

چکیده

در بیشتر مطالعات مربوط به اندرکنش گسلش - خاک - فونداسیون - سازه، تنها فونداسیون مدل شده و اثر سازه با روش‌هایی مانند سختی معادل یا اضافه نمودن سربار معادل آن در مدل‌سازی‌ها دیده شده و از مدل‌سازی مستقیم سازه در مدل‌های آزمایشگاهی و عددی خودداری شده است. لذا به نظر می‌رسد مدل‌سازی مستقیم سازه بتواند درک بهتری از تأثیر حضور سازه - فونداسیون بر نحوه انتشار گسلش سطحی^۱ و همچنین بر نحوه عملکرد اعضای مختلف سازه در حین گسلش را امکان‌پذیر سازد. در این تحقیق مدل‌سازی عددی دو بعدی سازه - فونداسیون - آبرفت با اعمال گسلش سطحی معکوس به صورت شبه‌استاتیکی، در حالت قاب‌های دو دهانه دارای پی نواری با تعداد طبقات ۳ و ۷، با استفاده از روش اجزای محدود و نرم‌افزار آباکوس انجام شده و تأثیر عواملی نظیر موقعیت قرارگیری سازه، تعداد طبقات و ضخامت فونداسیون در این پدیده اندرکنشی به صورت پارامتریک مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. بر این اساس بحرانی‌ترین موقعیت قرارگیری، برای حالتی است که سازه بر روی فرادواره و در فاصله ۱۵ تا ۲۵ متری از محل رخنمون گسلش میدان آزاد آقرار می‌گیرد. تأثیر افزایش تعداد طبقات (افزایش سربار) از نظر تغییر شکل‌های ایجاد شده در سازه در مواجهه با پدیده گسلش در حالت‌های مختلف قرارگیری سازه متفاوت می‌باشد، اما از نظر تغییرات نیروهای داخلی اعضای سازه‌ای، افزایش تعداد طبقات باعث ایجاد مقادیر نیروی برشی و لنگر خمشی بزرگ‌تری در طول تیر طبقات و فونداسیون سازه‌ها در اثر اعمال گسلش می‌شود. افزایش ضخامت فونداسیون نیز باعث کاهش مقادیر نیروی برشی و لنگر خمشی ایجاد شده در اعضای سازه‌ای نظیر تیرها در اثر اعمال گسلش می‌گردد، در نتیجه می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مناسب در جهت عملکرد بهتر سازه در مواجهه با پدیده اندرکنشی سیستم کوپل، مورد توجه قرار گیرد.

واژگان کلیدی: گسلش معکوس، اندرکنش گسلش - خاک - سازه، اجزای محدود.

مطالعه عددی اندرکنش گسلش - آبرفت - قاب ساختمانی دو دهانه

محمد داودی (نویسنده مسئول)

استادیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران

مهدی سلیمانی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی

زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران،

soleymani@iiees.ac.ir

محمد کاظم جعفری

استاد پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران

۱- مقدمه

سطحی و یا انحراف مسیر گسلش در اثر حضور سازه گزارش شده است [۳]. این امر بیانگر تأثیر متقابل گسلش سطحی، سازه و فونداسیون بر یکدیگر است.

در تحقیقات پیشین، مطالعه در زمینه انتشار گسلش، از سه جنبه مطالعات میدانی [۱-۲] و مدل‌سازی فیزیکی با آزمایش‌های سانتریفیوژ و [۴-۵] و مدل‌سازی عددی [۶-۸] انجام شده

تجربیات زلزله‌های گذشته نظیر ترکیه و تایوان (۱۹۹۹) موارد بسیاری از تخریب یا آسیب‌دیدگی سازه‌های مختلف نظیر ساختمان‌ها، سدها، راه‌ها و پل‌ها تحت تأثیر پدیده گسلش سطحی و جابه‌جایی‌های ماندگار ناشی از آن ارائه داده است [۱-۲]. با این وجود مواردی از عملکرد مناسب برخی از سازه‌ها بدون در نظر گرفتن تمهیداتی خاص در هنگام گسلش

داندی^۳ اسکاتلند، تعدادی تحلیل پارامتریک بر روی سیستم گسلش نرمال- خاک- فونداسیون- سازه انجام شد و تأثیر عواملی نظیر موقعیت قرارگیری سازه، میزان سربار سازه و جنس خاک بر پاسخ نهایی سیستم کوپل بررسی شده است. سازه‌های در نظر گرفته شده برای انجام تحلیل‌های عددی نیز قاب‌های ساختمانی چهار دهانه با مقاطع تقریبی و مشابه در تمام طبقات، قرار گرفته بر روی فونداسیون گسترده می‌باشد.

۲- مشخصات مدل عددی

با توجه به محدودیت‌های آزمایش‌های تجربی در زمینه سطح تنش و مدل‌سازی سازه موجود، تحلیل‌های عددی که بر مبنای نتایج آزمایش‌های تجربی کالیبره شده باشند، می‌توانند به‌عنوان ابزار مناسبی برای بررسی کامل‌تر و دقیق‌تر پدیده گسلش و اندرکنش آن با سازه و فونداسیون مورد استفاده قرار گیرند. در این تحقیق، برای مدل‌سازی قاب‌های ساختمانی و حرکت گسل در خاک از نرم‌افزار آباکوس^۴ استفاده شده است. مطالعات بسیاری در زمینه آزمایشگاهی و عددی نشان داده‌اند که رفتار خاک پس از گسیختگی یک عامل مهم در مسائل وابسته به شکل‌گیری نوار برشی است. برای مدل‌سازی این رفتار خاک در آباکوس، یک روش المان محدود غیرخطی با مدل ساختاری الاستوپلاستیک با معیار گسیختگی موهر-کولمب و نرم‌شدگی کرنش استفاده شده است. بدین منظور تعدادی آزمایش برش مستقیم برای اندازه‌گیری خصوصیات مکانیکی ماسه در تنش‌های درجای مختلف انجام گرفته است. بر این اساس برای $\sigma_v > 100 \text{ kPa}$ (بیانگر مدل واقعی)، مقادیر زاویه اصطکاک حداکثر و باقیمانده به ترتیب برابر با $\phi_{\text{peak}} = 32^\circ$ و $\phi_{\text{res}} = 30^\circ$ می‌باشد. زاویه اتساع که به میزان زیادی به سطح تنش همه‌جانبه مرتبط است برابر با $\psi = 3^\circ$ به دست می‌آید. در مدل آزمایشگاهی $1g$ سطح تنش‌های همه‌جانبه بسیار کمتر از مدل واقعی و در حد $\sigma_v < 10 \text{ kPa}$ است که باعث تغییر خصوصیات مکانیکی خاک در تحلیل‌های عددی کوچک مقیاس می‌شود. به منظور بررسی اثر کاهش تنش همه‌جانبه، زاویه اصطکاک داخلی خاک به میزان قابل توجهی افزایش [۱۱] و به $\phi_{\text{peak}} = 45^\circ$ تغییر می‌یابد و بر این اساس خصوصیات نهایی خاک برای استفاده در

