمان پدیده انحلال به تعادل رسیده به نحوی که متناسب با ترکیب شیمیایی آب‌های ورودی و قابلیت تبادل یونی توده خاک، خصوصیات شیمیایی آب‌های خروجی نظیر غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها در سطح تقریباً ثابتی قرار می‌گیرند. حال در صورتی که توده خاک تشکیل دهنده یک سطح شیب‌دار دچار لغزش و جابه‌جایی شود، تعادل و نظم ساختاری توده خاک بهم خورده و زمینه تغییر در غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها فراهم می‌شود. پایش این تغییرات می‌تواند به عنوان شاخص مهمی در کنترل حرکت شیب‌ها و توسعه سیستم‌های پیش‌هشدار سریع خطر وقوع زمین‌لغزش‌ها، مورد استفاده قرار گیرد.

در این تحقیق فرآیند فوق به روش آزمایشگاهی مدل گردیده و نتایج پایش تغییرات غلظت کاتیون‌های سدیم، پتاسیم، منیزیم و کلسیم تحت تأثیر فرآیند جابجایی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که با توجه به تنوع در ترکیب خاک‌ها، شناخت دقیق عناصر حساس به آبشویی در هر منطقه و پایش میزان و نحوه تغییرات یونی در آب‌های خروجی از پای شیب‌ها می‌تواند به عنوان علائم پیش‌هشدار دهنده آغاز حرکت شیب‌ها، مورد استفاده قرار گیرد.

کلید واژه‌ها: گسیختگی شیب‌ها، ترکیب شیمیایی آب‌ها، پایش، پیش‌هشدار، غلظت کاتیون‌ها

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

۲- عضو هیات علمی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، zshoaei@gamil.com

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

توسعه تحقیقات و شناخت کامل تر پدیده زمین لغزش نشان داده است که پیش بینی زمان وقوع این پدیده با کمک ارزیابی تغییرات ناشی از فعالیت آن‌ها امکان پذیر است. پیش بینی زمان وقوع بلایای طبیعی نظیر سیل، جریان‌های آواری و زمین لغزش‌ها به منظور برنامه ریزی جهت کاهش ریسک و نجات جان مردم از دیرباز موضوع بسیار مهمی در کارهای تحقیقاتی بوده است. پیچیدگی ساختمان‌های زیرسطحی و سازوکار نامشخص تغییرات وضعیت آب در شیب‌ها و نحوه تأثیر عوامل خارجی نظیر زلزله‌ها بر ناپایداری شیب‌ها، شناخت فرآیندهای مؤثر در وقوع لغزش‌ها را پیچیده تر می‌کند. ولی معمولاً اغلب زمین لغزش‌ها قبل از رانش اصلی، دارای پیش علائمی می‌باشند که در پیش بینی خطر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (Shoaei et al., 2001). معمولاً جهت پایش رفتاری یک شیب، علاوه بر اندازه گیری میزان حرکت که مستقیماً تغییرات جابه‌جایی شیب نسبت به زمان را اندازه گیری می‌نماید، سایر عوامل محیطی مؤثر بر رانش نیز پایش می‌گردد (شعاعی، ۱۳۷۶). محاسبه میزان جابه‌جایی شیب‌ها به صورت محاسبه مستقیم حرکت با نصب ابزار دقیق مناسب و یا استفاده از سیستم‌های DGPS (Dual Frequency Global Positioning System) انجام می‌پذیرد (شعاعی و امام‌جمعه، ۱۳۸۲). هریک از ابزارهای پایش حرکت شیب‌ها علاوه بر هزینه بالای خرید و نگهداری، معمولاً از نظر فن‌آوری با محدودیت‌های تکنیکی نیز همراه هستند، که در نهایت یک سری عدم قطعیت را در اطلاعات دریافتی ایجاد می‌نمایند. مهم‌ترین موضوعی که در پیش بینی وقوع رانش اصلی در یک شیب دارای پتانسیل ناپایداری مطرح می‌باشد، وجود یا عدم وجود علائم پیش‌هشدار می‌شود، قبل از وقوع رانش اصلی و با یک فاصله زمانی منطقی می‌باشد. (Shoaei and Karamsoltani, 2011) نشان دادند که معمولاً در خاک‌های دانه ریز رفتار لغزشی به صورت خزشی بوده که در صورت پایش دقیق فازهای خزشی شامل خزش اولیه، خزش ثانویه و خزش اصلی (Primary, Secondary and Tertiary Creep)

امکان پیش‌بینی زمان لغزش اصلی (Tertiary creep) فراهم می‌گردد. در خاک‌های درشت‌دانه نظیر ماسه‌ها و لس‌ها وقوع لغزش به طور ناگهانی بوده و تقریباً هیچ‌گونه علائم حرکتی قابل ثبت توسط ابزارهای رایج، قبل از لغزش اصلی مقدور نمی‌باشد. در اغلب لغزش‌ها، قبل از شروع حرکت قابل مشاهده در سطح و در چاه‌های مشاهده‌ای، حرکت‌های فوق‌العاده خفیف در امتداد سطح لغزش آغاز می‌گردد. با ادامه این حرکت‌های خفیف، به تدریج سطح لغزش شکل گرفته و پس از آن حرکت‌های مشهود آغاز می‌گردد که از این مرحله به بعد اندازه‌گیری حرکت توسط ابزارهای رایج مقدور می‌گردد. در بسیاری از لغزش‌ها به دلیل فاصله زمانی کوتاه بین شکل‌گیری سطح لغزش و وقوع لغزش اصلی عملاً امکان انجام تمهیدات لازم به منظور کاهش خسارات و ریسک وجود ندارد. لذا در این تحقیق امکان پایش حرکت‌های اولیه و نامحسوس سطح لغزش جهت استفاده به عنوان علائم پیش‌هشدار مورد بررسی قرار گرفت.

