

مطالعه آزمایشگاهی زمین لغزش‌های ناشی از باران در خاک‌های غیراشباع

محمد احمدی عدلی*^۱ و امیرحسین رضایی فرعی^۲

^۱ استادیار دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرند
^۲ استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

(دریافت: ۹۷/۸/۱۰، پذیرش: ۹۸/۲/۴، نشر آنلاین: ۹۸/۲/۴)

چکیده

در بسیاری از نقاط جهان وقوع بارش‌های طولانی و یا خیلی شدید اکثراً سبب وقوع زمین لغزش می‌شود. در این تحقیق، نفوذ باران به داخل یک شیب خاکی غیراشباع و شروع زمین لغزش از طریق آزمایش بر روی مدل‌های آزمایشگاهی بررسی شده و حدود آستانه شدت-مدت باران (I-D) برای ایجاد این زمین لغزش‌ها به دست آمده است. در مدل‌های آزمایشگاهی از ماسه ریز استفاده شده و سطح مدل‌ها دارای زاویه شیب ۵۶° می‌باشند. بر روی این مدل‌ها باران با شدت‌های مختلف به کمک یک سیستم پاشش کنترل شده اعمال شده و تا ایجاد زمین لغزش ادامه یافته است. در آزمایش‌های فلوم^۱، مکش در خاک توسط مکش سنج‌ها، پیشروی جبهه ترشونده با زمان به کمک اندازه‌گیری موقعیت سطح از یک مرجع و تغییر شکل‌ها در خاک نیز به کمک انحراف سنج‌های مینیاتوری اندازه‌گیری شده‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده برای مصالح استفاده شده، سطح گسیختگی هماهنگ با جبهه ترشونده یا در مجاورت آن بوده و شکل آن مکانیسم گسیختگی انتقالی را نشان می‌دهد، تغییر شکل‌های منجر به زمین لغزش به صورت ناگهانی رخ داده، شکل I-D یک رابطه دوخطی را نشان داده و همچنین افزایش ۴۰٪ در دانسیته نسبی نمونه‌ها موجب افزایش سه برابری در مدت زمان بارش برای ایجاد ناپایداری در مدل‌های فیزیکی گردیده‌اند. نتایج این تحقیق می‌تواند برای مدل‌سازی‌های دقیق عددی زمین لغزش‌های ناشی از باران مفید باشد.

کلیدواژه‌ها: زمین لغزش، باران، خاک غیراشباع، پایداری شیروانی‌ها، مدل‌سازی فیزیکی.

۱- مقدمه

شرایط هیدرولوژیکی و نیز رفتار غیرخطی مشخصه‌های هیدرولیکی و مکانیکی این نوع خاک‌ها بسیار پیچیده و مشکل می‌باشد (زمردیان و عبدالله‌زاده، ۱۳۹۱). روش‌های مختلفی از جمله روش‌های تجربی، آماری و مدل‌سازی‌های فیزیکی و عددی برای این منظور مورد استفاده قرار گرفته است. مفهوم آستانه بارندگی برای وقوع زمین لغزش را نخستین بار Camble در سال ۱۹۷۵ بیان نمود و سپس Strakle آن را در قالب روابط شدت-مدت بارندگی تئوریزه کرد (Glade و Wiczorek، ۲۰۰۵). آستانه کمینه پایین‌ترین سطحی است که در کم‌تر از آن فرآیند مورد نظر اتفاق نمی‌افتد و آستانه بیشینه سطحی است که در بالاتر از آن فرآیند همواره اتفاق می‌افتد. بر اساس این مفهوم و با استفاده از داده‌های مربوط به زمین لغزش‌های قبلی که در اثر باران به وقوع پیوسته‌اند منحنی‌های آستانه شدت-مدت باران (Intensity-Duration: I-D) به صورت آستانه‌های جهانی، ملی یا منطقه‌ای و محلی (برای یک محدوده خاص) به دست می‌آیند (Guzzetti، ۲۰۰۷؛ Rossi و همکاران، ۲۰۱۰).

زمین لغزش‌ها سالیانه خسارات جانی و مالی فراوانی را در اقصی نقاط دنیا ایجاد می‌نمایند. بارندگی‌های شدید، ذوب سریع برف، تغییرات ناگهانی در سطح آب زیرزمینی، زلزله و فرسایش با سرعت زیاد از جمله مهم‌ترین عوامل ایجاد زمین لغزش‌ها می‌باشند. از این بین وقوع بارش‌های طولانی و یا باران‌های خیلی شدید در بسیاری از نقاط جهان اکثراً سبب وقوع زمین لغزش‌ها می‌گردد (Nadim و همکاران، ۲۰۰۹؛ Godt و Lu، ۲۰۱۳). زمین لغزش‌های ناشی از بارندگی عموماً به دلیل خیس شدگی خاک‌های غیراشباع رخ می‌دهند. در حین بارندگی و با افزایش رطوبت خاک، مکش در این خاک‌ها کاهش یافته و تنش برشی نیز کاهش می‌یابد که نهایتاً منجر به تغییر شکل در شیروانی می‌گردد (Ahmadi-Adli، ۲۰۱۴).

مطالعه پایداری شیروانی‌های در معرض بارندگی در خاک‌های غیراشباع به دلیل تأثیر پارامترهای متعدد از قبیل ویژگی‌های بارش، نحوه نفوذ بارندگی، تراوش آب در داخل محیط خاک،

آزمایشات فلوم در ایجاد منحنی آستانه I-D مورد استفاده قرار گرفته و به بررسی تأثیر برخی عوامل تأثیرگذار از جمله دانسیته نسبی خاک بر روی منحنی‌های حاصل پرداخته شده است.

۲- مدل سازی فیزیکی

۲-۱- مصالح مورد استفاده

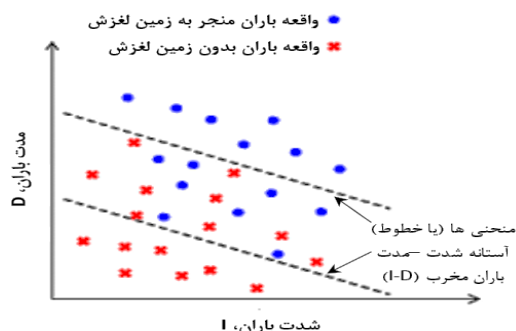
خاک مورد استفاده در تحقیق حاضر یک ماسه ریز یکنواخت با قطر متوسط $0/18$ میلی‌متر می‌باشد که دارای ۳ درصد ریزدانه غیرخمیری (درصد عبوری از الک ۲۰۰) بوده و بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد در گروه ماسه بد دانه‌بندی شده (SP) قرار می‌گیرد. خلاصه نتایج آزمایشات شناسایی انجام‌یافته بر روی خاک مذکور در جدول (۱) ارائه شده است.

