

چکیده

خرابی‌های به‌جامانده از زلزله‌های سال ۱۹۹۹ ترکیه و تایوان علاقه‌مندی به بررسی رفتار ساختمان‌ها در برخورد با گسیختگی سطحی ناشی از گسل‌ها را بیشتر نمود. در این خصوص تحقیقات زیادی برای پی بردن به وضعیت اندرکنش موجود بین گسیختگی گسل و پی‌های سطحی انجام شد؛ هم‌اکنون در ایران و بسیاری از کشورهای دنیا ساختمان‌های ساخته شده و یا در حال ساختی هستند که احتمال برخورد گسیختگی ناشی از گسل‌ها با آنها با توجه به وجود عدم قطعیت‌ها در رخنمون محل دقیق گسلش سطحی وجود دارد. از این‌رو با بررسی هر چه بیشتر خطرات ناشی از گسلش در اندرکنش با پی‌های سطحی می‌توان به ساخت‌وساز بر روی یا مجاور گسل‌ها کمک نمود و ابهامات موجود در این زمینه را تا حد زیادی مرتفع نمود. در تحقیق حاضر با توجه به محدودیت‌هایی که آیین‌نامه‌های لرزه‌ای جهت ساخت‌وساز در پهنه‌های گسلی در نظر گرفته‌اند و ارزیابی شواهد میدانی موجود از زلزله‌های گذشته به بررسی عددی مخاطرات گسلش سطحی معکوس بر ساختمان‌ها پرداخته می‌شود. با توجه به شواهد میدانی برداشت شده در زلزله‌های گذشته، موقعیت قرارگیری ساختمان‌ها و بار سازه از نقش ویژه‌ای در ایجاد خسارت در سازه‌ها هنگام وقوع گسلش سطحی برخوردار است که در تحقیق حاضر، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعات حاضر نشان می‌دهد که محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای از قبیل فاصله مجاز جهت ساخت‌وساز در پهنه‌های گسلی فعال، الزاماً منجر به حصول ساخت و سازی ایمن نمی‌گردد.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی عددی، گسلش سطحی معکوس، پی.

بررسی عددی مخاطرات گسلش سطحی معکوس بر ساختمان‌ها

مهتاب شیروی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران - زلزله،

دانشگاه مازندران، بابلسر

سیدمجتبی موسوی (نویسنده مسئول)

استادیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران،

moosavi@iiees.ac.ir

محسن احمدنژاد

مرئی دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مازندران، بابلسر

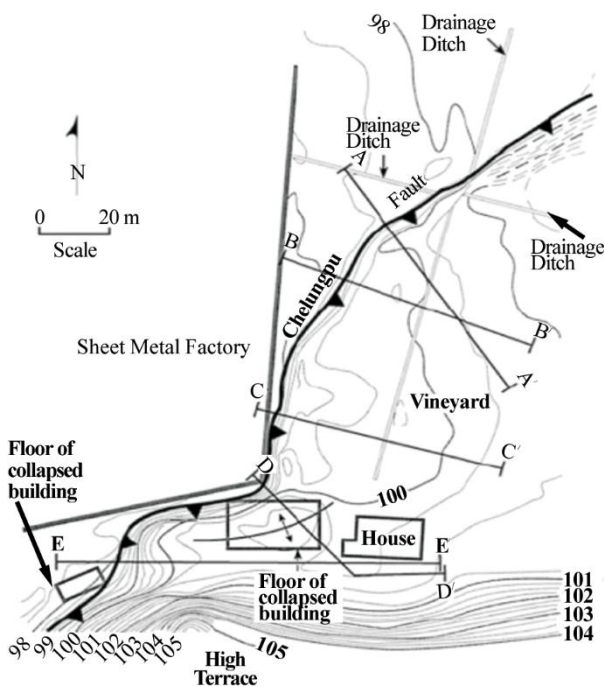
۱- مقدمه

محدوده گسل‌ها طرح نشده است اما در پهنه‌های گسلی به‌ویژه گسل‌های اصلی، اجتناب از ساخت ساختمان به‌ویژه ساختمان‌های با اهمیت بسیار زیاد، اکیداً توصیه شده است. به دلیل واقع شدن بسیاری از شهرهای کشورهای دنیا و از جمله ایران بر روی پهنه‌های گسلی فعال نظیر مراکز شهری پرجمعیتی چون تهران، مشهد، تبریز و ... در ایران و کاستی‌های موجود در ضوابط طراحی سازه‌ها در این خصوص، لزوم بررسی‌های بیشتر در این زمینه و به‌طور خاص اهمیت آن برای ایران آشکار می‌گردد.

از این‌رو تحقیقات زیادی به‌خصوص با توجه به آسیب‌های وارده به ساختمان‌ها ناشی از گسلش سطحی پس از زلزله‌های سال ۱۹۹۹

آیین‌نامه‌های لرزه‌ای در اکثر کشورهای دنیا محدودیت‌هایی را برای ساخت‌وساز بر روی یا مجاور گسل‌های فعال در نظر گرفته‌اند و عمدتاً به انجام تحلیل و طراحی خاص و رعایت تمهیدات ویژه در ساخت‌وساز در پهنه‌های گسلی نظر داشته‌اند. هرچند تعیین فاصله مورد نیاز برای عقب‌نشینی از محدوده انواع گسل‌ها به‌صورت دقیق با ابهاماتی مواجه است اما به‌عنوان نمونه، رعایت یک فاصله ۱۵ متری از هر طرف محل اثر گسل در کالیفرنیا [۱] پیشنهاد شده است. در آیین‌نامه‌هایی نظیر آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ ایران) [۲] و آیین‌نامه لرزه‌ای اروپا [۳]، فاصله مشخصی برای عقب‌نشینی از

که بر اثر حضور سازه منجر به انحراف گسلش و قرارگیری پی در فرودیواره گسل شده است در شکل (۲) نشان داده شده است [۱].