حضور آب یکی از فاکتورهای اصلی در تحریک شیب‌ها بوده و معمولاً ۹۰٪ زمین لغزش‌ها بر روی سطوح لغزشی اشباع و نیمه اشباع صورت می‌پذیرد (Yan, 1994). در برخی از لغزش‌ها علی‌رغم عدم اشباع توده لغزشی، شرایط لغزش با اشباع یک لایه رسی در عمق توده فعال می‌گردد (Mollard and Hughes, 1973) که این سطح یا سطوح، همان سطوح برشی هستند که تغییرات ریز ساختاری در آن‌ها به عنوان عاملی مهم در تغییرات مقاومت برشی نهشته‌های غنی از رس عمل می‌کند (Moon, 1993). حتی در برخی از رس‌ها کاهش مقاومت برشی در زمانی به حداکثر می‌رسد که سطح لغزش به حداکثر مقدار جذب آب برسد که در خاک‌های حساس، این عمل سریع‌تر رخ می‌دهد (Soderblum, 1974). خصوصیات خاک، شاخص خوبی برای تخمین و ارزیابی رفتار زمین لغزش‌ها می‌باشد. رفتار خاک‌ها هر چه به رفتار خاک‌های رسی شبیه‌تر باشد، لغزش در آن‌ها معمولاً همراه با آثار هشداردهنده قبلی بیشتری همراه است (شعاعی، ۱۳۷۶; Zung et al., 2008). حرکت لغزشی در این خاک‌ها

رس‌ها بر خلاف رس‌هایی نظیر کائولینیت و ایلیت در اثر اتصال یون‌هائی نظیر کلسیم به ذرات رس قوی‌تر، از ثبات بیشتری برخوردار هستند (آذر، ۱۳۶۹). استعداد تبادل یونی در خاک‌های ماسه‌ای کمتر است و یا وجود ندارد.

اصول مورد نظر در انجام این تحقیق که به منظور استفاده از تغییرات ترکیب شیمیائی آب‌های نشتی از بدنه شیب‌های مستعد لغزش، در اعلام پیش‌هشدارهای وقوع رانش زمین طراحی گردیده به شرح زیر می‌باشد:

۱. آب‌های نفوذی به یک توده لغزشی در طول زمان‌های گذشته با عبور از فضای متخلخل توده خاک مسیرهای مشخصی را برای عبور خود به سمت پائین شیب انتخاب می‌نماید.

۲. آب‌های عبوری، متناسب با ترکیب شیمیائی و pH محیط، عناصر مختلف موجود در مسیرهای عبوری خود را حل کرده و به بیرون توده انتقال می‌دهد.

۳. در صورت ثابت ماندن ساختار فیزیکی خاک ترکیب شیمیائی آب نیز به مرور زمان تثبیت می‌گردد.

۴. در صورتی که به هر علت نظیر وقوع جابه‌جایی در سطح لغزش، تعادل ساختاری خاک به هم بخورد، شرایط زهکشی و مسیر عبور آب‌های نفوذی نیز به هم خورده و شرایط انحلال یون‌ها دچار تغییر می‌شود. در نتیجه انتظار می‌رود میزان تبادل یونی آب‌های عبوری با محیط اطراف افزایش یافته و غلظت یون‌های آب‌های خروجی از دامنه نیز افزایش پیدا کند.

۵. در صورتی که این تغییرات به طور مستمر به ثبت برسد، پایش این تغییرات می‌تواند به عنوان علائم آغازین وقوع یک رانش، مورد استفاده قرار گرفته و متعاقب آن زمان وقوع رانش اصلی نیز پیش‌بینی گردد.

با توجه به حساسیت این روش به کنترل دقیق و قابل اعتماد عوامل مؤثر بر تغییرات غلظت کاتیون‌ها در آب‌های خروجی از یک توده لغزشی، لازم است که با پایش هم‌زمان میزان بارش و زمان تأثیرگذاری آن بر آبدهی چشمه‌های نشتی پای شیب، تأثیرات عواملی نظیر بارش‌های استثنائی و ذوب

به صورت حرکات بزرگ پی‌درپی و تدریجی بوده و به طور غیرمعمول در شیب‌های با زاویه ملایم‌تر عمل می‌کند (Chatwin et al. 1994). خاک‌های دانه‌ریز با پلاستیسیته بالا می‌توانند تا ۹۰٪ خصوصیات ذاتی مقاومت برشی خود را در اثر جذب آب از دست بدهند، که این کاهش در اثر انبساط و وقوع برش‌های خفیف در توده خاک و در نتیجه بر هم خوردن پیوندهای بین ذرات خاک حاصل می‌گردد (Leroueil and Vaughan, 1990). به همین دلیل انتظار می‌رود با تداوم برش‌های خفیف در خاک، تغییر در ترکیب شیمیائی آب‌های عبوری از پروفیل خاک نیز مشاهده شود. رابطه بین تغییر در بازشدگی ترک‌های سطحی در یک لغزش و تغییر در یون‌های آب‌های نشتی از بدنه توده لغزشی در برخی از کارهای تحقیقاتی گزارش گردیده است (Sakai, 2001, 2009). در این تحقیقات نشان داده شد که افزایش یون‌ها رابطه مستقیم با افزایش بازشدن ترک‌ها و درزه‌های جوان تازه شکل گرفته در اثر حرکت شیب سنگی دارد. تبادل کاتیونی یکی از خصوصیات مهم خاک‌های رسی است. یک واحد رس به دلیل ساختار شبکه‌ای تتراهدراول و اکتاهدراول دارای بار الکتریکی منفی در سطح خود بوده که یون‌های آزاد در محیط را در اطراف خود با نیروی جاذبه الکترواستاتیکی جذب می‌کند. بخش سطحی و خارجی تجمع یون‌ها به دلیل قدرت اتصال ضعیف‌تر می‌تواند توسط آب‌های عبوری زهکشی شده (مجللی، ۱۳۳۶) و از خاک خارج گردد. میزان تغییرات انحلال یونی با کمک سنجش غلظت یون‌ها در آب‌های خروجی ارزیابی می‌گردد که معمولاً پس از مدتی به ثبات می‌رسد.

