

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱. مقدمه	۳
۲-۱. تعریف مسئله	۸
۳-۱. روش تحقیق	۸
فصل دوم: مروری بر کارهای گذشته و مشاهدات میدانی	۱۰
۱-۲. مقدمه	۱۲
۲-۲. سازه‌ها بر روی فنداسیون‌های پیوسته و صلب	۱۲
۳-۲. سازه‌ها بر روی فنداسیون‌های انعطاف پذیر	۲۰
۴-۲. سازه‌ها بر روی تکیه‌گاه‌های گسسته	۲۷
فصل سوم: روش‌های مدل‌سازی فیزیکی گسلش و تحلیل‌های عددی مربوط به آنها	۳۰
۱-۳. مقدمه	۳۲
۲-۳. مدل‌سازی اندرکنش پی با گسلش معکوس با استفاده از آزمایش g-۱	۳۵
۱-۲-۳. مصالح استفاده شده	۳۵
۲-۲-۳. نتایج آزمایش	۳۶
۳-۲-۳. پیشنهادات طراحی	۳۹
۳-۳. آزمایش مدل‌سازی سانتریفیوژ (برای بررسی اندرکنش پی با گسلش معکوس)	۴۰
۱-۳-۳. مشخصات مدل	۴۰
۲-۳-۳. ابزار و هندسه مدل	۴۱
۳-۳-۳. مصالح استفاده شده در آزمایش ها	۴۲
۴-۳-۳. روش انجام آزمایش	۴۳
۵-۳-۳. نتایج حاصل از آزمایش	۴۳
۱-۵-۳-۳. شرایط آزاد میدانی (بدون پی)	۴۳

- ۳-۳-۵-۲. اندرکنش پی با گسلش..... ۴۶
- ۳-۳-۵-۳. اثر فشار تکیه‌گاهی q روی اندرکنش گسل و فنداسیون..... ۴۹
- ۳-۳-۵-۴. اثر صلبیت پی روی اندرکنش گسل و پی (EI)..... ۵۴
- ۳-۳-۵-۵. تأثیر هندسه فنداسیون (S و B) روی اندرکنش گسل و پی..... ۵۵
- ۳-۴. سه مفهوم برای طراحی..... ۵۹
- فصل چهارم: اعتبارسنجی داده‌های آزمایشگاهی..... ۶۱
- ۴-۱. پیشگفتار..... ۶۴
- ۴-۲. تحلیل عددی (آزمایش g-1)..... ۶۴
- ۴-۳. تحلیل عددی (آزمایش سانتریفیوژ)..... ۶۶
- ۴-۳-۱. روش المان محدود- پلکسیس..... ۶۶
- ۴-۳-۲. روش المان محدود- آباکوس..... ۶۸
- ۴-۳-۳. مقایسه بین روش‌های آنالیز عددی..... ۶۹
- ۴-۳-۳-۱. آزمایش ۲۸ - گسل معکوس ۶۰ درجه..... ۶۹
- ۴-۳-۳-۲. آزمایش ۲۹ - گسل معکوس ۶۰ درجه..... ۷۱
- فصل پنجم: مدل‌سازی عددی گسلش معکوس 60° ۷۴
- ۵-۱. مدل‌سازی و تحلیل عددی..... ۷۶
- ۵-۱-۱. مشخصات مدل و مصالح..... ۷۶
- ۵-۱-۲. شبکه‌بندی المان محدود تولید شده برای آنالیز عددی..... ۷۶
- ۵-۲. لیست تحلیل‌های انجام شده..... ۷۷
- ۵-۳. گسترش گسیختگی در شرایط آزاد میدانی..... ۷۸
- ۵-۴. اثر فشار سربار فنداسیون..... ۷۹
- ۵-۴-۱. مقایسه چرخش فنداسیون در تحلیل ۳ و ۲..... ۸۰
- ۵-۵. بررسی اثر مکان فنداسیون..... ۸۱
- ۵-۵-۱. مقایسه چرخش فنداسیون در تحلیل‌های ۴ و ۵..... ۸۳

۸۴	۶-۵. اثر عرض فنداسیون.....
۸۵	۷-۵. اثر توپوگرافی سطح زمین.....
۹۰	۸-۵. اثر صلبیت خمشی فنداسیون.....
۹۲	۹-۵. اثر حضور شمع.....
۹۴	فصل ششم: نتایج.....
۹۵	۱-۶. نتایج.....
۱۰۰	منابع و مراجع.....

فصل اول:

مقدمه

۱-۱. مقدمه

گسل یکی از پدیده‌های طبیعی است که دو تکه از زمین بر روی یکدیگر می‌لغزند و یا بطور کامل از هم جدا می‌شوند، این پدیده در بعضی از مواقع باعث وارد آمدن خسارات جانی و مالی فراوانی می‌شود. در مناطق زلزله‌خیز با وقوع زلزله، گسل‌ها فعال می‌شوند و دو تکه از زمین در طرفین گسل بر روی هم می‌لغزند که با توجه به این لغزش گسل‌ها به انواع زیر تقسیم می‌شوند شکل (۱-۱):

- گسل امتداد لغز^۱: صفحات طرفین گسل در امتداد یکدیگر می‌لغزند.
- گسل لغزشی نرمال^۲: صفحه‌ی بالایی گسل^۳ (HW) روی صفحه‌ی زیرین گسل^۴ (FW) به سمت پایین می‌لغزد. زاویه گسل با افق کمتر از ۴۵ درجه.
- گسل لغزشی معکوس^۵: صفحه‌ی بالایی گسل (HW) روی صفحه‌ی زیرین گسل (FW) به سمت بالا می‌لغزد. زاویه گسل با افق بیشتر از ۴۵ درجه.
- گسل لغزشی جدا شونده اریب^۶: صفحات گسل بطور کامل همراه با حرکت قائم، افقی و امتداد لغز از هم جدا می‌شوند. خطر آفرینی این نوع گسل از سه مورد قبلی بیشتر است.