۲-۲- دستگاه فلوم آزمایشگاهی

در تحقیق حاضر با آزمایشات مدل آزمایشگاهی در دستگاه فلوم و استفاده از اعمال بارش مصنوعی با شدت معین به مطالعه نفوذپذیری و شروع ناپایداری در شیروانی پرداخته شده است. در مدل‌سازی انجام‌یافته تلاش شده تا اندازه جعبه فلوم، زاویه شیب و خصوصیات مصالح انتخاب‌شده با ویژگی‌های مشاهده‌شده در زمین‌لغزش‌های واقعی رخ داده در اثر بارش در نقاط شمالی کشورهای ایران و ترکیه مطابقت داشته باشد. در شکل (۲) یک نمای کلی از دستگاه شامل جعبه فلوم، سیستم بالابری و سیستم بارش قابل تنظیم با نازل بخار آب نمایش داده شده است. جعبه فلوم را می‌توان با بلند کردن از یک طرف و دوران حول پای جعبه تا رسیدن به شیب دلخواه منحرف کرد. طول، عرض و ارتفاع داخلی جعبه به ترتیب عبارتند از ۱۸۷، ۴۸ و ۷۰ سانتی‌متر. دیواره‌های جانبی جعبه در جهت طولی به منظور امکان مشاهده الگوی جابه‌جایی‌ها از شیشه‌های سکوریت ساخته شده‌اند.

جدول ۱- ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک مورد استفاده

استاندارد مورد استفاده	مقدار	مشخصه
ASTM D6913	SP	طبقه‌بندی متحد
	$-0/14-0/202$	$D_{10}-D_{30}-D_{60}$ (mm)
---	$0/09$	ضریب انحناء (Cc)
---	$1/08$	ضریب یکنواختی (Cu)
ASTM D854	۲/۶۶۳	G_s
ASTM D2434	$1/145 \times 10^{-6}$	K_{sat} (m/s)
ASTM D4253 & D4254	$1/648$	$\gamma_d \max$ (g/cm ³)
	$1/332$	$\gamma_d \min$ (g/cm ³)
	$0/616$	e_{min}
	$1/536$	e_{max}



شکل ۱- منحنی شدت-مدت باران مخرب

همچنین منحنی‌های آستانه شدت-مدت باران مخرب نیز در سامانه‌های پیش‌بینی و هشدار سریع و برای تخمین زمان و موقعیت زمین‌لغزش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند که نمونه‌ای از آن‌ها در شکل (۱) به صورت شماتیک نمایش داده شده است. در این منحنی‌ها بارش‌های قرارگرفته در زیر خط آستانه هیچ‌گونه زمین‌لغزشی را ایجاد نکرده‌اند.

رویکرد دیگر در بررسی زمین‌لغزش‌های ناشی از بارندگی، انجام مدل‌سازی عددی است که در آن‌ها مکانیسم فیزیکی گسیختگی شیب یا با لحاظ کردن آخرین یافته‌ها درباره تراوش و پایداری شیروانی‌ها در خاک‌های غیراشباع در نظر گرفته شده (Ahmadi-adli و همکاران، ۲۰۱۷) یا تحلیل پایداری شیروانی‌ها با تحلیل دوگانه تراوش و مقاومت برشی وابسته به تغییر شکل انجام می‌شود (Iverson و همکاران، ۱۹۹۷؛ Rahimi و همکاران، ۲۰۱۱؛ Eichenberger و همکاران، ۲۰۱۳).

تراوش و پایداری حساسیت بالایی به شرایط مرزی مدل، شرایط اولیه و خواص خاک غیراشباع دارند (امامی و طاهری، ۱۳۹۵). امروزه محققین بر بهبود روش‌های مدل‌سازی عددی و به‌کارگیری قوانین پلاستیسیته خاک‌های غیراشباع در تجزیه‌وتحلیل پیوسته/وابسته متمرکز می‌باشند. به‌طورکلی، تعداد مطالعات عددی از این دست بسیار اندک بوده و عموماً مطالعات تحقیقاتی بیشتری برای ارزیابی صحت‌وسقم آن‌ها موردنیاز است که تحقیق حاضر با این هدف انجام گرفته است.

مطالعات بزرگ مقیاس فراوانی وجود دارند که هرکدام به بررسی بخشی از مکانیسم‌های موجود در زمین‌لغزش‌های ناشی از بارش می‌پردازند (Godt و همکاران، ۲۰۰۹؛ Askarinejad، ۲۰۱۳؛ Springman و همکاران، ۲۰۱۳). در کنار آزمایشات مدل فیزیکی بسیاری از محققین از آزمایشات فلوم بروی مصالح شنی که در معرض بارندگی می‌باشند نیز استفاده کرده و رفتارهای قبل و بعد از گسیختگی و مکانیسم‌های گسیختگی را بررسی نموده‌اند (Picarelli و همکاران، ۲۰۰۶؛ Okada، ۲۰۱۴؛ Wu و همکاران، ۲۰۱۵). هرچند آزمایشات فلوم هرگز دارای مقیاس قابل قبولی از زمین‌لغزش‌های واقعی نمی‌باشند. در مطالعه حاضر، نتیجه

در حین ساخت مدل مکش‌سنج‌ها و فشارسنج‌ها از سوراخ‌هایی به قطر ۱۲ میلی‌متر که بر روی دیواره شیشه‌ای جعبه قرار دارند عبور داده شده و در داخل توده خاک مدفون شدند (شکل ۳-ب)). انحراف‌سنج‌ها در نواحی کناری و مرکز شیب قرار داده شده است. انحراف‌سنج‌های کناری از نوارهای ارتجاعی سیاه به عرض ۵ میلی‌متر با نشانه‌های سفید بر روی آن که در فواصل عمودی ۵ سانتی‌متری از هم قرار دارند؛ تشکیل یافته و انحراف-سنج مرکزی از کش ارتجاعی خیلی نازک و انعطاف‌پذیر (با قطر یک میلی‌متر) که دارای گره‌های کوچکی با فواصل عمودی ۵ سانتی‌متر می‌باشد؛ ساخته شده است (شکل ۳-ج)).