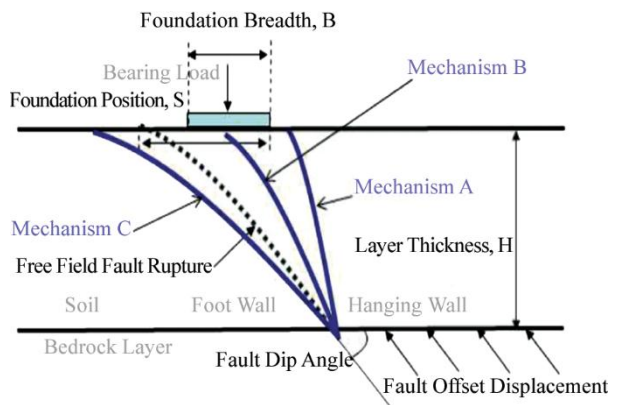
شکل (۲): اندرکنش گسلش و پی در زلزله سال ۱۹۹۹ چی چی تایوان (انحراف گسلش توسط پی و قرارگیری پی در فرو دیواره گسل) [۱].

از سازوکار رسیدن گسلش به زیر پی در نمونه‌های بررسی شده در مطالعات میدانی، می‌توان به ساختمان چهار طبقه دارای پی گسترده بتن مسلح به ضخامت ۰/۶ متر و دیوار برشی بتنی اشاره کرد (شکل ۳) که به دلیل وجود پی مقاوم و با ضخامت زیاد و همچنین دیوار برشی با مقاومت بالا در زلزله چی چی تایوان در سال ۱۹۹۹، متحمل تغییر شکل‌های ناشی از گسلش سطحی شده است.



شکل (۳): اندرکنش گسلش و پی در زلزله چی چی (ساختمان بتنی ۴/۵ متر جابه‌جایی را در گسلش معکوس متحمل شده است) [۶].

ترکیه و تایوان به صورت مطالعات میدانی [۴-۱۰]، آزمایشگاهی [۵، ۱۱-۱۵] و عددی [۷، ۱۶-۱۹] در دهه‌های اخیر صورت گرفته است. مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی با استفاده از دستگاه‌های شبیه‌ساز گسلش در سانتریفیوژ و یا انجام مطالعات در شرایط شتاب ثقل انجام شده‌اند. با تغییرات وسیع در موقعیت پی (به‌عنوان نمودی از سازه) نسبت به خط گسلش در حالت آزاد و آزمایش سربارهای مختلف به ارزیابی تأثیرات این دو پارامتر در اندرکنش گسلش و پی پرداخته شده و رخدادهای سازوکار اصلی آن‌چنان که در شکل (۱) نشان داده شده است مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل (۱): اندرکنش گسلش و پی [۲۰].

سازوکارهای اصلی اندرکنش گسلش و پی آن‌چنان که در شکل (۱) نشان داده شده است به قرار زیر می‌باشد:
سازوکار A: انحراف گسلش و قرارگیری پی در فرودیواره گسل
سازوکار B: رسیدن گسلش به زیر پی
سازوکار C: انحراف گسلش و قرارگیری پی در فرادیواره گسل
در مقاله حاضر پس از ارائه نمونه‌هایی از شواهد میدانی سازوکارهای اصلی و تبیین ناحیه‌بندی اطراف گسل‌های معکوس بررسی‌های عددی تحقیق حاضر ارائه می‌گردد.

۱-۱- شواهد میدانی اندرکنش گسلش سطحی معکوس بر ساختمان‌ها

همانطور که در قسمت قبلی اشاره شده است از سازوکارهای اصلی اندرکنش گسلش و ساختمان انحراف گسلش و قرارگیری ساختمان در فرودیواره گسل است که از نمونه‌های بررسی شده در مطالعات میدانی

اعتقاد بر این است که سختی زیر زمین در انتهای جنوبی کلاس‌های شرقی موجب انحراف گسلش شده باشد. ترک‌هایی نیز در دیوارهای جنوبی نشان‌دهنده اعمال نیرو از طرف گسلش سطحی بر سازه بوده است. انشعابات گسل ذکر شده از کلاس‌های ساختمان شمالی عبور کرده، در آن نقاط و در جایی که گسل کلاس‌ها را به دو نیم کرده، سازه به شدت انعطاف پذیر بوده است [۱۰].

۲-۱- نواحی سطحی اطراف گسل در اندرکنش گسلش سطحی معکوس و ساختمان‌ها

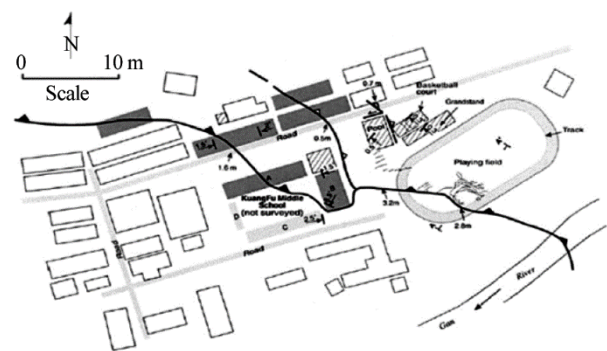
بر اساس مطالعات موسوی [۲۰]، طی دو سری تحلیل‌های عددی انجام شده با نرم‌افزارهای میداس و پلکسیس شناخت ارزنده‌ای از مقابله با خطر گسلش سطحی نرمال و معکوس به دست آمده است. شایان توجه است، عمده شناخت مزبور بر مبنای مطالعات فیزیکی بوده است. طبق نتایج به دست آمده از این مطالعات چهار ناحیه مشخص شده است. در صورتی که سازه در ناحیه شماره ۱ قرار گیرد، با توجه به قرارگیری سازه در فرودپواره، تغییر مکان سطحی آن قدر کم است که خطر چندانی سازه را تهدید نمی‌کند. اگر سازه در ناحیه شماره ۲ قرار گیرد، وجود سازه و فشار سربار آن می‌تواند بر مسیر گسلش تأثیرگذار شود و آن را تغییر دهد، اما در نهایت و با فرض تغییر محل رخنمون گسلش روی سطح زمین سازه در سمت چپ و در ناحیه فرودپواره قرار گرفته و آسیب‌ها کم می‌باشند. در صورت قرارگیری سازه در ناحیه شماره ۳، بیشترین آسیب‌ها برای سازه ایجاد خواهد شد. تغییر مکان و دوران سازه ممکن است آسیب جدی در سازه ایجاد نماید. سازه در این حالت بر روی فرودپواره قرار خواهد گرفت. در نهایت در صورت قرارگیری در ناحیه ۴ نیز، آسیب بر سازه کم خواهد بود. این امر ناشی از دور بودن سازه از محدوده گسلش سطحی و تغییر مکان کم سازه است. شکل (۶)، چهار ناحیه ذکر شده را نشان می‌دهد.