فعال شدن گسل‌ها باعث اعمال جابجایی‌های تکتونیکی به سازه‌های موجود در سطح خاک می‌شود، که بسته به نوع گسل این جابجایی‌ها می‌تواند به سمت بالا یا به سمت پایین باشد، زمین لرزه‌های سال ۱۹۹۹ در ترکیه و تایوان سوابق متنوعی از سازه‌هایی که در معرض جابجایی‌های بزرگ تکتونیکی بودند را ارائه کرد و نیرویی دوباره به اهمیت این موضوع در انجمن مهندسی زمین لرزه بخشید. در حالیکه بسیاری سازه‌ها خراب شده و یا حتی فروریخته بودند، نمونه‌های زیاد دیگری از عملکردهای رضایتبخش وجود داشت [۱].

¹ Strike-slip fault

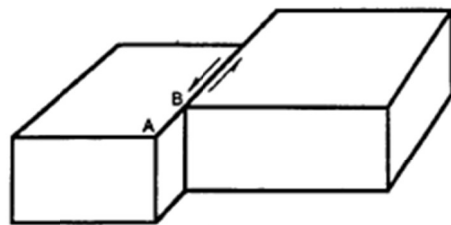
² Normal-slip fault

³ Hanging Wall

⁴ Foot wall

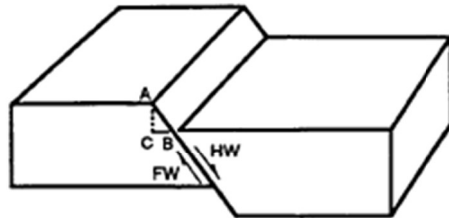
⁵ Reverse-slip fault

⁶ Left-oblique-slip fault



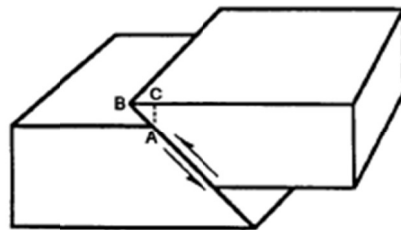
گسل امتداد لغز

AB = امتداد لغزش صفحات = AB



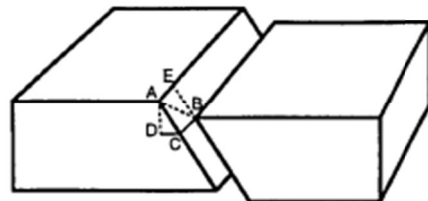
گسل لغزشی نرمال

AB = امتداد لغزش قسمت بالایی گسل
AC = مولفه قائم جانبی گسل
BC = گسش افقی گسل



گسل لغزشی معکوس

AB = امتداد لغزش معکوس لایه بالایی گسل
AC = مولفه قائم جانبی گسل
BC = کوتاه شدگی افقی گسل



گسل لغزشی جداشونده اریب

AB = لغزش اریب قسمت بالایی گسل
AC = امتداد لغزش رو به پایین گسل
AE = مولفه امتداد لغز گسل
AD = مولفه قائم جانبی گسل
DC = گسش افقی گسل

شکل (۱-۱): انواع گسل با مشخصات و امتداد حرکت صفحات آنها

شگفت انگیزتر این بود که در حالت‌های خاصی پارگی گسل سطحی به طور موثر، به علت حضور یک سازه منحرف شده بود. به منظور ایجاد یک دید عمیق‌تری نسبت به کنترل مکانیسم این نوع اندرکنش بین سازه و زمین، در این مطالعه گزارشی از سوابق میدانی اندرکنش بین فنداسیون و گسیختگی ناشی از گسل (گسلش) را از زلزله کواکالی^۱ به بزرگی ۷/۴ ریشتر (۱۷ آگوست) سال ۱۹۹۹ در ترکیه و زلزله دازسی-بلو^۲ به بزرگی ۷/۱ ریشتر (۱۲ نوامبر) سال ۱۹۹۹ در ترکیه و زلزله چی-چی^۳ به بزرگی ۷/۶ ریشتر (۲۱ سپتامبر) سال ۱۹۹۹ در تایوان و گسلش سطحی در کوه اتنا^۴، انتخاب شده است.

¹Kocaeli

²Duzce-Bolu

³chi-chi

⁴Etna

زیر مجموعه‌ای از سوابقی که در این اینجا ارائه شده، آنالیز عددی با استفاده از روش‌هایی است که در مقاله کمپانین^۱ آورده شده است. این سوابق نشان می‌دهد که سازه‌های نسبتاً سنگین که توسط فنداسیون صلب و پیوسته‌ای پشتیبانی می‌شوند، ممکن است گسیختگی گسل را منحرف کنند. چنین سازه‌هایی بدون عیب ساختاری قابل توجهی، در معرض چرخش صلب بدنه-ای هستند. در مقابل، سازه‌ها بر روی فنداسیون‌های انعطاف‌پذیر یا منفرد مستعد خرابی قابل توجهی هستند.

در طول چند دهه گذشته تحقیقات، عمدتاً بر روی پاسخ دینامیکی سازه‌ها و سیستم به زمین لرزه‌های قوی متمرکز شده است. این نوسانات دینامیکی ناپایداری که به صورت متوالی هنگامی که گسیختگی گسترش می‌یابد و لغزش صفحه‌ای اتفاق می‌افتد تولید می‌شوند، نتیجه‌ای از امواج منشا گرفته از تکه‌های مختلف یک گسل لرزه‌ای هستند. در مقابل، جامعه مهندسی توجه کمتری به نتیجه مستقیم روند گسترش گسیختگی گسلش کرده است.