است. عمده این بررسی‌ها بر تعیین مکانیسم‌های گسیختگی و انتشار گسل در آبرفت و پارامترهای مؤثر بر آن در حالت میدان آزاد و در اندرکنش با فونداسیون تمرکز داشته است. بر این مبنا می‌توان نتیجه‌گیری 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 [۹]. 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 فدایی [۱۰] اشاره نمود. فدایی [۱۰] به منظور حفاظت فونداسیون در برابر گسلش، پیشنهاد استفاده از دیواره بتونی در حد فاصل مسیر انتشار گسل تا فونداسیون را دادند که نتایج آن در بهبود عملکرد فونداسیون بسیار تأثیرگذار بوده است.

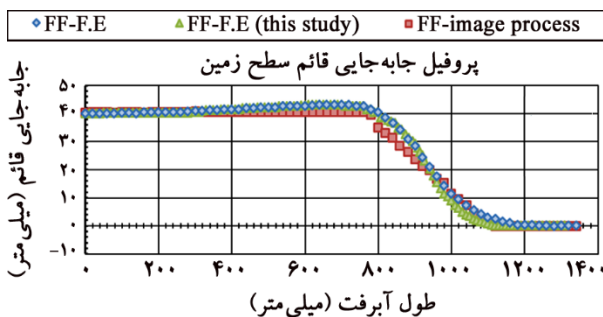
در مجموع بیشتر مطالعات مربوط به اندرکنش گسلش، اکثراً به بررسی مکانیسم انتشار گسلش در آبرفت و اندرکنش آن با فونداسیون پرداخته‌اند. به عبارتی تنها فونداسیون مدل شده و اثر وجود سازه از روش‌هایی مانند سختی معادل یا اضافه نمودن سربار معادل در مدل‌سازی‌ها دیده شده و از مدل‌سازی مستقیم سازه در مدل‌های آزمایشگاهی و عددی، خودداری شده است. با توجه به پیشینه مناسب مطالعات انجام شده، به نظر می‌رسد مدل‌سازی مستقیم سازه می‌تواند درک بهتری از عملکرد اعضای مختلف سازه در حین گسلش و همچنین تأثیر تغییر خصوصیات سازه (نظیر موقعیت قرارگیری، تعداد طبقات و...) بر عملکرد کلی سیستم را امکان‌پذیر سازد.

در زمینه مدل‌سازی مستقیم سازه نیز مطالعاتی توسط آناستوپولوس و همکاران [۱۱] و هاشمی [۱۲] انجام گرفته است. آناستوپولوس و همکاران [۱۱] به بررسی تأثیر متقابل گسلش سطحی نرمال- سازه، در یک لایه آبرفتی ماسه‌ای با استفاده از تحلیل‌های عددی و با تمرکز بر نحوه تأثیر گسلش بر سازه پرداختند. در این تحقیق پس از صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایش‌های سانتریفیوژ انجام شده در دانشگاه

نیروهای برشی از قانون اصطکاک کولمب پیروی می کند که امکان مدل سازی لغزش فونداسیون بر روی خاک را فراهم می نماید [۱۱].

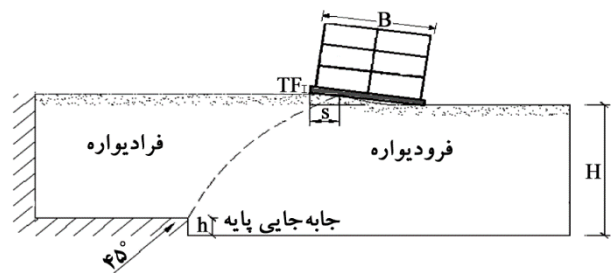
۳- صحت سنجی

در این بخش با کمک نتایج حاصل از آزمایش انجام شده در پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله [۱۳]، مدل سازی نظیر به نظیر، برای گسل معکوس، در خاک به صورت میدان آزاد و با حضور سازه به منظور صحت سنجی صورت گرفته است. مقایسه نتایج به دست آمده از صحت سنجی در حالت آزاد مطابق نمودارهای شکل (۲) تطبیق خوبی را نشان می دهد. البته در قسمت رخنمون گسلش، شیب منحنی حاصل از روش اجزای محدود اندکی متفاوت با پروفیل واقعی خاک است. دلیل این امر می تواند مدل رفتاری انتخاب شده برای تحلیل عددی باشد که ممکن است قادر به مدل سازی دقیق رفتار پلاستیک خاک و تغییرات مقادیر پارامترهای مقاومتی نباشد. علی رغم این موارد، فرضیات انجام گرفته در ساخت مدل عددی، منجر به ارائه نتایج قابل قبول شده است. در ادامه نتایج مرتبط با صحت سنجی، در حالت حضور سازه در شکل های (۳) و (۴) ارائه شده است. چنانچه ملاحظه می شود فرم کلی تغییر شکل سازه در هر دو حالت مدل سازی عددی و آزمایشگاهی مشابه یکدیگر است و مقایسه نتایج تغییر مکان های افقی ایجاد شده در طبقات اول و دوم در اثر اعمال گسلش نشان دهنده ی پاسخ مناسب مدل عددی و اختلاف قابل قبول نتایج تحلیل عددی با نتایج مدل سازی آزمایشگاهی می باشد.