علاوه بر نقش مهم رس‌ها در تبادل کاتیونی خاک‌ها، نوع رس نیز در میزان این تبادل بسیار مؤثر می‌باشد. به عنوان مثال در رس‌هایی نظیر کلریت و مونتموریلونیت یون‌ها علاوه بر جذب به سطح واحدهای رسی، در بین صفحات یا لایه‌های رس نیز قرار دارند. بخش یون‌های بین لایه‌ای در تبادل یونی با محیط اطراف نقش فعالی نداشته، در حالی که یون‌های جذب سطحی دارای پتانسیل تبادل بیشتری هستند. این گونه

اتصال کامل به بخش فوقانی خاک و جلوگیری از لغزش آن بر روی لایه خاکی در زمان برش تعبیه گردید. جهت کنترل تراکم خاک سطح لغزش در هنگام آزمایش دو تکیه گاه در بدنه محفظه و در امتداد شیب تعبیه تا از جابه‌جایی عمودی صفحه فوقانی (B₂) و به هم ریختگی سطح لغزش جلوگیری شود. تصویر کامل مدل ساخته شده در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به ضرورت ثابت بودن ترکیب شیمیائی آب ورودی به سطح لغزش، یک مخزن اصلی با ظرفیت ۱۸۰ لیتر در ارتفاع مناسب از مدل قرار داده شد (۱ در شکل ۲). همچنین جهت کنترل هد آب ورودی به سطح لغزش یک مخزن فرعی متصل به مدل تعبیه که به مخزن اصلی متصل و ارتفاع آب در آن به کمک یک شیر اتوماتیک کنترل می‌گردد. جهت جلوگیری از به هم خوردن ساختمان خاک در بخش ورودی آب به سطح لغزش و جلوگیری از وقوع آشفته‌گی در جریان آب خروجی و خروج ریزدانه‌ها در پاشنه دو لایه فیلتر نمدی به ضخامت ۲ سانتی‌متر (F در شکل ۱) در بالادست و پائین‌دست سطح لغزش نصب گردید.

در قسمت پائین‌دست شیب، یک شیار عرضی در تمامی عرض مدل ایجاد شد تا تمامی آب‌های نشستی را جمع‌آوری نماید (۶ در شکل ۲). شیار جمع‌آوری آب توسط یک لوله شیردار به خارج از مدل هدایت می‌شد. آب خروجی در یک استوانه مدرج جمع‌آوری و سپس جهت آزمایش ارسال می‌شد (۸ در شکل ۲).

۲-۲. تهیه نمونه و آماده‌سازی مدل

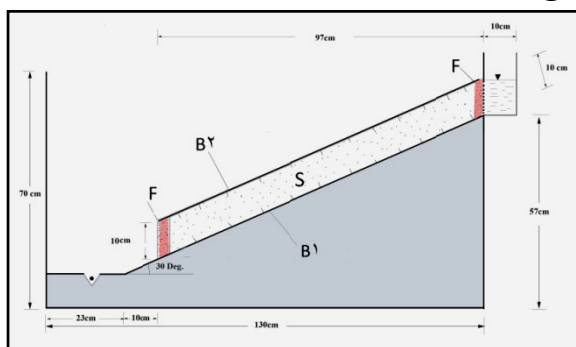
با توجه به اهداف تحقیق، باید از خاکی استفاده می‌شد تا ضمن داشتن قابلیت تراکم لازم جهت شبیه‌سازی سطح لغزش، دارای نفوذپذیری کافی به منظور عبور آب نیز باشد. همچنین این خاک باید از ترکیبات رسی مناسبی که دارای توانائی تبادل یونی است نیز برخوردار باشد. با بررسی خصوصیات خاک‌های مختلف، نوعی خاک رسی از معدنی در جنوب غرب تهران که برای توسعه فضای سبز و پارک‌های تهران بهره‌برداری می‌شد، انتخاب گردید. جهت بررسی

برف‌های ناشی از تغییر فصل‌ها نیز شناسائی گشته و در تجزیه و تحلیل اطلاعات، مورد توجه قرار گیرد (کرمانی، ۱۳۹۰).

۲. مواد و روش‌ها

۱-۲. مدل سطح لغزش اشباع

در این تحقیق چگونگی تغییر غلظت کاتیون‌های آب‌های خروجی از پای شیب‌ها تحت تأثیر جابه‌جایی در یک مدل فیزیکی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت. شکل ۱ مقطع طولی مدل ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱. مقطع طولی مدل فیزیکی ساخته شده از یک سطح

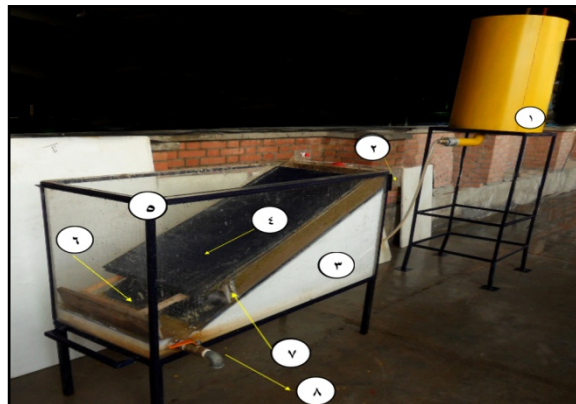
لغزشی اشباع

مدل ساخته شده دارای ابعاد قاعده 130×70 و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر است. این مدل در محفظه‌ای با همین ابعاد از جنس پلکسی گلاس شفاف قرار داده شد. همان‌طور که در شکل ۱ ملاحظه می‌گردد، جهت جلوگیری از نفوذ آب به عمق توده و کنترل نشت آب در امتداد یک سطح لغزشی (S در شکل ۱)، بخش زیرین مدل از یک بلوک یکپارچه و نفوذناپذیر ساخته شده است (قسمت B₁ در شکل ۱). تمامی درزه‌های اطراف این بلوک با چسب سیلیکون آب‌بندی گردیده به‌طوری‌که هیچ‌گونه نشستی به پائین دست بلوک B₁ وجود نداشته باشد. سطح این بلوک به عنوان سطح زیرین لایه لغزشی بوده که با شیب ۳۰ درجه ساخته شد. جهت جلوگیری از لغزش لایه خاک بر روی این سطح در هنگام برش، تعدادی میخ به نحوی در آن تعبیه گردید که ارتفاع مفید میخ در داخل نمونه خاک در حدود ۲ سانتی‌متر باشد.

