

صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی اندرکنش گسلش سطحی - سازه

آزاده سلاجقه

دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
a.salajegheh@iiees.ac.ir

محمد داوودی

استادیار پژوهشکده ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
m-davood@iiees.ac.ir

محمد کاظم جعفری

استاد پژوهشکده ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
jafari@iiees.ac.ir

میثم فدایی

استادیار دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
m.fadaie@iiees.ac.ir

کلید واژه‌ها: گسلش معکوس، اندرکنش گسلش - خاک - سازه، آزمایش‌های $1g$ ، اجزاء محدود

چکیده

در هنگام وقوع زلزله، گسیختگی گسل دو نوع تغییر مکان شامل جابجایی ناشی از انتشار امواج برشی زلزله و جابجایی ماندگار بر روی گسل را ایجاد می‌کند. تحقیقات مهندسی زلزله تاکنون بیشتر بر روی پاسخ دینامیکی خاک و سازه در اثر ارتعاش زمین متمرکز بوده‌است و مطالعات کمتری در خصوص شناخت اندرکنش گسلش و سازه انجام شده‌است. پس از سه زلزله مهم در ترکیه و تایوان که در آنها موارد متعددی از آسیب‌های وارد بر سازه‌های در معرض جابجاییهای ماندگار ناشی از گسلش گزارش شد، توجه زیادی به انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه معطوف گردید. با این وجود در بیشتر تحقیقات انجام شده از در نظر گرفتن مستقیم سازه در مدل‌های آزمایشگاهی و تحلیلی خودداری شده‌است. با توجه به پیشینه مناسب مطالعات انجام شده تا مرحله فعلی، به نظر می‌رسد مدل‌سازی مستقیم سازه می‌تواند درک بهتری از عملکرد اعضاء مختلف آن در حین گسلش و همچنین تاثیر تغییر خصوصیات سازه بر عملکرد کلی سیستم را امکان‌پذیر سازد. در تحقیق حاضر، تاثیر مدل‌سازی مستقیم سازه بر عملکرد سیستم کوپل گسلش معکوس - خاک - فونداسیون - سازه در مدل‌سازیهای فیزیکی و عددی و صحت‌سنجی نتایج تحلیل‌های عددی مطالعه می‌شود. در ابتدا نحوه انتشار گسل در یک لایه ماسه‌ای مورد آزمایش قرار می‌گیرد و مدل عددی مربوطه با استفاده از نتایج این آزمایش صحت-سنجی و تدقیق می‌گردد. در ادامه تاثیر حضور سازه بر عملکرد سیستم کوپل با دو آزمایش بررسی شده و پاسخ‌های سازه در دو حالت با یکدیگر و با نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. برای مدل‌سازی فیزیکی از دستگاه آزمایش گسلش $1g$ موجود در آزمایشگاه ژئوتکنیک پژوهشگاه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و برای مدل‌سازی عددی از روش اجزاء محدود و نرم افزار آباکوس استفاده شده‌است. نتایج کیفی حاصل از آزمایشها با روش پردازش تصویر به نتایج کمی و قابل مقایسه با تحلیل‌های عددی تبدیل شده‌است. به منظور کنترل بیشتر بر نتایج آزمایشها نیز تعدادی جابجایی سنج دیجیتال بکار گرفته می‌شود.



تجربیات زلزله‌های گذشته نظیر ترکیه و تایوان (۱۹۹۹) و ونچوان (۲۰۰۸) موارد بسیاری از تخریب یا آسیب دیدگی سازه‌های مختلف نظیر ساختمانها، دکل‌های برق، سدها، راهها و پلها تحت تاثیر پدیده گسلش سطحی و جابجائیهای ماندگار ناشی از آن ارائه داده‌است (Anastasopoulos, & Gazetas (2007a) و Faccioli et al.(2008). با این وجود مواردی از عملکرد مناسب برخی از سازه‌ها بدون در نظر گرفتن تمهیداتی خاص در هنگام گسلش سطحی و یا انحراف مسیر گسلش در اثر حضور سازه گزارش شده‌است (Anastasopoulos & Gazetas (2007b). این امر بیانگر تاثیر متقابل گسلش سطحی و سازه یا فونداسیون بر یکدیگر است.

در تحقیقات پیشین مطالعه در زمینه انتشار گسلش، از سه جنبه مطالعات میدانی (Anastasopoulos, & Gazetas (2007a) و Faccioli et al.(2008)، مدل‌سازی فیزیکی با آزمایشهای سانتریفیوژ و Ig (Bransby (2008) و موسوی و جعفری (۱۳۸۹)، و مدل‌سازی عددی (Anastasopoulos et al. (2007)، Loukid. et al. (2009)، Yilmaz & Paolucci.(2007) انجام شده‌است. عمده این بررسیها بر تعیین مکانیزمهای گسیختگی و انتشار گسل در آبرفت و پارمترهای موثر بر آن در حالت میدان آزاد و در اندرکنش با فونداسیون تمرکز داشته‌است. بر این مبنا می‌توان نتیجه گیری کرد که فونداسیون صلب و پیوسته و یا با بار سنگین، تغییر شکلهای نامتوازن تکیه‌گاهی و در نتیجه تخریب کمتری را به سازه منتقل می‌نمایند و بیش از فونداسیونهای تکی یا سبک باعث انحراف مسیر گسلش خواهند شد (Gazetas et al. (2008). در زمینه تمهیدات ژئوتکنیکی برای مقابله با خطر گسلش سطحی و کاهش تخریبهای ناشی از آن نیز مطالعاتی صورت گرفته است که از مهمترین آنها می‌توان به کارهای (Moosavi & Jafari (2012) و Fadaee et al (2013) اشاره نمود. فدایی و جعفری (۱۳۹۲) به منظور حفاظت فونداسیون در برابر گسلش، پیشنهاد استفاده از دیواره بنتونیتی در حد فاصل مسیر انتشار گسل تا فونداسیون را پیشنهاد داده که نتایج آن در بهبود عملکرد فونداسیون بسیار تاثیر گذار بوده‌است.