این به دلیل این واقعیت است که امواج زمین لرزه مسافت زیادی را طی کرده در حالیکه نواحی وسیعی را تحت تاثیر قرار می‌دهند، حال آنکه انحراف گسل پایدار فقط زمانی که گسیختگی گسل در سطح زمین و در امتداد گسل بیرون می‌زند، مهم هستند.

نوشته‌های گسترده‌ای بر روی پدیده انتشار گسیختگی گسل از میان رسوب‌های خاکی، در دسترس است. مطالعات میدانی بر روی زمین لرزه دکسی^۲ در سال ۱۹۵۴ در نوادا^۳، یکی از اولین زمین لرزه‌های گسلی طبیعی است که مورد بررسی قرار گرفت، اثبات کرد که:

- یک گسل طبیعی متمایل است، هنگامی که به سمت زمین گسترش می‌یابد، به میزان زیادی به صورت عمودی منتشر شود.
- پرتگاه‌های گسلش سطحی ممکن است به صورت قابل توجهی کمتر از جابجایی اعمال به سنگ بستر باشد.

^۱Companion

^۲Dixie

^۳Nevada

- خاک های سست و دگر دیس پذیر ممکن است جابجایی نسبی القایی گسل را جذب کرده و آن را به نشست تفاضلی توزیع شده از سطح زمین تبدیل کنند.
- با توجه به شکل گیری گسیختگی های ثانویه و فرورفتگی های گرانشی پوسته زمین، خمیدگی سطحی ممکن است وسعت داده شود.

مشاهدات مشابهی بعد از زلزله سال ۱۹۵۹ در مونتانا^۱ به بزرگی ۷/۱ ریشتر و زلزله ایداهو^۲ در آمریکا به بزرگی ۷/۳ ریشتر به وجود آمدند [۳ و ۴].

زلزله میکاوا^۳ در ژاپن به بزرگی ۷/۱ ریشتر در سال ۱۹۴۵ شاید یکی از اولین زلزله های گسل رانشی بود که از لحاظ انتشار گسیختگی مورد مطالعه قرار گرفت و به وضوح نشان داد که گسل های رانشی معمولاً به سوی دیوار پایینی گسل گسترش می یابند و هنگامی که به سطح زمین نزدیک می شوند به طور تصاعدی پهن تر می شوند [۵].

مشاهدات میدانی بعد از زلزله به بزرگی ۷/۷ ریشتر در سال ۱۹۵۲ [۶]، زلزله مونتگو^۴ در آلاسکا به بزرگی ۸/۴ ریشتر در سال ۱۹۶۷ [۷]، زلزله سان فرنادو^۵ به بزرگی ۶/۷ ریشتر در سال ۱۹۷۱ [۸]، زلزله ال-اصنام^۶ الجزایر به بزرگی ۷/۰ ریشتر در سال ۱۹۸۰ [۱]، و زلزله اسپیتاک^۷ در آمریکا به بزرگی ۶/۸ ریشتر در سال ۱۹۸۸ [۹]، دارای اهمیت مشابهی بودند. از سوی دیگر، تا همین اواخر شواهد کمی درباره اندرکنش پی ها و سازه ها با گسیختگی های گسل سطحی در دسترس بود.

یکی از مثال هایی که در این باره می توان زد، پی ساختمان مرکزی بانکو در نیکاراگوئه [۱۰]، یک ساختمان ۱۵ طبقه بتنی مستحکم که به شدت به وسیله لرزش شدید زمین طی زلزله مونتگو به بزرگی ۶/۳ ریشتر خراب شده بود. پی این ساختمان توسط گسیختگی گسل امتداد لغز قطع شده بود. جالب توجه اینکه، پی بدون هیچ آسیبی به جز چند ترک مویی در برابر گسلش

¹Montana

²Idaho

³Mikawa

⁴Montague

⁵San Fernando

⁶El-Asnam

⁷Spitak

حفظ شده بود. مهم‌تر این که، سازه‌های محکم (ضخامت دیوارها ۰/۴۵ متر) ظاهراً قادر بودند که گسلش را منحرف کنند. زمین لرزه‌های کوهکالی، دازسی-بلو و چی-چی در سال ۱۹۹۹ در ترکیه و تایوان، به اهمیت این موضوع نیرویی دوباره بخشید. در این حوادث، تعداد زیاد و طیف وسیعی از سازه‌ها در محدوده‌ای از ۲ تا ۸ متر، در معرض جابه‌جایی‌های تکتونیکی قرار گرفتند.

اگرچه تعداد زیادی از سازه‌ها خراب یا به شدت آسیب دیده بودند، ولی حالت‌هایی از عملکردهای رضایتبخش وجود داشت که نظریات قبلی، مبنی بر اینکه سازه‌ها را می‌توان طوری طراحی کرد تا در برابر جابه‌جایی‌های تکتونیکی مقاومت کنند، تایید می‌کرد [۱۱].

مطالعات آزمایشگاهی از نوع ۱-g توسط آقای موسوی و همکارانش در سال ۲۰۱۰ انجام شد که در این مطالعه به بررسی اثر مکان فنداسیون و فشار سربار فنداسیون بر روی این اندرکنش پرداخته شده بود. همچنین مطالعات عددی با استفاده از نرم افزار پلکسیس^۱ برای پیش بینی نقطه اثر گسیختگی در شرایط آزاد میدانی و همچنین تاثیر حضور فنداسیون بر روی مکان نقطه اثر انجام شده بود [۱۲]. برانس بای^۲ و همکارانش مطالعات آزمایشگاهی از نوع سانتریفیوژ برای بررسی این مسئله انجام دادند و اثر مکان، عرض، فشار تکیه‌گاهی و صلبیت خمشی فنداسیون بر روی این اندرکنش را بررسی کردند [۱۳].