سیستم اعمال بارش شامل یک جعبه کنترل (که متشکل از پنل کنترل دیجیتال، مدار قطع و وصل پاشش، منبع آب و عملگرها است) و مجموعه‌ای از نازل‌ها می‌باشد. مجموعه نازل‌ها که هم‌زمان لوله‌های آب تحت فشار و تک تک نازل‌ها را بر روی خود نگه می‌دارد بر روی یک قاب فولادی با قابلیت تنظیم ارتفاع و شیب نصب شده است (شکل ۳-د)). نازل‌ها آب را با شدت ثابت برای چندین ثانیه معین پاشیده و سپس متوقف می‌شوند. در شکل ۳-ه) نازل‌های پاشش در حین انجام آزمایش نمایش داده شده است. شدت پاشش آب و زمان توقف پاشش قابل تنظیم می‌باشد. بدین ترتیب می‌توان بارانی را که به‌طور متوسط دارای شدت معینی در هر دقیقه است ایجاد نمود. سیستم مورد استفاده در انجام آزمایشات دارای توانایی اعمال بارش یکنواخت بر روی سطح شیب با شدت متوسط ۴ الی ۷۰ میلی‌متر بر ساعت می‌باشد. در این تحقیق از اعمال بارش به‌صورت قطرات واقعی باران صرف‌نظر شده و بارش به‌صورت بخار آب اعمال شده است تا بدین ترتیب از فرسایش سطحی و نیز تغییر شکل‌های احتمالی در اثر انرژی برخورد قطرات اجتناب گردد. در آزمایشات، فرسایش سطحی و تغییر شکل به دلیل اثر قطره‌های باران مشاهده نشد.

۳-۲- برنامه آزمایشات

در مجموع، ده آزمایش فلوم با شدت بارندگی ثابت (شدت متفاوت در هر آزمایش) انجام شده است. برای ایجاد امکان تشکیل نمودار I-D، در هر آزمایش زمان لازم تا گسیختگی شیب ثبت گردیده است. همچنین تغییر مکش در ابزار دقیق‌های جاگذاری شده به همراه پیشروی جبهه ترشوندگی با گذشت زمان در هر آزمایش ثبت شده و تغییر شکل‌های ایجادشده با استفاده از انحراف‌سنج‌ها اندازه‌گیری شده است. در آزمایشات فلوم، نمونه‌های خاک در دو دانسیته نسبی ۳۸ و ۴۸ درصد ساخته شده‌اند که این مقادیر به‌ترتیب متناظر با وزن مخصوص خشک ۱/۲۰ و ۱/۲۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲- الف) جعبه فلوم، ب) سیستم بالابر، پ) فیلترهای تحتانی که در پاشنه شیب و ژئونت^۲ در کف قرار گرفته است

ابزار دقیق مورد استفاده عبارتند از:

- الف) مکش‌سنج کوچک یا مکش‌سنج (TNS) مدل F2100 برای اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای منفی در محدوده ۰ الی ۹۰ کیلوپاسکال که ساخت کارخانه SOILMOISTURE می‌باشد،
 ب) ترانسدیوسر^۳ مینیاتوری فشار آب حفره‌ای (PDCR) مدل Druck PDCR-81 ساخت کارخانه PROCON برای محاسبه فشار آب حفره‌ای منفی و مثبت (شکل ۳-الف))،
 ج) انحراف‌سنج مینیاتوری دست‌ساز متشکل از نوارهای کشی لاستیکی و بافتنی برای تشخیص تغییر شکل‌ها در شیب،
 د) دوربین‌های دیجیتال برای تهیه فیلم از الگوی تغییر شکل‌ها.

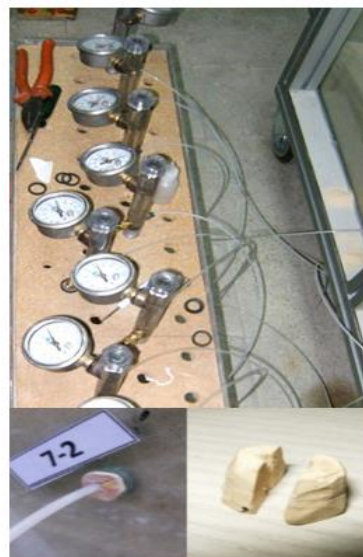


(ه)

شکل ۳- تعدادی از ابزار دقیق مورد استفاده و شبکه نازل‌ها به همراه نازل‌های پاشش: الف) فشارسنج‌های PDCR و نوک سرامیکی فشارسنج، ب) مکش‌سنج‌ها، انحراف‌سنج‌های میانی و کناری و مکش‌سنج‌های مینیاتوری که در دو موقعیت متفاوت قرار گرفته‌اند، د) شبکه نازل‌ها، ه) نازل‌های پاشش



(الف)



(ب)

مبنای این انتخاب دانسیته‌های نسبی متداول مشاهده شده در زمین‌لغزش‌های ناشی از باران در کشور ترکیه می‌باشد که عمده این زمین‌لغزش‌ها در خاک‌های با دانسیته نسبی کم‌تر از ۵۰ درصد رخ داده و عملاً زمین‌لغزش‌های ناشی از بارندگی در خاک‌های متراکم مشاهده نشده است. شیب سطح ترانشه نیز بر اساس زمین‌لغزه‌های ناشی از بارندگی مشاهده شده در کشور ترکیه، در تمامی آزمایشات فلوم برابر ۵۶/۵ درجه نسبت به سطح افق انتخاب شده است. شدت بارندگی بر سطح مدل در محدوده ۱۸ تا ۶۳/۵ میلی-متر بر ساعت اعمال شده است که به ترتیب متناظر با شدت بارش نسبتاً کم تا نسبتاً زیاد می‌باشد.

۲-۴- آماده‌سازی نمونه‌ها

آماده‌سازی نمونه مهم‌ترین و حساس‌ترین بخش آزمایشات فلوم است (شکل ۴). برای ساخت مدل ماسه دارای رطوبت اولیه ۱/۵ درصد در لایه‌های با ضخامت ۵ سانتی‌متر پخش و سپس با استفاده از یک صفحه فولادی که روی لایه قرار داده شده و یک چکش تا رسیدن به دانسیته مورد نظر متراکم می‌گردد.

پاشنه شیروانی خاکی در آزمایشات فلوم به صورت یک مرز زهکش در نظر گرفته شده که با قرار دادن ماسه درشت‌دانه پیچیده شده در کاغذ فیلتر ایجاد شده است (شکل ۴-الف). یک سوراخ تخلیه آب در قسمت انتهایی پایین جعبه تعبیه شده تا جلوی انباشتگی آب در پای شیروانی را بگیرد. در غالب زمین‌لغزش‌های ناشی از باران در ترکیه در شیب‌هایی که سطح آب زیرزمینی در یک تراز عمیق قرار داشته، خاک در شرایط غیراشباع بوده و زمین-لغزش قبل از این‌که جبهه ترشونده بتواند خود را به سطح آب زیرزمینی در عمق برساند رخ داده است.



(د)



(ج)



(و)

شکل ۴- مراحل آماده‌سازی نمونه: الف) مستقر کردن زهکش پای شیروانی و انحراف‌سنج‌های میانی، ب) خاکریزی لایه‌های مختلف به همراه ظروف کنترل دانسیته، ج) خاکریزی تا رسیدن به تراز موردنظر، د) تراشیدن خاک و ایجاد شیب موردنظر، ه) پوشش سطح نمونه و پوشش مجموعه نازل‌ها، و) تنظیم دقیق شیب ترانشه

بنابراین، مرز جانبی جعبه به اندازه کافی دورتر از پای شیب طراحی شده تا سطوح گسیختگی را تحت تأثیر قرار ندهد. به عبارت دیگر در مدل‌های ساخته‌شده تمامی گسیختگی‌ها قبل از رسیدن جبهه ترشونده به مرز پایین رخ داده‌اند. مراحل آماده‌سازی نمونه به شرح زیر می‌باشد:

۱) مستقر کردن زهکش پای شیروانی و انحراف‌سنج‌های میانی (شکل ۴-الف)).