علی رغم مطالعات نسبتاً جامع انجام گرفته در زمینه اندرکنش گسلش- آبرفت- فونداسیون- سازه، اثر سازه در مدل‌سازیها تنها با اعمال سربر ناشی از آن بر فونداسیون منظور شده و از مدل‌سازی مستقیم سازه در مدل‌های آزمایشگاهی و تحلیلی خودداری شده‌است. با توجه به پیشینه مناسب مطالعات انجام شده تا مرحله کنونی، به نظر می‌رسد مدل‌سازی مستقیم سازه می‌تواند درک بهتری از عملکرد اعضا مختلف سازه در حین گسلش و همچنین تاثیر تغییر خصوصیات سازه (نظیر سختی اعضا، نوع سازه و هندسه آن) بر عملکرد کلی سیستم را امکان‌پذیر سازد. در زمینه مدل‌سازی مستقیم سازه در تحقیقی که در راستای پایان‌نامه کارشناسی ارشد "هاشمی" در دانشگاه فنی آتن انجام گرفته‌است، تاثیر متقابل گسلش سطحی- سازه در یک لایه آبرفتی ماسه‌ای با استفاده از تحلیل‌های عددی و آزمایشگاهی و با تمرکز بر نحوه تاثیر گسلش بر سازه، بررسی شده‌است. سازه مورد نظر از جنس آلومینیوم و دارای سه طبقه و یک دهانه و با اتصالات نیمه گیردار در نظر گرفته شده‌است. در این تحقیق پس از صحت سنجی نتایج مدل‌سازی عددی، تعدادی تحلیل پارامتریک بر روی سیستم گسلش- خاک- فونداسیون- سازه انجام و تاثیر تغییر موقعیت سازه بر پارامترهایی نظیر چرخش نسبی و کلی اعضا، دررفت طبقات و تغییر شکلهای نقاط اتصالات بررسی شده‌است (Hashemi (2013).

با توجه به موارد فوق، در تحقیق حاضر که در راستای پروژه پژوهشی "بررسی اثر اندرکنش گسلش سطحی- قابهای ساختمانی" در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله تعریف شده است، مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی مسئله به منظور بررسی تاثیر متقابل سازه و گسلش بر یکدیگر مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. بدین منظور ابتدا آزمایش گسلش برای حالت میدان آزاد و سپس دو آزمایش با حضور سازه انجام خواهد شد. مدل‌سازی عددی هر سه آزمایش با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود آباکوس صورت خواهد گرفت و کالیبراسیون و صحت سنجی نتایج تحلیلهای عددی با استفاده از داده‌های نمونه‌های آزمایشگاهی انجام خواهد شد.

۲- مدل‌سازی فیزیکی

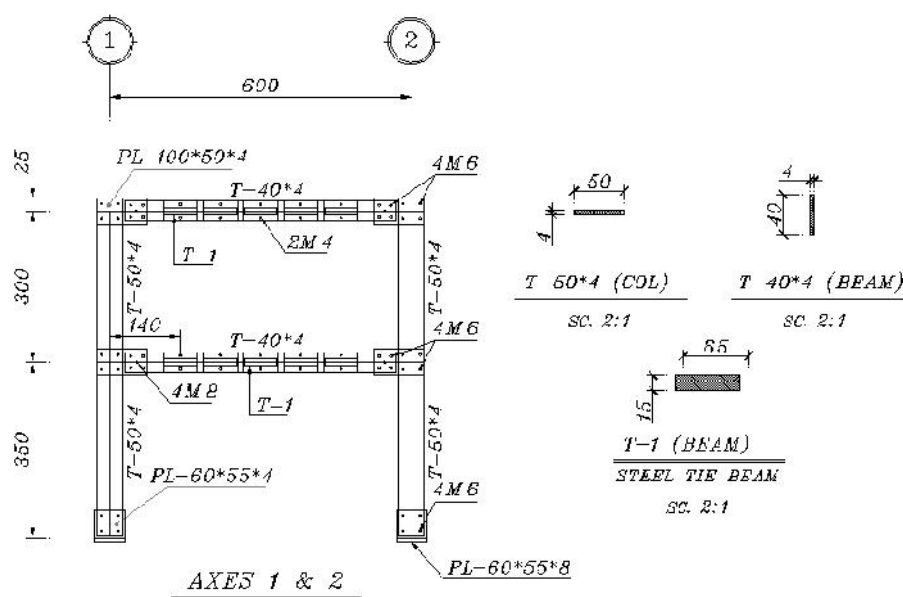
۲-۱- دستگاه گسلش

مدل‌سازی فیزیکی سیستم گسلش معکوس- خاک- فونداسیون- سازه با استفاده از دستگاه گسلش Ig موجود در آزمایشگاه مکانیک خاک پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله انجام شده‌است (موسوی و جعفری (۱۳۹۲). این دستگاه قادر به مدل‌سازی گسلش قائم (نرمال و معکوس) است. جعبه اصلی دستگاه دارای ۱۸۰ سانتیمتر طول، ۵۰ سانتیمتر عرض و ۸۰ سانتیمتر ارتفاع است که امکان مدل‌سازی لایه خاکی با ضخامت حداکثر ۶۰ سانتیمتر را دارا می‌باشد. در این تحقیق، طول جعبه با استفاده از دیواره موقت به ۱۳۰ سانتیمتر کاهش یافته است. در مدل‌سازیهای فیزیکی انجام گرفته گسلش از نوع معکوس می‌باشد. طول بخش متحرک قسمت تحتانی جعبه ۴۰ سانتیمتر، زاویه اعمال گسلش ۴۵ درجه و از نوع معکوس انتخاب شده‌است. جابجایی پایه در گام‌های ۲ میلیمتری با حداکثر مقدار ۶۲ میلیمتر و بصورت شبه‌استاتیکی به مدل اعمال می‌شود که مدل‌سازی واقع‌بینانه‌ای از سرعت رخداد پدیده گسلش می‌باشد.



