

چکیده

در اثر جابه‌جایی ریز صفحات نسبت به همدیگر امواج لرزه‌ای و شکست گسل شکل می‌گیرد که با توجه به عمق، میزان جابه‌جایی، نوع جابه‌جایی، شرایط زیرسطحی پیامدهای متنوعی را بر روی سطح زمین از خود نشان می‌دهد. تاکنون مطالعات محدودی بر روی گسلش سطحی صورت گرفته است اما به دنبال وقوع سه زمین‌لرزه چی چی تایوان، دوزجی و کوچا علی ترکیه انجام چنین مطالعاتی شتاب گرفته است. با توجه به از بین رفتن سریع شواهد سطحی گسلش و کم بودن زمان بررسی‌ها از یک طرف و زمان‌بر بودن و بالا بودن هزینه ساخت نمونه‌های بزرگ‌مقیاس (شرایط 1g) از طرف دیگر، اهمیت مطالعات گسلش در شرایط گرانث تشدید شده (Ng) به کمک دستگاه سانتریفیوژ را آشکار می‌کند. در این تحقیق ابتدا جزئیات جعبه دو بخشی گسلش مورد استفاده تشریح شده است. سپس نتایج هفت آزمایش شبیه‌سازی گسلش انجام شده به کمک این جعبه ارائه شده است. پنج آزمایش اولیه به منظور کالیبراسیون جعبه و کاهش شرایط مرزی بوده است و دو آزمایش نیز به شبیه‌سازی گسلش عادی و معکوس - بعد از کسب شرایط مطلوب - بر روی خاک‌های دانه‌ای پرداخته است سپس نتایج مقدار جابه‌جایی منتقل شده به سطح زمین، میزان جابه‌جایی مورد نیاز سنگ کف جهت ظهور گسل در سطح، تغییر زاویه گسل از سنگ کف تا سطح زمین، وسعت منطقه تغییر شکل در گسلش معکوس و عادی با همدیگر مقایسه شده است.

واژگان کلیدی: سانتریفیوژ، گسلش، جعبه شبیه‌ساز گسلش، انتشار گسلش، گسلش عادی، گسلش معکوس.

طراحی و ساخت جعبه برش دو بخشی جهت مدل‌سازی گسلش عادی و معکوس در دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی

ناصر تالی

دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

غلامرضا لشکری پور (نویسنده مسئول)

استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد،
 lashkaripour@um.ac.ir

ناصر حافظی مقدس

استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

عباس قلندرزاده

دانشیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۱- مقدمه

ده چند دهه گذشته تحقیقات مهندسی زلزله بیشتر بر روی پاسخ دینامیکی سازه‌ها تمرکز داشته است. در مقابل توجه کمتری به نتایج ناشی از گسلش (جابه‌جایی شبه استاتیک دو وجه گسل) شده است [۱]. تاکنون تحقیقات زیادی در خصوص گسلش سطحی و مخاطرات آن صورت گرفته است [۲-۷]. در ایران از جمله بزرگ‌ترین گسلش‌های سطحی گزارش شده می‌توان به زمین‌لرزه تبریز (۱۷۸۰ میلادی)، سلماس (۱۹۳۰/۰۵/۰۶)، دشت بیاض (۱۹۶۸/۰۸/۳۱) و کولی بنی‌آباد (۱۹۷۹/۱۱/۲۷) اشاره کرد. بیشینه‌ی جابه‌جایی این گسلش‌ها به ترتیب ۷۰۰، ۶۴۰، ۵۰۰ و ۴۷۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است [۸]. یکی از دلایل اهمیت گسلش سطحی این است که گسلش سطحی ممکن است چند

ده کیلومتر طول داشته باشد و با سازه‌های مختلفی تلاقی کند. لایه‌های سطحی زمین اغلب متشکل از رسوبات منفصل است. عبور گسل از پی سنگ به رسوبات فوقانی باعث تغییر الگوی انتشار می‌گردد در نتیجه خصوصیات آبرفت‌های سطحی بر نحوه آسیب‌های گسلش بر سازه‌های رویی تأثیرگذار است. لذا این موضوع دستمایه تحقیقات زیادی در دو دهه اخیر شده است. با توجه به اینکه شواهد گسلش سطحی در مدت کوتاهی پس از وقوع گسلش از بین می‌رود لذا استفاده از مدل‌سازی جهت مطالعه این پدیده از اهمیت خاصی برخوردار است. از آنجا که رفتار خاک به شدت تحت تأثیر سطح تنش می‌باشد از روش‌های مدل‌سازی، روش مدل‌سازی Ng که نتایج آن به واقعیت نزدیک‌تر است

کاربردی تر می‌باشد [۹]. در این مقاله جهت مدل‌سازی گسلش معکوس و عادی در شرایط Ng به کمک دستگاه سانتریفیوژ، یک جعبه برش دو بخشی طراحی و ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت که پس از حذف مشکلات دستگاه و کاهش شرایط مرزی، دو نوع گسلش عادی و معکوس به کمک آن انجام گرفته است که در ادامه شرح داده خواهند شد.

۲- پیشینه تحقیق

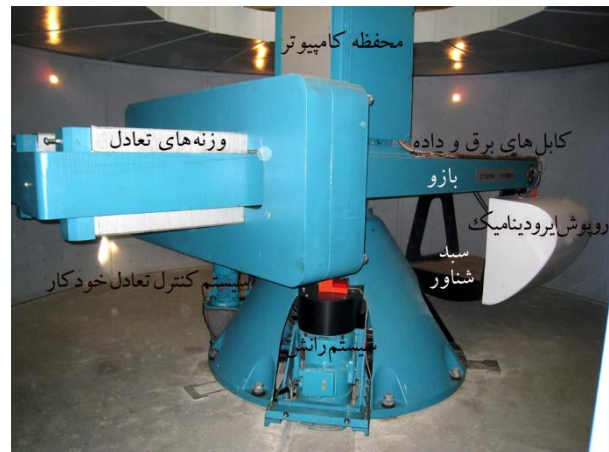
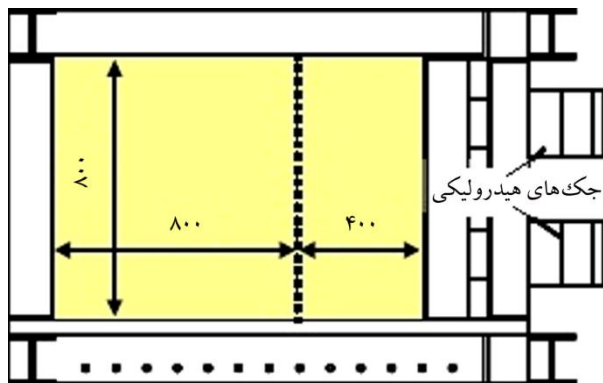
پیش از وقوع گسلش سطحی در زمین‌لرزه‌های سال ۱۹۹۹ میلادی شامل زمین‌لرزه‌های کوجاالی^۱ به بزرگای ۷/۴، دوزجی-بولو^۲ به بزرگای ۷/۱ در ترکیه و چی‌چی^۳ تایوان به بزرگای ۷/۶ ریشتر، توجه جامعه مهندسی در طراحی سازه‌ها و ابنیه‌ی فنی به مقوله برش مستقیم گسل کافی نبود؛ ولی به دنبال خسارت‌های سنگین و گسترده‌ای که به سازه‌ها و تأسیسات فنی طی برش‌های گسلی در این سه زمین‌لرزه وارد شد، توجه جامعه مهندسی را به مقوله مخاطرات گسلش سطحی جلب نمود [۱۰-۲۲].

پیشینه استفاده از مدل‌سازی به قرن‌ها قبل باز می‌گردد. با توجه به هزینه بالا و گاهی عدم امکان‌پذیری انجام آزمایش‌ها در مقیاس واقعی، یکی از بهترین روش‌های بررسی یک پدیده در مهندسی، مدل‌سازی فیزیکی آن در مقیاس کوچک می‌باشد اما در ژئوتکنیک رفتار یک پدیده معمولاً متأثر از سطوح تنش است و با مدل کردن آن در مقیاس کوچک سطوح تنش مدل نسبت به نمونه واقعی تغییر کرده و نتایج صحیحی حاصل نمی‌شود. بنابراین استفاده از دستگاه سانتریفیوژ برای مدل‌سازی در ژئوتکنیک از مطمئن‌ترین روش‌هاست. آگاهی کامل به تئوری مدل‌سازی، چگونگی استخراج روابط بین مدل و نمونه واقعی و فرضیات مدل‌سازی سانتریفیوژ برای ساخت یک مدل از نمونه واقعی و همچنین تعمیم نتایج آن امری ضروری است [۲۳]. ایده استفاده از دستگاه سانتریفیوژ در مدل‌سازی فیزیکی برای اولین بار توسط فلیپس^۴ در سال ۱۸۶۹ در فرانسه ارائه شد [۲۴]. در ادامه تحقیقات در سال ۱۹۳۶ در کشور شوروی سابق برای نخستین بار از دستگاه سانتریفیوژ در مدل‌سازی فیزیکی آزمایش‌های مکانیک خاک استفاده شد که

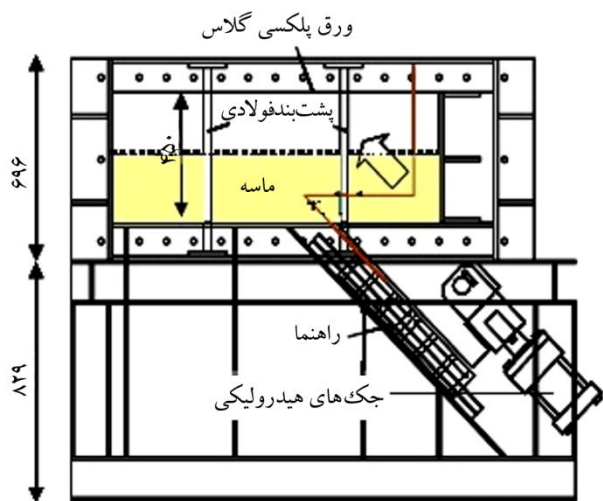
توسط پاکراوسکی و فیودوروف [۲۵] صورت پذیرفت. شاید بتوان کار روت و همکاران [۲۶] را جزو اولین تحقیقات انتشار گسلش از بین آبرفت توسط دستگاه سانتریفیوژ دانست. در این مطالعه محققین به مزیت آزمایش‌های سانتریفیوژ نسبت به آزمایش‌های محیط ۱g اشاره دارند و دستگاه‌های سانتریفیوژ موجود در نقاط مختلف دنیا را که در آن زمان توسعه بیشتری پیدا کرده‌اند را برشمرده‌اند. از جمله اولین دستگاه‌های سانتریفیوژ می‌توان به دستگاه کالتک^۵ اشاره نمود که در دهه هفتاد میلادی در مطالعات مکانیک خاک به کار رفته است. این دستگاه در تعدادی از تحقیقات اولیه بر روی شمع‌ها [۲۷-۲۸]، انکراژ کف اقیانوس‌ها [۲۹]، لغزش گسل [۳۰] و ساختمان‌های ثقلی ساحلی [۳۱] مورد استفاده قرار گرفته است.

با پیشرفت‌های علم و فن‌آوری، مدل‌سازی با دستگاه سانتریفیوژ افزایش یافته است و پروژه‌های تحقیقاتی در اروپا و آمریکا و غیره در این زمینه تعریف شده است.

از جمله مراکز تحقیقاتی مجهز به دستگاه سانتریفیوژ در ایران می‌توان به دستگاه سانتریفیوژ دانشگاه تهران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و دانشگاه علم و صنعت اشاره نمود. با دستگاه سانتریفیوژ دانشگاه تهران تاکنون تحقیقات زیادی صورت گرفته است که از جمله آنها می‌توان به پاسخ لوله‌های مدفون پیوسته تحت اثر گسلش توسط رجحانی و همکاران [۳۲-۳۳]، بررسی روش‌های کاهش اثرات گسلش معکوس بر عملکرد پی‌های سطحی توسط آشتیانی و همکاران [۳۴]، مطالعه تأثیر گسل شیب‌لغز بر تونل‌های قطعه‌ای (سگمتی) سطحی حفر شده در خاک، مدل‌سازی در سانتریفیوژ توسط کیانی و همکاران [۳۵-۳۶] اشاره نمود. دستگاه سانتریفیوژ مورد استفاده تولید شرکت اکتیدین سیستم^۶ فرانسه، مدل C67-2 و از نوع سانتریفیوژهای تیری بوده و دارای سکوی شناور می‌باشد. این سانتریفیوژ دارای اجزایی همچون سبد شناور، بوم سانتریفیوژ، وزنه‌های تعادل، اتصالات گردشی هیدرولیک و اتصالات لغزشی الکترونیک، سیستم رانش (دراپور)، روپوش ایرودینامیک، سیستم کنترل بالانس اتوماتیک در حالت چرخش و سایر اجزای جزئی دیگر می‌باشد (شکل ۱).

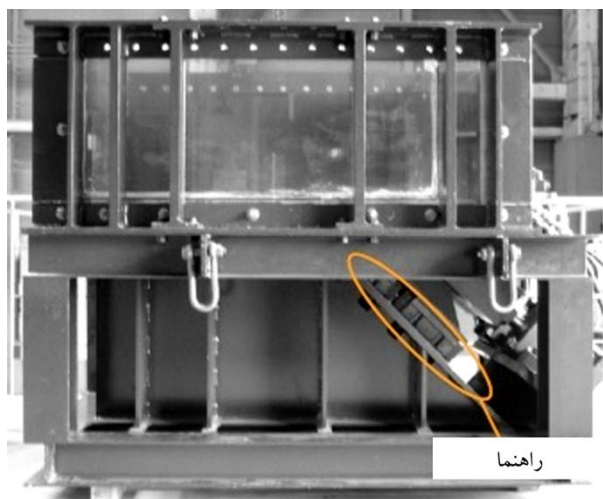


شکل (۱): نمایی از دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی مورد استفاده در این تحقیق در دانشگاه تهران مدل C67-2.