دانسن و لیفبور^۳ در مقیاس کوچک و با استفاده از آنالیزهای المان محدود برای بررسی اندرکنش بین گسل امتداد لغز و سازه‌های صلب مدفون، نتیجه گرفتند که اگر سازه‌ها به صورت مناسب طراحی شده باشند، ممکن است گسیختگی گسلی را منحرف و در برابر جابه‌جایی بدون آسیبی حفظ شوند [۱۴]. آناستاسوپولوس^۴ و گزتاس^۵ و همکارانشان در زمینه تحلیل عددی این مسئله با استفاده از نرم افزار آباکوس^۶ و پلکسیس انجام داده و به بررسی اثر مکان فنداسیون و ضخامت فنداسیون بر روی این اندرکنش پرداختند [۱۵].

¹ PLAXIS

² Bransby

³ Duncan and Lefebvre

⁴ Anastasopoulos

⁵ Gazetas

⁶ ABAQUS

۱-۲. تعریف مسئله

در پروژه‌های عمرانی یکی از پارامترهای مهم، مکان قرارگیری سازه می‌باشد که توسط مهندسين و مشاورين باتوجه به شرايط سطح زمين و توپوگرافي منطقه انتخاب می‌شوند. در بعضی از موارد ممکن است این مکان در منطقه‌ای قرار گیرد که در معرض جابجایی‌های تکتونیکی قرار دارد. در این شرایط دو راه وجود دارد: ۱- تغییر مکان پروژه ۲- طراحی سازه به گونه‌ای که در برابر جابجایی‌های تکتونیکی مقاوم باشد. در مناطقی که گسل وجود دارد، حرکت گسل باعث انتشار گسیختگی در لایه خاک قرار گرفته روی آن می‌شود. بسته به نوع گسل (امتداد لغز، نرمال و معکوس)، حرکت گسل یک جابجایی رو به بالا یا رو به پایین به لایه خاک القا می‌کند. گسل امتداد لغز حرکت لغزشی را به لایه خاک القا می‌کند. این جابجایی‌های القا شده به خاک مانند یک موج در لایه خاک حرکت می‌کنند و بسته به ضخامت لایه خاک و میزان حرکت گسل، به سطح لایه خاک می‌رسند. جابجایی تفاضلی بوجود آمده در سطح خاک سبب وارد آمدن خسارت به سازه‌های سطحی می‌شود. یکی از اهداف این مطالعه ارائه پیشنهاداتی برای طراحی سازه در مناطق گسله شده می‌باشد.

۱-۳. روش تحقیق

در این تحقیق ابتدا سوابقی از شواهد میدانی و مطالعات عددی مربوط به آنها بیان شده است و در بخش‌های بعدی به بیان مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در این زمینه و همچنین اعتبار سنجی داده‌های آزمایشگاهی توسط نرم‌افزارهای مربوطه پرداخته شده است. در آخر به مدل‌سازی مسئله و تحلیل عددی، اندرکنش فنداسیون با گسل معکوس 60° با استفاده از روش المان محدود غیر خطی توسط نرم‌افزار پلکسیس پرداخته شده است. در این تحلیل اثر فشار سربار، عرض، صلبیت خمشی و مکان فنداسیون بر این اندرکنش در شرایطی که سطح زمین بدون شیب و شیب‌دار باشد، بررسی شده است. همچنین اثر حضور شمع بر روی گسترش مسیر گسیختگی به سطح زمین و اندرکنش گسلش و فنداسیون بررسی شده است.

فصل دوم:

مروری بر کارهای گذشته و مشاهدات میدانی

۱-۲. مقدمه

به منظور ایجاد دید عمیق‌تری نسبت به عامل کنترل‌کننده عملکرد سازه‌هایی که در معرض تغییر شکل القایی گسلش قرار می‌گیرند، سوابقی را به صورت تطبیقی مورد ارزیابی قرار دادیم. هدف ما طبقه‌بندی سوابق مختلف از نواحی گوناگون به منظور مشخص کردن خصوصیات رفتاری مشترک و تقویت نتایج کلی مشتق شده از آن است. چهار مکان زلزله‌ای (کوکالی، دازسی، تایوان و کوه اتنا) در این باره مورد بررسی قرار گرفت [۱۵].

سوابق در سه دسته طبقه‌بندی می‌شوند:

۱- سازه‌ها بر روی فنداسیون‌های پیوسته صلب (شناور)

۲- سازه‌ها بر روی فنداسیون‌های انعطاف‌پذیر

۳- سازه‌ها بر روی تکیه‌گاه‌های مجزا

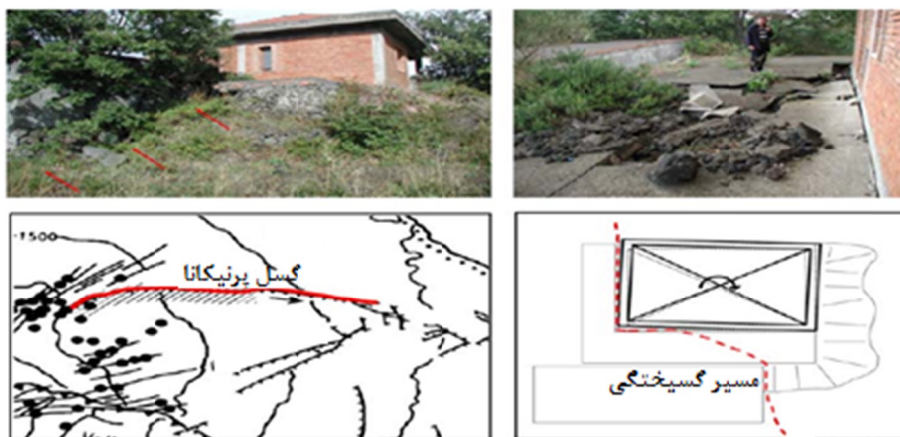
همانطوری که نشان داده خواهد شد، حالت‌هایی با سیستم‌های فنداسیونی مشابه تمایل دارند صرف نظر از نوع گسلش، عملکرد مشابه را نمایش دهند. بدیهی است که نتایجی که در این باره آورده شده اساساً کیفی هستند. جنبه‌های کمی این مساله پیچیده‌تر هستند و نیاز به دانش بیشتری از خصوصیات سازه‌ای و اندرکنش خاک و فنداسیون دارند.