در نمونه دیگر از سازوکار رسیدن گسلش به زیر سازه (شکل ۴)، سازه ۲ متر جابه‌جایی قائم را تجربه کرده است و آسیب‌های سازه‌ای در بخش مرکزی آن نمودار گشته‌اند. اطلاعات کمی از سازه مذکور در دست است، با این وجود شکل‌پذیری کافی در مفاصل، اجازه توزیع بار را به سازه داده و از خرابی‌های مصیبت‌بار جلوگیری کرده است. آن‌چنان‌که در تصویر دیده می‌شود سازه‌های واقع شده در جلوی این ساختمان به‌طور کامل تخریب شده‌اند [۱۰].



شکل (۴): رسیدن گسلش به زیر پی و آسیب جدی ساختمان [۱۰].

مطابق شکل (۵)، سازه مدرسه‌ای که در زلزله چی‌چی، گسلش سطحی از آن عبور نموده، نمونه دیگری از اندرکنش گسلش و پی سطحی است. سازه‌هایی که روی فرادپواره گسل قرار داشته‌اند، یا آسیب ندیده و یا میزان آسیب در آنها جزئی بوده است [۱].



شکل (۵): انحراف گسلش توسط پی و ماندن پی به‌طور کامل در فرادپواره شاخه اصلی گسل [۱].

با این حال، با گسترش گسیختگی به سمت کلاس‌های شرقی و به سمت شمال، شاخه‌هایی از گسل در زمین ایجاد شده است.

نتایج مدل‌های عددی و آزمایشگاهی کمک شایانی کرده است. در تحقیق حاضر، با استفاده از مدل رفتاری مورکلمب، خاک به صورت یک لایه همگن بدون وجود آب در نظر گرفته شده است. پارامترهای خاک در جدول (۱) آمده که منطبق با مشخصات خاک مرجع آناستاسوپولوس و همکاران [۲۲] انتخاب شده است.

جدول (۱): مشخصات خاک استفاده شده در مدل‌سازی با نرم‌افزار پلکسیس [۲۲].

خاک	ماسه فانتابلا (آناستاپولوس و همکاران)
مدل	موهر کولمب
زاویه اصطکاک	۳۷
زاویه اشباع	۰
مدول الاستیک	۶۷۵ Mpa
ضریب پواسون	۰/۳۵

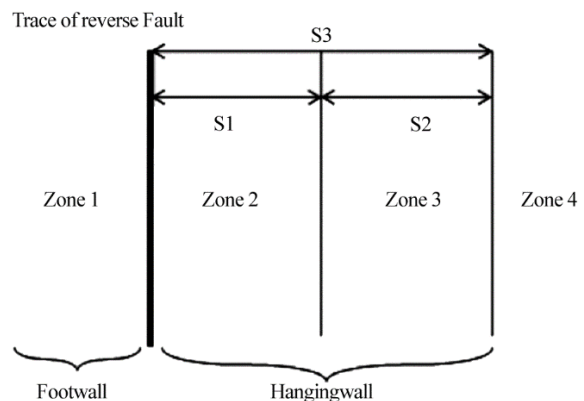
در مدل‌هایی که اندرکنش پی و خاک در گسلش سطحی مورد بررسی قرار گرفته‌اند، پی به صورت المان تیر با مشخصات جدول (۲) مدل‌سازی شده است. شایان توجه است که سختی تیر به گونه‌ای لحاظ شده تا عملکرد یک پی کاملاً صلب در تحلیل‌های مورد بررسی اعمال گردد.

جدول (۲): مشخصات پی در مدل‌سازی با نرم‌افزار پلکسیس [۲۲].

سختی محوری تیر (EA)	$5 \times 10^6 \text{ Kpa}$
سختی خمشی تیر (EI)	$10^9 \text{ KNm}^2/m$

۱-۲- صحت‌سنجی

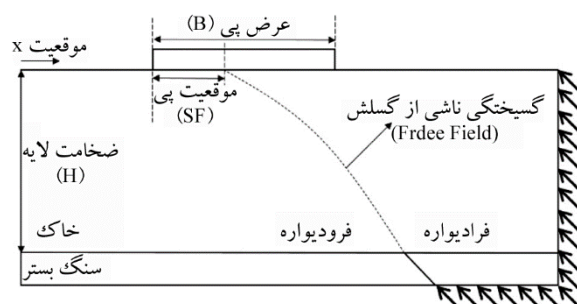
قبل از شروع مراحل تحلیل با استفاده از نتایج کار تحقیقی آناستاسوپولوس و همکاران [۲۲]، مدل مورد استفاده در این تحقیق صحت‌سنجی شد. این محققان، سه برنامه المان محدود PLAXIS، ABAQUS و DYNFLOW را جهت بررسی پدیده انتشار گسلش سطحی مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج به دست آمده از صحت‌سنجی در حالت آزاد، مطابق شکل (۸) تطبیق خوبی را نشان می‌دهد. شکل (۹)، تغییرات کرنش برشی را در مقاله مورد بررسی و مطالعات حاضر نشان می‌دهد. لازم به ذکر است در این



شکل (۶): چهار ناحیه اندرکنش گسلش معکوس و ساختمان [۲۰].