۳- جعبه های شبیه ساز گسلش در سایر مراکز علمی

جهت انجام آزمایش های Ng به جعبه شبیه ساز نیاز است. در مراکز تحقیقاتی بسته به توان فنی و امکانات در دسترس و هدف از پژوهش جعبه های شبیه ساز با مکانیسم های عملکردی ساده تا پیچیده ساخته شده است که از جمله آن می توان به مطالعات لین و همکاران [۳۷] اشاره کرد که با ساخت جعبه ماسه ساده به مطالعه همگرایی صفحات پوسته زمین پرداخته است. لی و هامادا [۳۸] نیز با کمک جعبه برش مطابق شکل (۲) به مطالعه انتشار گسلش از داخل رسوبات ماسه ای پرداخته است. برانزی و همکاران [۳۹-۴۰] با استفاده از مدل سازی سانتریفیوژ به مطالعه اندرکنش گسل های عادی و معکوس و پی های نواری پرداختند. در این راستا، برای انجام این آزمایش ها از دستگاه سانتریفیوژ دانشگاه داندی اسکاتلند استفاده شده است که جعبه آزمایش خاصی به این منظور طراحی و مورد استفاده قرار گرفته است که در شکل (۳) نشان داده شده است. در ادامه، لولی و همکاران [۴۱] به منظور بررسی پاسخ پی های کیسونی قرار گرفته در داخل خاک دانه ای بدون چسبندگی که در معرض گسلش های معکوس و عادی قرار گرفته است از دستگاه برش فوق استفاده کرده اند.

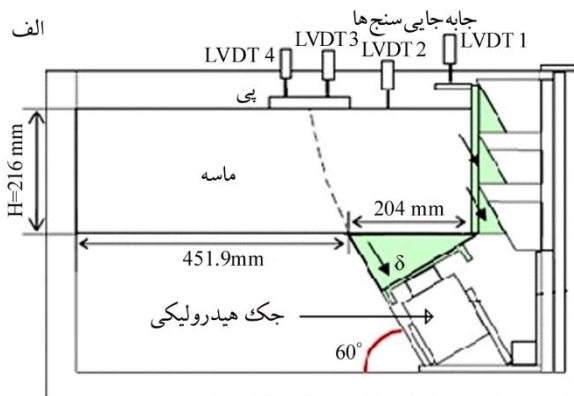


شکل (۲): نمایی از جعبه برش در مطالعات لی [۳۸].

۴- ساخت جعبه های شبیه ساز گسلش در دانشگاه تهران

از محققین داخلی که برای مدل سازی فیزیکی گسلش، جعبه شبیه ساز گسلش ساخته اند می توان به رجحانی و

سایر محققین مثل تانیا ما و واتانابه [۴۲]، سای و همکاران [۴۳]، فنگ [۴۴] نیز از جعبه برش در مطالعات خود استفاده نموده اند.



شکل (۳): جعبه آزمایش مدل سازی گسلش در دستگاه سانتریفیوژ دانشگاه داندی (الف) شکل شماتیک جعبه آزمایش؛ (ب) عکس از جعبه آزمایش [۳۹-۴۰].

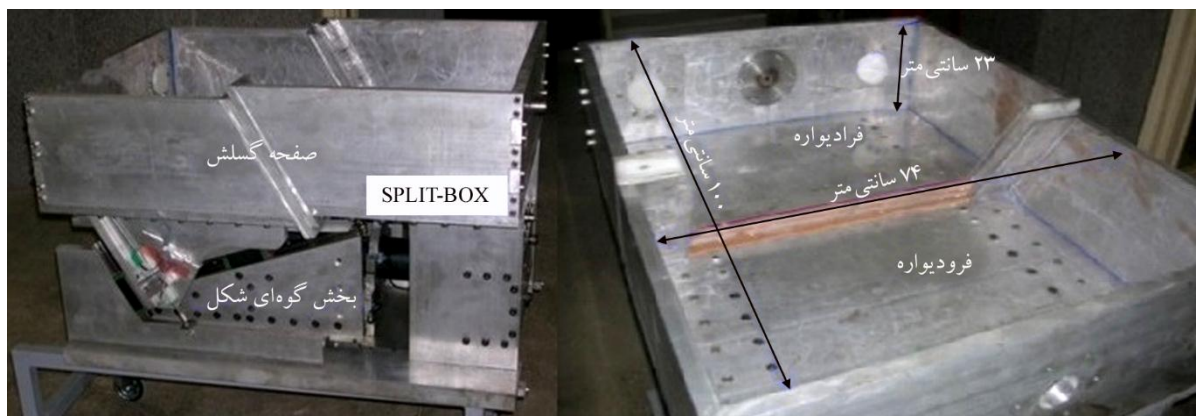
گسل تحمیلی نیست. تجربه حاصل از ساخت این دو جعبه برش باعث شد که نقاط ضعف و قوت این دو جعبه در ساخت جعبه جدید لحاظ گردد که حاصل طراحی و ساخت این جعبه در شکل (۶) قابل مشاهده است.



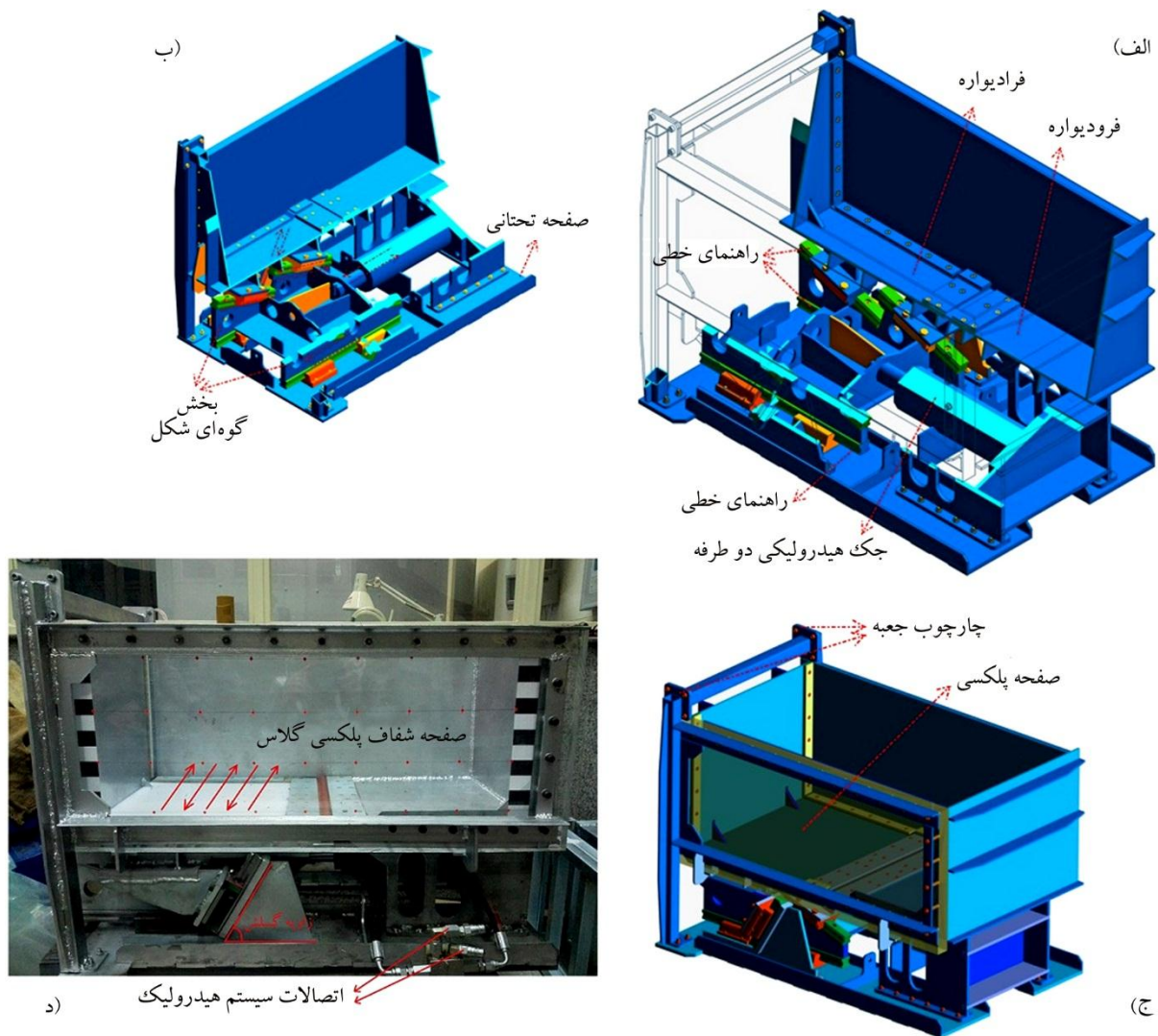
شکل (۵): جعبه آزمایش گسلش ساخته شده توسط آشتیانی و همکاران در دانشگاه تهران [۳۴].

همکاران [۳۲]، آشتیانی و همکاران [۳۴] اشاره نمود که به ترتیب در شکل های (۴) و (۵) نشان داده شده است.

در جعبه ساخته شده توسط رجحانی جهت حرکت بخش متحرک از سیستم لاینر (ریل) و واگن استفاده شده است که باعث می شود حرکت بخش متحرک جعبه مقید گردیده و انحرافی در مسیر حرکت آن به دلیل وزن جعبه و خاک داخل آن ایجاد نگردد و در این جعبه تغییرات جانبی خاک قابل رؤیت نبوده و انتشار گسلش تحمیلی و در مسیر از قبل مشخص شده می باشد. در مورد جعبه آشتیانی سیستم حرکتی توسط یک جک هیدرولیکی قوی از پشت بخش متحرک جعبه تأمین می شود که در شتاب های بالا به دلیل وزن جعبه و خاک محتوای آن در حین گسلش (جابه جایی) اندکی از حالت افقی خارج می شود. در این جعبه با نصب ورق پلکسی گلاس ضخیم ۳ سانتی متر در یک سمت جعبه، تغییرات جانبی خاک قابل رؤیت می باشد و انتشار شکستگی



شکل (۴): جعبه آزمایش مدل سازی گسلش مورد استفاده در پژوهش رجحانی و همکاران در دانشگاه تهران به همراه جزئیات آن [۳۲].



شکل (۶): جعبه دو بخشی جدید ساخته شده جهت آزمایش های گسلش.

۵- ساخت جعبه شبیه ساز گسلش در مطالعه حاضر

با توجه به وجود تجربه طراحی و ساخت دو جعبه شبیه ساز گسلش در دانشگاه تهران، با لحاظ نمودن موارد ضعف و قوت این دو جعبه، جعبه جدید طراحی و ساخته شد. طراحی این جعبه برای شتاب های تا $60g$ صورت گرفت. با توجه به عملکرد مناسب سیستم لاینر و واگن^۷ در جابه جایی بخش متحرک جعبه از این روش در ساخت جعبه ی دو بخشی بهره گرفته شده است. در این روش حرکت بخش متحرک تحت شتاب های زیاد دچار انحرافی نمی شود و وظیفه بالا و پایین بردن بخش متحرک جعبه توسط جک هیدرولیکی دو طرفه که به صورت افقی در زیر بخش ثابت نصب

شده است صورت می گیرد. در این حالت برخلاف حالت جک در شکل (۵)، در شتاب های بالا منحرف نشده و زاویه گسلش تغییر نمی کند. به علاوه استفاده از این روش باعث شد تا ارتفاع بخش حاوی نمونه خاک از ۲۳ سانتی متر (شکل ۴) و ۳۴ سانتی متر (شکل ۵) به ۴۰ سانتی متر- با توجه به محدودیت ارتفاع سبد سانتریفیوژ- برسد. در این جعبه با فرمان اتاق کنترل، جک هیدرولیکی باز (در گسلش عادی) یا بسته (در گسلش معکوس) می شود، در نتیجه صفحه ی متصل به جک (بخش ۱ شکل ۷) و عضو گوه ای شکل (بخش ۲ شکل ۷) نیز در سطح افق همراه آن حرکت می کند. بخش متحرک جعبه طوری ساخته شده است که دارای دو سیستم

جدول (۱): مشخصات فنی جعبه شبیه‌ساز گسلش ساخته شده در این پژوهش.

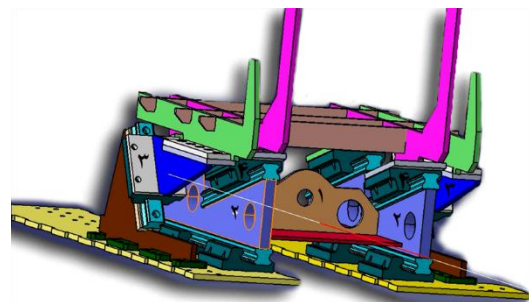
وزن جعبه خالی (kg)	حداکثر جابه‌جایی افقی (mm)	حداکثر جابه‌جایی قائم (mm)	ابعاد داخلی (mm) (L*W*H)	حداکثر شتاب طراحی	نوع گسلش قابل مدل
۳۱۴	۲۴	۴۲	۹۳۲*۵۰۸*۴۰۰	۶۰	عادی و معکوس
حداکثر ظرفیت جک (KN)	قطر شفت جک (mm)	گام جک گسلش (mm)	زاویه گسلش (درجه)	بخش ثابت جعبه	بخش متحرک جعبه
۸۵	۵۰	۱۵۰	۶۰	فرودیواره	فرادیواره

اطمینان از عملکرد صحیح و تکرارپذیر بودن نتایج حاصل و کاهش شرایط مرزی، آزمایش مجدد با شرایط مشابه صورت گرفته است. گسلش‌ها در این آزمایش‌ها همگی تحت زاویه ۶۰ درجه نسبت به افق و شتاب ثقل تشدید شده معادل ۶۰g انجام گرفته است. مشخصات کامل آزمایش‌ها در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲): مشخصات کامل آزمایش‌ها.