۲) ریختن و پخش کردن ماسه مرطوب به صورت لایه لایه و متراکم کردن تا دانسیته موردنظر سخت‌ترین و زمان‌برترین بخش ساخت نمونه ریختن و متراکم کردن ماسه در مجاورت ابزار دقیق از جمله انحراف‌سنج‌ها و مکش‌سنج‌ها می‌باشد. برای جلوگیری از لغزش احتمالی، قبل از اجرای یک لایه خاکی جدید ۵ سانتی‌متری سطح لایه زیرین خراش داده شده است تا همبستگی بین لایه‌ها تأمین گردد. هم‌زمان با اجرای لایه‌ها مکش‌سنج‌ها و فشارسنج‌های مینیاتوری نیز در محل‌های پیش‌بینی‌شده قرار داده شده است (شکل ۴-ب)). به منظور کنترل یکنواختی لایه‌های مختلف خاک، از قرار دادن ظروف کوچک مطابق شکل ۴-ب) در نقاط مختلف و اندازه‌گیری دانسیته خاک داخل ظروف بعد از آزمایش استفاده شده است که بر اساس نتایج حاصل رواداری در دانسیته برای نمونه‌های ساخته شده حداکثر برابر $\pm 3\%$ درصد می‌باشد.

۳) خاکریزی تا رسیدن به تراز موردنظر و تراش دادن سطح شیب و ایجاد شکل و یا زاویه نهایی (شکل‌های ۴-ج) و ۴-د).

۴) نصب ناودانی مینیاتوری در دیواره‌های جانبی جعبه فلوم. همان‌گونه که اشاره شد در این تحقیق سیستم اعمال بارش به صورت پاشش بخار آب عمل می‌نماید. هنگامی که بخار آب با دیواره‌های شیشه‌ای جعبه تماس پیدا می‌کند، به قطرات آب تبدیل شده و به‌طرف پائین جاری می‌شوند که این امر سبب



(الف)



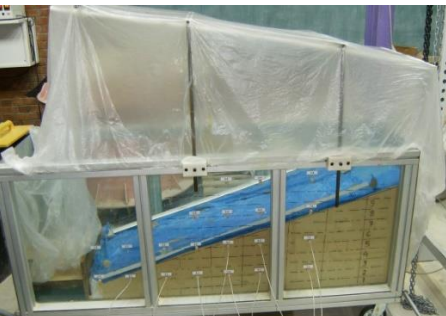
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

ج) تغییر شکل‌ها و گسیختگی‌های سطحی در هنگام گسیختگی می‌باشد.

در تمامی نتایج ارائه شده زمان صفر در آزمایشات برابر است با زمان شروع اعمال بارش و زمان گسیختگی به مدت زمان سپری شده از آغاز اعمال بارش تا زمان وقوع گسیختگی در شیب اطلاق می‌شود (تحت شرایط اعمال بارندگی). در جدول (۲) خلاصه‌ای از نتایج زمان گسیختگی در مدل‌های ساخته شده ارائه شده است.

جدول ۲- زمان گسیختگی در آزمایشات انجام گرفته

شماره آزمایش #	شدت بارش I (mm/h)	زمان لازم تا گسیختگی T (min)
دانسیته نسبی ۳۴٪ (دانسیته خشک ۱/۲ g/cm ³)		
FLM_03	۵۴/۴	۴۸
FLM_04	۴۶/۳	۶۰
FLM_05	۲۸/۳	۶۹
FLM_06	۱۵/۶	فاقد گسیختگی تا دقیقه ۲۹۵
FLM_08	۲۱/۶	۷۴
دانسیته نسبی ۴۸٪ (دانسیته خشک ۱/۲۷ g/cm ³)		
FLM_10	۶۳/۵	۱۰۳
FLM_12	۴۸/۷	۱۳۴
FLM_14	۲۲	۲۰۵
FLM_15	۲۰	فاقد گسیختگی تا دقیقه ۳۵۵

با توجه به حجم بالای نتایج به دست آمده از آزمایشات، در این مقاله به عنوان نمونه صرفاً به نتایج آزمایش FLM_06X اشاره شده است. شکل (۵-الف) آرایش مکانی مکش‌سنج‌ها و انحراف-سنج‌های جاگذاری شده برای این آزمایش را نشان می‌دهد. همچنین تغییرات مکش که در نقاط متعددی در داخل نمونه قرائت شده، در مقابل زمان سپری شده از آغاز بارش ترسیم و در شکل (۵-ب) ارائه شده است. مکش اولیه اندازه‌گیری شده در نقاط متفاوت در بازه ۱۸/۵ تا ۲۱/۵ کیلوپاسکال قرائت شده است. بارش با شدت ۱۷ میلی‌متر بر ساعت در خاک نفوذ کرده و مقدار مکش با رسیدن جبهه ترشدگی به مجاورت هر مکش‌سنج افت می‌کند. سریع‌ترین واکنش در TNS-01 و دیرترین عکس‌العمل در TNS-04 مشاهده می‌شود که در حقیقت در عمیق‌ترین نقطه از سطح شیب‌دار قرار دارد. بنابر قرائت‌های انجام شده در TNS-08 مقادیر مکش از بازه ۱۹ الی ۲۰ کیلوپاسکال شروع شده و در طول آزمایش که بیش از چهار ساعت طول کشیده ثابت می‌ماند تا این-که گسیختگی در آن رخ دهد. جالب این که پیش از آن که سطح ترشدگی به محدوده این مکش‌سنج‌ها برسد گسیختگی در شیب به وقوع پیوسته است. جهت دستیابی به روند ترشوندگی با زمان در آزمایشات فلوم، در بازه‌های زمانی معین مسافت عمودی بین جبهه ترشدگی و کف جعبه فلوم (قابل رؤیت از پشت شیشه‌های جانبی جعبه) اندازه‌گیری شده است.

افزایش میزان نفوذ سطحی در مجاورت سطوح شیشه‌ای خواهد شد. فلذا به عنوان یک راه‌حل، فلوم‌هایی به عرض ۱۸ میلی‌متر از جنس پلاستیک تهیه شده و در ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری بالای سطح خاک به دیواره‌های جانبی چسبانده شده است تا قطرات آب حاصل از معیان بخار بر روی شیشه‌ها را زهکشی نمایند.

