

## چکیده

جابه‌جایی ناشی از گسل‌ها می‌تواند سازه‌های موجود در امتداد محل بیرون‌زدگی آنها را تحت تأثیر قرار دهد و سطوح مختلف آسیب را در ساختمان‌ها ایجاد کند. در این زمینه، اندرکنش انواع مختلف پی اعم از سطحی، مدفون و شمعی، در مواجهه با این پدیده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این تحقیق، به منظور بررسی تأثیر موقعیت قرارگیری پی و نوع مکانیسم گسل بر روی اندرکنش گسل شیب‌لغز و پی‌های سطحی، تعدادی آزمایش سانتریفیوژ با لحاظ نمودن اثر سینماتیکی پی، انجام شده است. تغییر موقعیت پی از روی فرودپواره به فرادپواره، در برخورد با گسلش معکوس، موجب افزایش دوران و جابه‌جایی پی گردید و مکانیسم اندرکنش آن با گسیختگی گسل، دست‌خوش تغییر شد. ضمن حفظ موقعیت یکسان برای قرارگیری پی نسبت به بیرون‌زدگی گسیختگی گسل در شرایط میدان آزاد، با تغییر مکانیسم گسلش از معکوس به نرمال، مشخص شد که در گسلش نرمال، پی و روسازه سریع‌تر دچار آسیب می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که علاوه بر موقعیت پی، میزان جابه‌جایی گسل نیز در نوع مکانیسم خرابی پی تأثیر قابل توجهی دارد. همچنین، با توجه به نقش روسازه در سطح خرابی وارده به روسازه و پی، مدل‌سازی روسازه تأثیر قابل توجهی بر روی مکانیسم‌های اندرکنشی پی و گسلش نداشته است.

**واژگان کلیدی:** مدل‌سازی سانتریفیوژ، گسلش شیب‌لغز، پی سطحی، اثر سینماتیکی.

## بررسی اندرکنش پی‌های سطحی و گسلش شیب‌لغز با استفاده از مدل‌سازی سانتریفیوژ

### وحید صدرا

کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

### عباس قلندرزاده (نویسنده مسئول)

دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. [aghaland@ut.ac.ir](mailto:aghaland@ut.ac.ir)

### مهدی آشتیانی

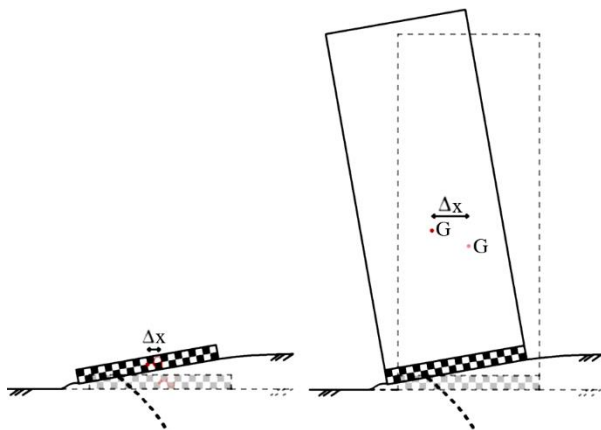
استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

## ۱- مقدمه

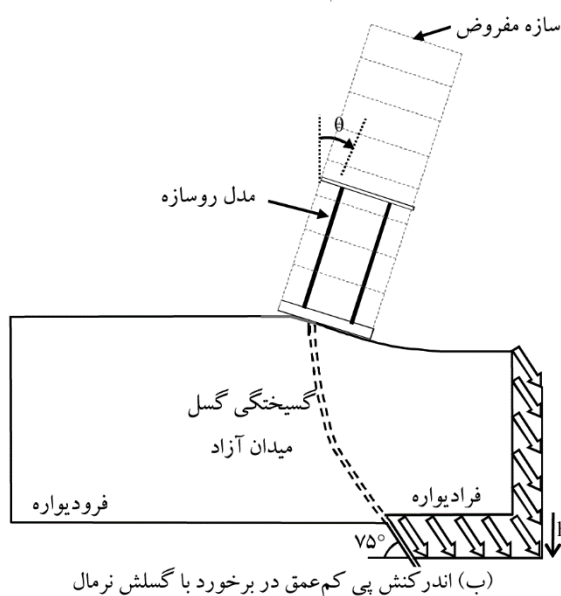
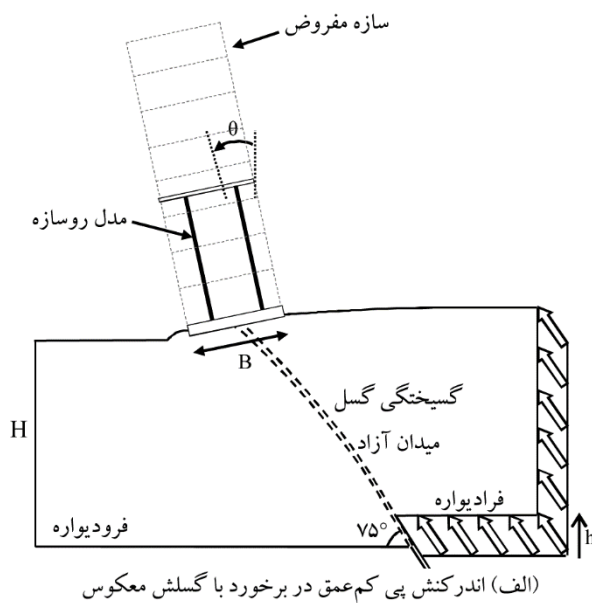
میزان صلبیت پی و روسازه اشاره کرد. به دنبال وقوع زلزله‌های سال ۱۹۹۹ در ترکیه و تایوان و زلزله سال ۲۰۰۸ در چین، برخلاف آسیب‌های شدید سازه‌ها در اثر گسلش سطحی، مشاهدات میدانی مبتنی بر عملکرد مناسب برخی سازه‌ها در برخورد با تغییر شکل ماندگار در سطح زمین، زمینه شناخت بیشتر نسبت به رفتار اندرکنشی برخورد گسلش سطحی به سازه‌ها را فراهم کرد.

در ابتدا، تحقیقات بر روی نحوه انتشار گسیختگی ناشی از گسلش در رسوبات در شرایط میدان آزاد (یعنی بدون حضور سازه) متمرکز بوده است. بررسی‌ها نشان داد که ترک‌های کششی در سطح زمین از جمله خطرات ناشی از جابه‌جایی گسل معکوس در رسوبات می‌باشند که مورد توجه محققین از جمله لازارت و همکاران [۱] و بری [۲] قرار گرفته است. این خطرات می‌تواند بر روی سازه‌های واقع بر روی زمین اثرات منفی را به همراه

مکانیسم‌های گسل به سه دسته شیب‌لغز (نرمال و معکوس)، امتدادلغز (چپ‌گرد و راست‌گرد) و مورب‌لغز تقسیم‌بندی می‌شوند. فعالیت هر یک از انواع مکانیسم‌ها، آثاری چون انتشار امواج تا فواصل دور از گسل و تغییر شکل ماندگار در محل گسل را به وجود خواهد آورد. به دلیل کم‌عمق بودن رسوبات و همچنین زیاد بودن جابه‌جایی گسل در سنگ‌بستر، فعالیت گسل می‌تواند به صورت گسلش سطحی ظاهر شود. لذا، در صورت قرار داشتن سازه در ناحیه تحت تأثیر گسلش سطحی، بسته به شرایط و عوامل متعدد، سازه دچار سطوح مختلف آسیب خواهد شد؛ که شامل لغزش، چرخش و جابه‌جایی غیریکنواخت قائم قابل توجه در پی می‌باشد. از جمله این شرایط و عوامل می‌توان به زاویه شیب گسل، مکانیسم گسل، عمق خاک، جنس و مشخصات رفتاری خاک، نوع سازه (سطحی و مدفون)، موقعیت سازه، وزن سازه و



شکل (۱): مدل سازی واقعی تر روسازه به منظور رسیدن به موقعیت واقعی مرکز جرم، با استفاده از ساخت مدل در ارتفاع.



شکل (۲): شمای کلی از مدل سازی فیزیکی در محیط سانتریفیوژ.

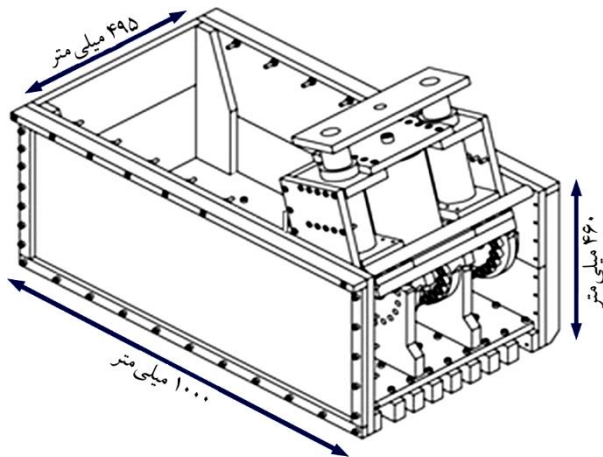
داشته باشد. در خصوص گسل های نرمال نیز باید اشاره نمود بیرون زدگی دیواره گسل و شکل گیری گودال ثقلی، از جمله مواردی است که برای انتشار گسیختگی خاک در اثر گسلش نرمال مشاهده شده است. همچنین، مطالعات صورت گرفته در خصوص اندرکنش سازه و گسلش، در حوزه های تحقیقات میدانی [۳-۶]، آزمایشگاهی [۷-۱۱]، تحلیلی [۱۲-۱۴] و عددی [۱۵-۲۱]، اثرات مخرب ناشی از برخورد گسلش سطحی با پی را آشکار کرده است. به طور مثال، بررسی ها در این خصوص [۹، ۲۲-۲۳] نشان داد که نوع مکانیسم اندرکنش بین پی سطحی و گسیختگی ناشی از گسلش معکوس، به موقعیت قرارگیری پی نسبت به بیرون زدگی گسیختگی خاک در شرایط میدان آزاد بستگی دارد. علاقه مندان در این زمینه، تلاش های زیادی در حیطه شناخت رفتار پی در برخورد با گسلش سطحی و به تبع آن، بررسی هایی در زمینه کاهش پیامدها و خطرات ناشی از این پدیده بر پی را انجام داده اند؛ اما پیچیدگی این پدیده همچنان زمینه مطالعه بیشتر در این زمینه را فراهم می کند.