۲-۲. سازه‌ها بر روی فنداسیون‌های پیوسته و صلب

در میان سازه‌های متعددی که تحت تاثیر گسلش سطحی، گسل پرنیکانا^۱ (کوه اتنا) قرار گرفته‌اند، یک ساختمان یک طبقه در قسمت شرقی گسل، به عنوان نماینده‌ای از سوابق اندرکنش فنداسیون و گسلش انتخاب شده است. همانطوری که در شکل ۱-۲ شرح داده شده است، این ساختمان از نوع بتنی بود، که بر روی فنداسیون شناور پیوسته و صلبی با ستون‌هایی گرد در محیط، قرار گرفته است. در طول زنجیره و توالی زلزله‌هایی که از سال ۱۹۸۱ تا ۱۹۸۸ طول

¹ Pernicana

کشید، سازه تقریبا به صورت قطری توسط گسلش سطحی امتداد لغز پرنیکانا عبور داده شد. شگفت‌آور این که، گسیختگی گسلی خسارت مهم و قابل توجهی را به این سازه وارد نکرد.



شکل (۱-۲): گسل امتداد لغز پرنیکانا- کوه اتنا، ساختمان یک طبقه قرار داده شده روی فنداسیون

صلب پیوسته [۱۴]

پیوستگی و استحکام فنداسیون این ساختمان که اساسا بوسیله تیرهای مدور با بتن مسلح شده بوجود آمده است. همانطوری که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است، گسیختگی گسلش سطحی را ناگزیر به انحراف کرده و ساختمان بدون آسیب مانده است اما باعث ایجاد پیچیدگی بدنه‌ای ساختمان دور محور عمودی شده است.

خرابی غیر سازه‌ای شدیدی در قالب ترک خوردگی دیوارهای داخلی ساختمان اتفاق افتاد. (شکل ۲-۲) مشابهت در این ساختمان با ساختمان مرکزی بانکو نیکاراگوئه [۱۴]، با وجود تفاوت‌هایی که در سیستم فنداسیونی وجود دارد، قابل توجه است.



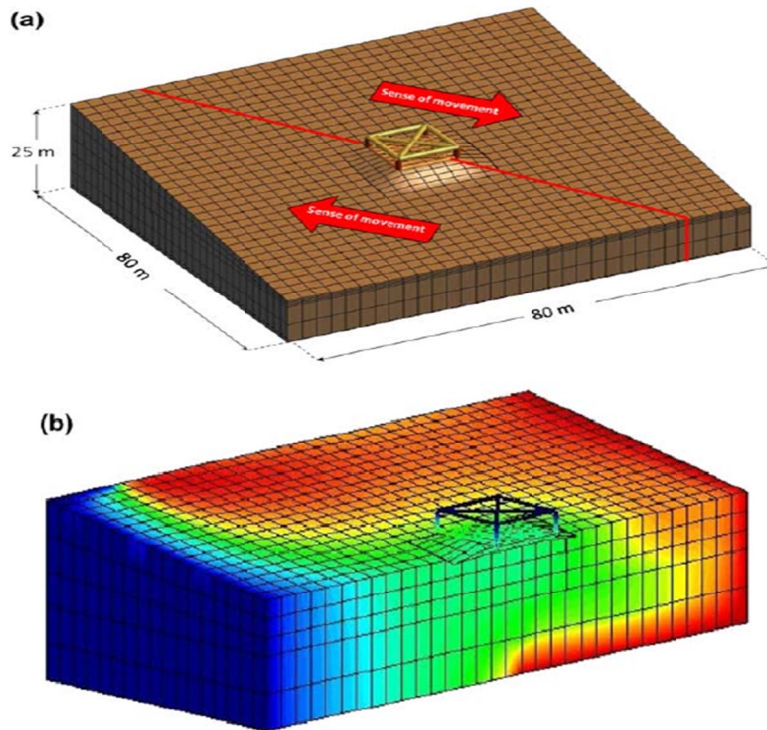
شکل (۲-۲): کوه اتنا- ساختمان یک طبقه شکل ۱-۲، جزییات بتن مسلح تیرهای حلقوی دور

فنداسیون [۱۴]