۲-۲- مشخصات مدل سازه‌ای

مدل سازه‌ای مورد استفاده در این تحقیق یک سازه فولادی دو طبقه کوچک مقیاس است که دارای یک دهانه در هر یک از راستاهای طولی و عرضی می‌باشد. با توجه به محدودیت‌های ابعادی دستگاه تست گسلش، مقیاس طرح و مدلسازی سازه برابر با $1/10$ انتخاب شده‌است. از آنجائیکه هدف نهایی این تحقیق بررسی عملکرد سازه‌های طراحی شده بر اساس آئین نامه‌های موجود می‌باشد، بارگذاری سازه بر مبنای روش تحلیل شبه استاتیکی معادل آئین نامه ۲۸۰۰ و طرح سازه با استفاده از روش تنشهای مجاز مبحث دهم مقررات ملی ساختمان انجام شده‌است. فولاد مورد استفاده در ساخت مدل سازه‌ای از نوع ST-37 با مقاومت تسلیم $F_y = 2400 \text{ Kg/cm}^2$ و پیچهای پرمقاومت از نوع DIN-10.9 با مقاومت گسیختگی نهایی $F_u = 10000 \text{ Kg/cm}^2$ می‌باشند. به منظور امکان انجام تعداد نامحدودی آزمایش، اتصالات سازه از نوع پیچی انتخاب شده‌است تا کلیه اعضاء سازه قابلیت جداسازی از یکدیگر و نصب مجدد را دارا باشند. جزئیات اجرای اعضاء سازه، ورقهای اتصال و پیچها در شکل (۱) نشان داده شده‌است. صلیبیت هر اتصال با تغییر میزان سفتی پیچها قابل اندازه‌گیری می‌باشد و از اتصال مفصلی تا اتصال کاملاً گیردار قابل تغییر می‌باشد. همچنین ملاحظه می‌شود که در محل اتصال تیرها پنج عدد سوراخ تعبیه شده‌است که برای اتصال تیر به ستون در حالت گیردار و نیمه گیردار از چهار عدد پیچ اطراف استفاده می‌شود و پیچ پنجم (پیچ وسط) برای مدلسازی اتصال کاملاً مفصلی پیش‌بینی شده‌است. به دلیل امکان ایجاد تعادل قابها در راستای عمود بر محور گسلش و اتصال آنها به یکدیگر، از تعدادی تیر عرضی استفاده می‌شود. نقش مهم دیگر این تیرها بارگذاری ثقلی سازه می‌باشد و به این دلیل با وزن نسبتاً بالا طراحی شده‌اند. تعداد این تیرها در هر طبقه می‌تواند بین یک تا ۵ عدد تغییر یابد که این امر باعث کاهش یا افزایش بار اعمالی از سوی سازه بر فونداسیون (که از پارامترهای بسیار مهم در نحوه رفتار سیستم گسلش- خاک- سازه می‌باشد) خواهد شد. برای مدلسازی فونداسیونهای سازه از ورقهای پلکسی گلاس با ضخامت یک سانتیمتر استفاده شده‌است که به کف ستونهای سازه پیچ می‌شوند. محل پیچها با استفاده از برش لیزری سوراخکاری شده‌است.



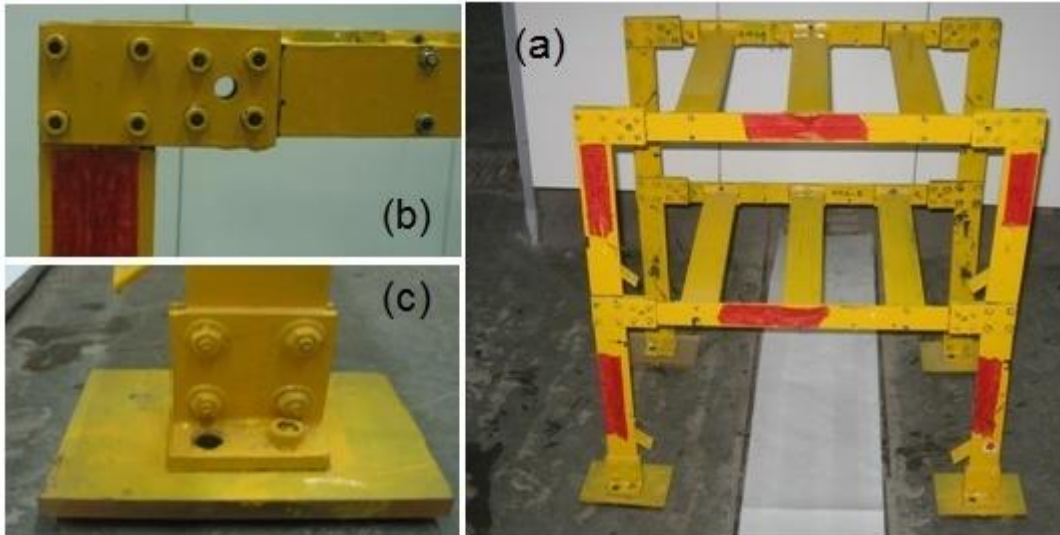
شکل ۱: مشخصات و ابعاد اعضاء سازه، ورقهای اتصالات و پیچها

تصویری از سازه فلزی کوچک مقیاس ساخته بر مبنای توضیحات بالا به همراه نمای نزدیک اتصالات تیر به ستون و اتصال پای ستون در شکل (۲) نمایش مشاهده می‌شود. در نهایت لازم به ذکر است که اعضاء سازه به نسبت خاک و نیروهای اعمالی ناشی از پدیده گسلش، دارای سختی زیادی می‌باشند. از سویی چنانچه از مشاهدات زلزله‌های قبل گزارش شده‌است، در حین گسلش تشکیل مفاصل پلاستیک در اتصالات سازه و نه در طول اعضاء سازه ایجاد می‌شود. لذا به دلیل فرم خاص طراحی شده برای اتصالات در مدل آزمایشگاهی سازه، امکان تشکیل مفاصل پلاستیک در محل اتصال وجود دارد و بنابراین سختی نسبتاً بالای تیرها و ستونها تأثیری بر نحوه رفتار کلی سازه در هنگام اعمال گسلش نخواهد گذاشت.