شکل (۲): مقایسه پروفیل قائم سطح آبرفت در حالت میدان آزاد با دو روش پردازش تصویر و اجزای محدود (image process: نتایج مربوط به آزمایش FF, Ig, FE: نتایج مدل سازی عددی مقاله مرجع، FF-F.E (this study): نتایج مدل سازی عددی تحقیق حاضر).

تحلیل های عددی کوچک مقیاس (صحت سنجی) به صورت $\phi_{\text{peak}}=45^{\circ}$ و $\phi_{\text{res}}=35^{\circ}$ و $\psi=13^{\circ}$ در نظر گرفته شده است [۱۳]. شکل (۱) تصویری از مدل استفاده شده و متغیرهای مؤثر در تحلیل های پارامتریک، در این مطالعه را نشان می دهد. برای مدل سازی عددی مسئله در تحلیل های پارامتریک بزرگ مقیاس با فرض تشابه و تقارن سازه در راستای عمود بر گسلش، مسئله به صورت دو بعدی مدل می شود. سازه های در نظر گرفته شده به منظور انجام تحلیل ها، به وسیله نرم افزار ایتبس ۵ و با استفاده از آیین نامه ۲۸۰۰ و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان بارگذاری و طراحی شده اند. شرط حصول به نتایج قابل اطمینان، استفاده از مدل رفتاری مناسب و همچنین ابعاد مش به حد کافی ریز است.

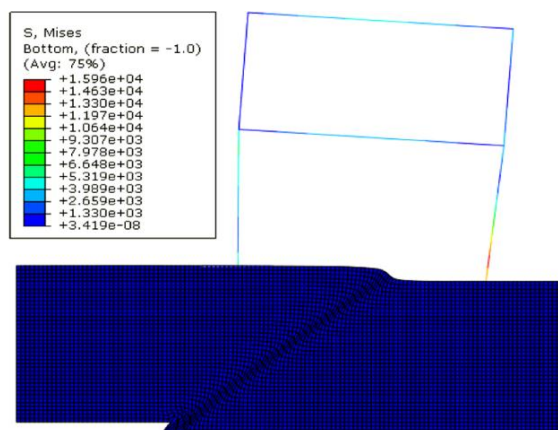


شکل (۱): معرفی متغیرهای مؤثر در تحلیل های پارامتریک.

برای آبرفت از مدل ترکیبی الاستوپلاستیک شامل معیار گسیختگی موهر-کولمب همراه با نرم شوندگی کرنشی که اشاره شد، استفاده شده است. برای سازه نیز رفتار (الاستیک-پلاستیک کامل) تعریف شده است. برای مش بندی محیط آبرفت از المان های مربعی چهار گره ای و برای تیرها و ستون های سازه از المان های خطی تیر انعطاف پذیری دو گره ای و از مصالح فولادی استفاده شده است. ابعاد بهینه مش لایه آبرفت پس از انجام چند تحلیل با ابعاد متفاوت مش، برابر 1×1 متر انتخاب شده است، برای سازه نیز ابعاد مش 0.5 متر انتخاب شده است. فونداسیون نیز با استفاده از المان های تیر دو گره ای و با مصالح بتی الاستیک تعریف شده است. همچنین به منظور اتصال فونداسیون به خاک زیر آن از نوعی المان فصل مشترک استفاده می شود که در فشار به صورت صلب عمل می کند اما به دلیل عدم تحمل نیروی کششی، قابلیت مدل سازی جدایش فونداسیون از خاک را دارد. رفتار المان های فصل مشترک در برابر اعمال

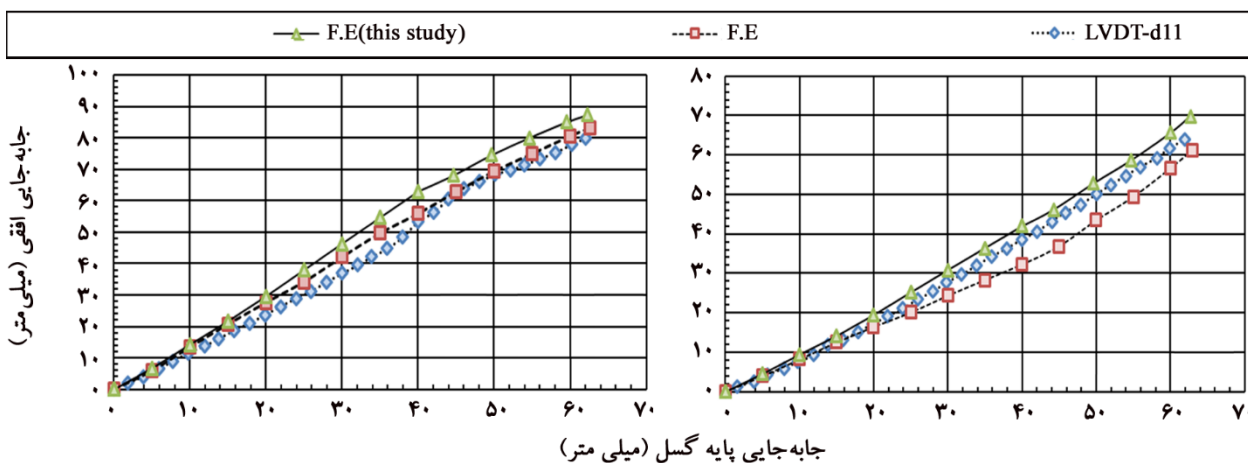


(ب) آزمایش 1g.



(الف) مدل سازی عددی تحقیق حاضر.

شکل (۳): تغییر شکل های ایجاد شده در سازه و آبرفت در اثر اعمال گسلس.



(ب) طبقه دوم.