۲- مدل‌سازی عددی

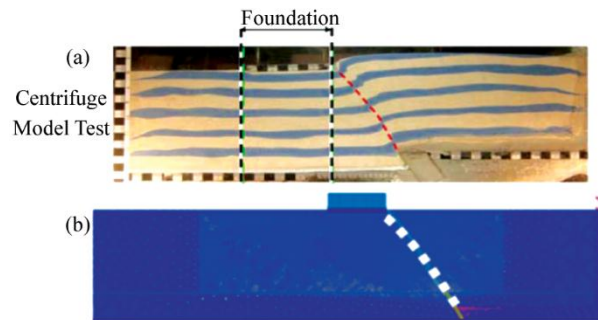
از آنجا که نتایج زیادی از شواهد میدانی و مطالعات گذشته در دسترس بوده و همواره مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی با سختی‌های خاص خود مواجه هستند، رویکرد بررسی عددی مسئله در این مطالعات مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا مدل‌سازی‌ها توسط نرم‌افزار پلکسیس [۲۱] که نرم‌افزار مناسب ژئوتکنیکی می‌باشد، انجام شد. شکل (۷) هندسه مدل در مطالعات حاضر را نشان می‌دهد. در این مدل، طول قسمت متحرک (قسمت اعمال گسلش) برابر با ۲۵ متر و قسمت ثابت آن برابر با ۷۵ متر در نظر گرفته شده است. این مقادیر در تمامی تحلیل‌ها ثابت هستند. زاویه اعمال گسلش نیز در تمامی مدل‌ها ۶۰ درجه در نظر گرفته شده است.



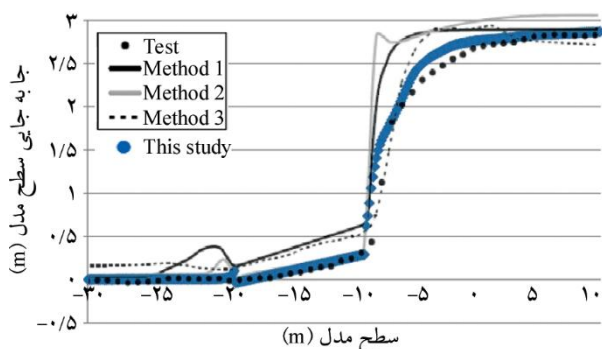
شکل (۷): هندسه مدل در مطالعات حاضر.

محدوده‌ای از سنگ بستر به ارتفاع ۵ متر به صورت صلب با فرض سرعت موج برشی برابر با ۱۰۰۰ متر بر ثانیه مدل شده است. طبق مطالعات انجام شده توسط موسوی [۲۰]، این نوع مدل‌سازی سنگ بستر (تعریف المان درزه)، ناحیه برشی حاصل در نتایج تحلیل‌های عددی را به صورت ناحیه باریکی نشان می‌دهد و در تدقیق

تست آزمایشگاهی مرجع [۲۲] نشان می‌دهد. شایان توجه است که مدل حاضر (شکل ۹b)، موضعی شدن کانتورهای برشی را نیز به وضوح نشان می‌دهد. این کانتورهای برشی از خروجی $\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2}$ نرم‌افزار برداشت شده‌اند.



شکل (۱۰): مدل اندرکنش پی با خاک در گسلش هنگامی که پی در فاصله $S=9.2$ متری قرار دارد، تحت گسلش با زاویه 60° درجه عرض پی 10 متر و بار 90 کیلو پاسکال (شکل a مدل سانتریفیوژ و شکل b مطالعات تحقیق حاضر است).

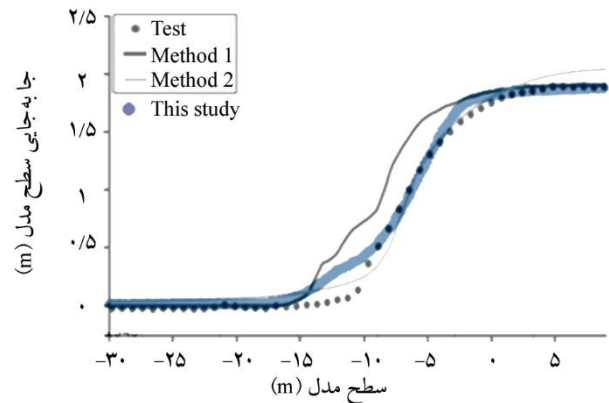


شکل (۱۱): مقایسه مدل اندرکنش پی با خاک در گسلش هنگامی که پی در فاصله $S=9.2$ متری قرار دارد، تحت گسلش با زاویه 60° درجه عرض پی 10 متر و بار 90 کیلو پاسکال (Test مدل سانتریفیوژ، Method 1 مدل پلکسیس و This study مطالعات تحقیق حاضر است).

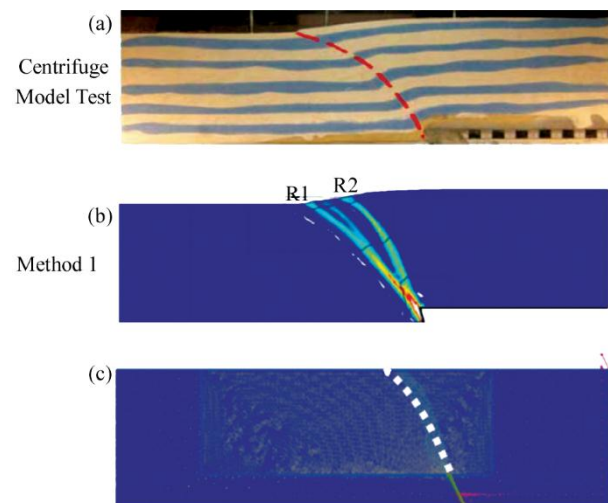
۲-۲- مدل سازی شرایط آزاد (بدون حضور پی)

در ابتدا جهت شناسایی محل رسیدن گسلش به سطح، مدل سازی اولیه در شرایط آزاد (بدون حضور پی) با مدلی با ضخامت آبرفت برابر 25 متر انجام شد. سپس با مدل سازی پی و تغییر موقعیت آن نسبت به حالت آزاد، مسئله مورد بحث و بررسی بیشتر قرار گرفت. در شکل (۱۲) نتایج تحلیل عددی شرایط آزاد (بدون حضور پی) ارائه شده است.

شکل منظور از Method 1، مدل ارائه شده با پلکسیس و Test، نتیجه آزمایش سانتریفیوژ در کار این محققان بوده است [۲۲].