۲-۳- مشخصات خاک مورد استفاده در آزمایش

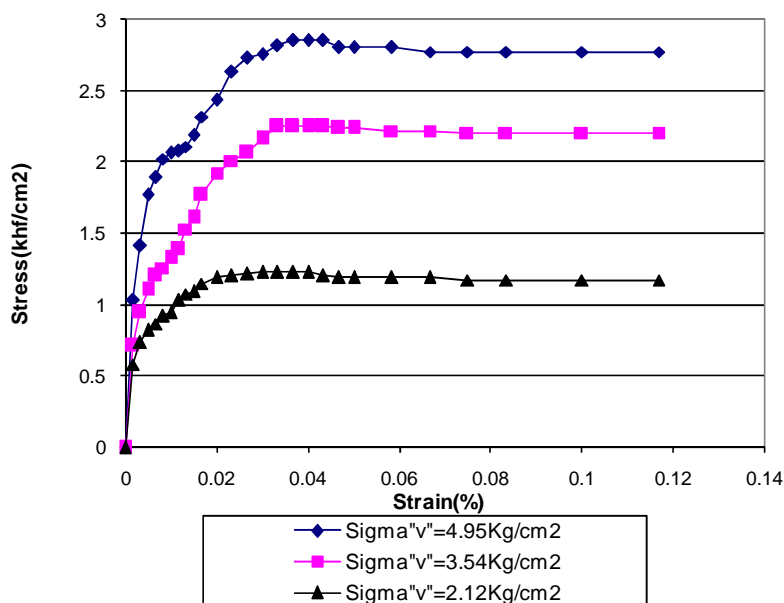
لایه آبرفتی از ماسه خشک یکنواخت فیروزکوه با اندازه متوسط دانه‌ها برابر با $D_{50} = 0.25 \text{ mm}$ تشکیل شده‌است. دانسیته مخصوص، دانسیته خشک حداقل و حداکثر ماسه به ترتیب برلبر با ۲.۶۱، 1.42 gr/cm^3 و 1.71 gr/cm^3 اندازه‌گیری شده‌است. ریزش هر لایه ماسه از

ارتفاع مشخص، با سرعت ثابت و توسط یک دستگاه خودکار ریزش ماسه انجام می‌گیرد تا یکنواختی دانسیته لایه‌های آبرفت تضمین شود. در مدلسازیهای انجام گرفته در این تحقیق دانسیته نسبی ماسه $D_r = 0.85$ می‌باشد که بیانگر ماسه با دانسیته متوسط است. ضخامت لایه‌های خاک برابر با ۵ سانتیمتر انتخاب شده است و به منظور مشخص بودن روند تغییرات ایجاد شده در آبرفت و مسیر انتشار گسلش، از یک لایه نشانگر با ماسه آبی رنگ در فصل مشترک لایه‌های پنج سانتیمتری استفاده می‌شود.



شکل ۲: (a) نمای سه بعدی سازه فلزی کوچک مقیاس پس از نصب قطعات (b) نمای نزدیک اتصال پیچی تیر به ستون (c) نمای نزدیک اتصال پای ستون

تعدادی آزمایش برش مستقیم برای اندازه‌گیری خصوصیات مکانیکی ماسه در تنشهای درجای مختلف انجام گرفته که نتایج آن در شکل (۳) نمایش داده شده است. براین اساس برای $\tau_v > 100KPa$ (بیانگر مدل واقعی)، مقادیر زاویه اصطکاک حداکثر و باقیمانده به ترتیب برابر با $w_{peak} = 32^\circ$ و $w_{res} = 30^\circ$ می‌باشد. زاویه اتساع که به میزان زیادی به سطح تنش همه جانبه مرتبط است برابر با $E = 3^\circ$ بدست می‌آید. در مدل آزمایشگاهی 1g سطح تنشهای همه جانبه بسیار کمتر از مدل واقعی و در حد $\tau_v < 10KPa$ است که باعث تغییر خصوصیات مکانیکی خاک در تحلیلهای عددی کوچک مقیاس می‌شود. به منظور بررسی اثر کاهش تنش همه جانبه، زاویه اصطکاک داخلی خاک به میزان قابل توجهی افزایش و به $w_{peak} = 45^\circ$ تغییر می‌یابد. (Anastasopoulos. et al. (2008) و Fadaee. et al. (2013).



شکل ۳: نتایج آزمایش برش مستقیم بر روی ماسه با $D_r = 85\%$

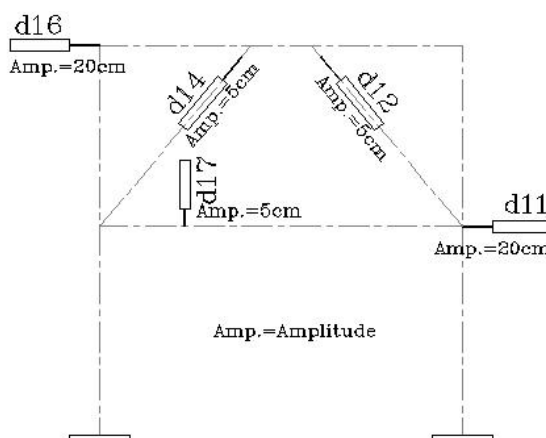
۲-۴- سیستم ثبت نتایج

در این تحقیق به منظور ثبت نتایج حاصل از مدل‌سازیهای فیزیکی، دو روش پردازش تصویر و استفاده از ابزار دقیق بکار گرفته شده‌است. در روش پردازش تصویر، از نسخه اصلاح شده نرم افزار پردازش تصویر تولید شده در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و در قالب پایان نامه دکتری فدایی (۱۳۹۲) استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر تغییراتی در نرم افزار سابق ایجاد شده تا اعضای سازه‌ای برای نرم‌افزار قابل تشخیص و تعریف باشند. همچنین به دلیل تغییر دوربین (استفاده از دوربین با رزولوشن ۱۵ مگاپیکسل نسبت به دوربین قبل با رزولوشن ۸ مگاپیکسل)، تنظیمات مجددی در بخش مشخصات دوربین در نرم افزار اعمال شده‌است. بر روی اعضاء سازه نیز نشانه‌هایی با رنگ قرمز تعبیه می‌شود تا در تصاویر متوالی امکان ردیابی آنها برای نرم‌افزار فراهم گردد. در هر مرحله از اعمال تغییر مکانها در مدل آزمایشگاهی (تغییر مکان پایه با دامنه ۲ میلی‌متر)، تصویر مدل با استفاده از دوربین دیجیتال با رزولوشن ۱۵ مگاپیکسل که در مقابل دستگاه گسلس قرار می‌گیرد ضبط می‌شود و لذا در پایان هر آزمایش یک سری عکس دیجیتال بدست می‌آید. در مرحله بعد این تصاویر خام با استفاده از مشخصات optical کل سیستم نظیر مشخصات دوربین، صفحه پلکسی گلاس دستگاه گسلس و تصویر صفحه کالیبراسیون، rectify می‌شود. با تعیین مقیاس تصاویر rectify شده، می‌توان مقادیر جابجایی‌های هر نقطه از آبرفت و سازه را مستقیماً از عکسها بدست آورد. با این وجود امکان دریافت اطلاعاتی نظیر جابجایی‌های افقی و قائم لایه‌های خاک و اعضاء سازه، پروفیل سطح خاک، کنتورهای کرنش در محیط آبرفت و مقادیر دوران اعضاء سازه، در نرم افزار پردازش تصویر نیز وجود دارد.