۵) برای جلوگیری از خشک شدن سطحی نمونه‌ها در بازه زمانی بین آماده‌سازی نمونه‌ها و زمان آزمایش یک پوشش نایلونی روی سطح شیب خاک قرار گرفته است (پوشش نایلون آبی رنگ در شکل (۴-ه)). همچنین پوششی دیگر از جنس نایلون بر روی مجموعه نازل‌ها قرار داده شده است تا تمام باران درون سیستم فلوم بدون تبخیر نگه‌داشته شود (پوشش نایلون سفید رنگ در شکل (۴-ه)).

۶) انحراف جعبه فلوم تا رسیدن به زاویه موردنظر بلافاصله بعد از آماده‌سازی نمونه و پوشش‌های سطح آن جعبه فلوم مطابق شکل (۴-و) با استفاده از سیستم بالابر تا رسیدن به شیب موردنظر سطح نمونه با دقت منحرف گردیده است.

۷) مرحله بالانس فشار آب حفره‌ای. در این مرحله و قبل از شروع اعمال بارش، نمونه‌های فلوم به مدت ۲۴ ساعت به حال خود رها شدند تا بالانس فشار آب حفره‌ای در آن‌ها ایجاد شود. بر اساس مشاهده تغییرات مکش در آزمایشات اولیه مدت زمان ۲۴ ساعت برای این مرحله در نظر گرفته شد. این مرحله به منظور رهاشدن از اثرات انباشت آب به صورت موضعی و بالانس توزیع رطوبت اولیه در اثر بار ارتفاعی آب است که بعد از انحراف جعبه دچار تغییر می‌شود.

۲-۵- نحوه انجام آزمایش

در ابتدای مرحله انجام آزمایش، پوشش نایلونی از روی نمونه خاکی داخل فلوم برچیده می‌شود. مرحله شامل اعمال متناوب باران با شدت میانگین ثابت هم‌زمان با اندازه‌گیری مکش در نقاط متعدد نمونه و ثبت پیشروی جبهه ترشدگی با زمان می‌باشد. بارش باران تا زمان وقوع لغزش در نمونه ادامه داده می‌شود. نهایتاً در پایان آزمایش سطح لغزش و عمق گسیختگی با قرائت میزان انحراف ایجادشده در انحراف‌سنج‌های جانبی و میانی که با برداشت و تخلیه با دقت نمونه قابل مشاهده خواهند بود؛ سنجیده می‌شوند.

۳- نتایج

۳-۱- پارامترهای اندازه‌گیری شده و نمونه نتایج

مهم‌ترین پارامترهای اندازه‌گیری شده در این آزمایشات شامل: الف) تغییرات فشار آب منفذی در یک موقعیت مشخص، ب) پیشروی جبهه ترشدگی با زمان



(الف)



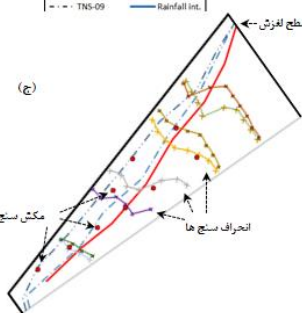
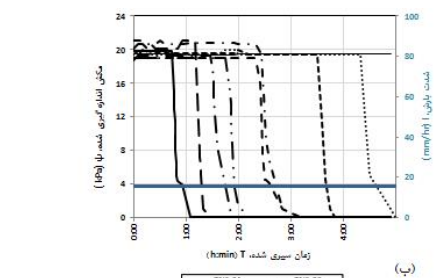
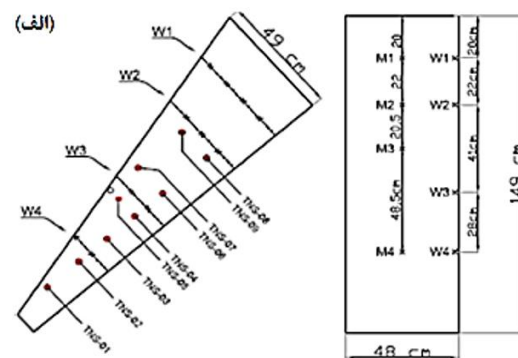
(ب)

شکل ۶- الف) نمای جانبی نمونه در آزمایش FLM-06X که در آن گسیختگی انتقالی و نیز خط لغزش دیده می‌شود، ب) نمای فوقانی که نشان‌دهنده انتقال بلوک لغزش می‌باشد

۳-۲- بحث نتایج

تغییرات مکش در موقعیت‌های متفاوت داخل نمونه در تمامی آزمایشات از زمان آغاز بارش قرائت شده‌اند. در آزمایشات با دانسیته نسبی ۳۴٪ (FLM_03, 04, 05, 06, 06X, 08, 13) آزمایشات (FLM_13 و FLM_03) مقدار مکش اولیه اندازه‌گیری شده در مکش‌سنج‌ها قبل از بارندگی در محدوده ۱۷ الی ۲۱ کیلوپاسکال قرار دارد. در آزمایشات FLM_13 و FLM_03 به دلیل زمان بالانس طولانی‌تر مقدار مکش اولیه نسبتاً بالاتری مشاهده شده است. در حالت کلی، در تمامی آزمایشات، مکش‌سنج‌های ۱، ۲، ۵ و ۷ که به سطح شیب نزدیک‌تر هستند افت مکش سریع‌تری نسبت به سایر مکش‌سنج‌ها که در نقاط عمیق هستند تجربه کرده‌اند و در نهایت گسیختگی در شیب رخ داده است. اما در آزمایشاتی با دانسیته نسبی بالاتر (۴۸٪)، تقریباً در همه مکش‌سنج‌ها افت مکش قبل از گسیختگی مشاهده شده است. در هر دو دسته از آزمایشات، در پایین‌ترین شدت بارش (FLM_06 برای $Dr = 34\%$ و FLM_15 برای $Dr = 48\%$) علی‌رغم افت مکش در همه مکش‌سنج‌ها هیچ گسیختگی در شیروانی مشاهده نگردیده است. در آزمایشات با خاک متراکم‌تر ($Dr = 48\%$) مکش اولیه در محدوده ۱۸/۵ الی ۲۳/۵ کیلوپاسکال متغیر بوده است.

شکل (۵-ج) روند حرکت سطح ترشدگی را برای آزمایش فلوام FLM_06X نشان می‌دهد. گسیختگی در دقیقه ۲۵۸ بعد از آغاز بارش در یک عمق حداکثر ۱۲ سانتی‌متری از سطح شیب مشاهده شده است. در این آزمایش ملاحظه گردیده که در زمان گسیختگی جبهه ترشوندگی نیز در نزدیکی سطح گسیختگی بوده است. در شکل (۶-الف) نمای جانبی نمونه در آزمایش FLM-06X نمایش داده شده است که سطح لغزش ایجاد شده و گسیختگی انتقالی به وضوح قابل مشاهده می‌باشد. همچنین شکل (۶-ب) نشان می‌دهد در زمان گسیختگی حرکتی انتقالی در بالاترین سطح نمونه رخ می‌دهد.