به منظور روشن تر ساختن عملکرد این سازه، یک شبیه سازی عددی سه بعدی از سیستم اندرکنش سازه و خاک انجام شد. تجزیه و تحلیل با استفاده از نرم افزار المان محدود^۱ انجام شد (یک نمونه خاکی تشکیل دهنده موهر-کولمب به عنوان اولین تقریب علمی انتخاب شد) [۱۵]. همانطوری که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است، مدل المان محدود در نقشه ۸۰×۸۰ متر است و ۲۵ متر ارتفاع داشته و شامل ۵۱۲۰ المان مکعبی می باشد. سازه یک طبقه ای طرح ریزی شده با المان تیردر مرکز مدل خاکی جای داده شده است. تجزیه و تحلیل در دو مرحله انجام شد. در گام اول، فشار ژئواستاتیکی اعمال شده است. سپس، جابجایی گسل به المان های خاکی شبه استاتیکی طی گام هایی متوالی اعمال شد. اگرچه این تحلیل نسبتا ساده بود، نتایج آن می تواند به صورت کیفی با مشاهدات میدانی مطابقت داشته باشد. گسیختگی گسل به علت صلبیت فنداسیون منحرف می شود و سازه در معرض پیچیدگی صلب بدنه ای در جهت عقربه های ساعت حول محور عمودی اش قرار می گیرد. هم نتایج شبیه سازی و هم مشاهدات میدانی به صورت کیفی با نتایج تحقیقات بریل^۲ (۱۹۸۳) سازگاری دارند [۱۶]. او کسی است که به صورت تحلیلی رفتار ساختمان ها روی فنداسیون های کم عمق صلب پیوسته که در معرض گسل امتداد لغز هستند، را مطالعه کرد.

^۱Finite element

^۲Berrill



شکل (۲-۳): گسل امتداد لغز پرنیکانا- آنالیز المان محدود ساختمان یک طبقه شکل ۱-۱، (a) طرح

اولیه مش بندی سه بعدی، (b) کانتورهای جابه جایی افقی [۱۵]

در طی زلزله چی-چی در سال ۱۹۹۹ در تایوان، انواع زیادی از سازه‌ها توسط گسل معکوس چلونگپو منقطع شدند. در میان چندین نواحی روستایی دیگر، گسل از میان شهر فونگ-یان در پارک چونگ-چنگ عبور کرد. اگرچه ساختمان‌های زیادی بشدت آسیب دیده و یا حتی فرو ریخته بودند، حالت‌هایی از عملکردهای رضایتبخش نیز وجود داشت [۱۷]. یکی از این حالت‌های استثنایی، یک ساختمان بتنی مستحکم چهار طبقه است که در شکل ۲-۴ نشان داده شده است. این سازه تقریباً ۴ متر حرکت رو به بالا را بدون خرابی سازه‌ای قابل توجهی تحمل کرده بود. به علت پیوستگی و سختی سیستم فنداسیونی، ساختمان یک چرخش بدنه‌ای صلب تقریباً ۱۰ درجه را تحمل کرد بدون اینکه متحمل آسیب زیادی شود.

¹Fung-Yan
²Chung-Cheng



شکل (۲-۴): گسل چلونگیو، چی - چی، زلزله ۱۹۹۹ تایوان، ساختمان چهار طبقه روی فنداسیون پیوسته

وصلب [۱۷]

یک تحلیل المان محدود در حالت دوبعدی کرنشی صفحه‌ای با استفاده از نرم‌افزار المان محدود انجام شد. یک مدل ساختمانی الاستوپلاستیک با معیار شکست موهر- کولمب و نرم کننده کشش ایزوتروپ تهیه شد و در آباکوس تحلیل شد [۱۸]. کرنش نرم شونده^۱ بوسیله کم کردن زاویه اصطکاک داخلی ϕ_{mob} و زاویه اتساعی ψ_{mob} با افزایش کرنش برشی هشت وجهی^۲ از جنس کرنش برشی پلاستیک تعریف شد [۱۵]. جزئیات بیشتری در مورد کالیبراسیون مدل سازه و شبکه‌بندی المان محدود در [۲۰ و ۱۹] ارائه شده است. در این مدل‌سازی یک حرکت قائم در سنگ بستر به میزان $h=4m$ در مدل به ماسه‌ی متراکم به ضخامت $H=20m$ اعمال شد.

سازه‌ای به وسیله المان‌های تیر شبیه سازی شده بود، اندرکنش فنداسیون و خاک با المان- های شکاف ویژه‌ای^۳ که اجازه تفکیک و افت را می‌دادند، مدل سازی شده بودند. همانطوری که در شکل ۲-۵ نشان داده شده است، مدل ۴ طبقه یک چرخش بدنه‌ای صلب $9/2$ درجه‌ای را بدون

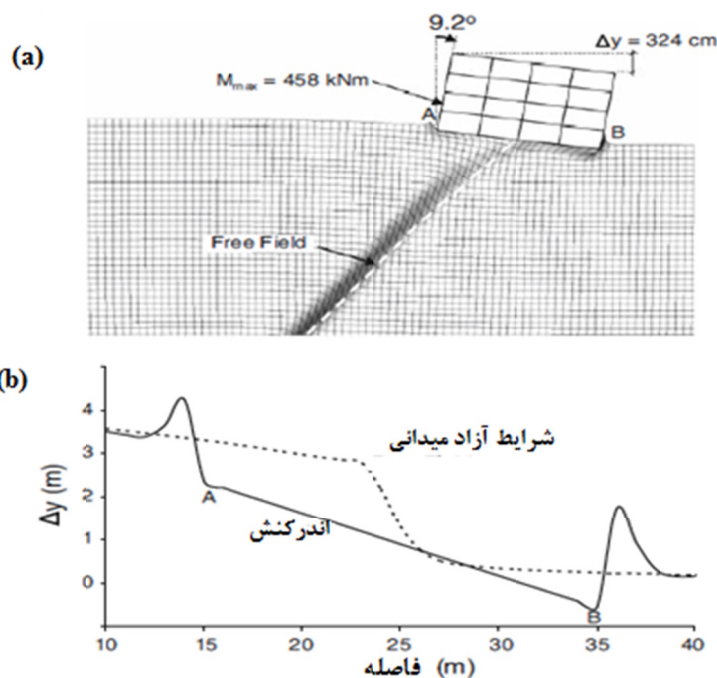
¹ Strain- softening

² Octahedral shear strain

³ Interface Element

فشار زیاد (در مقایسه با ۱۰ درجه ای که در واقعیت مشاهده شده بود) تجربه کرد، حداکثر گشتاور خمش در روبنا از ۴۵۸ کیلو نیوتن-متر تجاوز نکرد [۲۱].