لذا در این تحقیق، با استفاده از دستگاه شبیه ساز گسلش شیب لغز و مدل سازی فیزیکی در محیط سانتریفیوژ (با مقیاس ۵۰)، به بررسی رفتار پی های سطحی در برخورد با گسلش سطحی شیب لغز (یعنی معکوس و نرمال) پرداخته شده است. بدین منظور، تأثیر گسل های معکوس و نرمال بر پی های سطحی واقع بر روی خاک مرطوب دانه ای از نوع ماسه مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، به منظور مدل سازی روسازه ساختمان، مرکز جرم ساختمان هشت طبقه در ارتفاعی معادل با نمونه واقعی آن در نظر گرفته شده است. زیرا دوران پی باعث جابه جایی افقی مرکز جرم در ساختمان می شود که نتیجه آن، دخالت مستقیم اثر سینماتیکی روسازه در اندرکنش پی با گسلش سطحی است (شکل ۱).

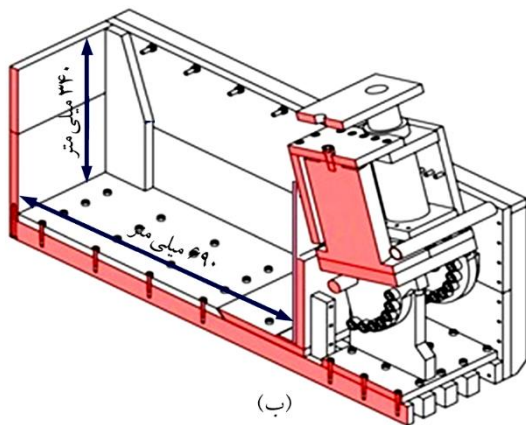
## ۲- مسئله مورد بررسی

به منظور دستیابی به اهداف این تحقیق، تعدادی آزمایش ابزاربندی شده در محیط سانتریفیوژ انجام شده است. شمای کلی از چگونگی اندرکنش پی و گسلش سطحی برای گسلش شیب لغز (یعنی معکوس و نرمال) در شکل (۲) آورده شده است.

$\gamma_d = 1528$  کیلوگرم بر مترمکعب) و رطوبت ۵ درصد می‌باشد. مشخصات ماسه مذکور در جدول (۱) ارائه شده است. پارامترهای مقاومتی این خاک به‌طور مفصل توسط آشتیانی [۲۲] ارائه شده است.



(الف)



(ب)

شکل (۳): تصویر شماتیک و ابعاد دستگاه شبیه‌ساز گسلش شیب‌لغز: (الف) نمای کلی، (ب) مقطع دستگاه [۲۲].

جدول (۱): مشخصات فیزیکی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه [۲۴].

طبقه‌بندی یونیفاید	وزن ویژه دانه‌های جامد خاک، $G_s$	نشانه خالص حداکثر، $e_{max}$	نشانه خالص حداقل، $e_{min}$	اندازه متوسط دانه‌ها، $D_{50}$ (میلی‌متر)
ماسه بد دانه‌بندی شده (SP)	۲/۶۶	۰/۹۴۳	۰/۶۰۳	۰/۳

### ۳-۲- مشخصات پی

در این تحقیق برای مدل‌سازی ساختمان‌ها، مقدار تنش زیر پی و همچنین ارتفاع مرکز جرم، مقیاس شده‌اند. برای این منظور،

پی سطحی صلب به عرض  $B$  (۲۰۰ میلی‌متر) بر روی یک لایه خاک ماسه‌ای مرطوب به عمق  $H$  (۲۴۰ میلی‌متر) واقع شده است. پی و خاک زیر آن، تحت تأثیر جابه‌جایی ناشی از گسل شیب‌لغز (رو به بالا برای گسلش معکوس یا رو به پایین برای گسلش نرمال) با مؤلفه عمودی  $h$  قرار گرفته است. موقعیت پی نسبت به بیرون‌زدگی گسیختگی ناشی از جابه‌جایی گسل در شرایط میدان آزاد با پارامتر  $s$  نشان داده شده است. مقدار  $s$  نسبت به گوشه سمت چپ پی از بیرون‌زدگی گسیختگی گسل اندازه‌گیری می‌شود. پس از اعمال گسلش، پی دوران ( $\theta$ ) و جابه‌جایی صلب ( $\Delta$ ) را تجربه خواهد نمود.

شایان ذکر است تمامی اعداد ارائه شده در مقیاس مدل هستند به غیر از مواردی که به آنها در متن اشاره شده است.

### ۳- مدل‌سازی سانتریفیوژ

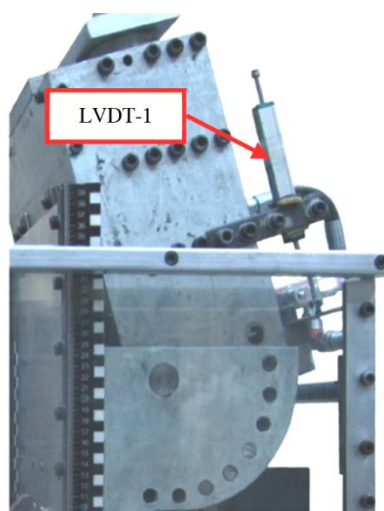
آزمایش‌ها با کمک دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی بازویی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران، با شعاع چرخش ۳ متر، ظرفیت  $150\text{g-t}$  و دارای سکوی شناور به ابعاد (طول×عرض×ارتفاع)  $1/0 \times 0/8 \times 0/8$  متر انجام شده است. به‌منظور ایجاد و شبیه‌سازی پدیده گسلش سطحی، با هدف مطالعه بر رفتار اندرکنش پی در برخورد با این پدیده، از دستگاه نشان داده شده در شکل (۳) استفاده شده است.

طول، عرض و ارتفاع داخلی دستگاه مدل‌سازی به ترتیب برابر با ۴۹۵، ۵۹۰ و ۳۴۰ میلی‌متر می‌باشند و زاویه گسلش برابر با  $75^\circ$  است. به‌طور کلی بخش اعظمی از این دستگاه ثابت بوده و بخش کوچکی از آن، شامل قسمتی از کف دستگاه و دیواره، قابلیت جابه‌جایی دارد؛ که می‌تواند با حرکت جک نصب شده در کنار آن، گسلش شیب‌لغز را شبیه‌سازی کند. این دستگاه قابلیت تغییر زاویه برای مدل‌سازی زوایای مختلف گسل شیب‌لغز از جمله ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه را داراست.

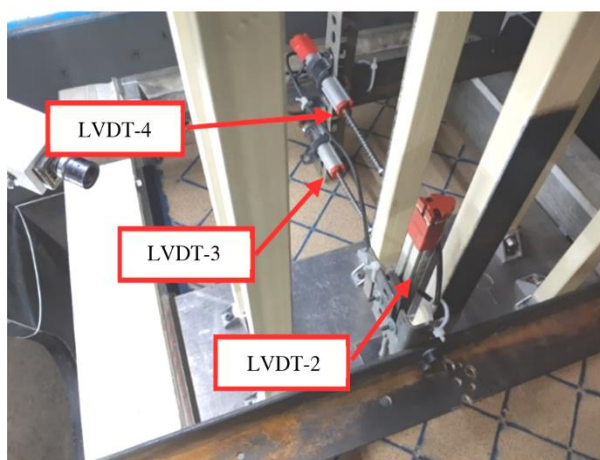
### ۳-۱- مصالح خاکی

مصالح خاکی مورد استفاده در مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی، ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با تراکم نسبی ۶۰ درصد (متناظر با

گسلش؛ و (ب) سیستم فیلم‌برداری، به منظور ثبت و بررسی جابه‌جایی‌ها و چرخش پی و چگونگی رفتار خاک و همچنین استفاده از تصاویر استخراج‌شده از آن، استفاده شده است. به منظور اندازه‌گیری تغییر مکان جک هیدرولیکی و همچنین جابه‌جایی و دوران پی، در آزمایش‌های این تحقیق از چهار عدد تغییر مکان‌سنج خطی استفاده شده است. یک عدد از آنها به طور مستقیم بر روی بخش متحرک دستگاه تعبیه گردید تا بتوان تغییر مکان جک را ثبت کرد (LVDT-1). سه عدد تغییر مکان‌سنج دیگر نیز بر روی پی نصب شدند. شکل (۵) نحوه قرارگیری این تغییر مکان‌سنج‌ها را در مدل ساخته‌شده آزمایشگاهی نشان می‌دهد.