به منظور کنترل و صحت سنجی نتایج نرم‌افزار پردازش تصویر و کنترل دقیق‌تر رفتار نمونه‌های آزمایشگاهی سازه، علاوه بر تکنیک پردازش تصویر، از تعدادی جابجایی سنج دیجیتال ساخت شرکت TML ژاپن مدل SDP-200D و CDP-50D استفاده شده‌است. این جابجایی سنجها به ترتیب دارای دامنه جابجایی ۵ و ۲۰ سانتیمتر هستند. نام‌گذاری، محل و راستای قرارگیری جابجایی سنجها در شکل (۴) نشان داده شده‌است. چنانچه ملاحظه می‌شود، جابجایی سنج‌های شماره d11 و d16 با دامنه ۲۰ سانتیمتر و جابجایی سنج d17 با دامنه ۵ سانتیمتر به ترتیب برای ثبت مقادیر جابجایی‌های افقی و قائم بکار رفته‌اند. با استفاده از داده‌های حاصل از دو جابجایی سنج مورب d12 و d14 (با دامنه ۵ سانتیمتر) نیز، می‌توان مقدار دوران نسبی زوایای طبقه دوم سازه را محاسبه نمود. سیگنالهای خروجی جابجایی سنجها، توسط یک دستگاه ثبت نتایج ۱۰۰ کاناله استاتیکی مدل UPM100 ساخت شرکت HBM آلمان، ثبت شده و به داده‌های عددی دیجیتال تبدیل می‌شوند (شکل ۵).



(b)



(a)

شکل ۴: (a) نمایش موقعیت قرارگیری و شماره‌گذاری جابجایی سنجها (b) تصویر جابجایی سنجهای نصب شده بر روی سازه (شماره d11 و d12 به ترتیب با دامنه ۲۰ و ۵ سانتیمتر)

۲-۳- مدل‌سازی عددی

برای مدل‌سازی عددی مسئله از روش اجزاء محدود و نرم افزار آباکوس (۲۰۱۱) استفاده شده‌است. به دلیل تشابه و تقارن سازه در راستای عمود بر گسلس مسئله بصورت دوبعدی مدل می‌شود. علی‌رغم محدودیتهای غیر قابل اجتناب، روش اجزاء محدود با دقت قابل قبولی قادر به برآورد تغییر شکلهای ناشی از گسلس در حالت میدان آزاد (Anastasopoulos. et al. (2007) و همچنین در اندرکنش گسلس- آبرفت- فونداسیون می‌باشد (Anastasopoulos. et al. (2008 & 2009). شرط حصول به نتایج قابل اطمینان در این روش استفاده از مدل رفتاری مناسب و همچنین ابعاد مش به حد کافی ریز است (Bray et al. (1994) و Anastasopoulos. et al. (2007). در تحقیق حاضر برای مش‌بندی محیط آبرفت از المانهای مربعی چهار گره‌ای و برای تیرها و ستونهای سازه از المانهای خطی تیر انعطاف‌پذیری دو گره‌ای و از مصالح فولادی استفاده شده‌است. اتصالات تیر به ستون، ستون به ستون و ستون به فونداسیون با استفاده از المانهای تیر پلاستیک تعریف شده‌است. لنگر

پلاستیک مورد نیاز در تعریف این المانها با انجام تعدادی آزمایش پوش آور بر روی اتصالات، کالیبره و تعیین می‌شود. ابعاد بهینه مش لایه آبرفت و سازه پس از انجام چند تحلیل با ابعاد متفاوت مش، برابر با ۲×۲ سانتیمتر برای محیط خاک، دو سانتیمتر برای المانهای الاستیک تیر و ستونها، و ۰/۵ سانتیمتر برای نواحی پلاستیک (محل اتصالات) انتخاب شده‌است. فونداسیون با استفاده از المانهای تیر دو گره‌ای و با مصالح بتنی الاستیک تعریف شده که بیانگر رفتار صلب آن می‌باشد. به منظور اتصال فونداسیون به خاک زیر آن از نوعی المان فصل مشترک استفاده می‌شود که در فشار بصورت صلب عمل می‌کند اما به دلیل عدم تحمل نیروی کششی، قابلیت مدلسازی جدایش فونداسیون از خاک را دارد. رفتار المانهای فصل مشترک در برابر اعمال نیروهای برشی از قانون اصطکاک کولمب پیروی می‌کند که امکان مدلسازی لغزش فونداسیون بر روی خاک را فراهم می‌نماید.



شکل ۵: نمای دستگاه ثبت داده‌های مورد استفاده در آزمایش

برای مدلسازی رفتار خاک از مدل رفتاری الاستو پلاستیک با نرم شوندگی ایزوتروپ و سطح گسیختگی مور- کولمب استفاده شده‌است (Anastasopoulos, et al. (2007) و Fadaee, et al. (2013). خصوصیات مکانیکی مصالح خاکی در بخش ۲-۳ مورد بررسی قرار گرفته- است. برای لحاظ کردن تاثیر اندازه مش بر رفتار پلاستیک خاک، کالیبراسیون مدل رفتاری خاک با نرم افزار اجزاء محدود آباکوس برای بعد مش ۲ سانتیمتر انجام گرفته (Anastasopoulos, et al. (2007) که بر این مبنا خصوصیات نهایی خاک برای استفاده در تحلیلهای عددی بصورت $\alpha = 45^\circ$ ، $w_{res} = 35^\circ$ و $E = 13^\circ$ در نظر گرفته شده‌است. جابجایی پایه گسل با دامنه‌های ۵ میلیمتری در مرز پائین مدل و در دیواره سمت چپ (سمت فرادیواره) اعمال شده‌است. مرز پائین مدل در سمت فرودیواره ثابت و بدون حرکت باقی می‌ماند.