شماره آزمایش	RV-01-S to RV-05-S	RV-06-S	NO-07-S
هدف از آزمایش	کنترل نتایج و کاهش شرایط مرزی	گسلش معکوس	گسلش عادی
خاک دانه‌ای	خاک دانه‌ای	خاک دانه‌ای	خاک دانه‌ای

لایبر و واگن بر روی دو سطح شیب‌دار عمود بر هم می‌باشد (بخش ۳ و ۴ شکل ۷) که در اثر حرکت بخش ۱ و ۲، بخش ۳ و ۴ متحمل حرکت شده و بخش متحرک جعبه را به بالا یا پایین جابه‌جا می‌کند. در ساخت این جعبه از صفحه‌ی پلکسی گلاس شفاف به ضخامت سه سانتی‌متر در یک سمت جعبه استفاده شده است تا تغییر شکل و انتشار شکستگی‌های گسل قابل ثبت باشد. مشخصات فنی جعبه شبیه‌ساز گسلش ساخته شده در این پژوهش در جدول (۱) آمده است.



شکل (۷): سازوکار حرکت بخش متحرک جعبه دو بخشی جدید ساخته شده جهت آزمایش‌های گسلش.

۶- برنامه آزمایش‌ها

این مقاله به نتایج حاصل از انجام هفت آزمایش مدل‌سازی به کمک دستگاه سانتریفیوژ می‌پردازد. یکی از اهداف اصلی این پژوهش بررسی چگونگی انتشار شکستگی‌های ناشی از گسلش از بین لایه‌های آبرفتی بوده است. لذا در پنج آزمایش اول جهت

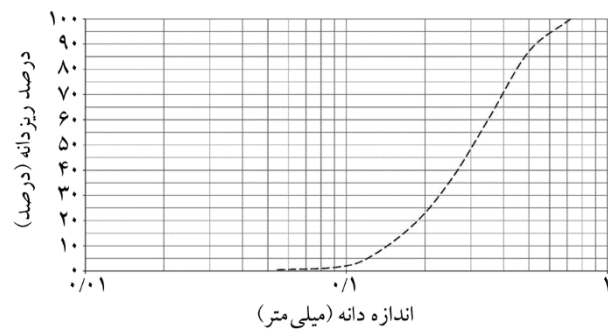
۷- نوع مصالح مصرفی

مصالح خاکی در نظر گرفته شده برای این تحقیق، خاک دانه‌ای از نوع ماسه فیروزکوه ۱۶۱ می‌باشد. این ماسه توسط فرمند به‌عنوان ماسه شاخص معرفی شده است [۴۵]. آزمایش‌های برش مستقیم صورت گرفته بر روی این نوع ماسه با تراکم نسبی ۶۰ درصد و درصد رطوبت ۵ درصد، زاویه اصطکاک داخلی حداکثر ۳۳ درجه، زاویه اصطکاک باقیمانده‌ی ۳۱ درجه و زاویه اتساع ۵ درجه را نشان می‌دهد. مشخصات فیزیکی و مکانیکی این ماسه در جدول (۳) آورده شده و منحنی دانه‌بندی آن در شکل (۸) آمده است.

جدول (۳) مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماسه‌ی فیروزکوه ۱۶۱.

نوع ماسه	چگالی دانه‌ها Gs	نسبت تخلخل حداکثر e _{max}	نسبت تخلخل حداقل e _{min}	قطر درصد عبوری ۵۰ D ₅₀ (mm)	درصد ریزدانه عبوری از الک شماره ۲۰۰ %F	ضریب یکنواختی Cu	ضریب دانه‌بندی Cc
ماسه ۱۶۱ فیروزکوه	۲/۶۵	۰/۹۴۳	۰/۶۰۳	۰/۳	۰	۲/۵۸	۰/۹۷

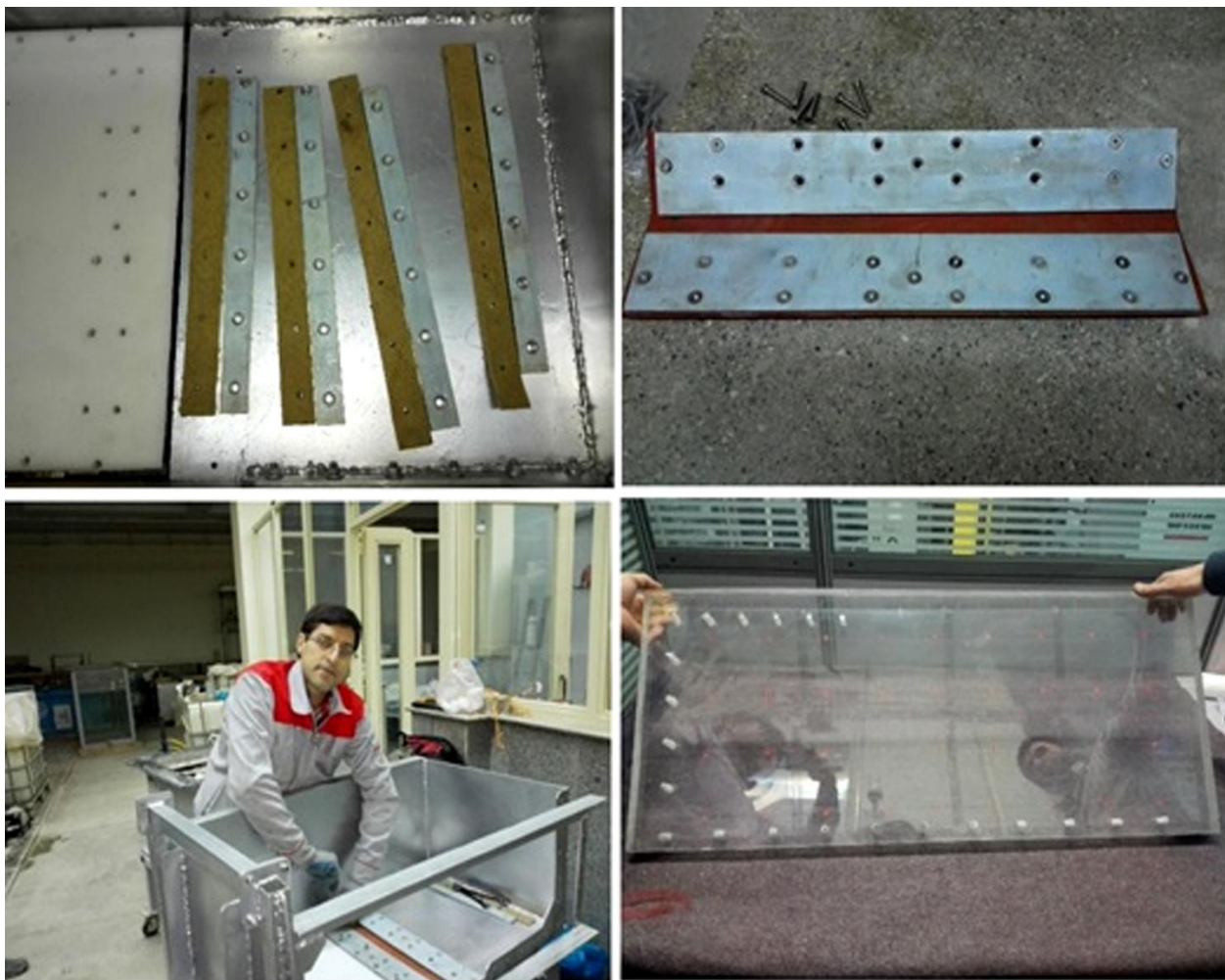
- نصب موکت یا نمدهای کناری بخش متحرک جعبه جهت جلوگیری از ریزش ماسه در حین حرکت بخش متحرک
 - نصب لاستیک کف جعبه بین بخش ثابت و متحرک به منظور عدم ریزش ماسه در حین گسلش
 - نصب اشل های اندازه گیری بر روی پلکسی گلاس و دیواره های جعبه جهت کنترل ارتفاع خاک کوبیده شده
 - نصب طلق های پلی اورتان در دیواره های طولی جعبه به منظور کاهش اصطکاک جداره و کاهش شرایط مرزی
 - چسباندن نقاط ثابت بر روی دیواره داخلی طلق پلی اورتان جهت پایش تغییر مکان ها
- شکل (۹) بعضی از این آماده سازی ها را نشان می دهد.



شکل (۸): توزیع دانه بندی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه.

۸- آماده کردن جعبه مدل سازی

قبل از ریختن نمونه خاک به داخل جعبه لازم است تا یکسری تمهیدات بر روی جعبه نمونه انجام گیرد تا شرایط برای آماده سازی نمونه فراهم گردد؛ که از جمله آن می توان به موارد زیر اشاره نمود:



شکل (۹): آماده سازی جعبه مدل سازی.

۹- آماده‌سازی مدل

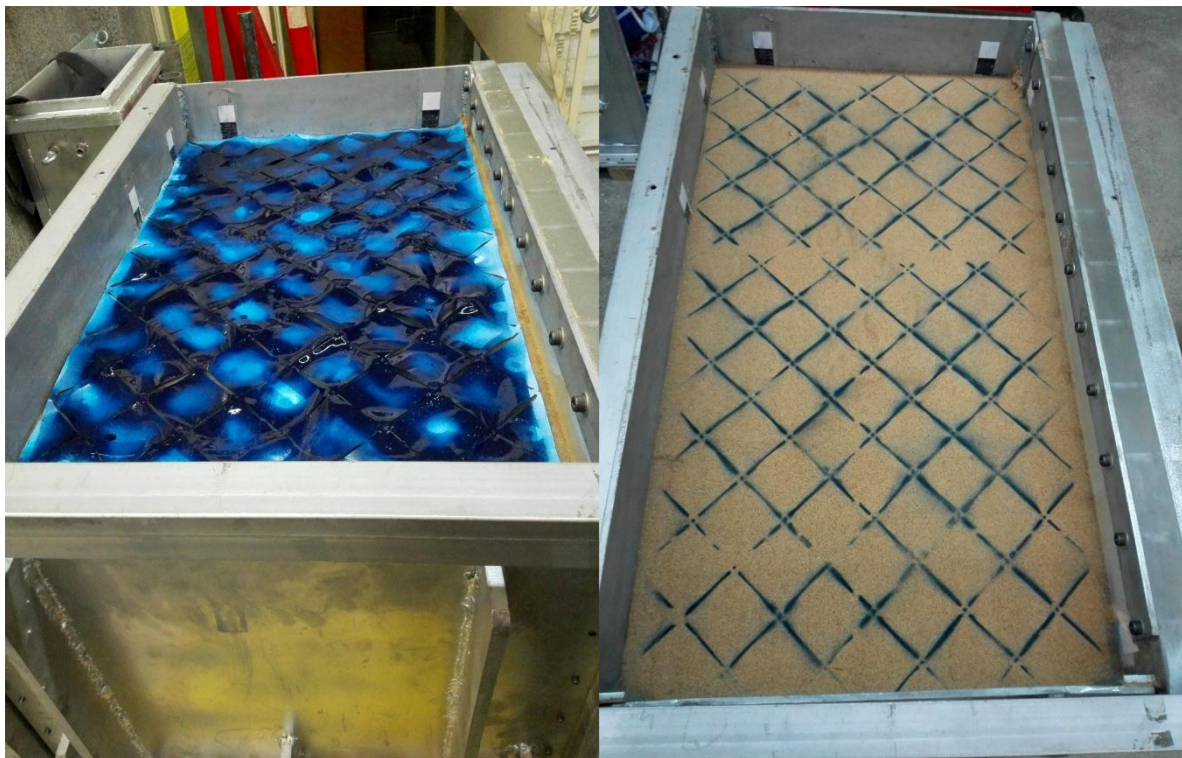
مجموعاً بیست لایه ماسه با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر درون جعبه ریخته شده و متراکم می‌گردد (شکل ۱۰). جهت پایش بهتر تغییر شکل‌ها بر روی سطح نمونه، شابلنی با چشمه‌های مربعی شکل که اندازه قطر آن ده سانتی‌متر می‌باشد ساخته شده است که قبل از آزمایش، سطح نمونه به کمک اسپری مطابق شکل (۱۱) رنگ آمیزی می‌شود.