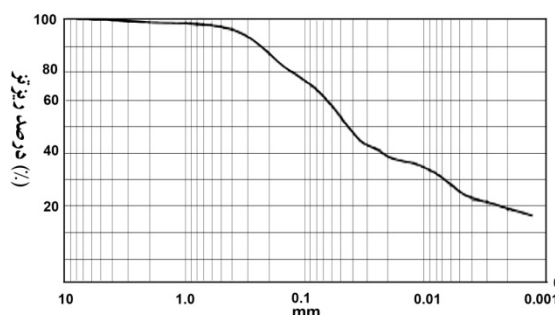
بخش فوقانی لایه خاک (سطح لغزش) نیز یک صفحه بوده (B₂ در شکل ۱) که نظیر سطح زیرین، تعدادی میخ جهت

با توجه به ضرورت حرکت یکنواخت آب در خاک، لازم است تا نمونه خاک همگن در تمامی جهات دارای تراکم یکنواخت باشد. لذا در ریختن نمونه به داخل مدل و تراکم آن باید نهایت دقت به عمل آید. بدین منظور ابتدا مقدار مناسب خاک انتخاب و سپس با مقدار مناسب آب مرطوب گردید. مقدار رطوبت در حدی تنظیم گردید تا ضمن اینکه به ابزار کوبیدن نچسبد، تراکم لازم را نیز بدست آورد. نمونه خاک در چند لایه به داخل مدل ریخته شد و هر لایه به طور جداگانه با ضربات یکنواخت سمبه متراکم گردید. ابعاد سمبه در حدی انتخاب گردید تا فضای بین میخ‌های تعبیه شده در سطح زیرین را به راحتی متراکم سازد. پس از کوبیدن لایه به لایه و رسیدن ضخامت نمونه به میزان ضخامت طراحی شده (۱۰ سانتی‌متر)، صفحه فوقانی را که نظیر صفحه زیرین میخ‌هایی به ارتفاع ۲ سانتی‌متر در آن تعبیه گردیده است را بر روی سطح خاک گذاشته و با ضربه‌های آرام به نحوی تحت فشار قرارداده تا میخ‌ها به داخل نمونه خاک فرو روند. وزن مخصوص لایه تهیه شده پس از کوبیدن به $\gamma_w = 1/65 \text{ g/cm}^3$ رسید که تشابه زیادی با نمونه خاک‌های موجود در طبیعت دارد. پس از آماده شدن نمونه و نصب لایه بالایی، اتصال مخزن اصلی آب به مخزن مدل برقرار شد. پس از پر شدن مخزن مدل، مرحله نفوذ آب به داخل سطح لغزش آغاز شد. آب وارد شده به داخل توده خاک تحت تأثیر شیب هیدرولیکی موجود، به سمت پائین‌دست و انتهای سطح لغزش حرکت کرده و پس از نشت از فیلتر نمادی پائین‌دست، توسط شیپار عرضی ایجاد شده در کف مدل در ظروف مخصوص آزمایشگاه جمع‌آوری و بلافاصله جهت انجام آنالیز شیمیائی به آزمایشگاه شیمی خاک ارسال شد. در این مدل، آزمایش بر روی سطح لغزش در دو مرحله انجام گردید.

خصوصیات کلی خاک آزمایش‌های دانه‌بندی، حدود آتبرگ و برش مستقیم در حالت اشباع بر روی آن انجام شد. نتایج حاصل در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۲. تصویر کامل مدل فیزیکی ساخته شده در آزمایشگاه
 ۱- مخزن اصلی آب ۲- حوضچه آرامش ۳- بلوک ثابت تحتانی ۴- بلوک متحرک فوقانی ۵- چارچوب مدل فیزیکی محصور شده با صفحات پلکسی‌گلاس ۶- شیپار جمع‌آوری آب خروجی ۷- فیلتر نمادی ۸- لوله خروج آب از شیب
 همچنین با کمک آزمایش XRD (X-Ray Diffraction)، شناسایی نوع رس‌های نمونه نیز انجام پذیرفت، که نتایج آن نشان‌دهنده حضور کانی‌های رس کلریت، ایلیت، و مونتوریلونیت در نمونه بود. تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها حکایت از فراوانی بیشتر رس‌های از نوع کلریت و ایلیت نسبت به مونتوریلونیت دارد. منحنی دانه‌بندی خاک نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به حضور ۲۷٪ رس، ۴۳٪ سیلت و ۳۰٪ ماسه، خاک با استفاده از طبقه‌بندی یونیفاید در رده CH قرار می‌گیرد.



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده در مدل

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک مورد استفاده در مدل فیزیکی

پارامترهای مقاومت برشی در حالت اشباع		نفوذپذیری cm/sec	حد خمیری %(PL)	حد روانی %(LL)	وزن مخصوص g/cm ³ (γ_w)	نوع خاک (سیستم یونیفاید)
ϕ (Deg.)	C Kg/cm ²					
۱۶	۰/۸	$3/83 \times 10^{-7}$	۱۶/۶۹	۵۹/۲	۱/۶۵	CH

الف) مرحله اول

جابه‌جایی، این مرحله پس از قطع موقت آب ورودی انجام پذیرفت و در هنگام جابه‌جایی، وزنه کافی بر روی سطح فوقانی قرار داده شده تا مانع هرگونه انفصال صفحه فوقانی از نمونه خاک و آزاد شدن خاک شود. پس از انجام مرحله جابه‌جایی، مجدداً جریان آب برقرار و نمونه‌برداری از آب خروجی از مدل، ادامه پیدا کرد. کلیه یون‌های انتخاب شده در مرحله اول، در مرحله دوم نیز مورد مطالعه قرار گرفت. روش نمونه‌برداری نیز مشابه مرحله اول و به این صورت بوده است که در ابتدای آزمایش، به ازای هر بار پرشدن نمونه بردار که حجم آن ۱۰۰۰ سانتی‌متر مکعب بوده است، نمونه‌برداری انجام و به آزمایشگاه ارسال شد. تعداد نمونه برداشت شده در مرحله دوم از زمان وقوع لغزش تا تثبیت غلظت کاتیون مورد نظر، حدود ۲۷ نمونه در مدت حدود ۳۶۵ ساعت بود.