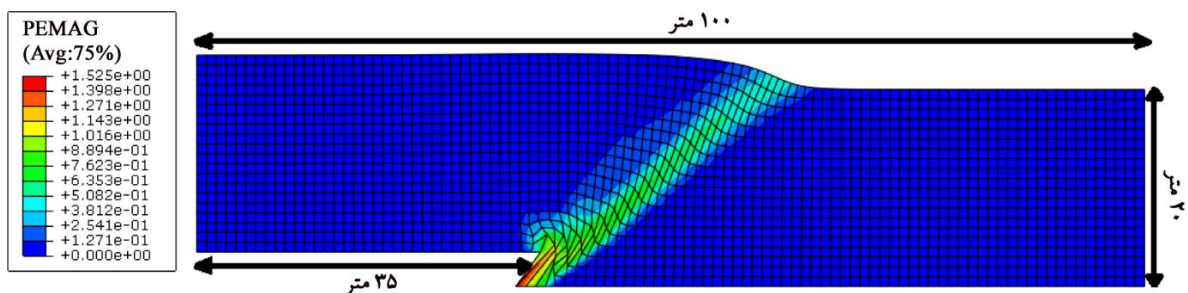
(الف) طبقه اول.

شکل (۴): مقایسه تغییر شکل های افقی حاصل از اطلاعات ثبت شده جابه جایی سنج ها و روش اجزای محدود LVDT: جابه جایی سنج، نتایج مربوط به آزمایش 1g، F.E: نتایج مدل سازی عددی مقاله مرجع، F.E.(this study): نتایج مدل سازی عددی تحقیق حاضر).

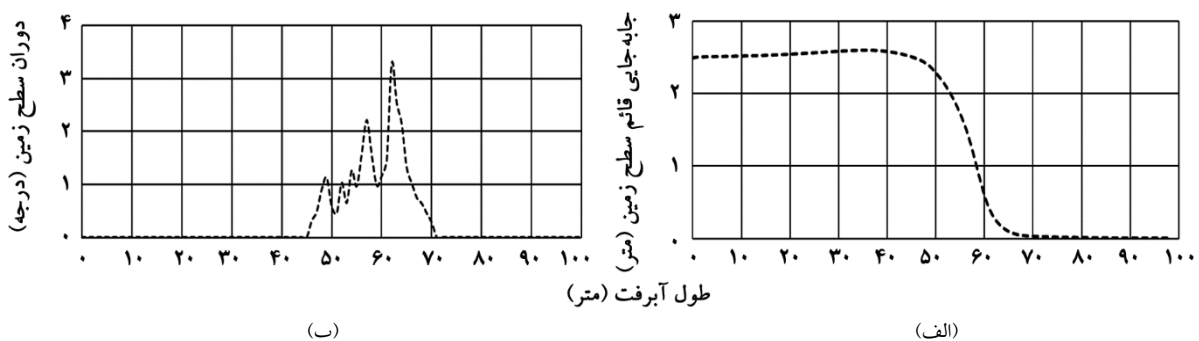
۴- انتشار گسلس در میدان آزاد

با زاویه ثابت ۴۵ درجه به ماسه خشک اعمال شده است. این مقادیر در همه تحلیل های پارامتریک ثابت هستند. نمودارهای شکل (۶) مشخص است که نقطه عطف نمودار تغییر شکل سطح زمین یا نقطه بیشترین دوران سطح زمین در فاصله ۶۲ متری رخ می دهد که این نقطه به عنوان محل بیرون زدگی گسلس در سطح زمین مشخص شده است. در بخش های بعد منظور از موقعیت های در نظر گرفته شده برای سازه (متغیر S)، فاصله این نقطه در میدان آزاد نسبت به سمت چپ فونداسیون می باشد.

در این بخش ابتدا به منظور مشخص نمودن موقعیت رخنمون گسلس سطحی در حالت میدان آزاد، با استفاده از مشخصات خاک و ابعاد مورد استفاده، یک مدل المان محدود دو بعدی (مدل بزرگ مقیاس) بدون حضور سازه مورد بررسی قرار گرفته است. همان طور که در شکل (۵) دیده می شود در این حالت طول قسمت متحرک (فرا دیواره^۷) برابر با ۳۵ متر، طول کل آبرفت برابر با ۱۰۰ متر و ضخامت آبرفت نیز برابر با ۲۰ متر در نظر گرفته شده و گسلس



شکل (۵): مش تغییر شکل یافته- نتایج مربوط به کرنش پلاستیک.



شکل (۶): (الف) تغییر شکل قائم سطح زمین در حالت میدان آزاد، (ب) دوران سطح زمین در حالت میدان آزاد.

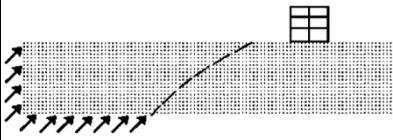
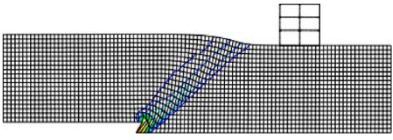
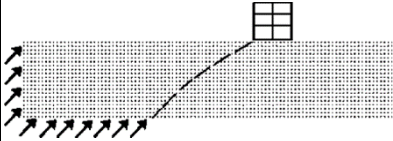
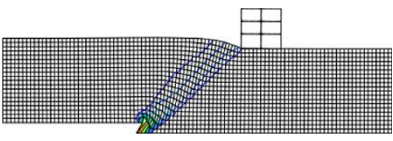
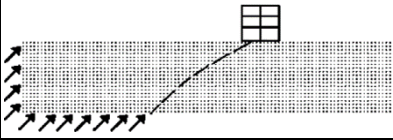
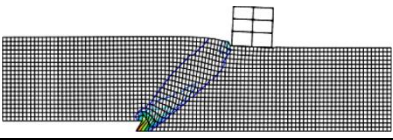
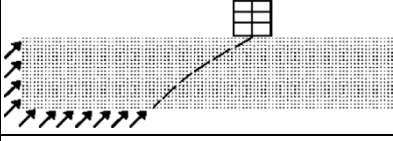
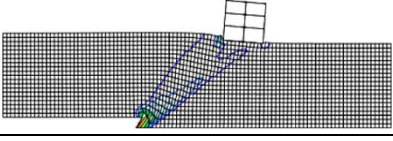
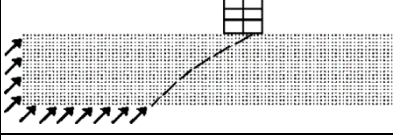
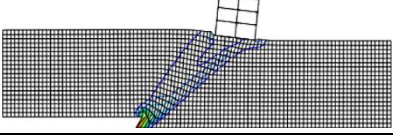
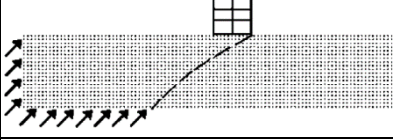
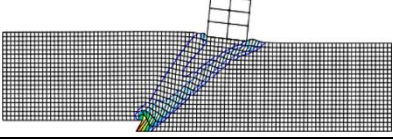
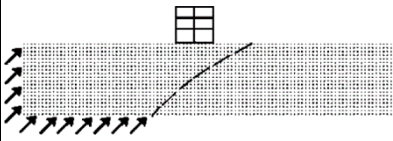
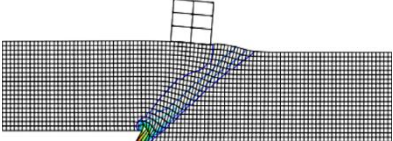
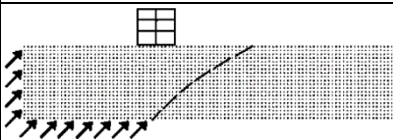
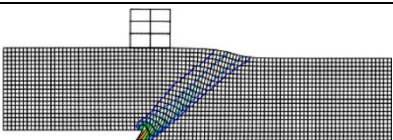
۵- مطالعات پارامتریک