پس از ساخت مدل در جعبه گسلش، مدل به داخل سبد نگه‌دارنده سانتریفیوژ منتقل می‌گردد و حس‌گرهای جابه‌جایی سنجی که قبلاً کالیبره شده‌اند با توجه به نوع گسلش در مکان مشخص شده نصب می‌شوند و اتصالات آن به کابل‌های سانتریفیوژ متصل می‌شود. نوارهای تأمین روشنایی نیز در مکان‌های تعیین شده قرار گرفته و به منبع تغذیه متصل می‌گردد. دوربین عکاسی در محفظه روبروی دیواره پلکسی‌گلاس نصب شده و اتصالات آن متصل می‌شود. دوربین فیلم‌برداری نیز در محل

برای آماده‌سازی مدل‌ها از روش تراکم مرطوب استفاده شده است. به این منظور به ماسه‌ی خشک به میزان ۵ درصد وزنی آب اضافه شده و با مخلوط کردن آن، حاکی مرطوب و همگن حاصل می‌شود. با توجه به ابعاد جعبه، میزان خاک مورد نیاز برای ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر توزین گشته و مصالح با الگوی بارش ماسه به داخل جعبه ریخته شده و با یک کوبه دستی به صورت همگن متراکم می‌شود ($Dr=60\%$). پس از کوبیدن هر لایه سطح آن برای حفظ یکنواختی شیاردار می‌شود. پس از هر دو لایه خاک یک نوار ماسه رنگی به ضخامت حدود ۳ میلی‌متر جهت تشخیص جابه‌جایی لایه‌ها در حین گسلش ریخته شده است [۴۶]. پس از اجرای هر لایه خاک، سطح طلق‌های پلی‌اورتان که در تماس با خاک هستند به روغن سیلیکون آغشته شدند تا اصطکاک جدار با خاک به حداقل ممکن برسد.



شکل (۱۰): آماده‌سازی نمونه.



شکل (۱۱): استفاده از شابلون جهت پایش بهتر تغییر شکل های سطح نمونه.

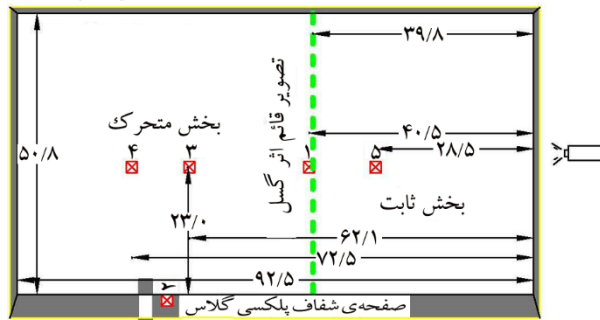
تا جابه جایی حداکثر برنامه ریزی شده ادامه پیدا می کند. در همه این مراحل حس گرهای جابه جایی میزان تغییر مکان سطح زمین و سنگ کف را ثبت نموده و ذخیره می کنند. با اتمام آزمایش تصویربرداری های تکمیلی و اندازه گیری های دستی انجام می گیرد و در صورت نیاز برش های مورد نیاز از خاک تهیه می شود.

۱۰- ابزار گذاری

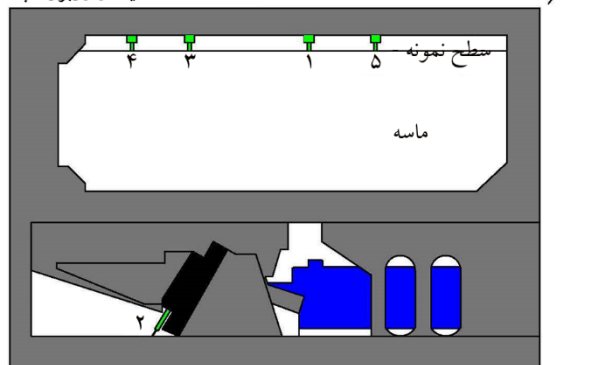
با توجه به اینکه بررسی تغییر مکان سنگ کف (جعبه) و اندازه گیری نسبت انتقال این جابه جایی به رسوبات فوقانی و سطح نمونه از اهمیت خاصی برخوردار است لذا جهت ثبت این اطلاعات در حین آزمایش ها از حس گرهای تغییر مکان^۸ استفاده شده است. عملیات ثبت داده ها به صورت لحظه ای توسط حس گرهای تغییر مکان انجام شده و به کمک رینگ های چرخشی به ثبت کننده داده ها^۹ منتقل می شود. در آزمایش ها از پنج حس گر استفاده شده است که یک عدد بر روی بخش متحرک جعبه و در کنار جعبه نصب شده است که

تعبیه شده بر روی دیواره جعبه نصب شده و اتصالات آن متصل می گردد. شیلنگ های هیدرولیک نیز به ورودی و خروجی جک متصل می شوند. قبل از آزمایش بر اساس جک لیست تهیه شده همه موارد کنترل شده و نرم افزارهای ثبت داده های جابه جایی سنجی، ثبت اطلاعات عکس برداری، ثبت داده های فیلم برداری کنترل می شوند. با توجه به مجموع وزن نمونه و جعبه برش، تعادل دستگاه (تعداد وزنه های مورد نیاز) کنترل می گردد. سپس با کنترل نهایی موارد فوق الذکر، آزمایش شروع می شود و با رساندن شتاب دستگاه سانتریفیوژ به ۶۰g، مرحله اصلی آزمایش که اعمال گسلش می باشد فرا می رسد. با توجه به اینکه جابه جایی اعمالی به صورت شبه استاتیک به مدل وارد می شود، جابه جایی از طریق تابلوی فرمان به صورت پله ای به نمونه وارد می شود به طوری که در هر مرحله جک هیدرولیکی جابه جایی ای را در راستای گسلش به نمونه وارد می کند. عملیات عکس برداری نیز به صورت اتوماتیک انجام شده و از نحوه انتشار و توسعه گسلش تصویربرداری می کند. این مراحل

دید از بالا (الف)



دید از روبرو (ب)



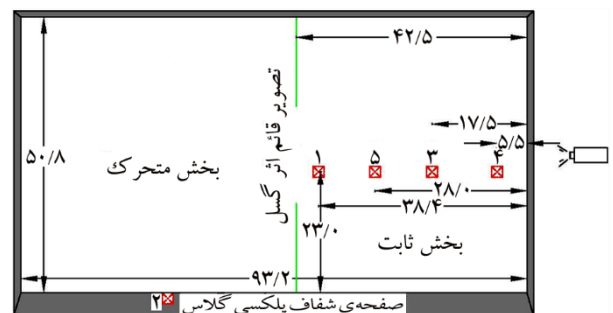
ابعاد بر حسب سانتی متر ۲۳۰ دوربین دیجیتال ۱ شماره‌ی حس گر جابه‌جایی ۲ یا ۳

شکل (۱۳): ابزارگذاری شبیه‌سازی گسلش عادی: (الف) دید از بالا (ب) دید از روبرو.

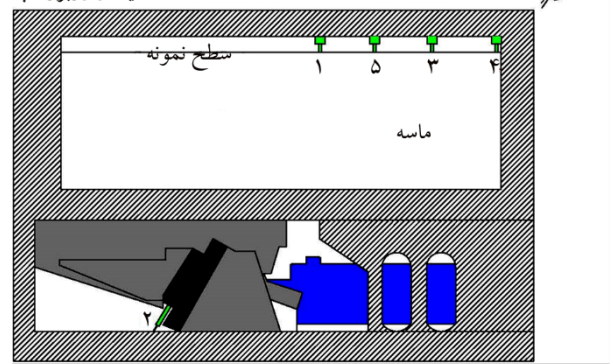
۱۱- شرح نتایج آزمایش‌ها

پس از ساخت جعبه برش، تعداد پنج آزمایش گسلش معکوس جهت کالیبراسیون و اصلاح جعبه انجام پذیرفت. با به کار گرفتن تمهیداتی مانند استفاده از ورق‌های پلی‌اورتان در جداره‌های جعبه، به کارگیری ورق پلی‌اورتان مضاعف در طرفین دیوار جعبه برش و آغشته نمودن بین ورق‌ها به روغن سیلیکون، استفاده از ورق پلی‌اورتان در جداره‌های جعبه به همراه آغشته نمودن ورق با روغن سیلیکون سعی در کاهش شرایط مرزی گردیده است. این روش‌ها در شکل (۱۴) نشان داده شده است. در نتیجه پس از مقایسه نتایج حاصله بهترین وضعیت مطلوب که شامل استفاده از ورق پلی‌اورتان بر روی جدار طولی جعبه و آغشته نمودن سطح این ورق‌ها با روغن سیلیکون می‌باشد، جهت ادامه آزمایش‌ها برگزیده شد (شکل ۱۴-ج). در ادامه تحقیق یک

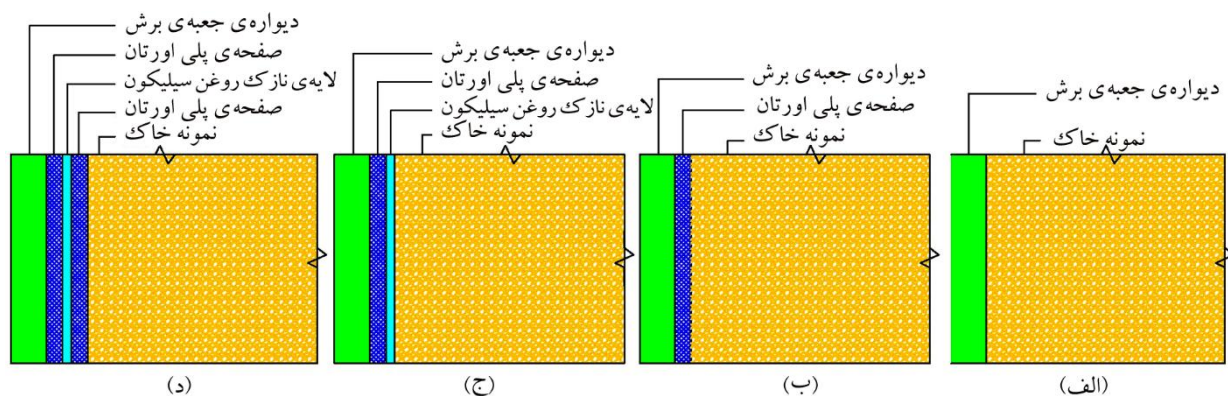
وظیفه اندازه‌گیری جابه‌جایی فرادیواره (جابه‌جایی سنگ کف) را به عهده دارد و چهار حس گر دیگر با توجه به نوع گسلش و تغییر مکان‌های پیش‌بینی شده در مکان‌های مختلف سطح نمونه به کمک پایه‌هایی نصب می‌گردند. به علاوه برای مشاهده چگونگی انتشار و توسعه سیستم‌های شکستگی گسلش در حین آزمایش عملیات فیلم برداری توسط سه دوربین دیجیتال و عکس برداری توسط دوربین نصب شده در مقابل دیواره پلکسی گلاس انجام می‌شود که داده‌های برداشت شده به منظور تحلیل تصاویر در سیستم نصب شده بر روی دستگاه سانتریفیوژ ذخیره می‌شود. نوع دوربین مورد استفاده در عملیات عکس برداری دوربین کانن مدل G7 با کیفیت ۱۰ مگاپیکسل می‌باشد. شکل‌های (۱۲) و (۱۳) موقعیت نصب ابزارها را در آزمایش گسلش معکوس و عادی نشان می‌دهد.



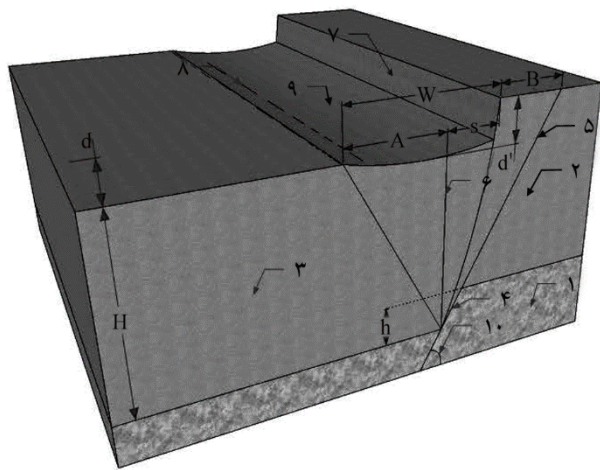
دید از روبرو (ب)



شکل (۱۲): ابزارگذاری شبیه‌سازی گسلش معکوس: (الف) دید از بالا (ب) دید از روبرو.



شکل (۱۴): تدابیر مختلف جهت کاهش شرایط مرزی



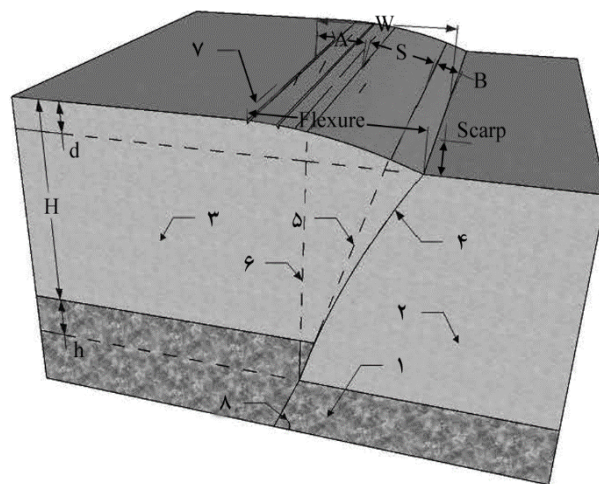
شکل (۱۶): تصویر سه بعدی گسلش عادی به همراه هندسه گسل، h : جابه‌جایی قائم پی سنگه، H : ضخامت لایه رسوبی، d : میزان جابه‌جایی رخ داده در لایه رسوبی، d' : حداکثر جابه‌جایی قائم لایه رسوبی، A : پهنای زون تغییر شکل حد واسط تصویر قائم گسل تا مرز ترک‌های کششی، B : زون حد واسط پرتگاه گسلی تا امتداد خط اثر گسل، S : زون حد واسط تصویر قائم و امتداد گسل در سطح زمین و پرتگاه گسلی، W : پهنای زون تغییر شکل گسل.