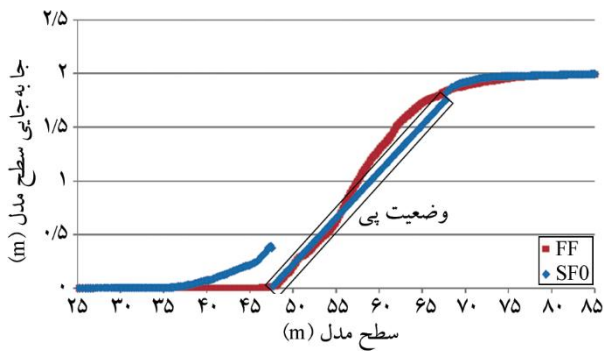
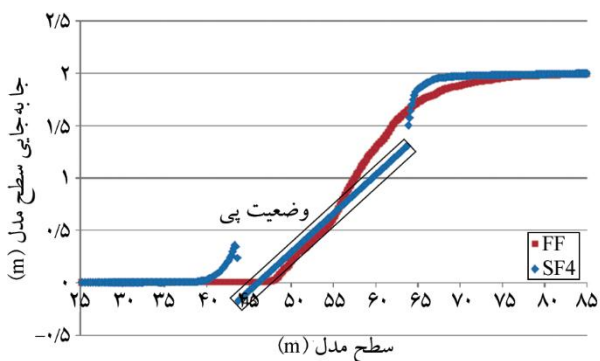
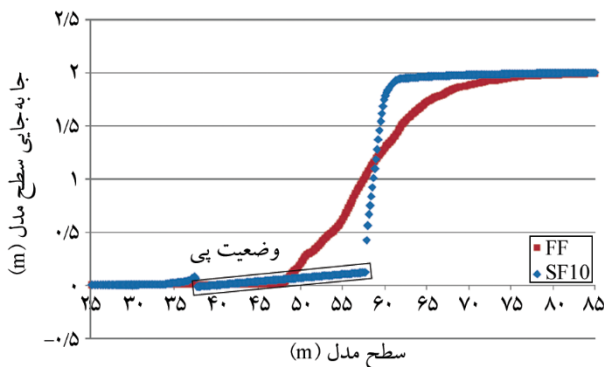
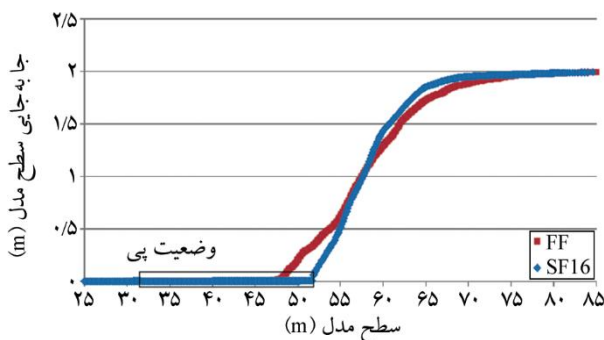
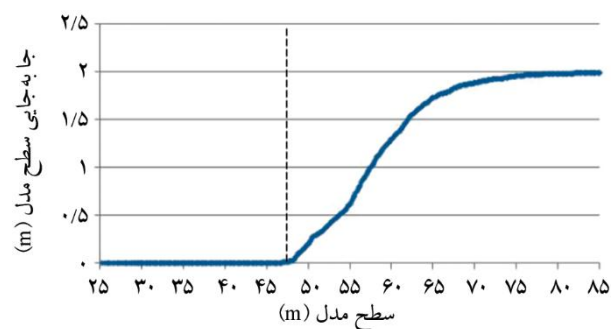


شکل (۸): مقایسه نتایج مدل سازی انتشار گسلش در خاک (تغییر مکان سطحی مدل) در تحقیق حاضر با نتایج کار آناستاسوپولوس و همکاران [۲۲]. (Test مدل سانتریفیوژ، Method 1 مدل پلکسیس، Method 2 مدل آباکوس و This study تحقیق حاضر است).



شکل (۹): مقایسه نتایج مدل سازی انتشار گسلش در خاک (نمایش کانتورهای کرنش برشی) (a) نتایج مدل سازی فیزیکی با سانتریفیوژ، (b) مدل سازی عددی با پلکسیس در کار آناستاسوپولوس و همکاران [۲۲]، (c) تحقیق حاضر.

همچنین در تحقیق حاضر اقدام به صحت سنجی مدلی با حضور پی به عرض 10 متر و بار 90 کیلو پاسکال نیز گردید. نتایج حاصل از این صحت سنجی در شکل (۱۰) قابل مشاهده است. شکل (۱۱) تطابق خوبی را بین نتیجه مطالعات حاضر و


 شکل (۱۳): تغییر مکان سطحی برای $SF=0$.

 شکل (۱۴): تغییر مکان سطحی برای $SF=4$.

 شکل (۱۵): تغییر مکان سطحی برای $SF=10$.

 شکل (۱۶): تغییر مکان سطحی برای $SF=16$.


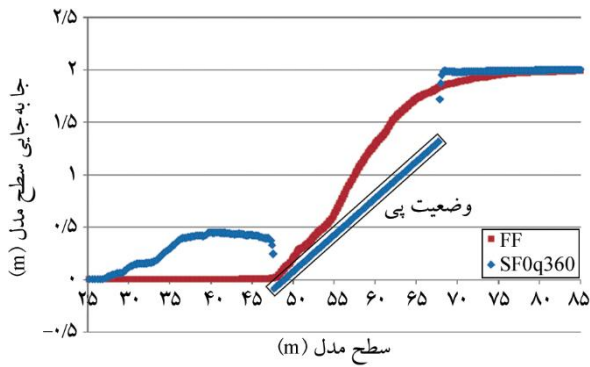
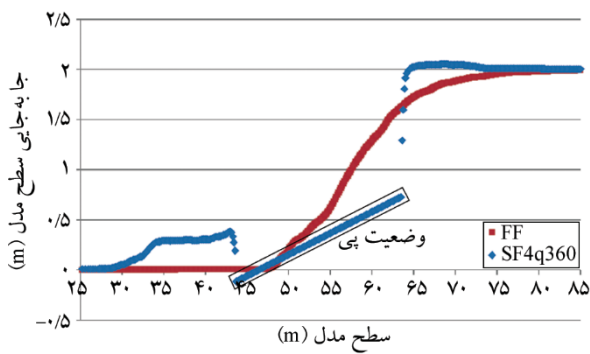
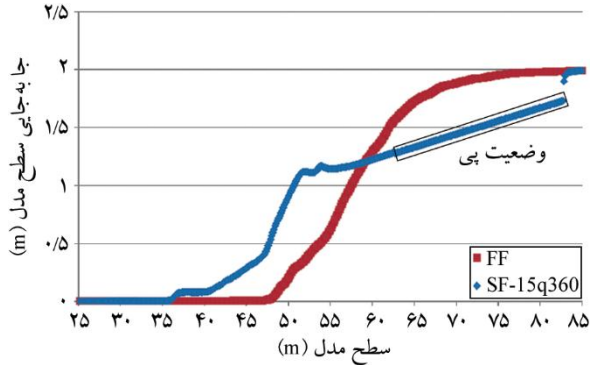
شکل (۱۲): انتشار گسلش معکوس ۶۰ درجه در شرایط آزاد (بررسی موقعیت رسیدن گسلش به سطح زمین).