۳. نتایج آزمایش‌ها در مدل

زمان کل آزمایش برای مرحله اول ۶۳۰ ساعت و برای مرحله دوم ۳۶۵ ساعت و جمع دو مرحله ۹۹۵ ساعت بود که همان‌طور که اشاره گردید ظرفیت مخزن ذخیره آب جهت انجام هر دو مرحله آزمایش به نحوی انتخاب گردید تا ترکیب آب مورد استفاده در هر دو مرحله ثابت بماند. قبل از شروع آزمایش، آب مخزن ذخیره مورد آزمایش کامل شیمیائی قرار گرفته و غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌های آن به همراه دو فاکتور pH و EC اندازه‌گیری شد (جدول ۲). مقادیر عناصر اندازه‌گیری شده به عنوان عناصر ورودی به خاک از خارج مدل، از میزان اندازه‌گیری‌های انجام شده برای آب‌های خروجی از سطح لغزش کسر گردید. در حقیقت تغییرات غلظت یون‌ها در آب‌های خروجی، میزان خالص تغییراتی

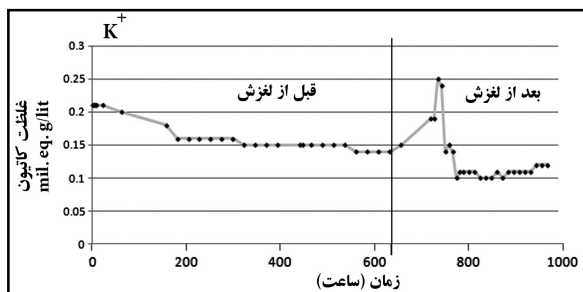
با توجه به این‌که خاک مورد استفاده از یک خاک غیراشباع بوده و در گذشته تحت تأثیر شرایط آبگذری قرار نداشته است و از سوئی دیگر به صورت دستخورد برداشت گردیده، انتظار می‌رود که در اولین آبگذری، غلظت عناصر مختلف محلول در آب خروجی، بالا باشد. لذا در مرحله اول زمان لازم به آب نفوذی داده شد تا به آرامی سطح لغزش را اشباع و عناصر و یون‌های قابل حل را از نمونه به صورت آبشویی خارج نماید. لذا بلافاصله پس از شروع خروج آب از پاشنه لغزش، کنترل غلظت عناصر محلول آغاز گردید. در این تحقیق یون‌های سدیم، پتاسیم، منیزیم و کلسیم مورد مطالعه قرار گرفت. روش نمونه‌برداری به این صورت بوده است که در ابتدای آزمایش، به ازای هر بار پرشدن نمونه‌بردار که حجم آن ۱۰۰۰ سانتی‌متر مکعب بوده نمونه‌برداری انجام و به آزمایشگاه ارسال گردید. تعداد نمونه برداشت شده در مرحله اول از زمان شروع تا زمان تثبیت غلظت کاتیون مورد نظر، حدود ۲۴ نمونه در مدت حدود ۶۳۰ ساعت بود. مرحله اول آزمایش تا زمانی ادامه پیدا کرد تا تغییرات غلظت یون‌ها به کمترین حد خود برسد و به اصطلاح تثبیت گردد. پس از تثبیت غلظت کاتیون‌های مورد مطالعه، مرحله دوم آزمایش انجام شد.

ب) مرحله دوم

مرحله دوم آزمایش، ایجاد جابه‌جایی در سطح لغزش بوده که پس از تثبیت غلظت یونی، آب خروجی انجام شد. در این مرحله سطح لغزش به میزان ۵ درصد طول، یعنی حدود ۵ سانتی‌متر در امتداد شیب جابه‌جا گردید. به‌منظور پرهیز از به‌هم‌ریختگی و وقوع روانگرایی در سطح لغزش در هنگام

به مقدار ۲/۲۸ میلی‌اکی‌والان گرم بر لیتر در آب ورودی (جدول ۲)، میزان Na^+ ورودی به آب زهکشی شده از خاک سطح لغزش، برابر ۴/۸۷ میلی‌اکی‌والان گرم بر لیتر است. این مقدار با گذشت مدت زمان حدود ۶۳۰ ساعت به سطح غلظت ۱/۶۳ میلی‌اکی‌والان گرم بر لیتر تنزل پیدا کرده و در این سطح تثبیت شد. در مرحله دوم که مقدار ۵٪ طول شیب در سطح لغزش جابه‌جایی انجام گردید، کاتیون Na^+ نسبت به این جابه‌جایی، حساسیت بسیار خوبی نشان داده و غلظت آن به سطح ۲/۹۸ میلی‌اکی‌والان گرم بر لیتر افزایش پیدا کرد. سپس با تداوم نشت آب و پس از گذشت حدود ۱۶۰ ساعت مجدداً به سطح قبل از برش (۱/۶۵ میلی‌اکی‌والان گرم بر لیتر) کاهش یافت و تا پایان آزمایش (۹۹۵ ساعت) در این سطح تثبیت شد.

همین رفتار در مورد غلظت یون K^+ نیز مشاهده گردید که نتیجه آن در شکل ۵ نشان داده شده است. غلظت کاتیون K^+ در شروع آزمایش ۰/۲۶ میلی‌اکی‌والان گرم بر لیتر بوده که با توجه به غلظت این کاتیون در آب ورودی (جدول ۲) که به مقدار ۰/۰۵ میلی‌اکی‌والان گرم بر لیتر بود، غلظت یون سدیم در آب خروجی که ناشی از انحلال این کاتیون از محیط خاک است به میزان ۰/۲۱ میلی‌اکی‌والان گرم بر لیتر اندازه‌گیری گردید. غلظت یون سدیم در مرحله اول آزمایش و پس از مدت ۵۷۰ ساعت به سطح ۰/۱۴ میلی‌اکی‌والان گرم بر لیتر کاهش یافت و تا زمان انجام برش (۶۳۰ ساعت) در این سطح تثبیت شد.