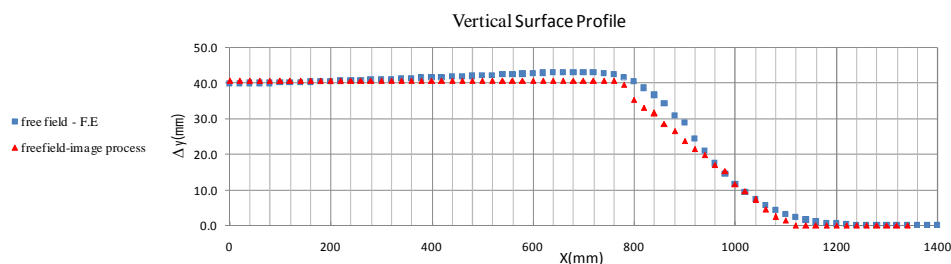
۴- صحت سنجی نتایج تحلیلهای

۴-۱- آزمایش میدان آزاد

در ابتدا یک آزمایش میدان آزاد بدون حضور سازه، برای بررسی رفتار لایه آبرفتی تحت اثر گسلش معکوس انجام می‌شود. ضخامت لایه خاک ۴۰ سانتیمتر و خاک از نوع ماسه متراکم مطابق با مشخصات ذکر شده در بالا است. از نتایج کمی شده مدلسازی فیزیکی با روش پردازش تصویر، برای صحت سنجی نتایج مدلسازی عددی استفاده شده‌است. در شکل (۶) پروفیل جابجایی قائم سطح خاک برای آزمایش و مدلسازی عددی در جابجایی پایه ۵۶ میلیمتر، نشان داده شده‌است. محل رخنمون مسیر اولیه گسلش در فاصله ۷۸ سانتیمتر از لبه دستگاه قرار گرفته است. تغییر شکل ناشی از گسلش در سطح خاک با روش تحلیل عددی، تطابق خوبی را با نتایج آزمایش نشان می‌دهد. البته در قسمت رخنمون گسلش، شیب منحنی حاصل از روش اجزاء محدود اندکی کمتر از پروفیل واقعی خاک است. دلیل این امر تنشهای همه جانبه بسیار کم در مدل‌های آزمایشگاهی 1g است که منجر به افزایش زاویه اصطکاک داخلی و اتساع خاک در مقایسه با نمونه‌های واقعی می‌شود. از سویی مدل رفتاری نسبتاً ساده انتخاب شده در تحلیل عددی، قادر به مدلسازی دقیق رفتار پلاستیک خاک و افزایش مقادیر پارامترهای مقاومتی آن نیست. علی‌رغم این مورد فرضیات انجام گرفته در ساخت مدل عددی منجر به ارائه نتایج قابل قبول شده‌است و لذا می‌توان از مدل عددی تهیه شده برای آبرفت، در ادامه مراحل تحقیق استفاده نمود.

۴-۲- آزمایشهای با حضور سازه

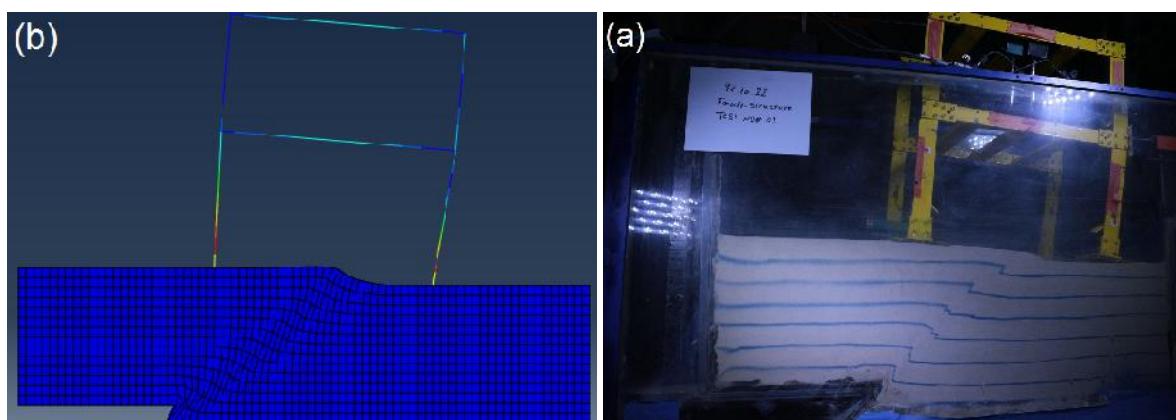
در این مرحله تاثیر متقابل گسلش و سازه بر یکدیگر (با تکیه بر پارامتر موقعیت قرار گیری سازه) و صحت سنجی نتایج تحلیلهای عددی اندرکنش گسلش- سازه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در تحقیق حاضر دو نمونه از این آزمایشها انتخاب و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته است. فونداسیون سازه در هر دو آزمایش از نوع تکی و با ابعاد ۱۵X۱۵ سانتیمتر انتخاب شده است که با توجه به مقیاس نمونه آزمایشگاهی، با یک فونداسیون به ابعاد ۱/۵X۱/۵ متر معادل می باشد. ضخامت و خصوصیات لایه آبرفتی مطابق با تست حالت میدان آزاد می باشد. چرخش ستون عقب سمت چپ، در طول آزمایش با یک دستگاه شیب سنج دیجیتال اندازه گیری و بصورت دستی ثبت می شود.



شکل ۶: مقایسه پروفیل قائم سطح آبرفت در حالت میدان آزاد با دو روش پردازش تصویر و اجزاء محدود

در آزمایش نخست (SFSI-1-H400-X500) فاصله محور ستون سمت چپ از گوشه سمت چپ آبرفت برابر با ۵۰ سانتیمتر انتخاب شده است. در این حالت محل رخنمون گسلش میدان آزاد در فاصله از ستون سمت چپ (میان دهانه سازه) قرار می گیرد. اتصالات تیر به ستون و ستون به ستون از نوع نیمه گیردار و اتصال پای ستون از نوع گیردار انتخاب شده است. سختی اتصال ستون سمت چپ در حدود ۳ برابر ستون سمت راست می باشد. به دلیل مشکلات خاص ایجاد شده در این تست نظیر تغییر زاویه دوربین در هنگام تصویربرداری از صفحه کالیبراسیون، امکان استفاده از نرم افزار پردازش تصویر میسر نگردید. لذا پاسخهای تحلیل عددی تنها با نتایج حاصل از ابزار دقیق مقایسه گردیده است و تصاویر ضبط شده در حین آزمایش تنها از لحاظ کیفی قابل مقایسه با تحلیل عددی می باشند.