۲-۳- بررسی اثر موقعیت پی در اندرکنش با گسلش معکوس

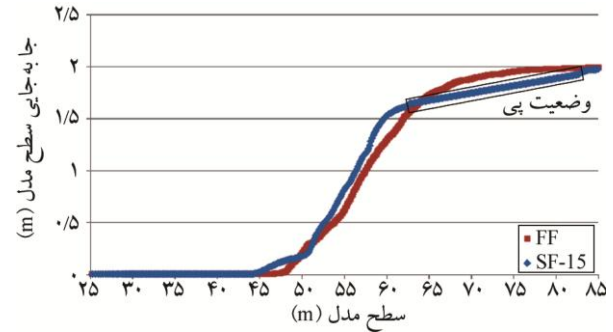
در این مرحله، پس از مشخص شدن موقعیت گسلش در شرایط آزاد، پی در چهار موقعیت (SF) برابر با ۰، ۴، ۱۰ و ۱۶ متری قرار گرفته و تحلیل شد. لازم به ذکر است که در تمامی این تحلیل‌ها عرض پی ۲۰ متر و بار اعمال شده ۹۰ کیلوپاسکال می‌باشد که معادل یک ساختمان ۹ طبقه است. نتایج این سری تحلیل‌ها در شکل‌های (۱۳-۱۶)، در مقایسه با حالت آزاد، قابل مشاهده است. در این تحلیل‌ها، بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای در راستای ساخت‌وساز در پهنه‌های گسلی، با قرار دادن پی در موقعیت‌های مختلف، رسیدن گسلش به زیر پی مورد بررسی قرار گرفته و میزان تغییر شکل‌های پی نشان داده شده است. شروع تغییر مکان‌های سطحی در شرایط آزاد در نمودارها با خط چین نشان داده شده است.

بر اساس نتایج به دست آمده در صورت قرارگیری پی در $SF=0$ ، پی سازه به میزان $4/94$ درجه و در صورت قرارگیری پی در $SF=4$ ، پی به میزان $4/2$ درجه دچار چرخش شده است. با افزایش فاصله پی از محل رسیدن گسلش به سطح در حالت آزاد یعنی در فاصله‌های ۱۰ و ۱۶ متری مقدار این چرخش کاهش یافته و به ترتیب به $0/37$ و $0/28$ درجه رسیده است.

در ادامه با در نظر گرفتن محدودیت آیین‌نامه‌ای نظیر آنچه در بخش نخست مقاله اشاره شده است، با فرض فاصله ۱۵ متری از محل رسیدن گسلش به سطح، مدل‌سازی انجام گرفت (شکل ۱۷).


 شکل (۱۸): تغییر مکان سطحی برای $SF=0$ با بار ۳۶۰ کیلوپاسکال.

 شکل (۱۹): تغییر مکان سطحی برای $SF=4$ با بار ۳۶۰ کیلوپاسکال.

 شکل (۲۰): تغییر مکان سطحی برای $SF=-15$ با بار ۳۶۰ کیلوپاسکال.

میزان چرخش محاسبه شده در پی، $0/8$ درجه اندازه‌گیری شده است. به صورت خلاصه نتایجی از تأثیر موقعیت پی در میزان چرخش پی و موقعیت رسیدن گسلش معکوس به سطح در جدول (۳) آمده است.


 شکل (۱۷): تغییر مکان سطحی برای $SF=-15$.

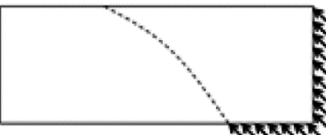
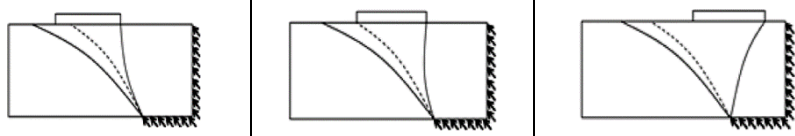
۴-۲- بررسی اثر بار پی در گسلش معکوس

با بررسی نتایج حاصل از تغییر موقعیت پی، ملاحظه شد که بیشترین میزان چرخش در SF های صفر و چهار متری اتفاق می‌افتد. از طرفی جهت بررسی راه‌حل‌های آیین‌نامه‌ای همچون معیار عدم ساخت و ساز در فاصله معین، با افزایش بار اعمال شده به پی تا ۳۶۰ کیلوپاسکال برای پی‌هایی با SF چهار، صفر و ۱۵- متر مطابق شکل‌های (۱۸) تا (۲۰) بررسی‌های تکمیلی انجام شد. نتایج انحراف گسلش در حضور پی در مقایسه با شروع تغییر مکان‌های سطحی در شرایط آزاد که در نمودارها با خط چین نشان داده شده است آمده است. خلاصه نتایج تأثیر بار پی در میزان چرخش پی و موقعیت رسیدن گسلش معکوس به سطح در جدول (۴) آمده است.

جدول (۳): اثر موقعیت پی بر مسیر انتشار گسلش معکوس با بار ۹۰ کیلوپاسکال.