شکل ۵. نمودار تغییرات غلظت کاتیون پتاسیم

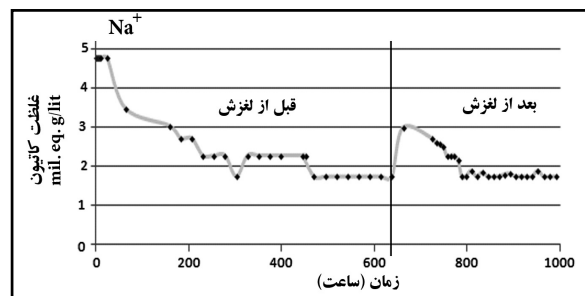
پس از اجرای مرحله دوم آزمایش و گذشت حدود ۱۰۰ ساعت از انجام برش، غلظت این کاتیون در آب خروجی از پاشنه لغزش به طور نسبی افزایش قابل توجهی داشته و به

بوده که بر اثر عبور آب از پروفیل خاک به دست آمده است. در کلیه اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، روش کار یکسان بوده است.

جدول ۲. خصوصیات شیمیائی آب مصرفی (مخزن اصلی)

Ec m.mhos/cm	pH	HCO_3^- m.eq./lit	Cl^- m.eq./lit	SO_4^- m.eq./lit	Ca^{++} m.eq./lit	Mg^{++} m.eq./lit	Na^+ m.eq./lit	K^+ m.eq./lit
۰/۶۱	۷/۰۳	۱/۷	۴	۱/۳۳	۴/۲	۰/۵	۲/۲۸	۰/۰۵

با توجه به این که خاک‌های ایران دارای منشاء آهکی بوده (موسسه پژوهش‌های برنامه‌ریزی و اقتصاد کشاورزی، ۱۳۸۴) و از سوئی دیگر میزان شوری خاک‌ها نسبتاً زیاد است، انتظار می‌رود کاتیون‌های فراوان در رس‌ها معمولاً از نوع سدیم، پتاسیم، منیزیم و کلسیم باشند. این کاتیون‌ها در محیط خاک‌های اسیدی به راحتی قابل تبادل بوده که تأثیر زیادی در تغییر استعداد پراکنش خاک‌های رسی دارد. در این تحقیق با توجه به این شرایط، تغییرات یون‌های سدیم (Na^+)، پتاسیم (K^+)، منیزیم (Mg^{++}) و کلسیم (Ca^{++}) مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از اندازه‌گیری غلظت یون‌های موجود در آب خروجی از پای شیب در نمودارهای شکل ۴ تا ۷ نشان داده شده است.

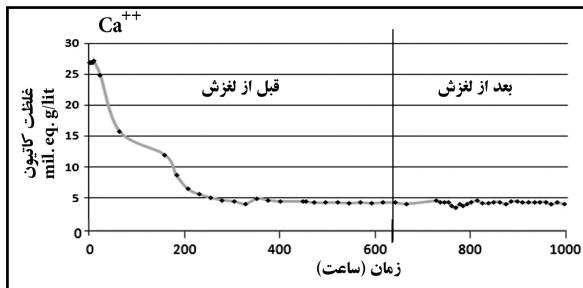


شکل ۴. نمودار تغییرات غلظت کاتیون سدیم

همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، اولین کاتیون مورد بررسی کاتیون سدیم (Na^+) بوده که به‌طور معمول در خاک‌های ایران دارای فراوانی قابل توجه است (موسسه پژوهش‌های برنامه‌ریزی و اقتصاد کشاورزی، ۱۳۸۴).

غلظت کاتیون سدیم در آب خروجی از پای شیب، دارای غلظتی برابر ۷/۱۵ میلی‌اکی‌والان گرم بر لیتر بوده که با توجه

لیتر)، غلظت ناشی از انحلال کاتیون کلسیم از خاک، در سطح ۲۷ میلی‌اکی‌والان‌گرم بر لیتر بود. علی‌رغم غلظت بالای کاتیون Ca^{++} در ابتدای آزمایش، این کاتیون نسبت به آبشویی حساسیت بالایی نشان داده و در زمان ۲۷۰ ساعت از شروع مرحله اول به سرعت به سطح ۴/۷ میلی‌اکی‌والان‌گرم بر لیتر کاهش یافته و تقریباً تا زمان ۶۳۰ ساعت، در همین سطح تثبیت گردید. همان‌طور که در نمودار شکل ۷ نشان داده شده است، با انجام برش در سطح لغزش بر خلاف سه کاتیون دیگر، کاتیون کلسیم (Ca^{++}) علی‌رغم قابلیت آب‌شویی بالا در مرحله اول، حساسیت زیادی به جابه‌جایی انجام شده در مرحله دوم نشان نداده و تغییر محسوسی در غلظت این یون‌ها در آب خروجی پس از وقوع لغزش مشاهده نشد.



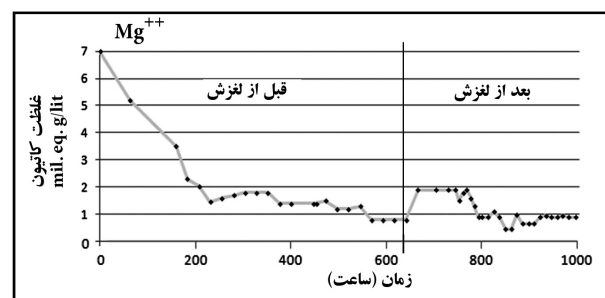
شکل ۷. نمودار تغییرات غلظت کاتیون کلسیم

۴. بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به نیاز روزافزون طرح‌های توسعه‌ای به تأمین فضای امن و عاری از خطر و ضرورت پایش عوامل اولیه منجر به وقوع زمین‌لغزش‌ها با فاصله زمانی مناسب از رانش اصلی، پایش تغییرات غلظت یون‌های موجود در آب‌های خروجی از شیب‌های مشرف به مناطق توسعه یافته، می‌تواند به عنوان پیش‌هشدار به منظور کنترل عامل محرک و یا تخلیه مردم با اعتماد قابل قبول مورد توجه قرار گیرد. بررسی نتایج حاصل از اجرای مدلی که در این تحقیق طراحی گردید، نشان‌دهنده این واقعیت بوده که تعدادی از یون‌ها اعم از کاتیون‌ها و آنیون‌های موجود در ترکیب خاک‌های طبیعی، نشانگرهای مناسبی جهت این هدف می‌توانند باشند. همان‌طور که بررسی نتایج نشان داد، یون‌های حساس به لغزش‌های خفیف در سطح لغزش در هر ترکیب خاکی ممکن است متفاوت باشد. جهت انتخاب یون‌های حساس به رانش، انجام آزمایش‌های