(الف)



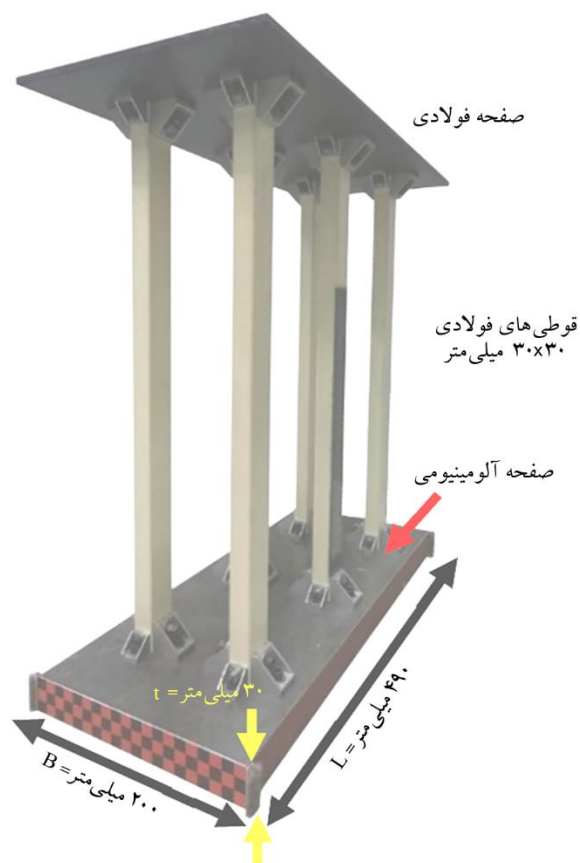
(ب)

شکل (۵): تغییر مکان‌سنج‌های تعبیه شده؛ (الف) بر روی بخش متحرک دستگاه شبیه‌ساز گسلش (جک هیدرولیکی)، (ب) بر روی پی.

ساختمان‌های هشت طبقه مسکونی با فشار باربری ۸۱ کیلوپاسکال و ارتفاع مرکز جرم برابر با ۲۰۲ میلی‌متر (معادل ۱۰/۱ متر در مدل واقعی) از زیر پی، طراحی و ساخته شدند. عمق کارگذاری ( $D/B$ ) برای پی‌ها، برابر با صفر برای ساختمان با پی سطحی در نظر گرفته شد. پی‌ها از جنس ورق آلومینیوم (با مدول الاستیسیته ۶۹/۰ گیگاپاسکال) می‌باشند. برای بالا بردن ضریب اصطکاک در سطح تماس بین خاک و پی‌ها، در سایر وجه‌های پی‌ها، سنباده آهن با زبری ۸۰ چسبانده شد. تصویر و مشخصات کلی پی در شکل (۴) ارائه شده است.

### ۳-۳- ابزارهای ثبت رفتار

برای ثبت و بررسی داده‌های آزمایش‌های صورت گرفته در این تحقیق، از دو سیستم متفاوت، شامل (الف) تغییر مکان‌سنج خطی (LVDT)، به منظور ثبت مقدار تغییر مکان‌های جک و پی و به دنبال آن، محاسبه جابه‌جایی‌ها و چرخش پی، متناظر با مقدار



شکل (۴): تصویر و مشخصات پی استفاده شده در این تحقیق.

### ۳-۴- آماده‌سازی نمونه‌ها

زاویه گسلش ( $\alpha$ ) و فشار باربری پی ( $q$ )، ثابت و به ترتیب برابر با ۷۵ درجه و ۸۱ کیلوپاسکال می‌باشند.

متناسب با جدول (۲)، دو آزمایش در شرایط میدان آزاد (بدون وجود پی) برای تعیین موقعیت قرارگیری پی‌ها و سه آزمایش به منظور بررسی رفتار پی در برخورد با گسلش سطحی شیب لغز انجام شده است.

### ۵- نتایج

در این بخش به ارائه نتایج و تحلیل آزمایش‌های صورت گرفته در زمینه‌های اندرکنش پی‌های سطحی با گسلش شیب‌لغز (معکوس و نرمال) پرداخته شده است. قبل از انجام آزمایش‌های اندرکنشی، لازم است موقعیت پی‌ها نسبت به مسیر گسیختگی خاک در اثر فعالیت گسل تعیین شوند. لذا، در ابتدا آزمایش‌های میدان آزاد (یعنی بدون حضور پی) انجام شده‌اند. شایان ذکر است نتایج اندرکنش پی در برخورد با گسلش، کاملاً وابسته به موقعیت قرارگیری پی نسبت به مسیر انتشار گسیختگی در خاک می‌باشد.

### ۵-۱- نتایج آزمایش‌های میدان آزاد

برای دو نوع گسل با مکانیسم‌های معکوس و نرمال، آزمایش‌های میدان آزاد (FF-N-75 و FF-R-75) انجام شده است. در شرایط میدان آزاد، اولین گسیختگی توسعه یافته در کل عمق خاک، به عنوان گسیختگی میدان آزاد گسلش معرفی می‌گردد و از این گسیختگی به عنوان یک شاخص برای تعیین موقعیت پی در آزمایش‌های اندرکنشی استفاده می‌شود.

در ابتدای کار، ماسه ۱۶۱ فیروزکوه به میزان ۵ درصد وزن خشک آن با آب مخلوط شد. سپس با استفاده از روابط وزنی-حجمی، میزان خاک مرطوب مورد نیاز برای هر ۱/۵ سانتی‌متر ارتفاع خاک (نیم‌لایه) محاسبه شد. خاک مورد نظر، از ارتفاع مشخصی در داخل جعبه آزمایش ریخته شده و توسط کوبه‌ای به وزن ۱۴۵۰ گرم با ارتفاع سقوط آزاد ۲۵ سانتی‌متر تراکم گردیده است تا به تراز مورد نظر برسد. پس از اتمام کوبش هر نیم‌لایه خاک، برای کاهش هرچه بیشتر اصطکاک بین خاک و دیواره‌ها و رسیدن به شرایط مرزی واقعی‌تر، در حاشیه دیواره‌ها مقداری روغن سیلیکون ریخته شده و پس از پایان کوبش هر ۳ سانتی‌متر لایه خاک (دو نیم‌لایه)، به منظور مشاهده بهتر انتشار گسیختگی در داخل خاک، ماسه رنگی در امتداد صفحه شفاف ریخته شده است و در ادامه، تا رسیدن به تراز نهایی خاک، نیم‌لایه بعدی بر روی آن اجرا شده است. برای آماده‌سازی مدل‌های میدان آزاد و دارای پی سطحی، نمونه خاک به طور پیوسته و تا ارتفاع ۲۴ سانتی‌متر آماده شد و متناسب با نوع آزمایش، مدل ساختمان بر روی خاک و در موقعیت‌های مورد نظر ( $s/B = 0/6$  و  $s/B = 0/3$ ) قرار داده شد.

### ۴- برنامه آزمایش‌ها

هدف این تحقیق، رفتارسنجی پی سطحی در حین برخورد با گسلش شیب‌لغز با لحاظ نمودن اثر سینماتیکی روسازه می‌باشد. برای این منظور، پنج آزمایش سانتریفیوژ انجام شده است که مشخصات آنها در جدول (۲) ارائه گردید. در این آزمایش‌ها،

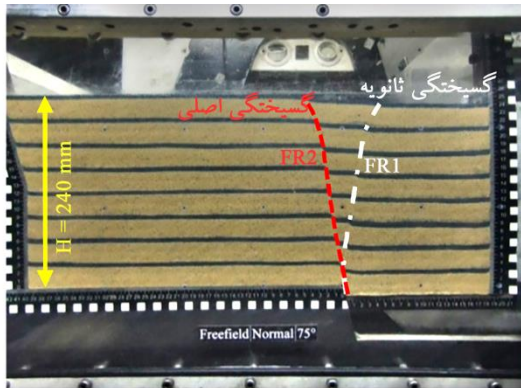
جدول (۲): لیست آزمایش‌های مدل سانتریفیوژ برای بررسی اندرکنش پی‌های کم‌عمق با گسلش سطحی شیب‌لغز.

نوع آزمایش	موقعیت پی، S/B	عرض پی، B (میلی‌متر)	نام اختصاری	نام آزمایش*
میدان آزاد	-	-	FF-R-75	Free-field   Reverse   75°
	-	-	FF-N-75	Free-field   Normal   75°
اندرکنش پی با گسلش سطحی	۰/۶	۲۰۰	SF-R-0.6	SF   s/B=0.6   Reverse   75°
	۰/۳	۲۰۰	SF-R-0.3	SF   s/B=0.3   Reverse   75°
	۰/۳	۲۰۰	SF-N-0.3	SF   s/B=0.3   Normal   75°

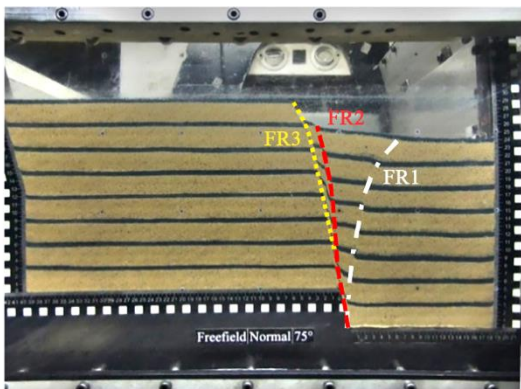
SF: پی سطحی



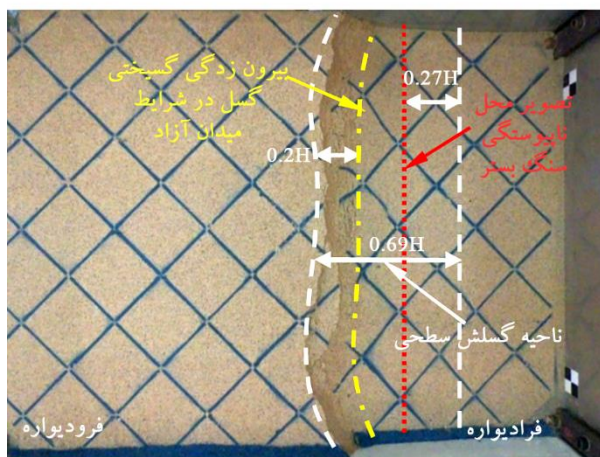
تأثیرگذار این نوع گسل در سطح زمین، در شکل (۷-ب) نشان داده شده است. از این شکل می‌توان برداشت نمود که تشکیل و رشد گسیختگی فرعی دوم، می‌تواند پهنای تأثیرگذار گسل نرمال را افزایش دهد.