جابجایی عمودی (Δy) سطح زمین آشکارا نشان می‌دهد که ساختمان به صورت یکنواخت و بدون انحراف قابل توجهی چرخیده است. ناحیه AB در شکل ۲-۵ از شیب ثابتی برخوردار است. نتایج عددی با مشاهدات میدانی توافقی خوبی نشان دادند. همانطوری که قبلاً اشاره شد، به علت مکانیسم گام‌به‌گام، یک گسیختگی گسل نرمال شمال غربی- جنوب شرقی ۴ کیلومتری در شرق کولکاک^۱ در زلزله سال ۱۹۹۹ کوالی رخ داد که از شهر کوچک دنزیولر^۲ عبور کرد. تحلیل، بحث و اسنادی با جزئیات بیشتری راجع به سوابق آن در مقاله دنزیولر ارائه شده است [۱۹ و ۱۵].



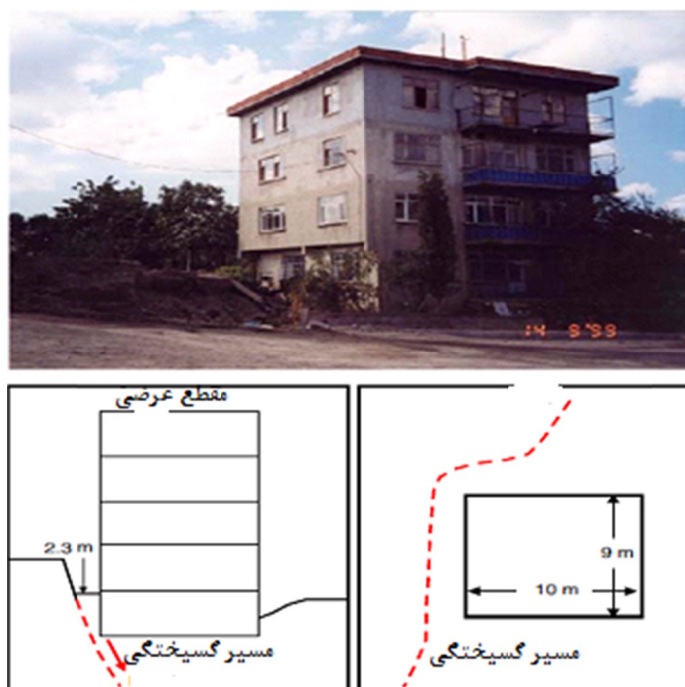
شکل (۲-۵): گسل چلونگپو- آنالیز المان محدود دو بعدی ساختمان شکل ۱-۴، (a) تغییر شکل مش-

بندی و کرنش پلاستیک (b) تغییر شکل عمودی سطح زمین [۲۱]

¹Gölcük

²Denizveler

شکل ۲-۶ نمونه‌ای از ساختمان ۴ طبقه‌ای که پی آن در یک فنداسیون صندوقه‌ای^۱ صلب قرار گرفته را نشان می‌دهد. این ساختمان توانست از جابجایی رو به پایین ۲/۳ متری بدون آسیب آشکاری حفظ شود علاوه بر آن به طور موثر گسلش سطحی را منحرف کند.



شکل (۲-۶): گسل نرمال کولکاک، کوکالی، زلزله ۱۹۹۹ ترکیه-دنزیلور، ساختمان پنج طبقه با فنداسیون

جعبه‌ای صلب [۱۹]

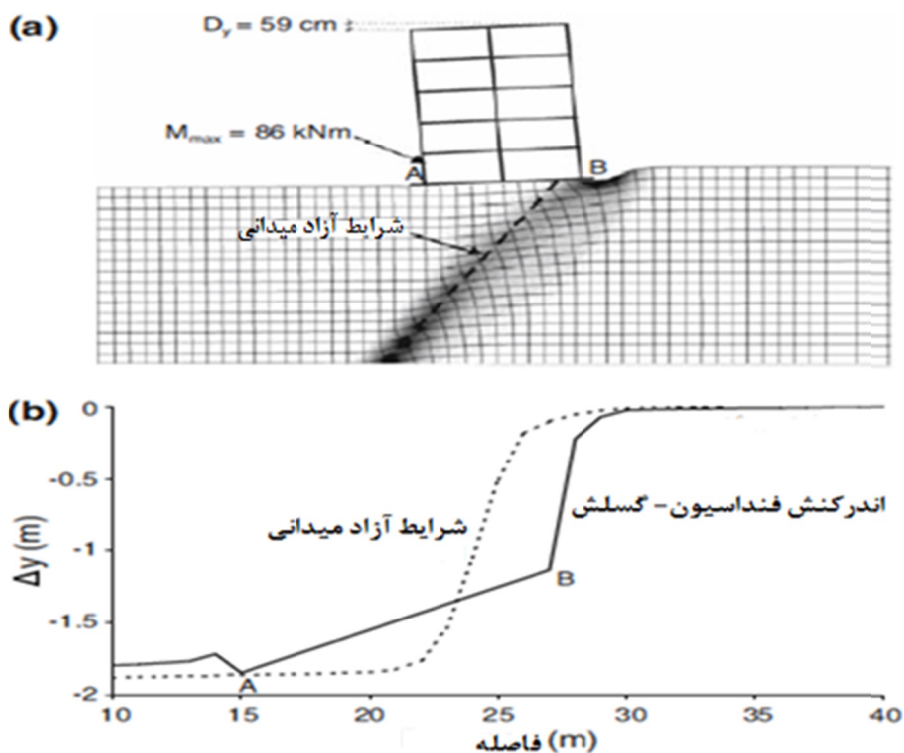
برای تحلیل این سازه حرکت قائم $h=2\text{m}$ به سنگ بستر و لایه خاک رسوبی به ضخامت $H=40\text{m}$ اعمال شد [۱۹]. همانطوری که شرح داده شد، ضخامت لایه خاک بر اساس اندازه گیری‌های میکرومتری توسط اری^۲ و همکارانش تخمین زده شد [۲۲]. همانطوری که در شکل ۲-۷ نشان داده شده است، مسیر گسیختگی هنگامی که به سطح زمین نزدیک می‌شود به طور آشکارا به سمت دیوار پایینی گسل^۳ شده است. ساختمان در معرض چند چرخش بدنه‌ای صلب در نتیجه