۱: سنگ کف، ۲: فرود یواره، ۳: فراد یواره، ۴: صفحه‌ی گسل، ۵: امتداد صفحه گسل، ۶: تصویر قائم گسل، ۷: پرتگاه گسلی، ۸: ترک‌های کششی، ۹: فروزمین (گراین)، ۸: زاویه شیب گسل.

۱-۱۱- مقایسه بین میزان جابه‌جایی سطح زمین در گسلش معکوس و عادی

اندرکنش سازه و گسل در پهنه پیشانی گسل از اهمیت خاصی برخوردار است. مطالعه رفتار سازه و گسل در پهنه گسلی

آزمایش گسلش معکوس (RV-06) و یک آزمایش گسلش عادی (NO-07) با به کارگیری تمهیدات ذکر شده انجام گرفت که نتایج حاصله از این دو آزمایش در ادامه آمده است. شکل‌های (۱۵) و (۱۶) تصویر سه بعدی گسلش معکوس و عادی را به همراه هندسه گسل و اصطلاحات به کار رفته در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل (۱۵): تصویر سه بعدی گسلش معکوس به همراه هندسه گسل، h : جابه‌جایی قائم پی سنگه، H : ضخامت لایه رسوبی، d : میزان جابه‌جایی رخ داده در لایه رسوبی، A : پهنای زون تغییر شکل حد واسط تصویر قائم گسل تا مرز ترک‌های کششی، B : زون حد واسط پرتگاه گسلی تا امتداد خط اثر گسل، S : زون حد واسط تصویر قائم و امتداد گسل در سطح زمین، $W=Flexure$: پهنای زون تغییر شکل گسل، Scarp: پرتگاه گسلی، ۱: سنگ کف، ۲: فرود یواره، ۳: فراد یواره، ۴: صفحه‌ی گسل شکل گرفته، ۵: امتداد صفحه گسل، ۶: تصویر قائم گسل، ۷: ترک‌های کششی، ۸: زاویه شیب گسل.

می دهد. همان طور که مشخص است نسبت میرا شدن جابه جایی ها^{۱۲} در جابه جایی های اولیه بیشتر بوده و به تدریج این نسبت کاهش می یابد. بیشترین نسبت میرایی در جابه جایی ۶۰ سانتی متری سنگ کف اتفاق می افتد که برابر ۱۵ درصد و کمینه ی آن در جابه جایی ۲/۴۹ متر، برابر ۹ درصد می باشد. در نتیجه با توجه به اندازه گیری های صورت گرفته نسبت d/h در مورد خاک ماسه ای برابر ۰/۹۱ می باشد.

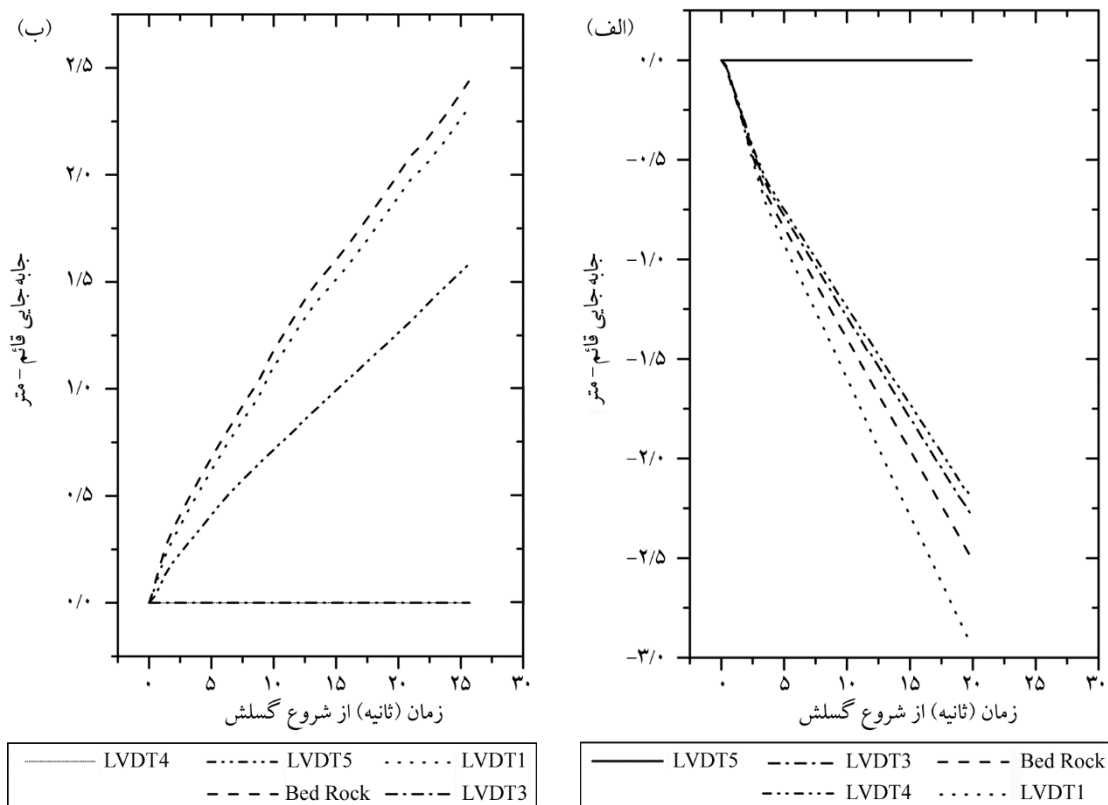
۱-۱-۱۱- میزان جابه جایی سطح زمین در گسلش عادی

در مدل سازی گسلش عادی با توجه به توزیع حس گره های جابه جایی، حس گر شماره ۱ در محل تقریبی تصویر قائم گسل قرار دارد، در نتیجه این حس گر بیشترین جابه جایی های سطح نمونه را نشان می دهد. حس گر شماره ۵ بر روی فرودیواره (شکل ۱۳) واقع است که به دلیل ثابت بودن این بخش، این حس گر جابه جایی خاصی را نشان نمی دهد و حس گر شماره ۳ و ۴ بر روی فرادیواره و به ترتیب در فاصله نزدیک تر و دورتر از حس گر شماره ۱ واقع شده اند و در نتیجه با توجه به نزدیکی به خط القعر فروزمین^{۱۳} ایجاد شده مقادیر جابه جایی بیشتر و کمتری را نشان می دهند. همان طور که از شکل (۱۷-الف) مشخص است میزان جابه جایی سنگ کف به سمت پایین در حالت واقعی برابر ۲/۵۰ متر بوده که این مقدار در حس گره های شماره ۱، ۵، ۳ و ۴ به ترتیب برابر ۲۹/۹۴، ۲/۲۰ و ۲/۲۰ متر قرائت شده است. شکل (۱۸-ب) میزان تشدید جابه جایی سنگ کف را در جابه جایی های مختلف توسط حس گر شماره ۱ نشان می دهد. همان طور که مشخص است نسبت تشدید جابه جایی ها^{۱۴} در جابه جایی های اولیه بیشتر بوده و به تدریج این نسبت کاهش می یابد. بیشترین نسبت تشدید در جابه جایی ۶۰ سانتی متری سنگ کف اتفاق می افتد که برابر ۳۱ درصد و کمینه ی آن در جابه جایی ۲/۵۰ متر، برابر ۲۴ درصد می باشد. در نتیجه با توجه به اندازه گیری های صورت گرفته نسبت d/h در مورد خاک ماسه ای برابر ۱/۲۴ می باشد.

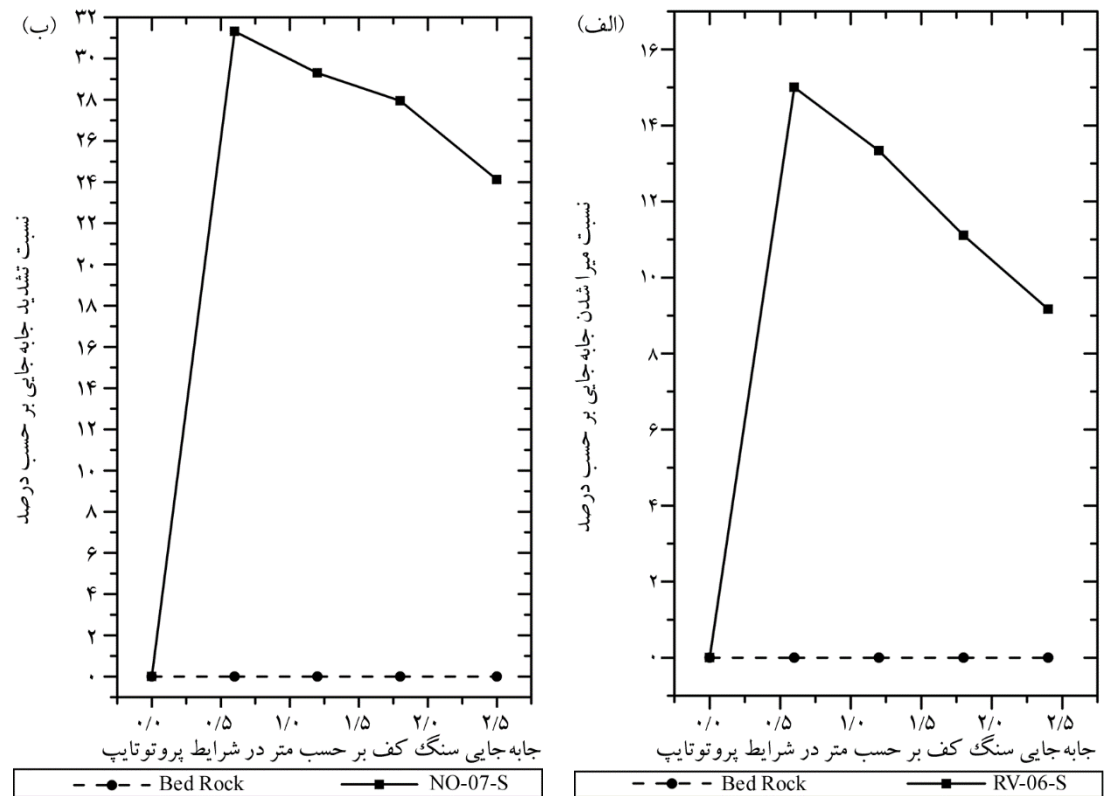
در زمین لرزه های پیشین نشان می دهد که میزان خرابی های حاصله علاوه بر مشخصات گسل به خصوصیات رفتاری رسوبات پهنه گسلی و پی سازه ارتباط دارد [۴۷-۴۸]. با توجه به اهمیت این موضوع میزان جابه جایی فرادیواره (d) نسبت به تغییر مکان سنگ کف (h) در حین آزمایش ها مورد سنجش قرار گرفته است. این اندازه گیری ها به کمک حس گرهای جابه جایی سنج نصب شده بر روی سنگ کف (LVDT2) و سطح زمین (LVDT1، LVDT3، LVDT4، LVDT5) بر روی قسمت فرادیواره و فرودیواره در مدل سازی گسلش معکوس و عادی (به ترتیب مطابق شکل های ۱۲ و ۱۳) صورت گرفته است. حال به تشریح میزان جابه جایی ها در گسلش معکوس و نرمال به تفکیک می پردازیم:

۱-۱-۱۱- میزان جابه جایی سطح زمین در گسلش معکوس

در مدل سازی گسل معکوس با توجه به توزیع حس گره های جابه جایی، حس گر شماره ۱ در محل تقریبی تصویر قائم گسل قرار دارد، در نتیجه این حس گر بیشترین جابه جایی های سطح نمونه را نشان می دهد. حس گر شماره ۵ که بر روی بخش میانی شیب پیشانی گسل^{۱۰} (شکل ۱۵) واقع است مقادیر کمتر جابه جایی را نشان می دهد و حس گره های شماره ۳ و ۴ به دلیل واقع شدن بر روی فرودیواره و ثابت بودن این بخش، جابه جایی خاصی را از خود نشان نداده اند. همان طور که از شکل (۱۷-ب) مشخص است، میزان جابه جایی سنگ کف در حالت واقعی^{۱۱} برابر ۲/۴۹ متر بوده که این مقدار در حس گره های شماره ۱، ۵، ۳ و ۴ به ترتیب برابر ۲/۱۲، ۱/۶۶، ۰ و ۰ متر قرائت شده است. میزان جابه جایی سطح نمونه بر روی فرادیواره و خارج از شیب گسل نیز با اتمام آزمایش اندازه گیری شده است. شکل (۱۸) میزان میرا شدن جابه جایی سنگ کف تا رسیدن به سطح نمونه را در جابه جایی های مختلف توسط حس گر شماره ۱ نشان



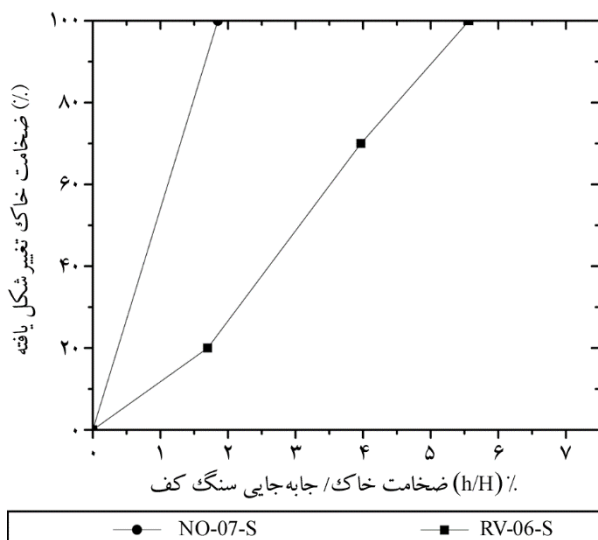
شکل (۱۷): مقایسه جابه جایی ها در پیشانی گسلش عادی (الف) و گسلش معکوس (ب).