(الف)



(ب)



(ب)

شکل (۷): آزمایش FF-N-75: الگوی انتشار گسیختگی گسل نرمال با شیب ۷۵ درجه؛ (الف)  $h/H = 3/8$ ، تشکیل اولین گسیختگی اصلی رسیده به سطح زمین، اندکی پس از تشکیل اولین گسیختگی فرعی، (ب)  $h/H = 7/4$ ، پهنای تأثیرگذار گسل نرمال.

ماسه‌ای مرطوب با پنج درصد رطوبت انجام شده است. از آنجایی که خاک در شرایط غیراشباع قرار دارد منطقی است که زون گسلش ایجاد شده داخل آن با خاک خشک متفاوت باشد. اما از آنجایی که در این تحقیق آزمایش بر روی خاک خشک انجام نشده است، امکان مقایسه وجود ندارد. اگرچه، احمدی و همکاران [۲۹] با بررسی پدیده گسلش معکوس با شیب ۴۵ درجه در خاک‌های ماسه‌ای خشک و مرطوب (با رطوبت حداکثر ۱۵ درصد)، نتیجه گرفتند که پهنای زون گسلش در خاک خشک به مراتب بیشتر از خاک‌های مرطوب است. اما بوهانسون و کوناگای [۳۰] با بررسی انتشار گسلش معکوس ۹۰ درجه در خاک‌های خشک و اشباع، اشاره نمودند که پهنای زون گسلش در خاک خشک کمتر از خاک اشباع است. دلیل این تفاوت نیز به عواملی از قبیل زاویه شیب گسلش، شرایط رطوبتی خاک و نحوه اعمال گسیختگی در خاک و ایجاد اضافه فشار در خاک در دو تحقیق نسبت دادند.

#### ۵-۱-۲- آزمایش FF-N-75

الگوی انتشار گسیختگی گسل نرمال با زاویه شیب ۷۵ درجه در ماسه ۱۶۱ فیروزکوه و بدون حضور پی، برای مقادیر مختلف پایین‌رفتگی سنگ بستر در شکل (۷) آورده شده است. برای توسعه اولین گسیختگی اصلی و اولین گسیختگی فرعی تا سطح زمین، به جابه‌جایی قائم سنگ‌بستر در حدود  $h/H = 9/0/240 = 3/8$  نیاز است (شکل ۷-الف). با افزایش جابه‌جایی در سنگ‌بستر به میزان  $h/H = 17/9/240 = 7/4$ ، گسیختگی فرعی دوم شکل گرفت و تمامی گسیختگی‌ها تا پایان اعمال جابه‌جایی توسعه یافتند (شکل ۷-ب). بری و همکاران [۲۶] و برانسی و همکاران [۲۳] در مطالعات خود، گسیختگی‌های فرعی و افزایش شیب گسیختگی در سطح زمین را مشاهده کرده‌اند. در این آزمایش نیز، دو سطح گسیختگی فرعی مشاهده شد؛ با این توضیح که گسیختگی اصلی، کمی بعد از اولین گسیختگی فرعی شکل گرفت. همچنین، شیب گسیختگی در سطح زمین با افزایش همراه نبود که می‌توان دلیل این امر را زیاد بودن زاویه شیب گسل ( $\alpha = 75^\circ$ ) دانست. ناحیه

ضخامت رسوبات نیز در محدوده وقوع گسلش متفاوت بوده است و در برخی موارد این مقدار برابر ۱۴ متر گزارش شده است. در خصوص نوع رسوبات نیز تنها به رسوبات جدید و کواترنری اشاره شده است. شکل (۸-ب) نیز نتیجه مدل‌سازی این پدیده در محیط سانتریفیوژ می‌باشد؛ که در مقایسه با شکل (۸-الف)، نشان می‌دهد که این آزمایش توانسته شواهد واقعی این پدیده را ایجاد نماید؛ اما با توجه بیشتر بودن زاویه شیب این آزمایش ( $\alpha = 75^\circ$ ) نسبت به گسلش سال ۱۹۵۴ در نوادا ( $\alpha = 65^\circ - 55^\circ$ )، گودال ثقلی به صورت کامل شکل نگرفته است.

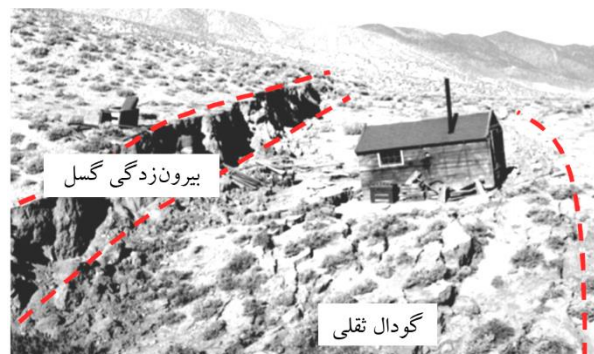
## ۵-۲- نتایج آزمایش‌های اندرکنش پی سطحی با گسل‌های معکوس و نرمال

برای مشاهده رفتار پی در مواجهه با گسلش سطحی، سه آزمایش (SF-R-0.6، SF-R-0.3 و SF-N-0.3) با تفاوت در موقعیت و نوع مکانیسم انجام شدند. نتایج آنها را می‌توان در دو بخش رفتار خاک در پدیده گسلش با حضور پی و عملکرد پی در برخورد با گسلش سطحی (شامل دوران و جابه‌جایی) خلاصه کرد.

مکانیسم گسل و موقعیت قرارگیری پی نسبت به گسیختگی خاک در شرایط میدان آزاد، دو متغیر اصلی در این تحقیق هستند. مقادیر موقعیت قرارگیری برای پی واقع بر سطح زمین ( $D/B = 0.10$ ) در این آزمایش‌ها برابر با  $s/B = 0.3$  و  $s/B = 0.6$  برای گسلش معکوس و  $s/B = 0.3$  برای گسلش نرمال با زاویه شیب  $75^\circ$  درجه می‌باشند. سازه مفروض در این مدل‌سازی‌ها، دارای فشار باربری  $q = 81$  کیلوپاسکال می‌باشد، که معادل با ساختمان مسکونی هشت طبقه است. دلیل انتخاب موقعیت‌های  $s/B = 0.3$  و  $s/B = 0.6$  برای قرارگیری پی‌ها، مطالعه اندرکنش پی‌های کم‌عمق در مواجهه با پدیده گسلش سطحی، برای دو موقعیت متمایز از هم می‌باشد؛ یکی برای موقعیتی که عرض بیشتر پی بر روی فرودپیواره قرار دارد ( $s/B = 0.6$ ) و دیگری برای حالتی که سهم بیشتر عرض پی بر روی فرادپیواره باشد ( $s/B = 0.3$ ).

همان‌طور که در شکل‌های (۶) و (۷) مشاهده می‌شود میزان پهنای تأثیرگذار ناشی از گسلش در شرایط میدان آزاد برای گسل‌های معکوس و نرمال با زاویه شیب  $75^\circ$  درجه به ترتیب برابر با  $0.65H$  و  $0.69H$  به دست آمدند. دلیل بیشتر بودن این پهنای گسل نرمال را می‌توان ایجاد گسیختگی‌های فرعی در این نوع مکانیسم دانست. همچنین رفتار به شدت ضعیف خاک در کشش، موجب شد که با مقدار جابه‌جایی کمتر ( $h_N / H = 0.3/8$ ) برای گسل نرمال و  $h_R / H = 0.7/0$  برای گسل معکوس) در سنگ بستر، گسیختگی خاک در مکانیسم نرمال زودتر از مکانیسم معکوس به سطح زمین برسد.

شکل (۸-الف) نمونه‌ای از بیرون‌زدگی دیواره گسل و تشکیل گودال ثقلی ناشی از وقوع پدیده گسلش نرمال در زلزله سال ۱۹۵۴ در نوادا را نشان می‌دهد [۳۱]. شایان ذکر است گسل‌های فعال در این ناحیه شامل ترکیبی از گسل‌های امتدادلغز راست‌گرد و گسل نرمال با ماکزیمم جابه‌جایی در حدود  $3/6$  متر بوده‌اند.



(الف)



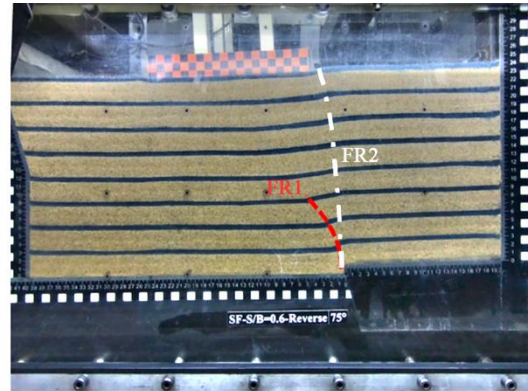
(ب)

شکل (۸): بیرون‌زدگی دیواره گسل و تشکیل گودال ثقلی بر سطح زمین ناشی از گسلش نرمال؛ (الف) زلزله سال ۱۹۵۴ نوادا [۳۱]؛ (ب) نتایج مدل آزمایشگاهی در این تحقیق.