۵-۱- بررسی تأثیر موقعیت قرارگیری سازه

گسلش و عبور مسیر گسلش از ناحیه‌ای با مقاومت و سختی کمتر و پخش شدن جابه‌جایی‌های تفاضلی قائم ایجاد شده در سطح زمین ناشی از گسلش، در ناحیه وسیع‌تری می‌شود؛ به عبارتی گسلش ناحیه وسیع‌تری را در سطح زمین تحت تأثیر قرار می‌دهد. در صورت قرارگیری سازه در 0 m تا -10 m ، سازه به‌طور کامل در فرودیواره قرار می‌گیرد، تغییر مکان افقی ایجاد شده در پی و مقادیر دررفت نسبی سازه‌ها بسیار کم (کمتر از ۰/۵ درصد) و در محدوده دررفت مجاز ساختمان‌ها (۰/۲٪) می‌باشد، در نتیجه در اثر اعمال گسلش خطر چندانی سازه‌ها را تهدید نمی‌کند. با حرکت سازه‌ها به سمت فرادیواره تا $S=25\text{ m}$ مقادیر دررفت نسبی سازه‌ها قابل توجه و بسیار بالا و بیش از محدوده دررفت مجاز دررفت ساختمان‌ها می‌باشد. در ادامه‌ی حرکت به سمت فرا دیواره و فاصله گرفتن از رخنمون گسلش میدان آزاد در S بزرگ‌تر مساوی ۳۰ متر، مقادیر دررفت نسبی سازه‌ها بسیار کم (حدود ۰/۵ درصد) و خطر چندانی سازه‌ها را تهدید نمی‌کند. در ادامه نتایج مشابه برای مقادیر چرخش صلب سازه‌ای نیز ارائه شده است.

تحلیل‌ها در این بخش برای سازه ۳ طبقه با ضخامت فونداسیون ۷۰ سانتی‌متر در هشت موقعیت قرارگیری سازه نسبت به محل رخنمون گسلش میدان آزاد انجام شده است. لازم به ذکر است که در این تحقیق، همه تحلیل‌ها برای قاب‌های ساختمانی با دهانه‌های ۵ متری (دو دهانه)، قرار گرفته بر روی پی نواری به طول ۱۰ متر انجام شده و بار مرده خطی طبقات نیز برابر با ۱/۵ تن بر متر در نظر گرفته شده است. در جدول (۱)، نحوه انتشار گسلش در آبرفت، میزان دوران و دررفت نسبی سازه در موقعیت‌های مختلف قرارگیری سازه در جابه‌جایی گسلش ۲/۵ متر نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود قرار گرفتن سازه در موقعیت‌های مختلف نسبت به رخنمون گسلش میدان آزاد می‌تواند باعث انحراف مسیر گسلش و حتی در برخی حالات باعث تشکیل مسیر ثانویه گسلش شود که دلیل اصلی این موضوع نیز وجود حباب تنش (میدان تنش) بزرگ‌تر در زیر فونداسیون‌ها در اثر وزن سازه است که باعث دوشاخه شدن مسیر