شکل (۱۸): نسبت میرایی جابه جایی سنگ کف در ضخامت خاک سربار در گسلش معکوس (الف) و تشدید جابه جایی در گسلش عادی (ب).

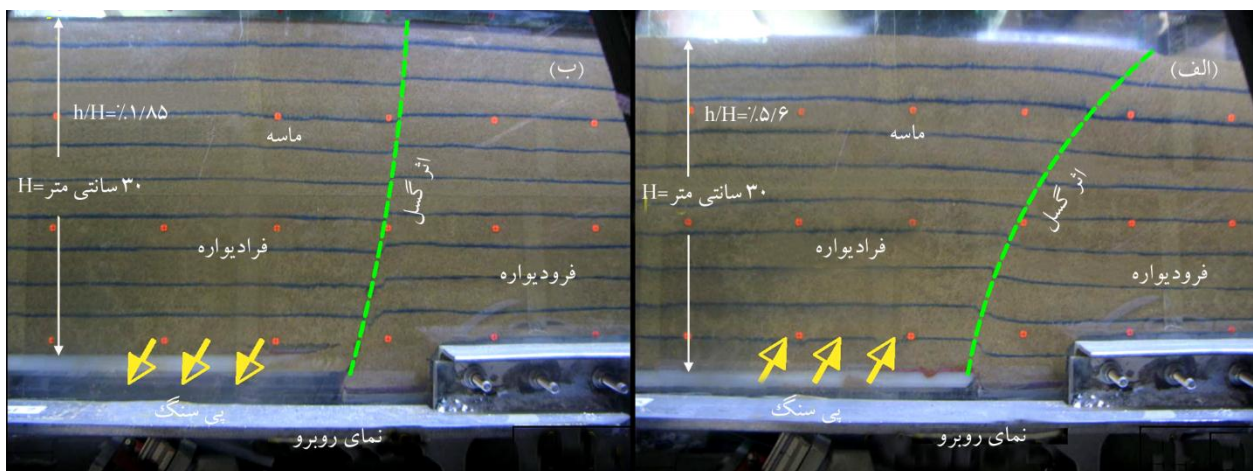
۱۱-۲- ظهور گسلش در سطح زمین

سانتی متر می باشد. در نتیجه میزان نسبت h/H مورد نیاز جهت ظهور گسلش در سطح زمین به ترتیب برابر $۵/۵۷$ و $۱/۸۵$ درصد می باشد. همان طور که مشخص است به دلیل بالا بودن مقاومت فشاری نسبت به مقاومت کششی، میزان جابه جایی لازم در حالت گسلش عادی به مراتب کمتر از گسلش معکوس است. در نتیجه در گسلش عادی با کوچک ترین حرکت صفحات، پرتگاه گسلی شکل گرفته و به دلیل تشدید جابه جایی دو سمت گسل ایمنی سازه های واقع شده در اطراف گسل به شدت به خطر می افتد. به همین خاطر گسلش های عادی نسبت به گسلش معکوس ویرانگر تر است.



شکل (۱۹): مقایسه پیشروی پیشانی گسل در آزمایش گسلش معکوس و عادی.

یکی از مواردی که در پدیده گسلش از اهمیت بالایی برخوردار است میزان جابه جایی لازم پی سنگ جهت ظهور شکستگی گسلش در سطح زمین می باشد. در مورد زمین لرزه ها، جهت ظهور گسلش در سطح زمین بزرگی آستانه حدود ۵ تا ۵/۵ ریشتر لازم است تا شکستگی ها به سطح زمین برسد [۴۹]. در مورد نتایج حاصل از مطالعات مدل سازی انتشار گسلش به سطح نیز میزان جابه جایی سنگ کف با توجه به پارامترهای سنجیده شده بین ۱ تا ۴ درصد ارتفاع خاک سربار مورد نیاز می باشد [۵۰]. بر اساس مطالعات لی و هامادا [۳۸] مقدار نسبت h/H مورد نیاز جهت ظهور گسلش در سطح با توجه به میزان دانسیته نسبی خاک بین $۵/۷۷$ تا $۱۰/۱$ متغیر می باشد. نتایج حاصل از مدل سازی گسلش معکوس و عادی صورت گرفته مطابق شکل (۱۹) می باشد. انتشار گسلش در ضخامت نمونه ی خاک در مدل ساترفیوژ در شکل (۲۰) نشان داده شده است. در گسلش معکوس بخش متحرک جعبه به سمت بالا و در گسلش عادی به سمت پایین حرکت می کند تا گسیختگی به سطح نمونه برسد. برای مدل با ضخامت ۳۰ سانتی متر (۱۸ متر در شرایط واقعی) مقدار جابه جایی مورد نیاز سنگ کف جهت ظهور شکستگی گسل در سطح زمین در مورد گسلش معکوس در خاک ماسه ای $۱/۶۷$ سانتی متر و در گسلش عادی $۰/۵۶$



شکل (۲۰): مقایسه میزان جابه جایی قائم مورد نیاز سنگ کف جهت رسیدن گسلش به سطح زمین در آزمایش های گسلش معکوس و عادی.

۱۱-۳- زاویه شکستگی گسل در گسلش معکوس و عادی در

سطح زمین

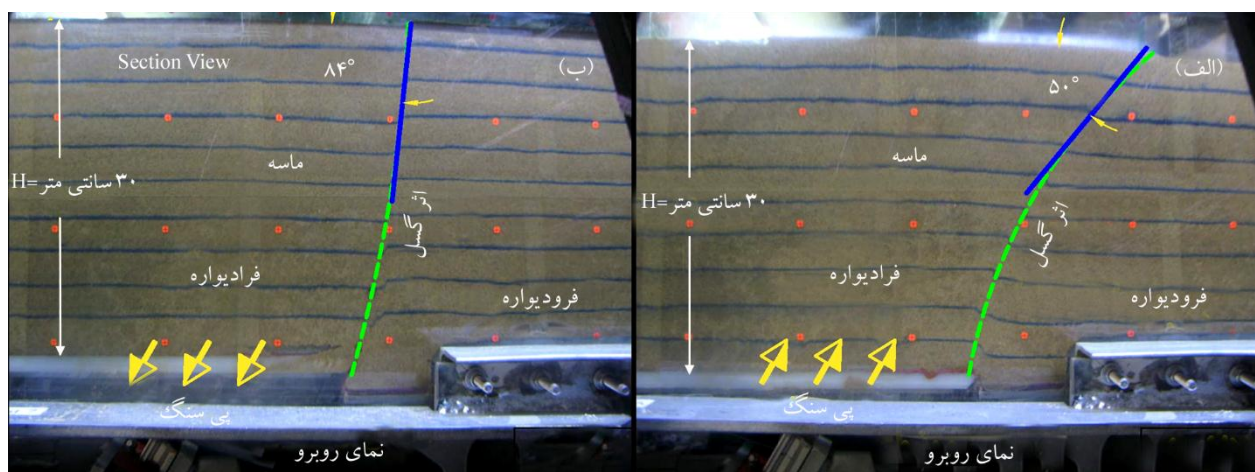
آناستاسوپلوس و همکاران [۵۱] نشان دادند که زاویه شیب گسل در مرز سنگ پی و آبرفت سربار می شکند و ابتدا شیب آن به خصوص در مصالح با زاویه اتساع پایین زیاد می شود. شیب گسل عادی تا رسیدن به سطح زمین افزایش می یابد. در صورتی که شیب گسل معکوس تمایل به کم شدن دارد. شکل (۲۱-الف) زاویه شکستگی گسل معکوس و شکل (۲۱-ب) زاویه شکستگی گسل عادی را در مواجهه با سطح زمین نشان می دهد. همان طور که از شکل (۲۱-الف) مشخص است زاویه گسلش معکوس از ۶۰ درجه به ۵۰ درجه کاهش پیدا نموده و شکل (۲۱-ب) نشان می دهد که زاویه گسلش عادی در سطح زمین مقادیر بالاتری (۸۴ درجه) را نسبت به زاویه گسلش در سنگ کف را نشان می دهد که این یافته ها با تحقیقات مرتضوی زنجانی و سروش [۵۲] و لی و هامادا [۳۸] هم خوانی دارد.

۱۱-۴- وسعت منطقه تغییر شکل در گسلش معکوس و عادی

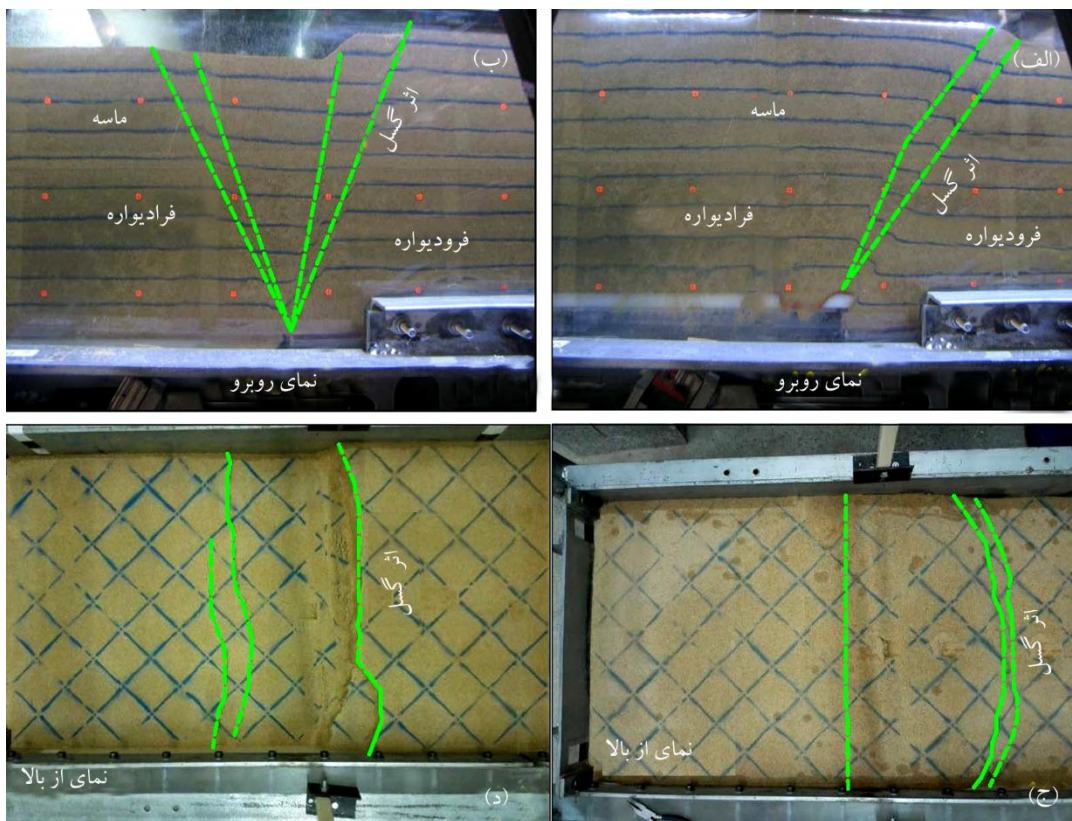
پهنه‌ی متأثر از گسلش سطحی یک عامل مهم در تعیین فاصله امن جهت عملیات ساخت و ساز می باشد [۵۳]. تخمین این پهنه برای امنیت لرزه‌ای ساختمان‌های نزدیک گسل‌های فعال از اهمیت بالایی برخوردار است. شکل (۲۲-الف و ب) انتشار سطوح

گسیختگی گسل را و شکل (۲۲-ج و د) گسترش محدوده تغییر شکل را در دو مدل سازی گسلش معکوس و عادی نشان می دهد. در این تصویر یک سمت محدوده تغییر شکل محدود به پرتگاه گسلی می باشد و سمت دیگر محدود به ترک‌های کششی می باشد.