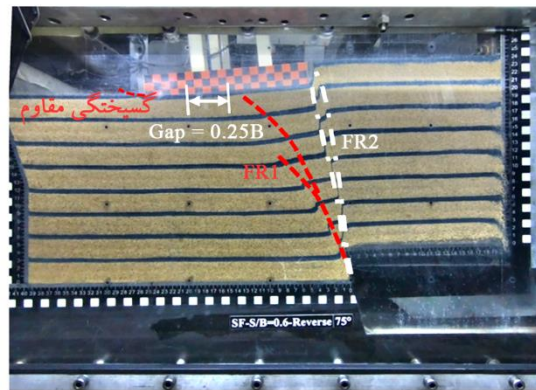


### ۵-۲-۱- آزمایش SF-R-0.6

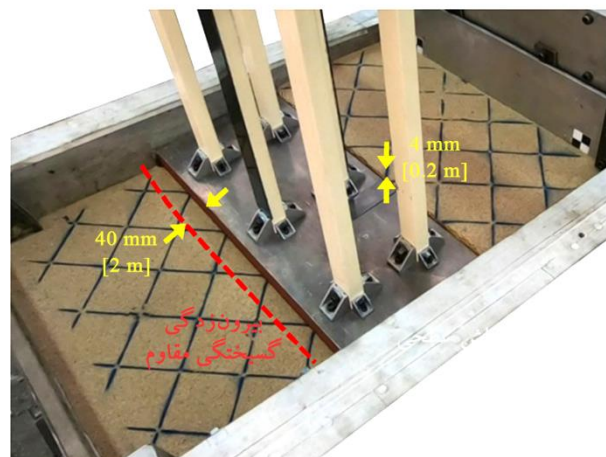
شکل (۹) نمایانگر رفتار خاک در حضور پی سطحی (SF) در موقعیت  $s/B = 0.6$  و متأثر از حرکت سنگ‌بستر ناشی از مکانیسم معکوس است و چگونگی تشکیل و توسعه گسیختگی‌ها در خاک



(الف)



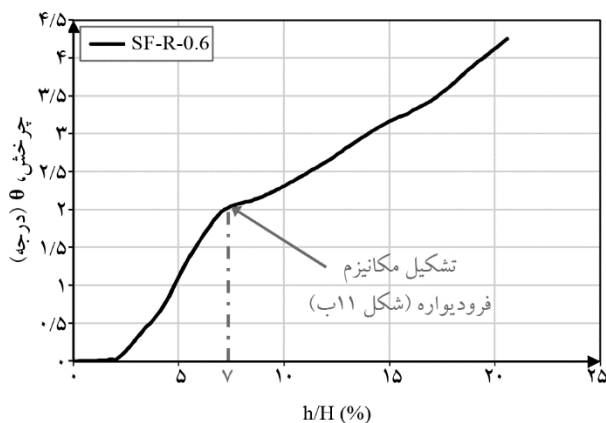
(ب)



(پ)

را نشان می‌دهد. شکل (۹-الف) نشان می‌دهد که انتشار گسیختگی تا زیر لبه سمت راست پی ادامه پیدا می‌کند ( $h/H=14/4/240=6/10$ ). با ادامه گسلش ( $h/H=16/4/240=7/10$ )، به دلیل حضور پی سنگین، گسیختگی دوم تا لبه پی شکل می‌گیرد. تا رسیدن به انتهای جابه‌جایی سنگ بستر می‌کنند، به این صورت که سهم بیشتر آن در گسیختگی دوم پدیدار می‌شود (شکل ۹-ب). با توجه به شکل (۹-پ)، هیچ‌گونه ترک کششی در قسمت فرادیواره مشاهده نشد این در حالی است که در جلوی پی در قسمت فرودیواره، گوه گسیختگی مقاوم به عرض ۴۰ میلی‌متر ( $2/10$  متر در مدل واقعی) ایجاد شده بود؛ همچنین در پشت پی، میزان بالازدگی خاک از لبه فوقانی آن برابر با ۴ میلی‌متر مشاهده شد.

میزان چرخش پی نسبت به مقادیر مختلف حرکت سنگ‌بستر در شکل (۱۰) آورده شده است. به دلیل موقعیت پی و سنگین بودن آن، گسیختگی دچار انحراف شد، به صورتی که پی بر روی فرودیواره قرار گرفت و به اصطلاح باعث تشکیل مکانیسم فرودیواره [۹] گردید؛ در نتیجه چرخش پی به  $4/3$  درجه ختم شد.

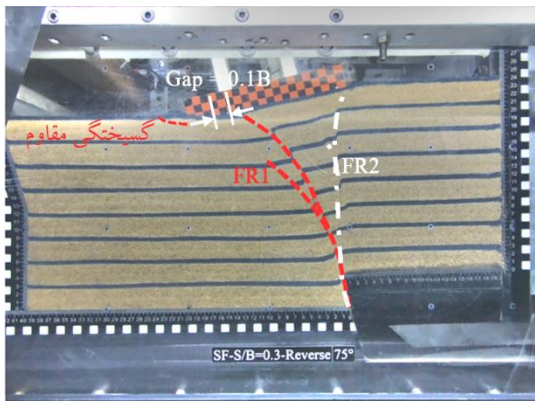


شکل (۱۰): آزمایش SF-R-0.6: چرخش پی در موقعیت  $s/B=0.6$  نسبت به مقادیر مختلف بالآمدگی گسل معکوس با زاویه شیب ۷۵ درجه.

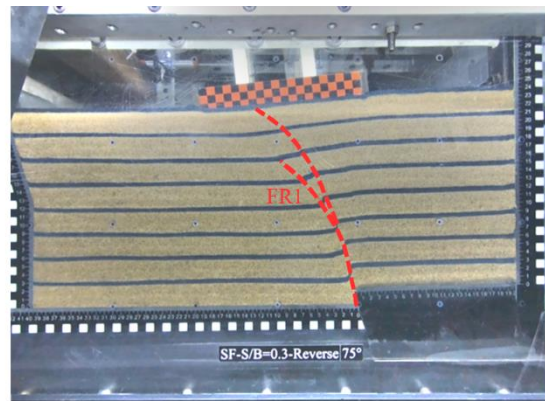
### ۵-۲-۲- آزمایش SF-R-0.3

شکل (۱۱) نمایانگر رفتار خاک در حضور پی سطحی (SF) در موقعیت  $s/B = 0.3$  و متأثر از حرکت سنگ‌بستر ناشی از مکانیسم معکوس است و چگونگی تشکیل و توسعه گسیختگی‌ها

شکل (۹): آزمایش SF-R-0.6: الگوی انتشار گسیختگی گسل معکوس با زاویه شیب ۷۵ درجه در اندرکنش با پی سطحی در موقعیت  $s/B=0.6$ ; (الف)  $h/H=7/10$ ، اولین گسیختگی رسیده به سطح زمین، (ب)  $h/H=20/16$ ، تشکیل گوه گسیختگی مقاوم در جلوی پی.



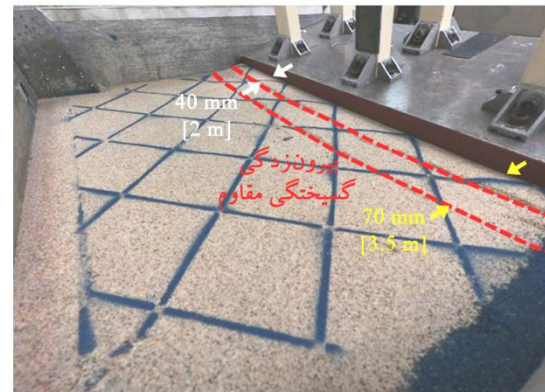
(ب)



(الف)



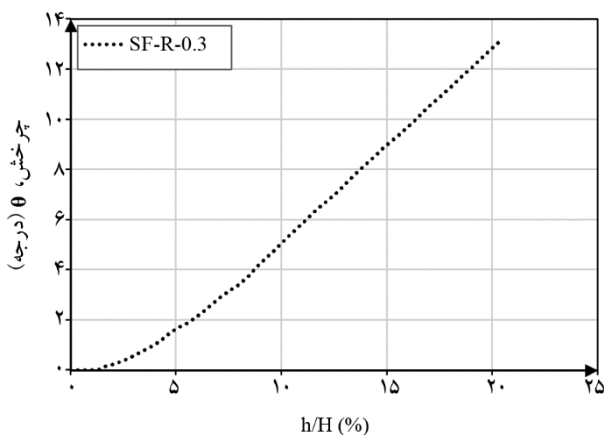
(ت)



(ب)

شکل (۱۱): آزمایش SF-R-0.3؛ الگوی انتشار کسیختگی گسل معکوس با زاویه شیب ۷۵ درجه در اندرکنش با پی سطحی در موقعیت  $s/B=0/3$ ؛ (الف)  $h/H=0/11/2$ ؛ (ب)  $h/H=0/20/4$ ؛ (پ) تشکیل گوه کسیختگی مقاوم در جلوی پی، (ت) عدم تشکیل ترک کشی در فرادیواره.

در شکل (۱۲) آورده شده است. با توجه به اینکه بخش اعظم پی بر روی فرادیواره قرار دارد ( $s/B=0/3$ )، از برخورد با این پدیده به شدت تأثیر پذیرفت و در نتیجه چرخش پی به  $13/2$  درجه رسید.



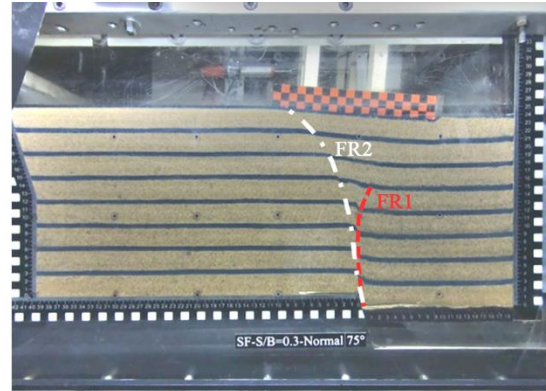
شکل (۱۲): آزمایش SF-R-0.3؛ چرخش پی در موقعیت  $s/B=0/3$  نسبت به مقادیر مختلف بالا آمدگی گسل معکوس با زاویه شیب ۷۵ درجه.