سطح حد ۰/۲۵ میلی‌اکی‌والان‌گرم بر لیتر رسید. با تداوم آبشویی غلظت این کاتیون، روند کاهشی نسبتاً سریع داشته و در فاصله ۱۴۷ ساعت از وقوع لغزش مجدداً تا حدود سطح اولیه (۰/۱۳ میلی‌اکی‌والان‌گرم بر لیتر) کاهش یافت و تقریباً در این سطح تثبیت شد.

یون دو ظرفیتی دیگری که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت، کاتیون منیزیم (Mg^{++}) بوده که در آب خروجی از شیب دارای غلظتی برابر ۷/۵ میلی‌اکی‌والان‌گرم بر لیتر بوده که با توجه به غلظت یون منیزیم در آب ورودی (۰/۵ میلی‌اکی‌والان‌گرم بر لیتر)، (جدول ۲)، میزان Mg^{++} زهکشی شده از خاک، به آب عبوری حدود ۷/۰ میلی‌اکی‌والان‌گرم بر لیتر است. این مقدار با گذشت مدت زمان ۵۷۰ ساعت به سطح غلظت ۰/۸ میلی‌اکی‌والان‌گرم کاهش یافت و تا زمان انجام برش (۶۳۰ ساعت پس از شروع آزمایش) در این سطح تثبیت گردید. با اجرای مرحله دوم آزمایش و انجام برش به مقدار ۵٪ طول شیب سطح لغزش، این کاتیون نسبت به جابه‌جایی حساسیت مناسبی نشان داده و غلظت آن به میزان ۱/۹ میلی‌اکی‌والان‌گرم بر لیتر افزایش پیدا کرد. با تداوم نشت آب و پس از گذشت ۱۷۰ ساعت از شروع مرحله دوم، میزان غلظت Mg^{++} مجدداً کاهش یافت و تقریباً در سطح غلظت اولیه (۱/۹ میلی‌اکی‌والان‌گرم بر لیتر) تثبیت شد.



شکل ۶. نمودار تغییرات غلظت کاتیون منیزیم

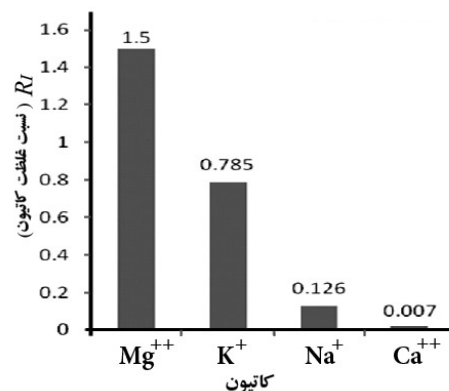
دومین کاتیون دو ظرفیتی مورد مطالعه یون کلسیم (Ca^{++}) بود که نتیجه اندازه‌گیری آن در شکل ۷ نشان داده شده است. اولین اندازه‌گیری انجام شده نشان‌دهنده غلظت بالای یون کلسیم در آب خروجی بود که میزان آن در سطح ۳۱/۲ میلی‌اکی‌والان‌گرم بر لیتر اندازه‌گیری گردید. با احتساب غلظت این کاتیون در آب ورودی (۴/۲ میلی‌اکی‌والان‌گرم بر

- نتایج حاصل از این تحقیق به طور خلاصه به شرح زیر است:
- وقوع تغییرات غلظت یونی قابل مشاهده در برخی از کاتیون‌ها و آنیون‌ها در آب‌های خروجی از سطوح لغزشی پس از هر فعالیت اثبات گردید.
- با توجه به حساسیت ابزارهای پایش و زمان تأخیر نسبتاً طولانی بین فعالیت‌های خفیف سطح لغزش و بروز علائم قابل مشاهده در سطح، استفاده از تغییرات غلظت یون‌ها به عنوان پیش‌نشانگر فعال شدن یک لغزش، می‌واند به کنترل حرکت و کاهش ریسک خطر کمک مؤثری کند.
- تغییرات غلظت انواع یون‌ها و حساسیت آن‌ها نسبت به حرکت مشابه نبوده که جهت بررسی علت این اختلاف حساسیت، علاوه بر تأثیر ترکیب آب نفوذی و مواد تشکیل دهنده سطح لغزش، آزمایش‌های بیشتری مورد نیاز است.
- تغییرات غلظت یون‌ها تابع جنس خاک و نوع رس‌های موجود در خاک بوده که به همین دلیل برای یک منطقه انجام آزمایش مدلینگ به منظور شناخت یون‌ها و فاکتورهای حساس به حرکت خاک خاص آن منطقه، ضروری است.
- به‌طورکلی نسبت غلظت یون‌ها قبل از رانش، به غلظت آن بعد از رانش (R_I)، و سرعت رسیدن مجدد غلظت یون‌ها به حد تعادل، فاکتور مناسبی جهت انتخاب یون مناسب در یک منطقه با ترکیب خاک مشخص به عنوان پیش‌نشانگر حساس نسبت به رانش است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از مدیریت پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری به خاطر حمایت‌های مالی و در اختیار قرار دادن امکانات آزمایشگاهی تشکر و قدردانی نمایند. از تکنسین‌ها و افراد فنی بخش مدل‌سازی و خدمات فنی آقایان رحمت ا. خلیلی، محمد احرار، محمد دادگر که در ساخت و انجام آزمایش‌ها کمک‌های زیادی کردند، کمال تشکر را دارد.