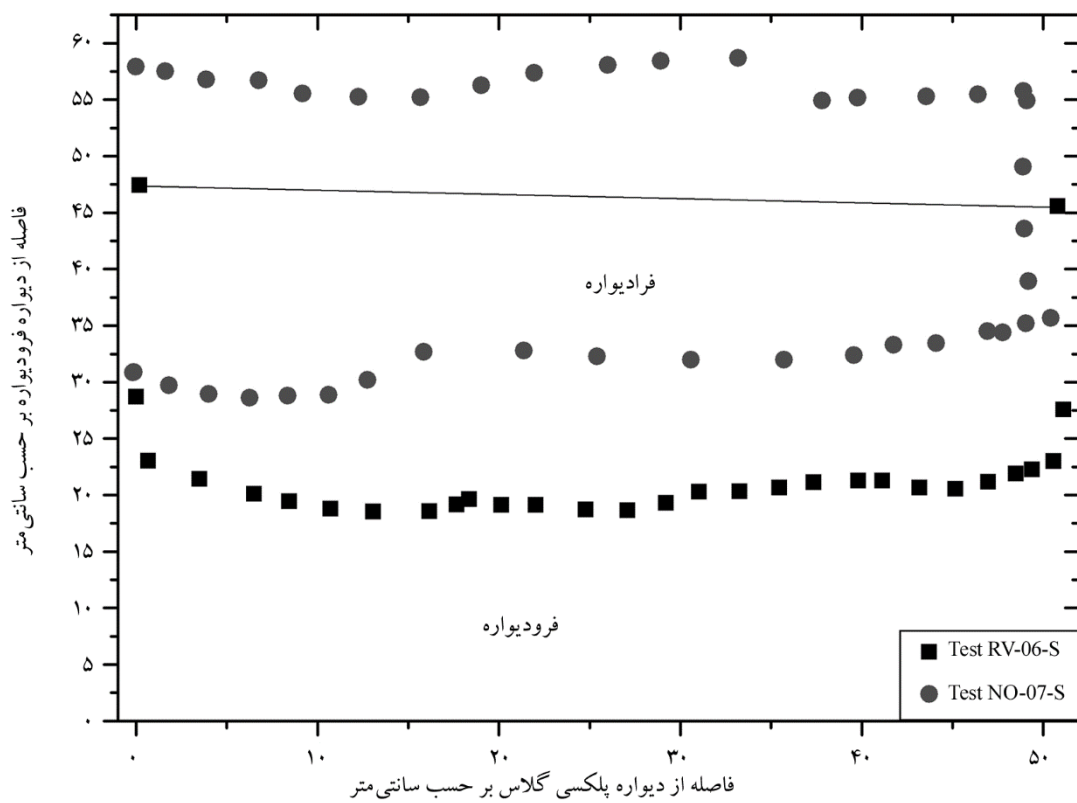
با بررسی تصاویر مشخص می شود که در گسلش معکوس با افزایش میزان جابه‌جایی سنگ کف، شکستگی گسل دو شاخه شده و باعث می گردد تا پرتگاه گسلی حالت پله‌ای پیدا کند و پیشرفت اسکارپ گسلی بر روی فرودیواره محدود شود، در نتیجه پرتگاه گسلی شیب بیشتری پیدا می کند. محدوده تغییر شکل سطحی را از روی قطر شابلن رنگی می توان به دو ناحیه فشاری (در بالای پرتگاه گسلی) و کششی (محدوده‌ی بالای تصویر قائم گسل) تقسیم کرد. در گسلش عادی نیز همان طور که از شکل (۲۲-ب و د) مشخص است با ادامه جابه‌جایی سنگ کف به دلیل پایین بودن چسبندگی خاک، شکستگی‌هایی بر روی دیواره‌ی پرتگاه گسلی ایجاد می شود. با توجه به میرا شدن بخشی از جابه‌جایی‌ها در گسلش معکوس پرتگاه گسلی ایجاد شده به مراتب دارای شیب و ارتفاع کمتری نسبت به گسلش عادی می باشد که در گسلش عادی جابه‌جایی‌ها تشدید شده و زاویه گسلش زاویه بیشتری به خود می گیرد. شکل (۲۳) مقایسه محدوده تغییر شکل در گسلش معکوس و عادی را نشان می دهد.



شکل (۲۱): زاویه شیب سطح گسل در مواجهه با سطح زمین در آزمایش‌های گسلش معکوس (الف) و عادی (ب).



شکل (۲۲): گسترش زون تغییر شکل در آزمایش های گسلش معکوس (الف و ج) و عادی (ب و د).



شکل (۲۳): گسترش و جانمایی محدوده تغییر شکل در آزمایش های گسلش معکوس و عادی.

حال به مقایسه اعداد خروجی از نتایج حاصله در این تحقیق ($W=18m$) با فرمول‌های بتاتیان [۵۵] می‌پردازیم. با فرض زاویه گسلش (θ) ۶۰ درجه، ضخامت رسوبات روی سنگ کف (H)، برابر ۱۸ متر و جابه‌جایی سنگ کف (h) برابر ۲/۵ متر و با فرض مقدار $U = 2$ m و $F = 2$ m بر اساس روابط بتاتیان، مقدار $S_1 = 12.31$ m و $S_2 = 10$ m می‌شود که مقدار حریم گسلش $S = 22.31$ m محاسبه می‌گردد که این مقدار بیشتر از مقدار حاصل شده در نتایج آزمایش‌های مدل‌سازی می‌باشد. از آنجا که مقادیر آیین‌نامه‌ای به دلیل محافظه‌کاری و عدم تعیین جزئیات خاک، ضخامت رسوبات و غیره اعداد بالاتری پیشنهاد می‌شود و در آیین‌نامه‌ها نیز کاهش این اعداد را منوط به انجام مطالعات دقیق‌تر و تخصصی‌م‌شروط می‌نماید، در نتیجه مقادیر حاصل شده از مدل‌سازی مقادیر منطقی به نظر می‌رسد.

۱۲- نتیجه‌گیری

همان‌طور که اشاره شد، جعبه گسلش جدید ساخته شده که حاصل تجربه ساخت دو جعبه قبلی است در آن نقاط ضعف دیگر جعبه‌ها رفع شده و نقاط قوت آنها تقویت شده است. با توجه به طراحی صحیح و دقت در ساخت جعبه، شبیه‌سازی پدیده گسلش با کمترین خطا صورت می‌پذیرد. به‌منظور کم کردن اثر شرایط مرزی تعدادی آزمایش صورت گرفت که با توجه به بررسی نتایج حاصله استفاده از ورق پلی‌اورتان بر روی جدار جعبه و آغشته نمودن سطح این ورق‌ها با روغن سیلیکون در حین خاک‌ریزی لایه‌ها بهترین نتایج را ارائه می‌دهد. با استفاده از این روش دو آزمایش شبیه‌سازی گسلش معکوس و عادی بر روی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه تحت شتاب ثقل تشدید شده g ۶۰ انجام گرفت که نتایج زیر حاصل گردید:

۱- در گسلش معکوس مقداری از جابه‌جایی پی‌سنگ در حین انتشار در ضخامت رسوبات فوقانی میرا می‌شود که بیشترین مقدار این میرایی در جابه‌جایی اولیه رخ می‌دهد و با ادامه پیشروی گسلش از مقدار جذب جابه‌جایی‌ها کاسته می‌شود که در شرایط مدل‌سازی این تحقیق مقدار DDR به ۹۱ درصد می‌رسد.

با اندازه‌گیری صورت گرفته عرض محدوده تغییر شکل (W) در گسلش معکوس در حالت واقعی (۱۷/۳۲ متر) با گسلش عادی (۱۸/۰۲ متر) تقریباً یکسان می‌باشد. در نتیجه می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در خاک ماسه‌ای مورد آزمایش با وقوع گسلش معکوس و عادی تحت زاویه شیب ۶۰ درجه و با جابه‌جایی قائم حداکثر ۱۴ درصد میزان عرض پهنه تغییر شکل با همدیگر برابر و معادل ضخامت لایه آبرفت می‌باشد ولی جانمایی این دو پهنه با همدیگر متفاوت است و مطابق شکل (۲۳)، پهنه‌ی گسلش عادی حدود ۶ متر به سمت فرادیواره نسبت به گسلش معکوس جابه‌جایی دارد.

۱۱-۵- مقایسه عرض پهنه گسلی با پهنای حریم گسلش در آیین‌نامه‌های ساخت‌وساز

همان‌طور که قبلاً عنوان شد، استاندارد ۲۸۰۰ ایران و آیین‌نامه‌های لرزه‌ای اروپا (EC8) مقدار مشخصی را برای فاصله حریم گسلش ارائه نکرده‌اند. در حالی که دستورالعمل کشور نیوزلند و راهنمای ارزیابی خطر گسلش سطحی ایالت کالیفرنیا، بدون توجه به مشخصات و خصوصیات خاک، به ترتیب فواصلی در حدود ۲۰ و ۱۵ متر را از هر طرف محل اثر گسیختگی گسل به عنوان فاصله عقب‌نشینی پیشنهاد داده‌اند [۵۴]. البته در بعضی از کشورهای پیشرفته، قوانینی وضع شده که جهت ساخت‌وساز نیاز به رعایت حداقل استانداردها در مطالعات خطر برش سطحی گسل می‌باشد که بر اساس این مطالعات، در مورد نحوه ساخت‌وساز و میزان عقب‌نشینی از حریم گسل تصمیم‌گیری می‌شود [۵۵]. بر اساس روابط ارائه شده توسط بتاتیان [۵۵] مقدار حریم گسلش مطابق فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$S_1 = U(2D + F/\tan \theta) \quad \text{برای فرودیواره}$$

$$S_2 = U(2D) \quad \text{برای فرادیواره}$$

که در آن S_1 ، S_2 ، U ، D ، F و θ به ترتیب حریم گسلش در فرودیواره و فرادیواره، اهمیت ساختمان، میزان جابه‌جایی پی‌سنگ بر حسب متر، عمق پی و زاویه گسل نسبت به افق می‌باشد.

پهنه‌ی گسلش عادی حدود ۶ متر به سمت فرادیواره نسبت به گسلش معکوس جابه‌جایی دارد.

۹- با توجه به افزایش قیمت و کاهش مساحت زمین‌های با قابلیت ساخت‌وساز، می‌توان شرایط موجود در اطراف گسل‌ها را مدل‌سازی نموده تا مقادیر حریم گسلش بهینه جهت استفاده از این زمین‌ها به دست آید.

قدردانی

این تحقیق با پشتیبانی مالی دانشگاه فردوسی مشهد تحت شماره ۲۸۸۴۰ تاریخ ۱۳۹۲/۰۹/۱۸ و در قالب فرصت مطالعاتی داخل کشور در دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران به انجام رسیده است که لازم است از همکاری و مساعدت ویژه‌ی دانشکده‌ی مهندسی عمران و کارشناسان محترم بخش سانتریفیوژ و مدل‌سازی فیزیکی آقایان مهندس سلیمی و شکوری که بدون همکاری آنها انجام این پژوهش میسر نبود کمال تشکر و قدردانی را بنمایم. از آقایان مهندس ابراهیمی که در طراحی جعبه برش و مهندس عابدینی که در ساخت آن همکاری داشته‌اند سپاسگزارم.

مراجع

1. Faccioli, E., Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Callerio, A. and Paolucci, R. (2008) Fault rupture foundation interaction: selected case histories. *Bull. Earthquake Engineering*, 557-583.
2. Oakeshott, G. (1973) 'Some case histories, the association of engineering geologists, reprinted from geology'. In: *Patterns of Ground Ruptures in Fault Zones Coincident with Earthquakes*, Special publication. 287-312.
3. Brune, J. and Allen, C. (1967) A low-stress-drop, low magnitude earthquake with surface. *Bull Seismology Soc.*, 57, 501-514.
4. Doser, D. and Smith, R. (1988) Source parameters of the 28 October 1983 Borah Peak, Idaho. *Bull Seismology Soc.*, 75, 1041-1051.

۲- در گسلش عادی میزان جابه‌جایی پی‌سنگ در مراحل اولیه بیش از حرکت رسوبات رویی بوده که با ادامه جابه‌جایی‌ها، حرکت آبرفت سربار از میزان جابه‌جایی سنگ کف پیشی می‌گیرد که در شرایط مدل‌سازی این تحقیق مقدار ADR به ۱۲۴ درصد می‌رسد.

۳- نسبت h/H مورد نیاز پی‌سنگ جهت ظهور شکستگی گسل در سطح زمین در مورد گسلش معکوس در خاک ماسه‌ای برابر ۵/۵۷ درصد و در گسلش عادی برابر ۱/۸۵ درصد می‌باشد که به دلیل بالا بودن مقاومت فشاری نسبت به مقاومت کششی، میزان جابه‌جایی لازم در حالت گسلش عادی به مراتب کمتر از گسلش معکوس است.

۴- در هنگام ظهور شکستگی گسل در سطح زمین، زاویه گسلش معکوس از ۶۰ درجه به ۵۰ درجه کاهش پیدا می‌کند و زاویه گسلش عادی تا ۸۴ درجه افزایش می‌یابد.

۵- در گسلش معکوس با افزایش جابه‌جایی پی‌سنگ، شکستگی گسل دو شاخه شده و پرتگاه گسلی حالت پله‌ای پیدا می‌کند در نتیجه شیب پرتگاه گسلی بیشتر و توسعه محدود تغییر شکل گسلی کاهش می‌یابد.

۶- در گسلش عادی با توجه به تشدید جابه‌جایی‌ها در رسوبات فوقانی و افزایش شیب صفحات گسل در سطح زمین، پرتگاه گسلی ایجاد شده بسیار شارپ و عمیق می‌باشد. در نتیجه با توجه به اختلاف جابه‌جایی تفریقی زیاد دو طرف سطح گسل، سازه‌های واقع شده بر روی این نوع گسل‌ها متحمل خسارات سنگین‌تری خواهند شد.

۷- میزان بازشدگی درزه‌های کششی در فرونشست حاصل از گسلش عادی به مراتب بیش از پشته تشکیل شده از گسلش معکوس می‌باشد.