^۱Box-Type

^۲Arai

^۳Footwall

تغییرات نشست ۵۹ سانتیمتری بود، بدون این که فشاری بر ساختمان آورده شود، گشتاور ماکزیمم برابر ۸۶ کیلو نیوتن-متر محاسبه شد. این واکنش مساعد و مطلوب را می توان ناشی از فنداسیون پیوسته و صلب این بنا دانست.



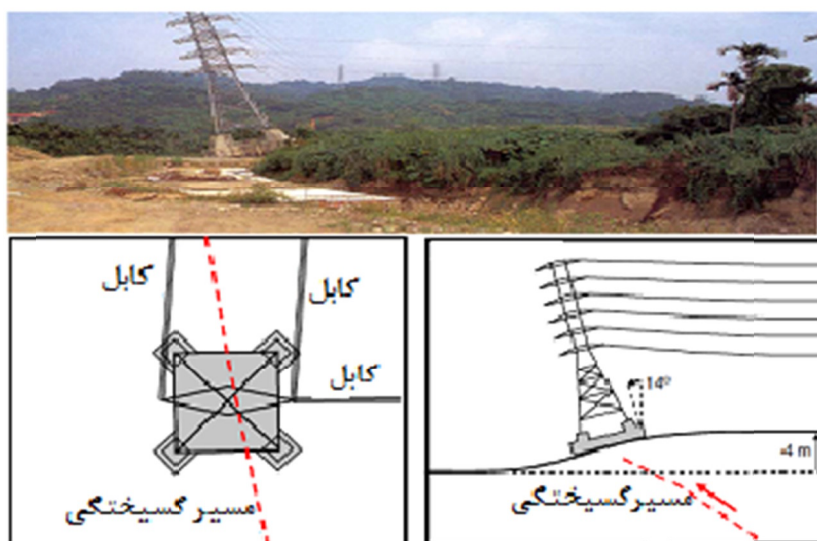
شکل (۲-۷): آنالیز المان محدود دو بعدی ساختمان پنج طبقه شکل ۱-۶ با حرکت رو به پایین دو متری،

(a) تغییر شکل مش بندی و کرنش پلاستیک، (b) جابه جایی عمودی سطح زمین [۲۱]

نتایج تجزیه و تحلیل به خوبی با تحقیقات میدانی انطباق داشتند. به جز مواردی که در واقعیت چرخش کمتر آشکار بود. تفاوت ممکن است از ساده سازی مسئله به حالت کرنش مسطح تحلیل ها ناشی شود، گسیختگی گسلش واقعی از گوشه ساختمان عبور کرد. شکل ۲-۸ نمونه ای از زلزله چی-چی در سال ۱۹۹۹ تایوان را نشان می دهد. این شکل یک تیر چراغ برق با خط ولتاژ الکتریکی بالا در شهر مین-چین^۱ را نشان می دهد [۲۳]. گسل رانشی چلونگپو از این تیر چراغ برق به صورت عمودی عبور کرد در حالی که حرکت رو به بالای ۴ متری را به سازه تحمیل کرد. به

¹Min-chein

علت فنداسیون صندوقه‌ای صلب آن، تیر چراغ برق به طرز شگفت‌انگیزی جابجایی را بدون کوچکترین خرابی سازه‌ای آشکار، تحمل کرد، اگرچه چرخش بدنه‌ای صلب تقریباً ۱۸ درجه‌ای را تحمل کرد. اعتقاد بر این است که این تاریخچه، به منظور اثبات نقش مفید چنین سیستم‌های فنداسیونی، از اهمیت خاصی برخوردار است. در حالت‌های قبلی، بحث بر سر این موضوع بود که استحکام روبنا ممکن است به طور برابر نقش مهمی را ایفا کند. اما، در این حالت، روبنا قطعاً انعطاف پذیر است و بقای سازه می‌تواند تنها ناشی از فنداسیون آن باشد.



شکل (۲-۸): گسل چلوتگپو، شهر مین-چین تایوان، دکل برق روی فنداسیون پیوسته‌ی صلب [۲۳]

۲-۳. سازه‌ها بر روی فنداسیون‌های انعطاف پذیر

در بخش ۲-۲، عملکردهای رضایتبخش سازه‌هایی که روی فنداسیون‌های پیوسته و صلب قرار داشتند در مناطق مختلف زلزله‌خیز مورد بحث قرار گرفت. به منظور روشن‌تر ساختن اهمیت استحکام و پیوستگی فنداسیون، در این قسمت سازه‌هایی که بر روی سیستم‌های فنداسیونی انعطاف‌پذیر قرار دارند، ارائه می‌شود. شکل ۲-۹ اولین نمونه را از زلزله چی-چی در سال ۱۹۹۹ را نشان می‌دهد [۲۳].