شکل ۵- الف) موقعیت مکش‌سنج‌ها و انحراف‌سنج‌ها در آزمایش FLM_06X (TNS): مکش‌سنج، M: انحراف‌سنج میانی و W: انحراف‌سنج کناری، ب) تغییرات مکش در خاک بعد از آغاز بارش، ج) پیشروی سطح ترشوندگی (خطوط آبی) با گذشت زمان حین انجام آزمایش و موقعیت انحراف‌سنج‌ها بعد از گسیختگی شیب و ترسیم سطح لغزش

$I = a \times D^b$ که در آن I: شدت بارش، D: مدت زمان بارش و a و b ثوابت می‌باشند) منحنی‌ها عبور داده شده از داده‌های حاصل از آزمایشات نیز به شکل توابع چندجمله‌ای ارائه شده‌اند. مقادیر ثابت a برای دانسیته‌های نسبی ۳۴ و ۴۸ درصد به ترتیب برابر ۳۸ و ۱۳۵ و مقادیر ثابت b به ترتیب برابر ۱/۵۵۶ و ۱/۴۳۱ حاصل شده‌اند. قابل توجه است که این مقادیر در محدوده مقدار رایج ارائه شده برای این پارامترها که صفر الی ۱۴۸ برای ثابت a و ۰/۱ الی ۲ برای ثابت b می‌باشد؛ قرار دارند (Giannecchini ۲۰۰۵، Guzzetti و همکاران ۲۰۰۸، Ma و همکاران ۲۰۱۵). در آزمایشات FLM_06 و FLM_15، به ترتیب تا دقیقه ۲۹۵ و ۳۵۵ بارش ممتد هیچ گسیختگی مشاهده نشده است. در زمان ترسیم حدود آستانه شدت- مدت زمان بارش، داده‌های مربوط به این آزمایشات نیز مورد استفاده قرار گرفته است که اطلاعات مفیدی در ترسیم خطوط آستانه بارش ارائه می‌دهند. این موضوع ممکن است نشان‌دهنده وجود یک حد پائین که بیشتر شبیه خط مجانب برای محدوده I-D است باشد.

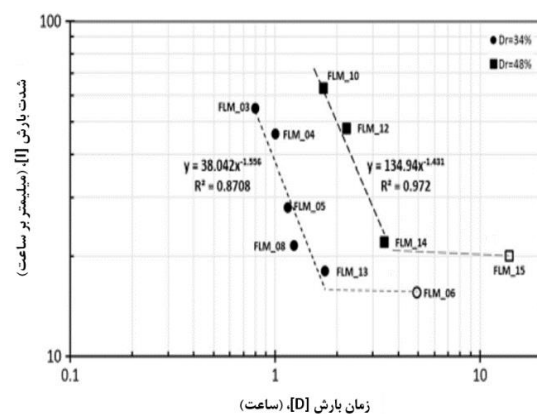
بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایشات انجام یافته در تحقیق حاضر، بارش‌هایی با مدت زیاد- شدت کم و بارش‌های دارای مدت کم- شدت زیاد هر دو می‌توانند باعث وقوع زمین لغزش گردند (به غیر از بارش‌هایی با شدت خیلی کم در محدوده کم‌تر از ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر بر ساعت به ترتیب برای دانسیته‌های نسبی ۳۴ و ۴۸ درصد). در بارش‌هایی با شدت بسیار کم یا بایستی بارش برای مدت زمانی بسیار طولانی ادامه یابد تا گسیختگی رخ دهد و یا این‌که اساساً شاهد هیچ گسیختگی در این شدت بارش‌ها نخواهیم بود. در حقیقت در چنین مواردی نفوذ آب در خاک آن- قدر کم می‌باشد که آب نفوذ کرده می‌تواند از حفرات خاک به آرامی عبور کند بدون این‌که توده‌ای نسبتاً اشباع که موجب ناپایداری شیب گردد را ایجاد کند. همچنین تعداد محدودی از محققان از جمله Wiczorek (۱۹۸۷) و Crosta و Frattini (۲۰۰۱) حد پائینی را برای منحنی آستانه پیشنهاد کرده‌اند که در نتیجه یک منحنی دو خطی را در فضای لگاریتمی نشان داده است.

در تحقیق حاضر شدت بارش‌های اعمال شده در محدوده ۱۸ الی ۶۴ میلی‌متر بر ساعت و مدت زمان آن‌ها بین مقادیر کم‌تر از یک الی حدود سیزده ساعت متغیر بوده است. مقادیر و مشخصات بارش در زمین لغزش‌های متعدد در نقاط مختلف جهان با زوایای شیب مختلف و مصالح پایه متغیر دارای محدودیت‌هایی هستند اما همچنان در محدوده واقع بینانه‌ای قرار می‌گیرند. بایستی توجه کرد که هدف از تحقیق حاضر به دست آوردن حدود آستانه I-D در محیط آزمایشگاهی کنترل شده بوده و پیشنهاد یک آستانه برای استفاده در سیستم هشدار سریع برای یک منطقه خاص

پیشروی سطح ترشدگی با گذشت زمان در تمامی آزمایشات فلوم ثبت شده است. همچنین سطح گسیختگی به طور واضح از دیواره‌های جانبی رؤیت شده و عمق آن با قرائت‌های انجام گرفته از انحراف‌سنج‌ها و تحلیل تصاویر ثبت شده تصدیق گردیده است. ناپایداری شیب در تمامی آزمایشات دارای ماهیت سطحی بوده و مکانیسم شیب نامحدود را نشان داده که دارای سطوح گسیختگی تقریباً موازی با سطح شیب می‌باشند. در تمامی آزمایشات که تحت رژیم‌های مختلف بارش قرار گرفته‌اند، سطح گسیختگی تقریباً مسطح بوده و عمق آن در بازه ۱۰ الی ۲۰ سانتی‌متری از سطح شیب قرار دارد (به جز FLM_12 که در آن سطح گسیختگی به صورت نیمه دایره‌ای رخ داده است). بایستی توجه کرد که در همه آزمایشات فلوم، تغییر شکل‌های منتهی به گسیختگی تقریباً به صورت آبی رخ داده‌اند، به عبارت دیگر، در نمونه‌ها حرکات پیش- رونده آرام در خاک به چشم نمی‌خورد.