					Free- Field
$SF=-15$	$SF=16$	$SF=10$	$SF=4$	$SF=0$	SF
$0/8$	$0/28$	$0/37$	$4/2$	$4/94$	میزان چرخش پی (درجه)
					مسیر انتشار گسلش معکوس

جدول (۴): اثر موقعیت پی بر مسیر انتشار گسلش معکوس با بار ۳۶۰ کیلوپاسکال.

			Free-Field
SF=4	SF=0	SF=-15	SF
۲/۴	۴	۱/۲	میزان چرخش پی (درجه)
			مسیر انتشار گسلش معکوس

مسیر باند برشی ایجاد شده را به سمت چپ پی منحرف کرده است. همچنین، محدوده وسیع تری از خاک اطراف پی را تحت تأثیر قرار داده و موجب بالازدگی خاک در این نواحی شده است. البته در این حالت بروز باند برشی ثانویه در سمت راست پی مطابق جدول (۵) دیده می‌شود که در حالت دیگری که گسلش به زیر پی رسیده است (SF=4) بروز این باند برشی ثانویه جدی‌تر شده و مطابق جدول (۵) می‌توان آن را مسیر گسلش اصلی تلقی نمود. همچنین در بررسی افزایش سربار برای فاصله ۱۵ متری (بررسی معیار عدم ساخت‌وساز)، میزان چرخش پی افزایش یافته است. این افزایش سربار موجب ایجاد باند برشی ثانویه شده است (جدول ۵).

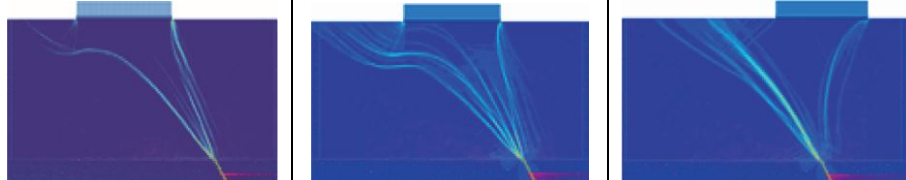
نکته بسیار حائز اهمیت آن است، در حالتی که پی در ناحیه اثر گسلش سطحی واقع شده (SF=0m, SF=4m)، افزایش سربار موجب ایجاد فشار بیشتر بر روی پی شده و میزان انحنای سطح تغییر شکل یافته را کاهش می‌دهد؛ اما در حالت بررسی معیار عدم ساخت‌وساز، با ایجاد فاصله ۱۵ متری، پی به سمت فرادیواره گسل جابه‌جا شده و افزایش سربار موجب افزایش چرخش شده است (جدول ۴).

همانطور که در جدول (۴) دیده می‌شود با افزایش میزان سربار در SF=0 و SF=4 مقدار چرخش پی کاهش یافته و همچنین مطابق شکل‌های (۱۸) و (۱۹) در مقایسه با شکل‌های (۱۳) و (۱۴)، محدوده وسیعی از اطراف پی تحت تأثیر قرار گرفته و موجب بالازدگی خاک در این نواحی شده است.

۳- بحث و بررسی نتایج

همان‌طور که در بررسی اثر موقعیت پی، هنگام وقوع گسلش سطحی مشاهده شد، با جابه‌جایی پی به سمت فرودیاره، میزان چرخش پی کاهش یافته و این مقدار با فاصله گرفتن پی از محل رسیدن گسلش به سطح زمین در شرایط آزاد کمتر می‌شود. مطابق جدول (۳)، چنین شرایطی مسیر انحراف باند برشی در گسلش سطحی را به سمت راست پی منحرف کرده است. در ادامه با بررسی پارامتر سربار پی، هنگام وقوع گسلش سطحی مشاهده شد زمانی که گسلش به زیر پی رسیده (SF=0) با افزایش میزان سربار، مطابق جدول (۴)، مقدار چرخش پی کاهش یافته و

جدول (۵): کانتورهای برشی در بر مسیر انتشار گسلش معکوس با بار ۳۶۰ کیلوپاسکال.

SF=4	SF=0	SF=-15	SF / سربار
			۳۶۰ کیلوپاسکال

- Design of Buildings: Standard No. 2800-91*. Iran, 4th Edition.
3. Eurocode E. (1994) *Structures in Seismic Regions. Part 5: Foundations, Retaining Structures and Geotechnical Aspects*. Commission of the European Communities, Brussels.
 4. Anastasopoulos, I. and Gazetas, G. (2007) Foundation-structure systems over a rupturing normal fault: Part I. Observations after the Kocaeli 1999 earthquake. *Bullition of Earthquake Engineering*, **5**(5), 253-275.
 5. Bray, J.D., Seed, R.B., Cluff, L.S., and Seed, H.B. (1994a) Earthquake Fault Rupture Propagation through Soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **120**(3), 543-561.
 6. Bray, J.D. (2009) *Designing Buildings to Accommodate Earthquake Surface Fault Rupture*. 41084 ed. San Francisco, California, ASCE.
 7. Faccioli, E., Anastasopoulos, I., Callerio, A., and Gazetas, G. (2008) Case histories of fault-foundation interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **6**(4), 557-583.
 8. Jafari, M.K. and Moosavi, S.M. (2008) Lessons to be learned from surface fault ruptures in Iran earthquakes. *Sixth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering and Symposium in Honor of Professor James K. Mitchell*, Arlington, VA, USA.
 9. 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. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **84**(3), 547-561.
 10. Lettis, W. and Associates (2003) *Surface Deformation Produced by the 1999 Chi-Chi (Taiwan) Earthquake and Interactions with Built Structures*. U.S. Geological Survey, National Earthquake Hazards Reduction Program.
 11. Bransby, M.F., Davies, M.C.R., El Nahas, A., and Nagaoka, S. (2008) Centrifuge modelling of reverse fault-foundation interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*. **6**(4), 607-628.
 12. Cole, D.A., Jr. and Lade, P.V. (1984) Influence

۴- نتیجه گیری

بررسی‌های انجام شده در تحقیق حاضر نشان می‌دهد که موقعیت پی و سربار تأثیر شایان توجهی در سازوکارهای اصلی اندرکنش گسلش و ساختمان دارد. نتایج مدل عددی نشان می‌دهد در موقعیت‌های رسیدن گسلش‌های سطحی به زیر ساختمان افزایش سربار موجب ایجاد فشار بیشتر بر روی پی شده و میزان چرخش پی را کاهش می‌دهد اما چنین امری در خصوص ساختمان‌هایی که با رعایت معیار عدم ساخت‌وساز در برخی آیین‌نامه‌های لرزه‌ای در فاصله ۱۵ متری از موقعیت رسیدن گسلش سطحی در شرایط آزاد (بدون حضور پی) قرار می‌گیرند شرایط متفاوتی را تجربه می‌نماید و افزایش سربار موجب افزایش چرخش پی می‌تواند شود. از این رو نیاز به بررسی‌های بیشتر در مواردی که محدودیت فاصله برای ساخت‌وساز در آیین‌نامه‌های لرزه‌ای مطرح شده بیش از پیش نمایان می‌شود و به نظر می‌رسد که معیار عدم ساخت‌وساز در فاصله‌ای از گسل الزاماً ایمنی کامل سازه را تأمین نمی‌نماید.