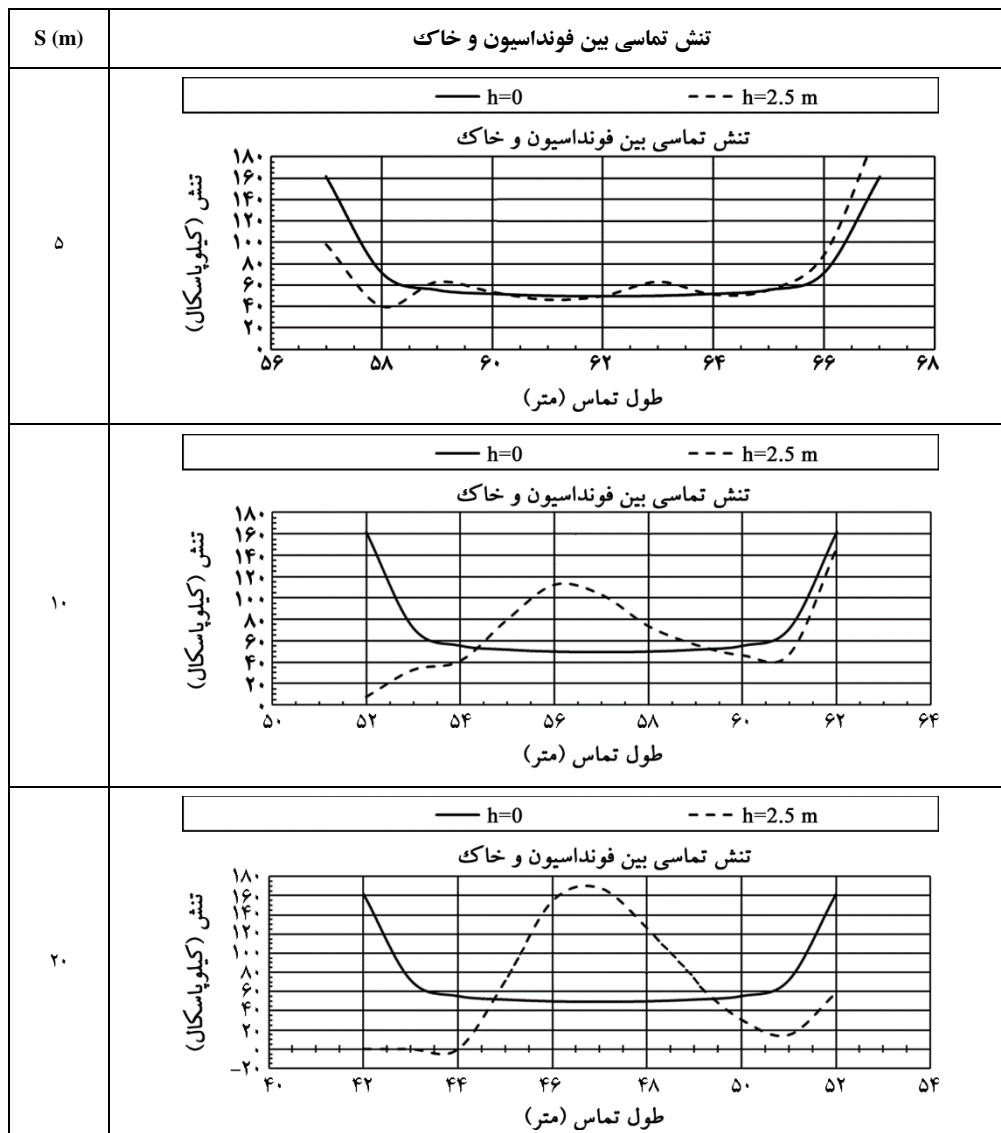
جدول (۱): نحوه انتشار گسلش در آبرفت (نتایج کرنش پلاستیک)، میزان چرخش و دریفت نسبی سازه در جابه‌جایی پایه گسلش ۲/۵ متر.

S (m)	Free Field (h = 2.5m)		انتشار گسلش در آبرفت نتایج کرنش پلاستیک	دوران صلب سازه (درجه) (h = 2.5m)	Drift Ratio (%) (h = 2.5m)
	موقعیت قرارگیری سازه (شماتیک)	انتشار گسلش در آبرفت			
-۱۰			۰/۰۷	۰/۱۱	
۰			۰/۳۱	۰/۵۴	
۲/۵			۲/۶	۴/۵	
۵			۴/۶	۸/۱	
۷/۵			۶/۲	۱۱	
۱۰			۶	۱۰/۴	
۲۰			۴/۷	۸/۲	
۳۰			۰/۳	۰/۵۴	

محدوده ۲۵m تا S=15 امکان جدایی فونداسیون از خاک در اثر اعمال گسلش (h=2.5m) وجود دارد. جدایی پی از خاک باعث کاهش تکیه‌گاه پی شده که این موضوع می‌تواند باعث ایجاد اضافه نیرو و لنگر اضافی در اعضای سازه‌ای و فونداسیون به هنگام وقوع گسلش شود.

در جدول (۲) نتایج مربوط به تنش تماسی بین فونداسیون و خاک زیر آن در جابه‌جایی گسلش ۰ و ۲/۵ متر برای سه حالت قرارگیری سازه بر روی آبرفت به‌اختصار آورده شده است. با بررسی نمودارها در حالت کلی‌تر، نتایج حاصل از تنش تماسی در تمام حالات نشان می‌دهد که در صورت قرارگیری سازه در

جدول (۲): نتایج مربوط به تنش تماسی بین فونداسیون و خاک در جابه‌جایی پایه گسلش ۰ و ۲/۵ متر.