در خاک را نشان می‌دهد. شکل (۱۱-الف) نشان می‌دهد که انتشار کسیختگی با  $h/H=22/5/240=0/9/4$  تا نزدیک پی ادامه پیدا می‌کند؛ ولی مسیر انتشار اندکی تغییر زاویه می‌دهد و در نهایت با  $h/H=26/8/240=0/11/2$  به عنوان اولین کسیختگی در زیر پی و در سمت فرودیواره ظاهر می‌شود. هم‌زمان با رسیدن اولین کسیختگی به سطح زمین، تشکیل کسیختگی دوم به سمت فرادیواره شروع می‌شود و تا پایان انجام آزمایش هر دو کسیختگی به مقدار قابل توجهی توسعه پیدا می‌کنند (شکل ۱۱-ب). با توجه به شکل‌های (۱۱-ب) و (۱۱-ت) هیچ‌گونه ترک کشی در قسمت فرادیواره مشاهده نشد. این در حالی است که در جلوی پی در قسمت فرودیواره، دو گوه کسیختگی مقاوم به عرض‌های ۴۰ و ۷۰ میلی‌متر (به ترتیب  $2/0$  و  $3/5$  متر در مدل واقعی) ایجاد شده بودند.

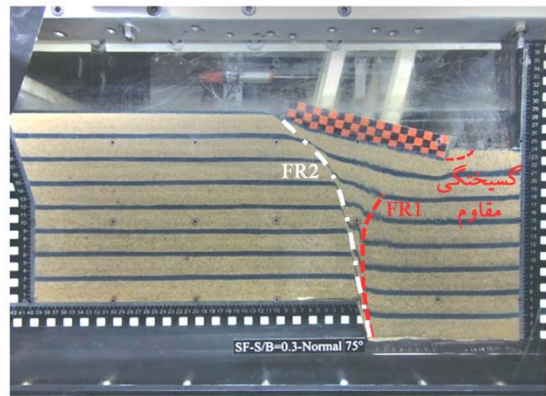
میزان چرخش پی نسبت به مقادیر مختلف حرکت سنگ‌بستر

## ۵-۲-۳- آزمایش SF-N-0.3

شکل (۱۳) نمایانگر رفتار خاک در حضور پی سطحی (SF) در موقعیت  $s/B = 0.3$  و متأثر از حرکت سنگ‌بستر ناشی از گسلش نرمال است. این شکل چگونگی تشکیل و توسعه



(الف)



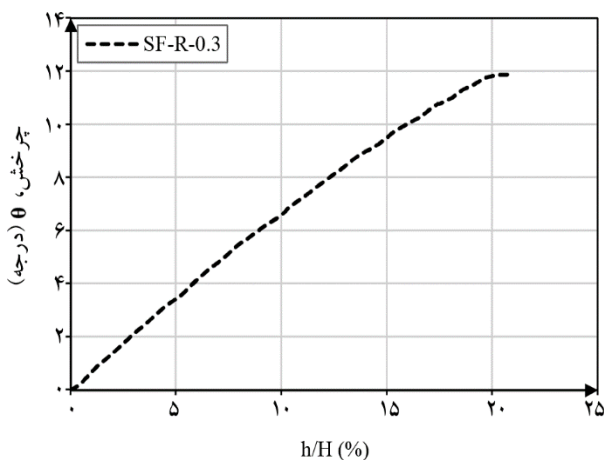
(ب)



(ب)

گسیختگی‌ها در خاک را نشان می‌دهد. شکل (۱۳-الف) نشان می‌دهد که انتشار گسیختگی با جابه‌جایی  $h/H = 8.1/240 = 0.3/4$  به سمت فرادیواره به حداکثر پیشروی خود رسیده است. در این هنگام، مسیر انتشار به دلیل موقعیت پی و وزن آن تغییر زاویه می‌دهد و با  $h/H = 11.6/240 = 0.4/8$  زمینه تشکیل اولین گسیختگی در سطح زمین و در سمت فرادیواره را فراهم می‌آورد. تا رسیدن به انتهای جابه‌جایی سنگ‌بستر  $(h/H = 50.3/240 = 0.21/0)$ ، این گسیختگی‌ها به صورتی که سهم بیشتر آن در گسیختگی دوم پدیدار می‌شود، توسعه پیدا می‌کنند (شکل ۱۳-ب). با توجه به شکل (۱۳-پ)، پی در قسمت فرادیواره به میزان ۱۴ میلی‌متر در خاک فرو رفته است که ۳ میلی‌متر از ناشی از ایجاد گوه گسیختگی مقاوم با عرضی برابر با ۴۰ میلی‌متر می‌باشد؛ همچنین در قسمت فرادیواره، پی دچار لغزشی به میزان ۲۷ میلی‌متر شده است.

میزان چرخش پی نسبت به مقادیر مختلف پایین‌رفتگی سنگ‌بستر  $(h/H)$ ، در شکل (۱۴) آورده شده است. متناسب با موقعیت پی  $(s/B = 0.3)$ ، بخش بیشتری از پی بر روی فرادیواره قرار دارد و با تأثیرپذیری از حرکت سنگ‌بستر و همچنین فرو رفتن گوشه سمت راست پی در خاک (یعنی، تشکیل گوه گسیختگی مقاوم در برابر گوشه راست پی)، چرخشی قابل توجه  $11/9$  درجه در آن به وجود آمد.



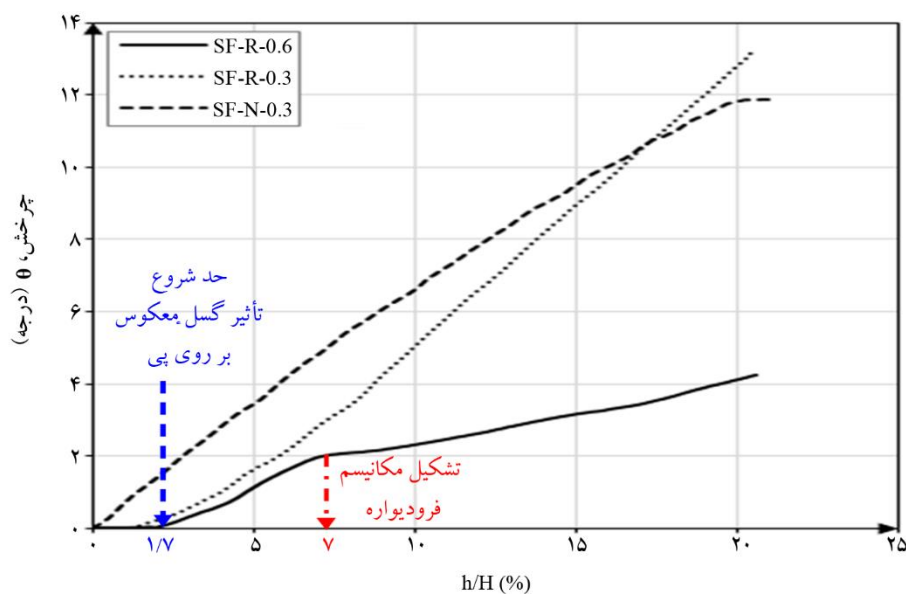
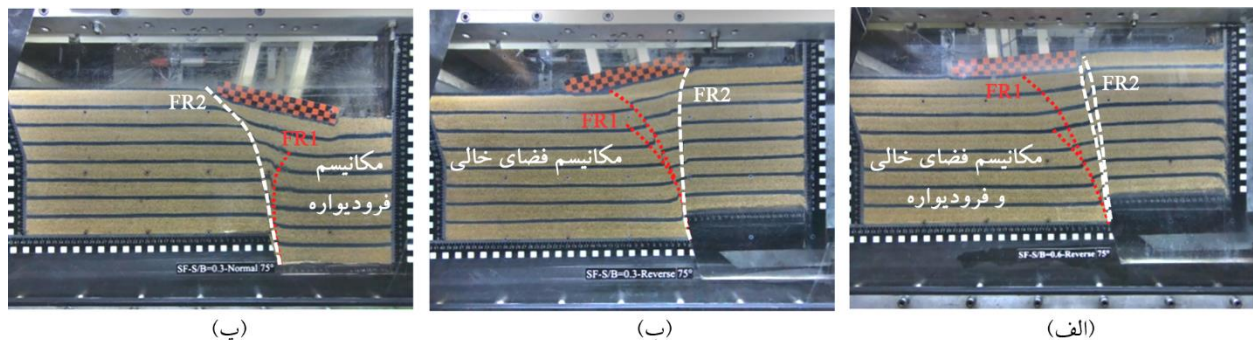
شکل (۱۴): آزمایش SF-N-0.3: چرخش پی در موقعیت  $s/B = 0.3$  نسبت به مقادیر مختلف پایین‌رفتگی گسل نرمال با زاویه شیب ۷۵ درجه.

شکل (۱۳): آزمایش SF-N-0.3: الگوی انتشار گسیختگی گسل نرمال با زاویه شیب ۷۵ درجه در اندرکنش با پی سطحی در موقعیت  $s/B = 0.3$ ؛ (الف)  $h/H = 0.4/8$  اولین گسیختگی رسیده به سطح زمین، (ب)  $h/H = 0.21/0$ ؛ (پ) میزان لغزش، گوه گسیختگی مقاوم و فرورفتگی پی.