تشکر و قدردانی

این تحقیق در راستای برنامه کلان پژوهشی پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله در جهت ساخت‌وساز ایمن در پهنه‌های گسلی و در مرحله ایده‌پردازی پروژه تحقیقاتی ۶۵۲۴ تحت عنوان «کاهش مخاطرات گسلش سطحی برای ساخت ساختمان‌ها در پهنه‌های گسلی» و با حمایت پژوهشگاه انجام شده است.

مراجع

1. Kelson, K.I., Kang, K.H., Page, W.D., Lee, C.T., and Cluff, L.S. (2001) Representative styles of deformation along the Chelungpu fault from the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake: Geomorphic characteristics and responses of man-made structures. *Bulletin of Seismological Society America*, **91**(5), 930-952.
2. Building and Housing Research Center (2012) *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant*

- Engineering Techniques*. Ph.D. Thesis, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran (*in Persian*).
21. Plaxis 2016 (1987) Netherlands: Technical University of Delta.
 22. Anastasopoulos, I., Callerio, A., Bransby, M., Davies, M., 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**, 645-675.
 - Zones in Alluvium Over Dip-Slip Faults. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **110**(5), 599-615.
 13. 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.
 14. 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.
 15. Tani, K., Ueta, K., and Onizuka, N. (1996) Discussion on "Earthquake fault rupture propagation through soil" by J.D. Bray, R.B. Seed, L.S. Cluff and H.B. Seed. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **122**(1), 80-82.
 16. Bray, J.D., Seed, R.B., and Seed, H.B. (1994b) Analysis of earthquake fault rupture propagation through cohesive soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **120**(3), 562-580.
 17. Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Bransby, F., Davies, M.C.R., and Nahas, E.I.A. (2007) Fault rupture propagation through sand: finite-element analysis and validation through centrifuge experiments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. American Society of Civil Engineers (ASCE). **133**(8), 943-958.
 18. Zanjani, M.M. and Soroush, A. (2014) Numerical modeling of fault rupture propagation through two-layered sands. *Scientia Iranica, Transaction A, Civil Engineering*, **21**(1), 19.
 19. Fadaee, M., Jafari, M.K., Kamalian, M., and Mustafa, S.A. (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*, **14**(4), 271.
 20. Moosavi, S.M. (2010) *Earthquake Fault Rupture Propagation through Soil: Reduction of Seismic Risk through the Application of Geotechnical*

Numerical Analysis of Reverse Fault Rupture Hazards on Buildings

Mahtab Shiravi¹, Mojtaba Moosavi^{2*} and Mohsen Ahmadnezhad³

1. M.Sc. Graduate of Earthquake Engineering, University of Mazandaran, Babolsar, Iran
2. Assistant Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran,
* Corresponding Author, email: Moosavi@iiees.ac.ir
3. Lecturer, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

The destructions of earthquakes in Turkey and Taiwan (1999) have increased the interest of investigation on structures behavior in surface fault rupture propagation. Therefore, many studies have been accomplished to investigate the fault rupture and shallow foundations interaction. Based on the fact that a lot of structures are constructing and they have the possibility of facing fault emergence hazards due to the uncertainty in exact locating of surface fault emergence, the investigation on surface fault rupture hazards can give a better insight to explicit this issue and mitigate the damage to constructions adjacent or in active fault zones. In this research, numerical investigations on surface fault rupture hazards based on the evaluation of earthquake's field studies and seismic codes limitations for constructions in active fault zones have been employed.

Based on field studies observations, four different fault zones with different levels of hazard possibility for structures have been obtained. Some of the field studies results have been reviewed in this paper.

For numerical studies, the two-dimensional, finite element software (Plaxis) was employed to study the surface fault rupture mechanism beneath the foundation in four different locations. In the mentioned Plaxis model, a rigid foundation with breadth, $B=20$ and embedment depth, $D = 0$ m was used. The model height was 25 m, and in order to model the bedrock, 5 m layer with $V_s= 1000$ m/s was considered beneath the model. It should be mentioned that the fault has a dip angle, $\alpha=60^\circ$ at the rock-soil interface, the length of fault propagation upward from the bedrock is 25 m and the fixed part of the model is 75 m.

After locating the fault rupture trace on the ground in free-field condition, the foundation was located in four different positions in respect of free field and bearing pressure, $q=90$ kpa (9-storey building) was imposed on all of them. Foundation rotations were calculated in these models and compared together. By moving the foundation toward the foot wall, the rotation amount decreased. In the following, to investigate the effect of load on reverse faulting, the bearing pressure was increased to 360 kpa for two foundation locations and the results discussed. Decreased foundation rotation and soil uplift in surrounding area were really noticeable.

In order to investigate the seismic code limitations, two different models were made. The foundation was located in hanging wall at the distance of 15 m from free field location. In these models, bearing pressure of 90 and 360 kpa were examined. In this case, by increasing the bearing pressure, the amount of foundation rotation increased.

The field studies results indicate, foundation location and structure weight have important impact on structure damages during surface fault ruptures. As mentioned, these results have been achieved in this paper. Briefly, the results of numerical models demonstrate that seismic codes limitations such as setback do not have necessarily safe construction outcome.

Keywords: Surface Fault Rupture, Foundation, Interaction, Setback, Numerical Analysis.