۵-۲- بررسی تأثیر تعداد طبقات سازه

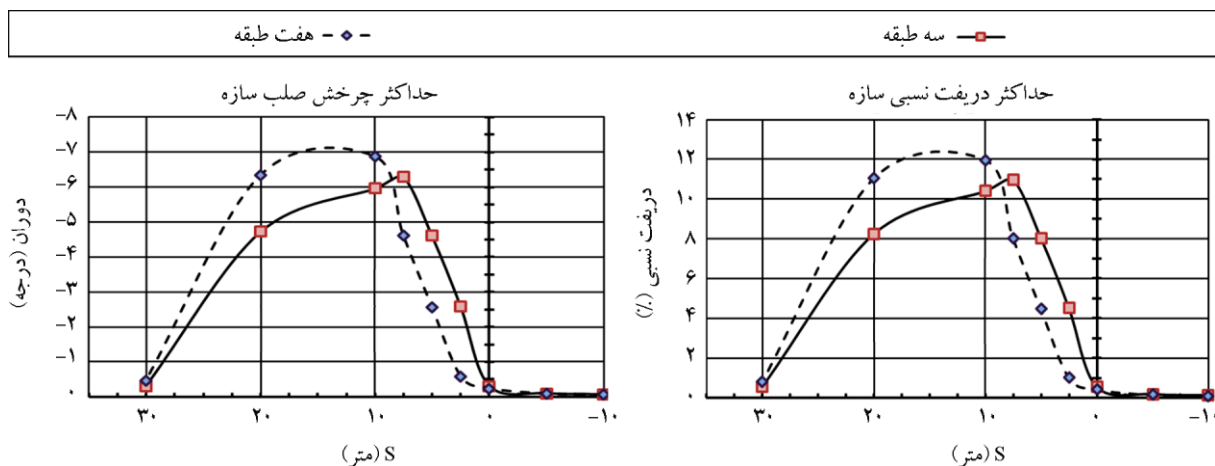
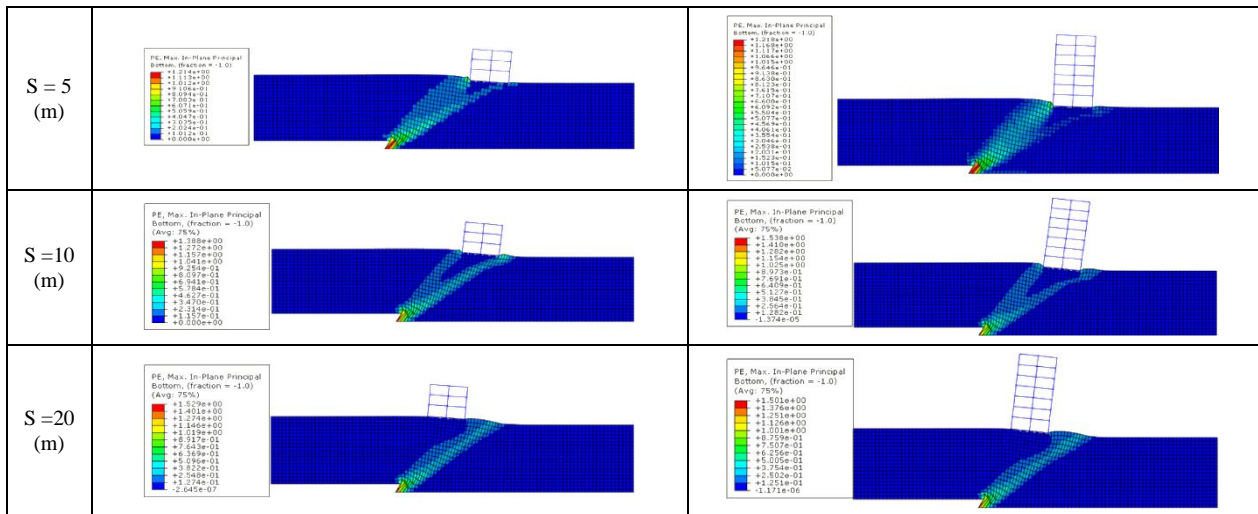
در شکل (۷) مشاهده می‌شود که تأثیر تعداد طبقات بر روی مقادیر پاسخ تغییر شکل سازه در موقعیت‌های مختلف قرارگیری سازه متفاوت و به‌صورت زیر جمع‌بندی می‌شود:

۵-۲-۱- قرارگیری سازه بر روی فرود یواره ($S \leq 0$)

- مقادیر دررفت نسبی سازه‌ها بسیار کم (کمتر از ۰/۵ درصد) و در محدوده دررفت مجاز ساختمان‌ها
- افزایش تعداد طبقات (افزایش سربار) = کاهش دررفت نسبی و افزایش عملکرد بهتر سازه‌ها
- خطر چندان سازه‌ها را تهدید نمی‌کند.

تحلیل‌ها در این بخش برای قاب‌های ساختمانی ۳ و ۷ طبقه با ضخامت فونداسیون ۷۰ سانتی‌متر انجام شده است. به‌منظور بررسی و تفسیر نتایج تحلیل‌های عددی، در المان‌های سازه‌ای دو دسته از پاسخ‌ها مورد توجه هستند. دسته نخست با نحوه جابه‌جایی سازه در ارتباط هستند که برای نمایش آن از پارامترهایی نظیر مقادیر دررفت ستون‌ها و دوران صلب سازه استفاده می‌شود. دسته دوم پاسخ‌های سیستم سازه که در مطالعه رفتار قاب سازه‌ای اهمیت دارند از جنس نیروهای داخلی اعضای سازه نظیر نیروی برشی و لنگر خمشی تیرها و فونداسیون هستند.

جدول (۳): نمونه‌ای از نتایج مربوط به کرنش پلاستیک (نحوه انتشار گسلش در آبرفت و تأثیر آن روی قاب‌های ساختمانی ۳ و ۷ طبقه)، جابه‌جایی پایه ۲/۵ متر - ضخامت فونداسیون ۰/۷ متر.



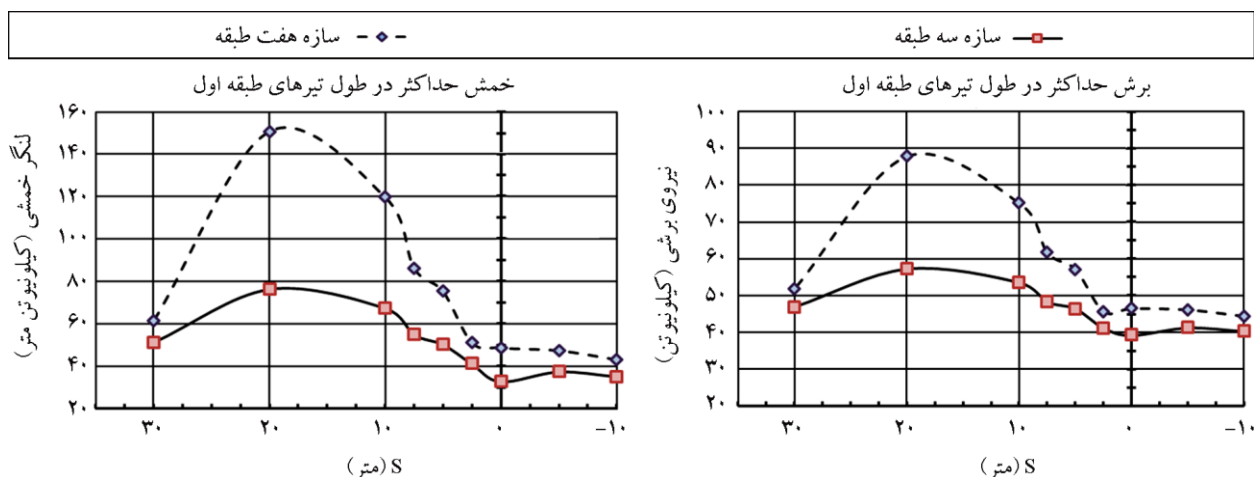
شکل (۷): نتایج حداکثر مقادیر دررفت نسبی و چرخش صلب سازه‌ها در موقعیت‌های مختلف قرارگیری برای جابه‌جایی گسلش ۲/۵ متر.