## ۶- بحث

گسلش معکوس، امکان افزایش بسیار زیاد دوران وجود دارد. این در حالی است که در گسلش نرمال پس از اعمال جابه‌جایی، به دلیل جابه‌جایی پی، موقعیت آن تغییر می‌کند و با قرار گرفتن آن بر روی فرادیواره، دوران پی آن‌چنان تحت تأثیر افزایش جابه‌جایی سنگ‌بستر قرار نمی‌گیرد. همچنین، تشکیل مکانیسم فرودیواره در آزمایش SF-R-0.6، نرخ تغییرات دوران به‌ازای افزایش بالاآمدگی ( $\Delta\theta/\Delta h$ ) تغییر کرده است. در این خصوص باید اشاره نمود که برای  $\Delta h/H \leq 1/7$  تغییرات دوران در حدود ۰/۴ درجه بر متر است. اما با افزایش مقدار بالاآمدگی گسل و با تغییر مکانیسم خرابی پی از مکانیسم فضای خالی به فرودیواره، این مقدار به ۰/۱۶ درجه بر متر کاهش پیدا کرد. این موضوع نشان‌دهنده‌ی این مطلب است که علاوه بر موقعیت پی، مقدار جابه‌جایی گسل نیز بر روی مکانیسم خرابی و به دنبال آن میزان دوران پی تأثیرگذار است.

شکل (۱۵) نمایانگر تأثیر چشم‌گیر موقعیت پی در میزان چرخش آن می‌باشد. در اثر جابه‌جایی قائم سنگ‌بستر در حالت گسلش معکوس و به میزان حدوداً ۵۰ میلی‌متر، چرخش پی از ۴/۳ درجه در موقعیت  $S/B=0/6$  به ۱۳/۲ درجه در موقعیت  $S/B=0/3$  افزایش پیدا کرد. در همین مقدار جابه‌جایی سنگ‌بستر برای مکانیسم نرمال، چرخش پی در موقعیت  $S/B=0/3$  به ۱۱/۹ درجه رسید. همچنین تفرع رو به بالا برای تغییرات دوران پی در گسلش معکوس و تفرع رو به پایین این تغییرات برای گسلش نرمال (شکل ۱۵)، نشان‌دهنده‌ی نرخ رشد افزایشی برای چرخش پی در گسلش معکوس و نرخ رشد کاهشی برای چرخش پی در گسلش نرمال می‌باشد. این بدان معناست که با افزایش جابه‌جایی در سنگ‌بستر و باقی ماندن گسیختگی ناشی از گسل در زیر پی حین



شکل (۱۵): تأثیر موقعیت پی و نوع مکانیسم گسلش، در شکل‌گیری مکانیسم اندرکنشی بین پی سطحی و گسیختگی ناشی از گسل‌های معکوس و نرمال با زاویه شیب ۷۵ درجه: (الف) آزمایش SF-R-0.6، (ب) آزمایش SF-R-0.3 و (پ) آزمایش SF-N-0.3.

در آزمایش‌های SF-R-0.6، SF-R-0.3 و SF-N-0.3، جابه‌جایی قائم در مقایسه با جابه‌جایی افقی، به ترتیب کمتر، برابر و بیشتر می‌باشد، یعنی پی‌ها به ترتیب با زاویه‌ای کمتر، برابر و بیشتر از ۴۵ درجه جابه‌جا می‌شوند. زاویه جابه‌جایی انتقالی پی‌ها در شکل (۱۶-ب) به همراه زوایای جابه‌جایی انتقالی ۷۵ و ۴۵ درجه جهت مقایسه با یکدیگر نشان داده شده‌اند. این مسئله مؤید این مطلب است که بسته به موقعیت پی، نوع خاک و زاویه گسلش، زاویه جابه‌جایی انتقالی پی بر روی سطح زمین می‌تواند متفاوت باشد. همچنین، تمامی پی‌ها با زاویه‌ای کمتر از زاویه شیب گسل (یعنی ۷۵ درجه) در سطح زمین جابه‌جا می‌شوند.

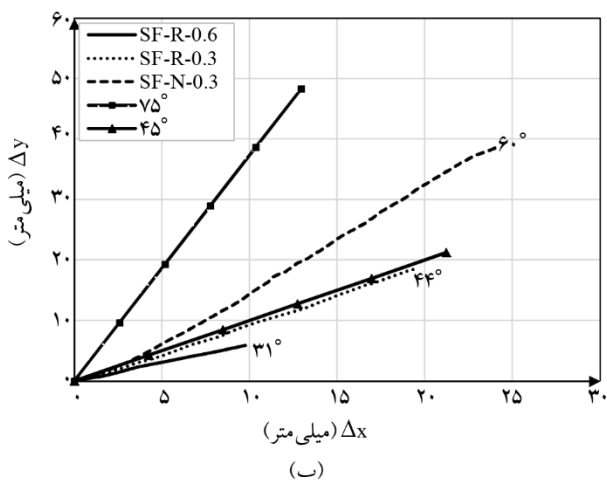
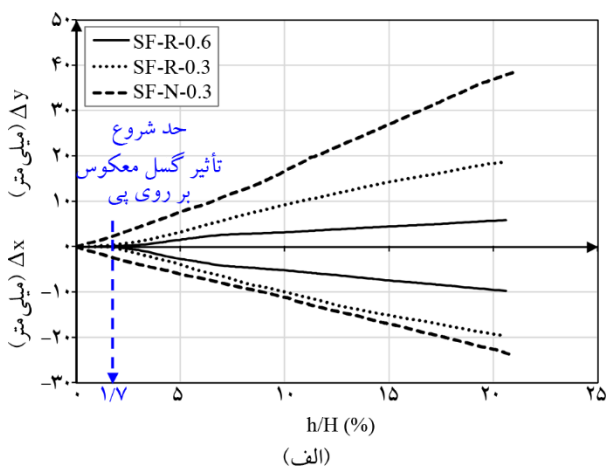
از مقایسه شکل‌های (۹-پ) و (۱۱-پ) معلوم می‌شود که عرض گوه گسیختگی مقاوم در آزمایش گسلش معکوس برای موقعیت پی در  $s/B = 0/3$ ، نسبت به  $s/B = 0/6$  بیشتر است (به ترتیب ۷۰ و ۴۰ میلی‌متر)؛ زیرا انتشار اولین گسیختگی برای موقعیت پی در  $s/B = 0/3$  در قسمت پنجه پی به سطح زمین رسید، این در حالی است که برای موقعیت پی در  $s/B = 0/6$ ، مکانیسم فرودپواره به وجود آمد. همچنین چرخش زیاد پی در موقعیت  $s/B = 0/3$ ، با افزایش تنش در قسمت پنجه پی، پتانسیل ایجاد گوه گسیختگی مقاوم را تشدید می‌کند.

### ۶- نتیجه‌گیری

این تحقیق به بررسی اندرکنش پی‌های سطحی و گسیختگی سطحی گسل‌های شیب‌لغز (معکوس و نرمال) پرداخته است. در ادامه، نتایج میدان آزاد و اندرکنش پی‌های کم‌عمق و گسلش‌های معکوس و نرمال ارائه شده است.

مشاهدات آزمایشگاهی و وقوع ترک‌های کششی در سطح زمین، تأییدکننده صحت شرایط مدل‌سازی می‌باشد. مشاهده این ترک‌ها در سطح زمین به دلیل رطوبت خاک و چسبندگی ظاهری آن می‌باشد. همچنین، این نتایج نشان می‌دهد که دلیل وقوع ترک‌های کششی در سطح زمین ناشی از گسلش معکوس در خاک‌های مرطوب، زون تحت تأثیر گسلش در این شرایط، در مقایسه با خاک‌های خشک بیشتر

شکل (۱۶-الف) نشان‌دهنده‌ی جابه‌جایی افقی ( $\Delta x$ ) و جابه‌جایی قائم ( $\Delta y$ ) پی سطحی در برابر جابه‌جایی سنگ‌بستر می‌باشد. شکل‌های (۱۵) و (۱۶-الف) نشان می‌دهند که در مکانیسم نرمال، با توجه به ماهیت تنش این نوع گسلش و ضعف خاک در کشش، پی در همان جابه‌جایی‌های اولیه سنگ‌بستر، از لحاظ چرخش و جابه‌جایی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. این در حالی است که در مکانیسم معکوس، تا حدود ۴/۰ میلی‌متر اولیه حرکت سنگ بستر ( $h/H = 4/0/240 = 1/17$ )، پی‌ها هیچ‌گونه تأثیری از گسلش نمی‌بینند؛ زیرا گسیختگی ناشی از گسل معکوس تا قبل از این مقدار جابه‌جایی هنوز به زیر پی نرسیده است. لذا در گسلش معکوس، بخشی از جابه‌جایی در همان ابتدای حرکت گسل، توسط خاک محو می‌شود.



شکل (۱۶): نتایج آزمایش‌های اندرکنش پی سطحی با گسل‌های معکوس و نرمال؛ (الف) تأثیر موقعیت و مکانیسم گسل بر جابه‌جایی افقی ( $\Delta x$ ) و قائم ( $\Delta y$ ) پی، (ب) تأثیر موقعیت و مکانیسم گسل بر زاویه جابه‌جایی انتقالی پی.

گسل تغییر می کند که این موضوع نشان دهنده ی تغییر مکانیسم خرابی پی می باشد. همچنین، با توجه به نقش روسازه در سطح خرابی وارده به مجموعه سازه و پی، نتایج نشان می دهند که مدل سازی روسازه تأثیر قابل توجهی بر روی مکانیسم های اندرکنشی پی و گسلش نداشته است اما قطعاً بر روی مقادیر دوران پی تأثیر گذار بوده است.