۳-۳- منحنی‌های آستانه شدت- مدت (I-D)

با ترسیم مدت زمان لازم تا گسیختگی در مقابل میانگین شدت بارش اعمالی در آزمایش‌های فلوم می‌توان حدود I-D بارش برای زمین لغزش‌های رخ داده را به دست آورد. در شکل (۷) حدود I-D حاصل از آزمایشات مشخص شده در جدول (۲) برای دو مجموعه از مقادیر دانسیته نسبی ۳۴ و ۴۸ درصد ارائه شده است. نقاط توپر در شکل (۷) آزمایشاتی را نشان می‌دهند که در آن‌ها گسیختگی رخ داده باشد، در مقابل آزمایشاتی که در آن‌ها تا پایان آزمایش هیچ‌گونه گسیختگی در آن‌ها مشاهده نشده با نقاط توخالی نشان داده شده‌اند (آزمایشات FLM_06 و FLM_15). برای هر یک از دانسیته‌های نسبی ۳۴ و ۴۸ درصد یک منحنی از داده‌های I-D مربوطه عبور داده شده است. به طور کلی، مشاهده می‌شود که منحنی‌های I-D حاصل در مقیاس لگاریتمی دارای شکل دو خطی می‌باشند. با در نظر گرفتن نوع تابعی که عموماً در ادبیات فنی برای بیان حدود I-D به کار گرفته می‌شود.



شکل ۷- داده‌های شدت- زمان بارش حاصل از آزمایشات فلوم

- Ahmadi-adli M, Kartal Tokar N, Huvaj N, "Prediction of Seepage and Slope Stability in a Flume Test and an Experimental Field Case", *Procedia Earth and Planetary Science*, 2014, 9, 189-194.
- Ahmadi-adli M, Huvaj N, Tokar NK, "Rainfall-triggered landslides in an unsaturated soil: a laboratory flume study", *Environ Earth Sci*, 2017, 76, 735.
- Askarnejad A, "Failure mechanism of unsaturated silty sand slopes triggered by rainfall", PhD thesis, ETH Zurich, Switzerland, 2013.
- Crosta G, Frattini P, "Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flow", In: Mugnai A, Guzzetti F, Roth G (Eds) *Proceedings of the 2nd EGS plinius conference on Mediterranean storms*, Siena, 2001, 463-487.
- Eichenberger J, Ferrari A, Laloui L, "Early warning thresholds for partially saturated slopes in volcanic ashes", *Comput Geotech*, 2013, 49, 79-89.
- Giannecchini R, "Rainfall triggering soil slips in the southern Apuane Alps (Tuscany, Italy)", *Adv. in Geosci*, 2005, 2, 21-24.
- Godt JW, Baum RL, Lu N, "Land sliding in partially saturated materials", *Geophys Res Lett*, 2009, 36, 1-5.
- Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, Stark CP, "Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe", *Meteorol Atmos Phys.*, 2007, 98 (3-4), 239-267.
- Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, Stark CP, "The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update", *Landslides*, 2008, 5, 3-17.
- Iverson RM, Reid ME, La Husen RG, "Debris-flow mobilization from landslides", *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1997, 25 (1), 85-138.
- Lu N, Godt JW, "Hillslope hydrology and stability", Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2013.
- Ma T, Li C, Lu Z, Bao Q, "Rainfall intensity-duration thresholds for the initiation of landslides in Zhejiang Province, China", *Geomorphology*, 2015, 245, 193-206.
- Nadim F, Cepeda F, Sandersen F, Jaedicke C, Heyerdahl H, "Prediction of rainfall-induced landslides through empirical and numerical models", In: *Proceedings of IWL-the first Italian*, 2009.
- Okada Y, "Changes in shear strain and subsurface flow prior to rainfall-induced landslide in 15 flume experiments", In: Sassa K, Canuti P, Yin Y (Eds) *Landslide science for a safer geoenvironment*, Springer, Cham, 2014, 81-86.
- Picarelli L, Olivares L, Damiano E, "Discussion to evaluation of landslide triggering mechanisms in model fill slopes", by W.A. Take, M.D. Bolton, P.C.P. Wong, and F.J. Yeung [*Landslides*, 2004, 1 (3), 173-184.] and "A fluidized landslide on a natural slope by artificial rainfall", by H. Ochiai, Y. Okada, G. Furuya, Y. Okura, T. Matsui, T. Sammori, T. Terajima, and K. Sassa [*Landslides*, 2004, 1 (3), 211-219.], *Landslides*, 2006, 3 (3), 269-272.
- Rahimi A, Rahardjo H, Leong E-C, "Effect of antecedent rainfall patterns on rainfall-induced slope failure", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137 (5), 483-491.

نیازمند انجام تحقیق مشابه با شرایط منطبق بر شرایط منطقه‌ای می‌باشد.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از تحقیق بر روی رفتار نمونه‌های شیب خاکی ساخته شده از شن و ماسه ریز تحت بارش باران را می‌توان به صورت زیر جمع‌بندی نمود:

۱- گسیختگی تقریباً از نوع انتقالی بوده و مکانیسم آن لغزش در شیب نامحدود می‌باشد. در این آزمایشات سطح گسیختگی عموماً یا با جبهه ترشدگی برخورد کرده یا در مجاورت آن قرار می‌گیرد. وقتی که باران داخل خاک نفوذ می‌کند جبهه ترشدگی رو به پایین حرکت کرده و با رسیدن آن به سطح مکش سنج‌ها در عمق به تدریج موجب کاهش مکش در خاک می‌شود.

۲- تقریباً در همه آزمایشات فلوم تغییر شکل‌هایی که موجب گسیختگی می‌شوند به صورت ناگهانی رخ می‌دهند (در کم‌تر از ۳ ثانیه).

۳- خطوط I-D به صورت یک رابطه دو خطی در نمودار لگاریتمی مدت- شدت باران نشان داده شده است. نتایج حاصله از این تحقیق نشان می‌دهد که هر دوی باران‌های با شدت زیاد- مدت زمان کم و باران‌های با شدت کم- مدت زیاد می‌توانند موجب ایجاد زمین‌لغزش‌ها گردند و این را می‌توان در آزمایشات آزمایشگاهی نیز نشان داد.

۴- افزایش ۴۰ درصدی در دانسیته نسبی نمونه‌ها موجب افزایش قریب به سه برابری در مدت زمان بارش برای ایجاد ناپایداری در مدل‌های فیزیکی می‌گردد.

به نظر می‌رسد تحقیقات تکمیلی در خصوص اثر سایر پارامترها در موقعیت و شکل منحنی‌های شدت- مدت باران می‌تواند در راستای دستیابی به سیستم‌های هشدار سریع دقیق‌تر مؤثر واقع شود.

۵- مراجع

امامی تبریزی م، طاهری ساروقیه و، "تأثیر تغییرات تراز آب مخزن سد و استفاده از سیستم‌های زهکشی قائم بر پتانسیل لغزش در یک شیروانی خاکی"، عمران و محیط زیست تبریز، ۱۳۹۵، ۴۶ (۴)، ۹۹-۱۰۹.