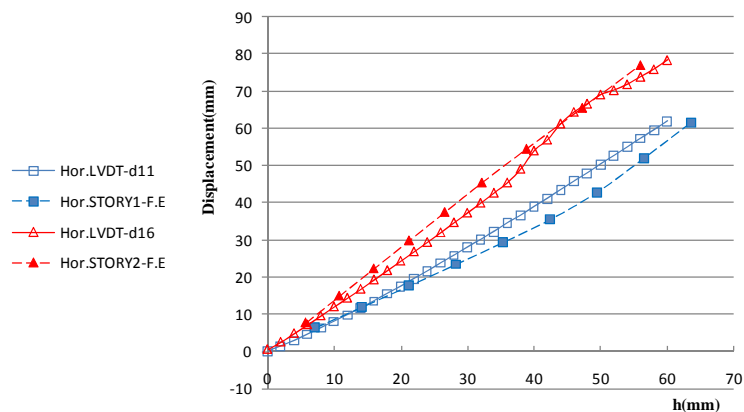
شکل (۷-ا) تصویر تغییر شکلهای ایجاد شده در سازه و آبرفت را در پایان آزمایش نشان می دهد. در این مرحله جابجایی پایه گسل برابر با ۶۲ میلی متر در امتداد زاویه گسلش ۴۵° بوده است. تغییر شکل حاصل از تحلیل عددی با روش اجزاء محدود در جابجایی پایه ۶۳ میلی متر نیز، در این تصویر (شکل ۷-ب) نمایش داده شده است. چنانچه ملاحظه می شود فرم کلی تغییر شکل سازه در هر دو حالت مشابه یکدیگر است. ستون سمت چپ که بر فرادیواره قرار گرفته دچار چرخش کلی شده، در حالیکه دوران نسبی در ستون واقع بر فرودیواره ایجاد می شود. به دلیل سختی بالای اتصال در طبقه اول ستون سمت چپ و صلبیت اتصال پای ستون، امکان چرخش نسبی این ستون در طبقات وجود نداشته است. از سویی جابجایی افقی اعمال شده به پایه دو ستون سازه برابر نیست. لذا چرخش کلی ستون سمت چپ، به تغییر زاویه نسبی ستون سمت راست در طبقه اول منجر خواهد شد.



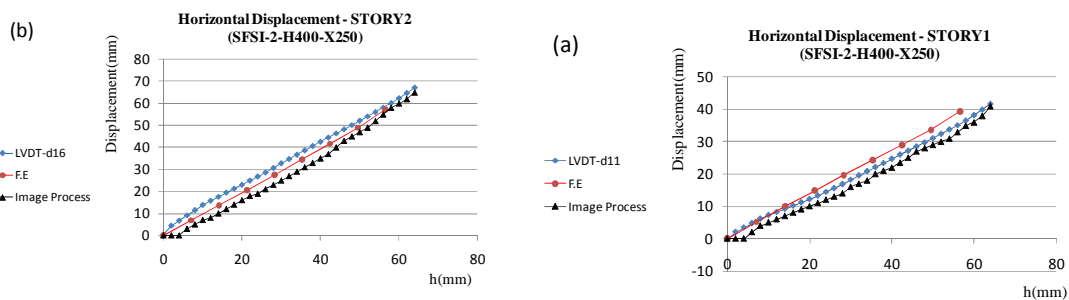
شکل ۷: تغییر شکلهای ایجاد شده در سازه و آبرفت در جابجایی پایه گسل برابر با ۶۲ میلی متر (a) آزمایش 1g (b) روش اجزاء محدود



در شکل (۸) مقادیر جابجایی حاصل از آزمایش و تحلیل عددی برای مقادیر مختلف جابجایی پایه - در محل نصب جابجایی سنجهای شماره d11 و d16 - مقایسه شده است. مقایسه نتایج نشان دهنده پاسخ مناسب مدل عددی و اختلاف اندک نتایج تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی می باشد. در دومین آزمایشی که به منظور صحت سنجی نتایج تحلیل عددی انجام شده است (SFSI-2-H400-X250)، موقعیت سازه به گونه ای تغییر یافته که فاصله محور ستون سمت چپ تا لبه دستگاه برابر با ۲۵ سانتیمتر شده و در نتیجه محل رخنمون گسلش به ستون واقع بر فرادیواره نزدیک تر است. همچنین سختی اتصال ستونهای سمت چپ و راست با هم برابر است. در این آزمایش با فراهم نمودن تصاویر کالیبراسیون مناسب، مشکل نرم افزار پردازش تصویر مرتفع و امکان استفاده از نتایج آن فراهم گردید. لذا در آزمایش دوم، صحت سنجی نتایج تحلیل عددی با استفاده از هر دو روش پردازش تصویر و استفاده از ابزار دقیق انجام می شود. در این آزمایش نیز مشابه با



شکل ۸: مقایسه تغییر شکلهای ایجاد شده در سازه حاصل از جابجایی سنجها و روش جزء محدود در حالت SFSI-1-H400-X500



شکل ۹: مقایسه تغییر شکلهای افقی حاصل از اطلاعات ثبت شده جابجایی سنجها، نرم افزار پردازش

تصویر و روش اجزاء محدود در حالت SFSI-2-H400-X250 (a) طبقه اول (b) طبقه دوم

آزمایش نخست، مقادیر جابجایی افقی طبقات اول و دوم در نقاط قرارگیری جابجایی سنجها نشان داده شده که بیانگر تطابق نتایج تحلیل عددی با مدلسازی آزمایشگاهی است (شکل ۹). اختلاف موجود در نتایج پردازش تصویر نسبت به داده های حاصل از جابجایی سنجها، ناشی از خطاهای نرم افزار پردازش است که از مهمترین آنها می توان به خطای کالیبراسیون، نورپردازی نامناسب، عدم شفافیت بالای صفحه پلکسی گلاس دستگاه گسلش (Fadaee. et al., 2012) اشاره نمود.