۸- پهنه گسلی ایجاد شده توسط گسلش معکوس تقریباً برابر پهنه گسلش عادی می‌باشد ولی از نظر جانمایی با همدیگر متفاوت هستند. در شرایط مدل‌سازی این تحقیق مقدار گسترش پهنه گسلی برابر ضخامت رسوبات فوقانی بوده و

- propagation in clay with and without a preexisting fracture. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **138**(12), 1492–1502.
15. Chang, A.A., Lee, C.J., Huang, W.C., Huang, W.Y., Huang, W.J., Linc, M.L., and Chend, Y.H. (2015) Evolution of the surface deformation profile and subsurface distortion zone during reverse faulting through overburden sand. *Engineering Geology*, **184**, 52–70.
 16. Bray, J.D., Seed, R.B., Cluff, L.S., and Seed, H.B. (1994) Earthquake fault rupture propagation through soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, **120**(3), 543–561.
 17. Anastasopoulos, I., Callerio, A., Bransby, M.F., Davies, M.C.R., El Nahas, A., Faccioli, E., Gazetas, G., Masella, A., Paolucci, R., Pecker, A., and Rossignol, E. (2008) Numerical analyses of fault-foundation interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **6**(4), 645–675.
 18. Taniyama, H. (2011) Numerical analysis of overburden soil subjected to strike-slip fault: Distinct element analysis of Nojima fault. *Engineering Geology*, **123**, 194–203.
 19. Mortazavi Zanjani, M., Soroush, A., and Solhmirzaei R. (2012) Effect of mechanical soil parameters on fault rupture propagation through granular soils. *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, 24–28 September, 17929–17936.
 20. Oettle, N.K. and Bray, J.D. (2013) Fault rupture propagation through previously ruptured soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **139**(10), 1637–1647.
 21. Hazeghian, M. and Soroush, A. (2017) Numerical modeling of dip-slip faulting through granular soils using DEM. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **97**, 155–171.
 22. Bray, J.D. (2001) Developing mitigation measures for the hazards associated with earthquake surface fault rupture. *Proceedings of the Workshop on Seismic Fault-Induced Failures-Possible Remedies for Damage to Urban Facilities*, 11–12 January. University of Tokyo Press, Tokyo, 55–79.
 5. Gur, T. and Sozen, M.A. (2004) An investigation of the earthquake effects on articulated bridge located on fault ruptures. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., 1–6 August, Paper No. **1029**, Canada.
 6. Lin, A., Rao, G., and Yan, B. (2012) Field evidence of rupture of the Qingchuan Fault during the 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake, northeastern segment of the Longmen Shan Thrust Belt, China. *Tectonophysics*, **522–523**, 243–252.
 7. Lin, C.W., Lee, Y.L., Huang, M.L., Lai, W.C., Yuanc, B.D. and Huang, C.Y. (2004) Characteristics of surface ruptures associated with the Chi-Chi earthquake of September 21, 1999. *Engineering Geology*, **71**(1-2), 13–30.
 8. Zare, M. (2005) *An Introduction to Applied Seismology*. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran (in Persian).
 9. Burridge, P.B. (1987) ‘Soil mechanics laboratory failure of slopes’. In: *Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy*, California Institute of Technology, Pasadena, California.
 10. Loukidis, D., Bouckovalas, G.D. and Papadimitriou, A.G. (2009) Analysis of fault rupture propagation through uniform soil cover. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29**(11–12), 1389–1404.
 11. Maa, K.F. and Chiao L-Y. (2003) Rupture behavior of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake-slips on a curved fault in response to the regional plate convergence. *Engineering Geology*, **71**, 1–11.
 12. Johansson, J. and Konagai, K. (2006) Fault induced permanent ground deformations-an experimental comparison of wet and dry soil and implications for buried structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **26**, 45–53.
 13. Anastasopoulos, I. and Gazetas, G. (2010) Analysis of cut and cover tunnels against large tectonic deformation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **8**(2), 283–307.
 14. Ng, C.W.W., Cai, Q.P. and Hu, P. (2012) Centrifuge and numerical modeling of normal fault-rupture

- Canadian Geotechnical Journal*, **49**(6), 659–670.
34. Ashtiani, M., Ghalandarzadeh, A., and Towhata, I. (2016) Centrifuge modeling of shallow embedded foundations subjected to reverse fault rupture. *Canadian Geotechnical Journal*, **53**, 505–519.
35. Kiani, M., Ghalandarzadeh, A., Akhlaghi, T., and Ahmadi, M. (2016) Experimental evaluation of vulnerability for urban segmental tunnels subjected to normal surface faulting. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **89**, 28–37.
36. Kiani, M., Akhlaghi, T., and Ghalandarzadeh, A. (2016) Experimental modeling of segmental shallow tunnels in alluvial affected by normal faults. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **51**(16), 108–119.
37. Lin, M.L., Lu, C.Y., Chang, K.J., Jeng, F.S., and Lee, C.J. (2005) Sandbox experiments of plate convergence - scale effect and associated mechanisms. *TAO*, **16**(3), 595-620.
38. Lee, J.W. and Hamada, M. (2005) An experimental study on earthquake fault rupture propagation through a sandy soil deposit. *Structural Eng. and Earthquake Eng.*, **22**, 1-13.
39. Bransby, M.F., Davies, M.C.R., and Nahas A.El. (2008) Centrifuge modelling of normal fault–foundation interaction. *Bull. Earthquake Eng.*, **6**, 585–605.
40. Bransby, M.F., Davies, M.C.R., Nahas, A.El., and Nagaoka, S. (2008) Centrifuge modelling of reverse fault–foundation interaction. *Bull. Earthquake Eng.*, **6**, 607–628.
41. Loli, M., Anastasopoulos, I., Bransby, M.F., Ahmed, W. and Gazetas, G. (2011) Caisson Foundations Subjected to Reverse Fault Rupture: Centrifuge Testing and Numerical Analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **137**, 914-925.
42. Taniyama, H, and Watanabe, B. (2001) Deformation of sandy deposits by reverse faulting. *Seismic Fault-Induced Failures*, 135-142.
43. Cai, Q.P., Ng, C.W.W., Luo, G.Y., and Hu, P. (2013)
23. Baziar, M.H., Salehzadeh, H., Kazemi, M., and Rabeti Moghadam, M. (2014) Centrifuge modeling of an underground structure subjected to blast loading. *Advanced Defence Sci. & Tech.*, **5**, 31-41 (in Persian).
24. Craig, W.H. (2001) The seven ages of centrifuge modelling. *Workshop on Constitutive and Centrifuge Modelling: Two Extremes*, Monte Verità, Ascona Acad.
25. Pokrovskii, G.I. and Fiodorov, I.S. (1936) Studies of soil pressures and deformations by means of a centrifuge. *1st Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng.*, 70.
26. Roth, W.H., Scott, R.F., and Austin, I. (1981) Centrifuge modelling of fault propagation through alluvial soils. *Geophysical Research Letters*, **8**, 561–564.
27. Scott, R.F. (1977) Dynamic pile tests by centrifuge modeling. *6th World Conference on Earthquake Engineering*, 4-50.
28. Scott, R.F. (1979) Cyclic and static model pile tests in a centrifuge. *11th Annual Offshore Technology Conference*. Paper No. **3492**, 1159-1168.
29. Tagaya, K. (1977) Fundamental study on extraction on buried anchors. *12th Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo.
30. Liu, H.P. and Hagman, R. L. (1978) Centrifuge modeling of earthquakes. *Geophysical Research Letters*, (5), **333-336**.
31. Prevost, J.H. (1981) Offshore gravity structures centrifuge modeling. *Journal of Geotechnical Engineering Div., ASCE*, **107**.
32. Rojhani, M., Moradi, M., Ebrahimi, M.H., Galandarzadeh, A., and Takada, S. (2012a) Recent Developments in Faulting Simulators for Geotechnical Centrifuges. *Geotechnical Testing Journal*, **35**(6).
33. Rojhani, M., Moradi, M., Galandarzadeh, A., and Takada, S. (2012b) Centrifuge modeling of buried continuous pipelines subjected to reverse faulting.

- Xin, Y., Chunshan, Z., and Tanyu, X. (2013) Surface ruptures induced by the Wenchuan earthquake: Their influence widths and safety distances for construction sites. *Engineering Geology*, **166**, 245 – 254.
54. Lade, P.V., Cole, D.A., and Cummings, D. (1984) Multiple failure surfaces over dip-slip faults. *Journal of Geotechnical Engineering*, **110**(5), 616–627.
55. Batatian, D. (2002) Minimum standards for surface fault rupture hazard special studies. *Salt Lake County Geologic Hazards Ordinance*. Chapter 19.75, Appendix A.
- Influences of pre-existing fracture on ground deformation induced by normal faulting in mixed ground conditions. *J. Cent. South Univ.*, **20**, 501–509.
44. Feng, S. (2004) *Centrifuge Modelling of Tunnel-Pile Interaction*. A thesis submitted for the degree of master of engineering, National University of Singapore.
45. Farahmand, K., Lashkari A., and Ghalandarzadeh, A. (2016) Firoozkuh sand: introduction of a benchmark for geomechanical studies. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, **40**, 133–148.
46. Cai, Q.P., Hu, P., Van Laak, P., Ng, C.W.W. and Chiu, A.C.F. (2010) Investigation of boundary conditions for simulating normal fault propagation in centrifuge. *The 4th International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics*, Tehran, 2-3 November 2010, Iran.
47. Anastasopoulos, I. and Gazetas, G. (2007a) Foundation–structure systems over a rupturing normal fault: Part I. Observations after the Kocaeli 1999 earthquake. *Bull. Earthquake Eng.*, **5**, 253–275.
48. Anastasopoulos, I. and Gazetas, G. (2007b) Foundation-structure systems over a rupturing normal fault: part II- Analysis of the Kocaeli case histories. *Bull. Earthquake Eng.*, **5**, 277-301.
49. Bonilla, M.G. (1988) Minimum earthquake associated with coseismic surface faulting. *Bulletin of the Association of Environmental & Engineering Geologists*, **1**, 17-29.
50. Cole, D.A. and Lade, P.V. (1984) Influence zones in alluvium over dip-slip faults. *Journal of Geotechnical Engineering*, **110**(5), 599–615.
51. Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Bransby, M.F., Davies, M.C.R. and El Nahas, A., (2007) Fault rupture propagation through sand: finite-element analysis and validation through Centrifuge experiments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133**(8), 943-958.
52. Mortazavi Zanjani, M. and Soroush, A. (2014) Numerical modeling of fault rupture propagation through two-layered sands. *Scientia Iranica*, **21**, 19-29.
53. Yongshuang, Z., Jusong, S., Ping, S., Weimin, Y.,

واژه‌نامه

Kocaeli	۱- کوجاعلی
Duzce –Bolu	۲- دوزجی- بولو
Chi Chi	۳- چی چی
Phillips	۴- فیلیس
Caltech	۵- کالتک
Actidyn Systems	۶- اکتیدین سیستم
Linear Guide Way and Block	۷- سیستم لاینر و واگن
Linearly Variable Differential Transformers	۸- حس گرهای تغییر مکان
Datalogger	۹- ثبت کننده داده‌ها
Snop Slop	۱۰- بخش میانی شیب پیشانی گسل
Prototype	۱۱- حالت واقعی
Dissipated Displacement Ratio	۱۲- نسبت میرا شدن جابه‌جایی
Graben	۱۳- خط القعر فروزمین
Amplification Displacement Ratio	۱۴- نسبت تشدید جابه‌جایی

Centrifuge Modeling of Reverse and Normal Faulting with a Designed and Manufactured Split Box

Naser Tali¹, Gholam Reza Lashkaripour^{2*}, Naser Hafezi Moghadas³ and Abbas Ghalandarzadeh⁴

1. Ph.D. Candidate Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2. Professor Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran,
*Corresponding Author, email: lashkaripour@um.ac.ir
3. Professor Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
4. Associate Professor School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Due to the relative displacement of the earth crust micro plates, seismic waves and fault ruptures are formed, which shows different consequences on the ground surface. These effects vary according to fault depth, displacement value, type and sub-surface conditions. Although limited studies have been conducted on fault rupture propagation so far, studies have been accelerated following the occurrence of three earthquakes in Taiwan (Chi-Chi), and Turkey (Duzce and Kocaeli). Because of limited time to study the fault ground rupture after an earthquake, and the huge cost of performing large-scale tests (1 g conditions), it is important to perform studies on centrifugal model of fault rupture phenomena adopting accelerated gravity condition (N_g). In this study, a split box was designed and manufactured to simulate reverse and normal faulting. It was composed of a fixed and movable part designed to simulate footwall and hanging wall, respectively. The Firoozkuh sand No. 161 with a relative density of $D_r=70\%$ that is uniformly-graded fine clean sand with a mean grain size (D_{50}) of 0.3 mm, maximum void ratio (e_{max}) of 0.943 and a minimum void ratio (e_{min}) of 0.548 was used in these tests. The tests were performed at the centrifuge facility of the University of Tehran, using Actidyn Systems C67-2 equipment and at a centrifugal acceleration of 60 g. Five initial tests were conducted to improve the boundary conditions of the models. The sidewalls of the model could create undesirable friction that could affect the test results; thus, different solutions were examined for reducing friction. Polyurethane sheets, double polyurethane sheets and silicon oil were used on both sides of the split box to reduce the frictional resistance. These tests were conducted using polyurethane sheets along with silicon oil-covered surfaces, which were determined to be the best solution. The other two experiments were designed to simulate normal and reverse faulting after obtaining desirable and appropriate conditions. The results of simulation showed that the vertical movement of bedrock in reverse faulting dissipated throughout the soil layer, and amplified throughout the soil thickness in normal faulting that the value of DDR (Dissipated Displacement Ratio) was 91% and ADR (Amplified Displacement Ratio) was 124%, respectively. The required h/H ratios for complete development of a failure surface were 5.57% and 1.85% in reverse and normal faulting, respectively. The failure surface approached the ground surface at a smaller dip angle (50°) than the fault dip angle at bedrock (60°) in reverse faulting and it became increased (84°) in normal faulting. The scarp fault in normal condition is sharper and higher than reverse faulting; therefore, the buildings located in this area suffer damages that are more drastic than reverse faulting. According to the conditions of this study, the width of deformation zone is almost equal in reverse and normal faulting, but its location with respect to bedrock fault tip is different in either types. The width of deformation zone is equal to the soil layer thickness, and its border moved toward hanging wall side almost one third of the soil layer thickness in normal faulting. Increases in the price of urban land and a shortage of land for construction make optimal determination of this zone of special importance. Therefore, for effective usage of land, it is suggested that complementary studies (field investigation or laboratory model testing) be performed.

Keywords: Centrifuge, Faulting, Split Box, Rupture Propagation, Reverse Faulting, Normal Faulting.