### مراجع

1. Lazarte, C.A., Bray, J.D., Johnson, A.M., and Lemmer, R.E. (1994) Surface breakage of the 1992 Landers earthquake and its effects on structures. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**(3), 547-561.
2. Bray, J.D. (2001) Developing mitigation measures for the hazards associated with earthquake surface fault rupture. *Seismic Fault Induced Failures*, 55-79.
3. Chen, C.C., Huang, C.T., Cherng, R.H., and Jeng, V. (2000) Preliminary investigation of damage to near fault buildings of the 1999 Chi-Chi earthquake. *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, **2**(1), 79-92.
4. Ulusay, R., Aydan, O., and Hamada, M. (2002) The behavior of structures built on active fault zones: Examples from the recent earthquakes of Turkey. *Structural Engineering/Earthquake Engineering*, **19**(2), 149-167.
5. Pamuk, A., Kalkan, E., and Ling, H.I. (2005) Structural and geotechnical impacts of surface rupture on highway structures during recent earthquakes in Turkey. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **25**(7-10), 581-589.
6. Faccioli, E., Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Callerio, A., and Paolucci, R. (2008) Fault rupture–foundation interaction: selected case histories. *Bull. Earthquake Engineering*, **6**, 557-583.
7. Lee, J.W. and Hamada, M. (2005) An experimental study on earthquake fault rupture propagation through a sandy soil deposit. *Structural Engineering/Earthquake Engineering*, **22**(1), 1s-13s.

است. لذا، این ترک ها باید در محاسبه زون عقب نشینی مورد نیاز از محل اثر گسل لحاظ شوند.

- شکل گیری گودال ثقلی در اثر گسلش نرمال از جمله نتایج این تحقیق می باشد. همچنین، مقایسه میزان پهنای تأثیر گذار ناشی از گسلش در شرایط میدان آزاد در سطح زمین نشان می دهد که این میزان برای گسل نرمال بیشتر از گسل معکوس با زاویه شیب ۷۵ درجه می باشد. دلیل بیشتر بودن این پهنای برای گسل نرمال را می توان ایجاد گسیختگی های فرعی در این نوع مکانیسم دانست. همچنین رفتار به شدت ضعیف خاک در کشش، موجب شد که با مقدار جابه جایی کمتر در سنگ بستر، گسیختگی خاک در مکانیسم نرمال زودتر از مکانیسم معکوس به سطح زمین برسد.
- نوع مکانیسم اندرکنش بین پی سطحی ( $D/B=0/10$ ) و گسیختگی ناشی از گسلش معکوس با زاویه شیب ۷۵ درجه، کاملاً به موقعیت قرار گیری پی نسبت به بیرون زدگی گسیختگی خاک در شرایط میدان آزاد بستگی دارد. بدین صورت که با تغییر موقعیت پی از روی فرودیواره به فرادیواره، مکانیسم اندرکنشی، از حالت مکانیسم فرودیواره و فضای خالی، به مکانیسم فضای خالی تغییر یافته است.
- مکانیسم اندرکنش بین پی سطحی در موقعیت  $s/B = 0/3$  و گسیختگی ناشی از گسلش نرمال با زاویه شیب ۷۵ درجه، به صورت مکانیسم فرادیواره مشاهده شده است. همچنین، با توجه به ماهیت تنش در گسلش نرمال و ضعف خاک در کشش، از همان ابتدای اعمال جابه جایی در سنگ بستر، پی مقداری دوران را تجربه خواهد نمود، اما این موضوع در گسلش معکوس مشاهده نشده است.
- علاوه بر موقعیت پی، میزان جابه جایی گسل نیز در نوع مکانیسم خرابی پی در نتیجه برخورد گسیختگی ناشی از گسل تأثیر قابل توجهی دارد. با افزایش جابه جایی گسل، با توجه به احتمال وقوع لغزش در فصل مشترک خاک و پی (به خصوص برای گسلش نرمال)، امکان جابه جایی موقعیت پی وجود دارد و در نتیجه موقعیت پی نسبت به بیرون زدگی

18. 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.
19. Moosavi, S.M., Jafari, M.K., Kamalian, M., and Shafiee, A. (2010) Experimental Investigation of Reverse Fault Rupture - Rigid Shallow Foundation Interaction. *International Journal of Civil Engineering*, **8**(2), 85-98.
20. Mortazavi Zanjani, M. and Soroush, A. (2014) Numerical modeling of fault rupture propagation through two-layered sands. *Scientia Iranica*, **21**(1), 19-29.
21. Hazeghian, M. and Soroush, A. (2015) DEM simulation of reverse faulting through sands with the aid of GPU computing. *Computers and Geotechnics*, **66**, 253-263.
22. Ashtiani, M. (2016) *Study on Mitigation Measures of Reverse Faulting on the Performance of Shallow Foundations*. Ph.D. Thesis, University of Tehran (in Persian).
23. Bransby, M.F., Davies, M.C.R., El Nahas, A., and Nagaoka S. (2008b) Centrifuge modeling of normal fault-foundation interaction. *Bull. Earthquake Eng.*, **6**(4), 585-605.
24. Mostafavi Moghadam, A.A. (2009) *Experimental Investigation of the Effectiveness of Improvement Methods on the Seismic Performance of Gravity Quay Walls*. Ph.D. Thesis, University of Tehran (in Persian).
25. Cole, D.A. and Lade, P.V. (1984) Influence zones in alluvium over dip-slip faults. *Journal of Geotechnical Engineering*, **110**(5), 599-615.
26. Bray, J.D., Seed, R.B., Cluff, L.S., and Seed, H.B. (1994b) Earthquake fault rupture propagation through soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, **120**(3), 543-561.
27. Bransby, M.F., Davies, M.C.R., El Nahas, A., and Nagaoka, S. (2008a) Centrifuge modeling of reverse fault-foundation interaction. *Bull. Earthquake Eng.*, **6**(4), 607-628.
28. Lin, M.L., Chung, C.F., and Jeng, F.S. (2006) Deformation of overburden soil induced by thrust
8. El Nahas, A., Bransby, M.F., and Davies, M.C.R. (2006) Interaction between normal fault rupture and rigid strong raft. *In Proceeding of International Conference on Physical Modeling in Geotechnics*, Hong Kong, 337-342.
9. Ahmed, W. and Bransby, M.F. (2009) Interaction of Shallow Foundations with Reverse Faults. *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. **135** (7), 914-924.
10. Ashtiani, M., Ghalandarzadeh, A., and Towhata, I. (2015) Centrifuge modeling of shallow embedded foundations subjected to reverse fault rupture. *Canadian Geotechnical Journal*, **53**(3), 505-519.
11. Ahmadi, M., Moosavi, M., and Jafari, M.K. (2018) Experimental investigation of reverse fault rupture propagation through cohesive granular soils. *Geomechanics for Energy and the Environment*, **14**, 61-65.
12. Berrill, J.B. (1983) Two-dimensional analysis of the effect of fault rupture on buildings with shallow foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **2**(3), 156-160.
13. Paolucci, R. and Yilmaz, M.T. (2008) Simplified theoretical approaches to earthquake fault rupture-shallow foundation interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **6**(4), 629-644.
14. Yilmaz, M.T. and Paolucci, R. (2007) Earthquake fault rupture-shallow foundation interaction in undrained soils: a simplified analytical approach. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **36**(1), 101-118.
15. Bray, J.D., Seed, R.B., and Seed, H.B. (1994a) Analysis of earthquake fault rupture propagation through cohesive soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, **120**(3), 562-580.
16. Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Bransby, M.F., Davies, M.C., and El Nahas, A. (2009) Normal fault rupture interaction with strip foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **135**(3), 359-370.
17. Anastasopoulos, I., Antonakos, G., and Gazetas, G. (2010) Slab foundation subjected to thrust faulting in dry sand: Parametric analysis and simplified design method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**(10), 912-924.

fault slip. *Engineering Geology*, **88**, 70-89.

29. Ahmadi, M., Moosavi, S.M., and Jafari, M.K. (2018) Intergranular water effects on shear behavior of wet sand: phenomenology based on direct shear tests and fault rupture physical modeling. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, **5**(1), 23-39 (in Persian).
30. 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.
31. Slemmons, D.B. (1957) Geological effects of the Dixie valley-Fairview peak, Nevada, earthquakes of December 16, 1954. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **47**(4), 353-375.



## Investigation on the Interaction of Shallow Foundations and Dip-Slip Faulting Using Centrifuge Modeling

Vahid Sadra<sup>1</sup>, Abbas Ghalandarzadeh<sup>2\*</sup>, and Mehdi Ashtiani<sup>3</sup>

1. M.Sc. Graduate, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2. Associate Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran,  
\*Corresponding Author, email: aghaland@ut.ac.ir
3. Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Fault displacement can affect structures along their outcropping on the ground surface and cause varying levels of damage to buildings. In this regard, the interaction of different types of foundations, including shallow, buried and pile ones, in the interaction with this phenomenon have been studied. In this study, a series of centrifuge tests have been conducted considering the kinematic effect of the foundation in order to investigate the effect of foundation location and type of fault mechanism on the interaction of dip-slip faults and shallow foundations. The dip-slip fault rupture at a dip angle of  $75^\circ$  propagates in a moderately dense sand layer and interplays with the shallow foundation. A summary of conclusions is as follows:

- For the reverse fault, the formation of tension cracks on the ground surface is due to the soil moisture and the apparent cohesion of the wet sand. Also, the fault-zone width is greater in wet sand than dry sand due to the formation of tension cracks. Therefore, these cracks should be considered in specifying the width of the set-back zones.
- For the reverse fault, changing the position of the foundation from the foot wall to the hanging wall increased the rotation and displacement of the foundation, and the interaction mechanism was changed. The behavior of foundation and the development of rupture mechanisms are fully dependent on the location of the foundation relative to the fault rupture and the magnitude of the fault offset.
- The formation of a graben due to normal faulting is one of the results of this study.
- By changing the fault mechanism from reverse to normal, it was found that the foundation and superstructure are damaged at smaller fault-induced dislocation. In a normal fault, the foundation will experience rotation for small amounts of the fault displacement because of the nature of stress in normal faulting and the weakness of the soil in tension.
- The superstructure did not have a significant effect on the interaction mechanisms of the foundation and the fault, but it certainly had an effect on the foundation rotation.

**Keywords:** Centrifuge Modeling; Dip-Slip Faulting; Shallow Foundation; Kinematic Effect.