متعدد در خاک‌های با ترکیبات متفاوت ضروری است. به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت که مهم‌ترین عامل مؤثر، اختلاف رفتاری رس‌ها در جذب و دفع کاتیون‌های موجود در سطح لایه‌های رسی و در ساختار شبکه‌ای آن‌ها است. با توجه به اینکه افزایش قابل توجه غلظت یون‌ها در مقابل جابه‌جایی خاک و همچنین سرعت در رسیدن به حالت تعادل از مهم‌ترین خصوصیات هستند که یک یون را جهت استفاده در برنامه‌ریزی اعلام پیش‌هشدارها مناسب می‌نماید، از میان یون‌های مورد مطالعه در این تحقیق، یون‌های سدیم (Na^+)، پتاسیم (K^+) و منیزیم (Mg^{++})، حساسیت قابل قبولی را در مقابل وقوع لغزش در خاک مورد آزمایش از خود نشان دادند. در حالی که یون کلسیم (Ca^{++}) دارای حساسیت کافی به منظور استفاده از تغییرات آن در پیش‌هشدار شروع حرکت‌های خفیف در یک شیب مستعد ناپایداری نمی‌باشد. لذا استفاده از نسبت غلظت یون‌ها قبل از رانش به غلظت آن بعد از رانش می‌تواند شاخص مناسبی جهت استفاده در برنامه‌ریزی مدیریت شیب‌های مستعد لغزش باشد. شاخص R_I برای کاتیون‌های مطالعه شده در این تحقیق در شکل ۸ نشان داده شده است، با توجه به این نمودار، بیشترین مقدار R_I مربوط کاتیون منیزیم بوده، بعد از آن کاتیون پتاسیم و سدیم در مرحله دوم و سوم حساسیت قرار دارند. افزایش شاخص R_I نشان دهنده مناسب‌تر بودن یون مربوطه جهت استفاده در پایش رفتاری سطح لغزش است. در نتیجه کاتیون کلسیم به دلیل R_I بسیار کوچک، برای این هدف مناسب نمی‌باشد.



شکل ۸. نمودار نسبت غلظت کاتیون‌ها قبل و پس از برش خاک (R_I)

منابع

- آذر، ا.، ۱۳۶۹. خاک شناسی عمومی. انتشارات دانشگاه ارومیه، ۳۹۵ صفحه.
- شعاعی، ض.، امام جمعه، س.ر.، شریعت جعفری م.، جلالی ن.، غیومیان ج. ۱۳۷۶. تجزیه و تحلیل مکانیزم حرکت و پیشنهاد اقتصادی ترین روش های کنترل لغزش. چهارمین کنفرانس زمین شناسی و محیط زیست ایران، دانشگاه تربیت مدرس- تهران ص ۱۲۰۲-۱۲۱۸
- شعاعی، ض.، امام جمعه، س.ر.، ۱۳۸۲. کاربرد GPS در رفتارنگاری زمین لغزش های فعال به منظور تجزیه و تحلیل مکانیزم و اعلام پیش هشدارها. سومین کنفرانس زمین شناسی و محیط زیست ایران، همدان، ص ۳۲-۴۱.
- کرمانی، ایمان. ۱۳۹۰. تأثیر فعالیت زمین لغزش بر ترکیب شیمیایی آب های خروجی از دامنه ها با استفاده از مدل فیزیکی. پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات.
- مجللی، ح. (مترجم)، ۱۳۶۹. شیمی خاک. ترجمه کتاب بوهن، مک نیل، اوکانز، مرکز نشر دانشگاهی، ۳۲۹ صفحه.
- موسسه پژوهش های برنامه ریزی و اقتصاد کشاورزی، ۱۳۸۴. خاک - کتاب اول: شناخت وضع موجود و منابع (مبانی لایحه قانون جامع خاک کشور). انتشارات تابان، ۴۴۹ صفحه.
- Chatwin S.C., Howes D.E., Schwab J.W., Swanston D.N., 1994. A Guide for Management of Landslide Prone Terrain in the Pacific Northwest Ministry of Forests, Victoria, B.C., N0. 18, Second Edition.
- Leroueil S., Vaughan P.R., 1990. Congruent and General Effects of Structure of Natural Soils and Weak Rocks. *Geotechnique*, 40: 467-488.
- Mollard J.D., Hughes G.T., 1973. Earth-flows in the Grondines and Trois Rivières areas, Québec. Discussion, *Canadian Geotechnical Journal*, 10: 324-328.
- Moon V.G., 1993. Microstructure Control on the Geomechanical Behavior of Ignimbrite. *Engineering Geology*, 36: 19-31.
- Sakai H., 2001. Observation of Ground Displacement in Landslide by Monitoring Groundwater Composition. *QR of RTRI*, Vol.42, No.3, pp 161-167
- Sakai H., 2009. Prediction of Landslide a Few Months in Advance of its Occurrence with Chemical Sensors for Groundwater Composition Observation. Proc. of the IS-Kyoto, Prediction and Simulation Methods for Geohazard Mitigation, Oka, Murakami, and Kimoto(ed.), Taylor and Francis Group, London, 603p.
- Shoaei Z., Karamsoltani K., 2011. Application of Monitoring Data for the Prediction of the Time to Failure and Risk Management. Second World Landslide Forum, 3-7 October, Rome, pp. 262
- Shoaei Z., Shariat Jafari M., Ghayoumian J., 2001. Continuous Site Monitoring to Predict the Time of Rapid Failure in High Risk Reactivated Landslide", *IAEG Congress*, 30 Jul.-2 Aug. 2001, Yekaterinburg, pp102-109
- Soderblum R., 1974. A New Approach to the Classification of Quick Clays. *Proceedings of the Royal Swedish Geotechnical Institute*, 4: 1-17.
- Yan T., 1994. Hydrological and Engineering and Environmental Protection. Press of China University of Geosciences.
- Zung A.B., Sorenson C.J., Winthers E., 2008. Landslide Soils and Geomorphology in Bridger-Teton National Forest Northwest" *Phys Geography* 30(6):501-516