مقایسه نتایج جابجایی افقی طبقات در دو آزمایش (شکل ۸ و ۹)، بیانگر مقادیر بیشتر این کمیت در حالت اول (SFSI-1-H400-X500) می باشد. به نحویکه در آزمایش نخست مقدار حداکثر جابجایی سازه در طبقات اول و دوم به ترتیب برابر با ۶۲ و ۷۸ میلیمتر و در آزمایش دوم به ترتیب برابر با ۴۱/۷ و ۶۷ میلیمتر بوده است. در حالت اول ستون واقع بر فرادیواره به محل رخنمون گسلش نزدیک تر است بیشتر تحت تاثیر دوران و جابجایی ناشی از گسلش قرار می گیرد و تغییر شکلهای بزرگتری در آن ایجاد می شود. از سویی به دلیل سختی زیاد اتصال ستون سمت چپ، امکان چرخش نسبی ستون در محل اتصال وجود نداشته و بیشتر دوران بصورت چرخش کلی به سازه وارد می شود که باعث افزایش تغییر مکان افقی سازه می گردد. البته این افزایش دررفت در طبقات لزوماً به معنای ایجاد تخریب بیشتر در سازه نیست و چرخش نسبی اعضای و نیروهای داخلی ناشی از آن، نقش مهمی در پیدایش آسیبهای سازه ای ایفا می نماید.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق تاثیر در نظر گرفتن حضور سازه بر پاسخهای سیستم کوپل گسلش- خاک- سازه با دو روش مدلسازی فیزیکی و عددی بررسی شده است. تحلیل‌های عددی با روش اجزاء محدود، تطابق مناسبی با نتایج حاصل از آزمایش‌های کوچک مقیاس Ig نشان می‌دهند که نشان‌دهنده اعمال مدل رفتاری و فرضیات مناسب در روند مدلسازی عددی می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از نرم‌افزار پردازش تصویر که برای حالت حضور سازه به روزرسانی شده است، تطابق خوبی با داده‌های حاصل از جابجایی سنج‌های دیجیتال متصل به مدل سازه‌ای دارند. ارزیابی نتایج حاصل از دو آزمایش با حضور سازه، بیانگر تاثیر سختی اتصالات بر رفتار سازه تحت تاثیر گسلش سطحی نظیر مقادیر جابجایی اعضاء و چرخش نسبی و کلی آنها دارد. سختی بیشتر اتصال ستون واقع بر فرادیواره باعث ایجاد چرخش کلی در همان ستون و انتقال چرخش نسبی به ستون واقع بر فرادیواره گردیده است. همچنین در حالتیکه ستون سمت چپ به محل رخنمون حالت میدان آزاد نزدیک تر است، مقادیر جابجایی افقی طبقات، بیش از حالتی است که ستون سمت راست به رخنمون گسلش نزدیک باشد. در انتها لازم به توضیح است که نتایج ارائه شده در این تحقیق مربوط به تعداد محدودی آزمایش و تحلیل عددی می‌باشد و به منظور امکان دستیابی به نتایج کلی‌تر، مطالعات تکمیلی با انجام تحلیل‌های پارامتریک عددی و آزمایش‌های مربوطه در حال انجام است.

مراجع

موسوی س م (۱۳۸۹) "تمهیدات مهندسی پی برای ساخت ساختمانها در پهنه‌های گسلی شیب لغز فعال". پایان‌نامه دکتری. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

فدایی م (۱۳۹۲) "امکان سنجی تجربی و عددی تمهیدات ژئوتکنیکی برای کاهش تغییرمکان ناشی از گسل‌های معکوس فعال". پایان‌نامه دکتری. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

Ahmed W and Bransby MF (2009) Interaction of Shallow Foundations With Reverse Faults. *Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 135(7), 914-924

Anastasopoulos I and Gazetas G (2007a) Foundation Structure Systems Over a Rupturing Normal Fault: Part I. Observations After the Kocaeli 1999 Earthquake. *Bulletin of the Earthquake Engineering*, 5(3), 253-275

Anastasopoulos I and Gazetas G (2007b) "Foundation Structure Systems Over a Rupturing Normal Fault: Part II. Analysis of the Kocaeli case Histories". *Bulletin of the Earthquake Engineering*, 5(3), 277-301

Anastasopoulos I, Gazetas G, Bransby MF, Davies MCR and El Nahas A (2007) Fault Rupture Propagation through Sand: Finite-Element Analysis and Validation through Centrifuge Experiments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 133(8), 943-958

Anastasopoulos I, Callerio A, Bransby MF, Davies MCR, El Nahas A, Faccioli E and Rossignol E (2008) Numerical Analyses of Fault-Foundation Interaction. *Bulletin of earthquake engineering*, 6(4), 645-675

Anastasopoulos I, Gazetas G, Bransby MF, Davies MCR and Nahas A (2009) Normal Fault Rupture Interaction with Strip Foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 135(3), 359-370

Bransby MF, Davies MCR and Nahas A (2008) Centrifuge Modelling of Normal Fault-Foundation Interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6(4), 585-605

Bransby MF, Davies MCR, Nahas A and Nagaoka S (2008) Centrifuge Modelling of Reverse Fault-Foundation Interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6(4), 607-628

Bray JD, Seed RB, Cluff LS and Seed HB (1994) Earthquake Fault rupture Propagation through Soil. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 120(3), 543-561

Faccioli E, Anastasopoulos I, Gazetas G, Callerio A and R Paolucci R (2008) Fault rupture-foundation interaction: selected case histories. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6(4), 557-583

Fadaee M, Anastasopoulos I, Gazetas G, Jafari MK and Kamalian M (2013) Soil bentonite wall protects foundation from thrust faulting: analyses and experiment. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 12(3), 473-486



Fadaee M, Anastasopoulos I, Gazetas G, Jafari MK, Kamalian M and Mustafa SA (2012) Fault Rupture Propagation in Alluvium and Its Interaction with Foundation: New Insights from 1g Modelling via High Resolution Optical Image Processing Techniques. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering (JSEE)*, 14(5), 271-283

Gazetas G, Pecker A, Faccioli E, Paolucci R, and Anastasopoulos I (2008) Preliminary Design Recommendations for Dip-Slip Fault–Foundation Interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6(4), 677-687

Loukidis D, Bouckovalas GD and Papadimitriou AG (2009) Analysis of Fault Rupture Propagation Through Uniform Soil Cover. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(11), 1389-1404

Paolucci R and Yilmaz MT (2008) Simplified Theoretical Approaches to Earthquake Fault Rupture- Shallow Foundation Interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6(4), 629-644

Yilmaz MT and Paolucci R (2007) Earthquake Fault Rupture- Shallow Foundation Interaction in Undrained Soils: a Simplified Analytical Approach. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 36(1), 101-118