زمردیان م، ع، عبدالله‌زاده م، "تأثیر زهکش‌های افقی بر پایداری شیروانی بالا دست سدهای خاکی در حین تخلیه سریع مخزن"، عمران و محیط زیست تبریز، ۱۳۹۱، ۴۲ (۱)، ۲۹-۳۴.

Ahmadi-adli M, "Shallow landslides triggered by rainfall in unsaturated soils", PhD thesis, Middle East Technical University, Civil Engineering Department, Ankara, Turkey, 2014.

- Rossi M, Guzzetti F, Reichenbach P, Mondini AC, Peruccacci S, "Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts", *Geomorphology*, 2010, 114, 129-142.
- Springman SM, Thielen A, Kienzler P, Friedel S, "A long-term field study for the investigation of rainfall-induced landslides", *Geotechnique*, 2013, 63 (14), 1177-1193.
- Wieczorek GF, "Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains", In: Costa JE, Wieczorek GF (Eds) *Debris flow/avalanches: process, recognition, and mitigation. Reviews in Engineering Geology*, Geological Society of America, Boulder, 1987, 7, 93-104.
- Wieczorek GF, Glade T, "Climatic Factors Influencing Occurrence of Debris Flows", In: *Debris Flow Hazards and Related Phenomena*, Springer Berlin Heidelberg, 2005, 325-362.
- Wu LZ, Huang RQ, Xu Q, Zhang LM, Li HL, "Analysis of physical testing of rainfall-induced soil slope failures", *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73, 8519-8531.

EXTENDED ABSTRACT

A Laboratory Study on Rainfall-Induced Landslides

Mohammad Ahmadi-Adli ^{a,*}, Amir Rezaei Farei ^b

^a Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Marand, Iran

^b Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

Received: 02 November 2018; Accepted: 25 April 2019

Keywords:

Landslide, Rainfall, Unsaturated Soils, Slope stability, Physical modeling.

1. Introduction

Frequently, rainfalls with high intensity and/or low intensity but lasting for a long time cause landslides in many parts of the world (Lu and Godt, 2013). To be used in early warning systems, rainfall intensity-duration (I-D) thresholds generally are the key to predict the time and location of rainfall-induced landslides (Wieczorek and Glade, 2005). In the current study, the flume experiments are used to develop I-D thresholds and to investigate the effect of soil relative densities on it are described (Ahmadi-adli, 2014).

2. Experimental Study

2.1. Material used & Flume setup

An uniformly graded fine sand with 3% fines was used in current study as soil medium. In Table 1 summary of soil properties are listed.

A flume box of 187 cm (length), 48 cm (width), and 70 cm (height) was constructed and used to model infinite slopes subjected to rainfalls. The box was facilitated with a system of rainfall application with controlled intensity and duration. Also a variety of instrumentation were also used (a) miniature tensiometers, (b) miniature pore pressure transducers, (c) miniature inclinometers, and (d) digital cameras to obtain a video recording of deformations (Fig. 1).

Table 1. Soil properties

D ₁₀ (mm):	0.09	Coefficient of curvature, <i>c_c</i> :	1.08	$\rho_{d\ max}$ (g/cm ³):	1.648
D ₃₀ (mm):	0.14	Coefficient of uniformity, <i>c_u</i> :	2.24	$\rho_{d\ max}$ (g/cm ³):	1.332
D ₅₀ (mm):	0.18	Fines content (%):	3	<i>e_{min}</i> :	0.616
D ₆₀ (mm):	0.202	USCS soil classification:	SP	<i>e_{max}</i> :	1.536
<i>G_s</i> :	2.663	<i>K_{sat}</i> (m/s):	1.145		

2.2. Sample preparation & Testing

Sample preparation undoubtedly was the most important part of flume tests. Filter placement, Soil placement in layers, trimming surface of sample, droplet drain installation, covering, flume tilting and suction equalization are the main stage of sample preparation. Fig. 2 clearly shows some view of this stage.

In total, ten flume experiments were performed each with different constant rainfall intensities and time to slope failure was recorded in order to create threshold I-D plot. Also. At each test, variation of suction at location of instruments, wetting front progression over time and deformation measurements by inclinometers at the end of tests were also recorded.

* Corresponding Author

E-mail addresses: adli@marandiau.ac.ir (Mohammad Ahmadi-Adli), rezaei.ah@azaruniv.ac.ir (Amir Rezaei Farei).

3. Results and discussion

3.1. Test results

Test results obtained from each flume experiment are (i) suction-time response at specific points, (ii) wetting front progress with time, and (iii) deformations and failure surface at the time of failure.



Fig. 1. Test setup: a) Flume box and lifting system, b) Rainfall controlling unit, c) Misting (rainfall) sprinklers, d) instrumentation placed in soil sample, e) gauges of tensiometers, f) pore pressure transducers

3.2. I-D threshold

Plotting time to failure versus average rainfall intensity in flume experiments gives the rainfall I-D threshold that triggers a landslide. Fig. 2 shows the I-D threshold for the two sets of tests with 34 and 48% relative density. Solid-filled symbols represent the experiments that have experienced failure, whereas the experiments in which no failure is observed till the end of the experiment are shown with data points with no filling.

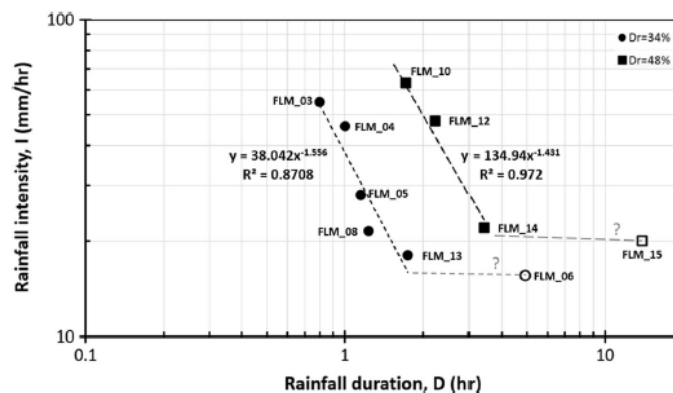


Fig. 2. I-D threshold

4. Conclusions

The major conclusions from the current research can be summarized as follows, for the rainfall-triggered landslides in the fine sand used in this study: (1) The failure surfaces are mostly translational, (2) In almost all flume experiments, the deformations leading to a failure occurred abruptly, (3) The shape of the I-D threshold is demonstrated to be a bilinear relation in log-log plot of rainfall intensity versus duration.

5. References

- Ahmadi-adli M, "Shallow landslides triggered by rainfall in unsaturated soils", PhD thesis, Middle East Technical University, Civil Engineering Department, Ankara, Turkey, 2014.
- Lu N, Godt JW, "Hillslope hydrology and stability", Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2013.
- Wieczorek GF, Glade T, "Climatic Factors Influencing Occurrence of Debris Flows", In: Debris Flow Hazards and Related Phenomena, Springer Berlin Heidelberg, 2005, 325-362.