نسبی و کاهش عملکرد مناسب سازه‌ها
 - امکان ایجاد آسیب‌های جدی در سازه‌ها وجود دارد.
 $S \geq 30m$ - ۳-۲-۲-۵
 - مقادیر دررفت نسبی سازه‌ها بسیار کم (حدود ۰/۵ درصد)
 - افزایش تعداد طبقات (افزایش سربار) = افزایش دررفت نسبی سازه‌ها
 - خطر چندانی سازه‌ها را تهدید نمی‌کند.
 نمودار مشابه برای مقادیر چرخش صلب سازه‌ای نیز در همان شکل (۷) ارائه شده است. بر اساس این نمودارها، روند کلی تغییرات این دو پاسخ با هم همخوانی دارد. در ادامه مقادیر حداکثر خمش و

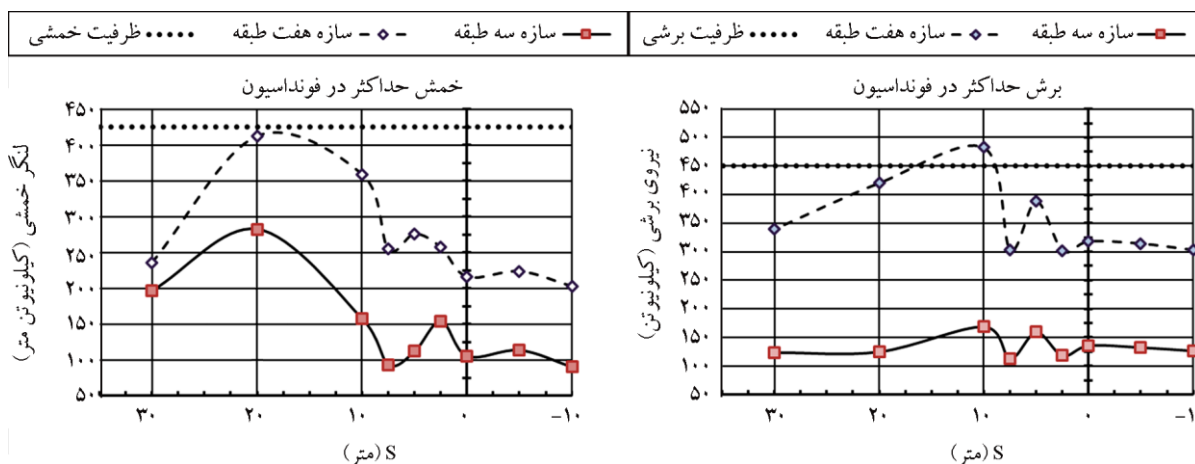
۲-۲-۵ - قرارگیری سازه بر روی فرادیواره ($S \geq 0$)
 ۰-۲-۲-۵ - $0 < S < 10 m$
 - مقادیر دررفت نسبی سازه‌ها قابل توجه
 - افزایش تعداد طبقات (افزایش سربار) = کاهش دررفت نسبی و افزایش عملکرد بهتر سازه‌ها
 - امکان ایجاد آسیب‌های جدی در سازه‌ها وجود دارد.
 ۱۰-۲-۲-۵ - $10 \leq S < 30 m$
 - مقادیر دررفت نسبی سازه‌ها قابل توجه و بسیار بیشتر از محدوده دررفت مجاز ساختمان‌ها
 - افزایش تعداد طبقات (افزایش سربار) = افزایش دررفت

مشابه با حالت مذکور در تیرها، در فونداسیون‌ها مشاهده می‌شود و افزایش تعداد طبقات سازه (افزایش سربار) باعث ایجاد لنگر خمشی و نیروی برشی بزرگ تری در فونداسیون در اثر اعمال گسلش ($h=2.5m$) می‌شود، البته در حالت استاتیکی ($h=0$) نیز در فونداسیون سازه با تعداد طبقات بیشتر نسبت به سازه با تعداد طبقات کمتر این موضوع مشاهده می‌شود و مقادیر نیروهای داخلی ایجاد شده در فونداسیون با افزایش تعداد طبقات (سربار) افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به دو نمودار شکل (۹) می‌توان مشاهده نمود که به‌منظور بررسی پایداری و عملکرد مناسب فونداسیون‌ها در اثر اعمال گسلش، علاوه بر خمش، مقادیر برش نیز بایستی بررسی شوند (تأثیر هر دو بایستی به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته شود) برخلاف تیرها که در این تحقیق غالباً خمش عامل تعیین‌کننده در طراحی آنها بوده است. به‌عنوان نمونه در سازه ۷ طبقه در $S=10m$ مقادیر لنگر خمشی ایجاد شده در فونداسیون‌ها در اثر اعمال گسلش ($h=2.5m$) کمتر از ظرفیت خمشی فونداسیون است، در حالی که مقدار نیروی برشی ایجاد شده در فونداسیون بیشتر از مقدار مجاز نیروی برشی فونداسیون بوده و می‌تواند باعث ایجاد شکست و تخریب در فونداسیون گردد که برای رفع این مشکل یا باید درصد آرماتور یا ضخامت فونداسیون یا هر دو را افزایش داد که در مرحله بعدی این تحقیق، تأثیر افزایش ضخامت فونداسیون روی پاسخ سیستم کوپل ارائه می‌شود.

برش ایجاد شده در طول تیرهای طبقه اول و فونداسیون سازه‌ها، در موقعیت‌های مختلف قرارگیری سازه در جابه‌جایی گسلش $2/5$ متر در شکل‌های (۸) و (۹) ارائه شده است. در حالت استاتیکی ($h=0$) زمانی که گسلش رخ نداده است، با توجه به توزیع بار مرده خطی یکسان در طول تیر طبقات قاب‌های ساختمانی ۳ و ۷ طبقه، توزیع مقادیر خمش و برش در طول تیرهای تمام طبقات مشابه و یکسان می‌باشد ولی با وقوع گسلش سطحی و ایجاد جابه‌جایی‌های تفاضلی در سطح زمین و تأثیرگذاری بر قاب‌های ساختمانی، همان‌طور که در نمودارهای شکل (۸) مشخص می‌باشد با افزایش تعداد طبقات، حداکثر خمش و برش ایجاد شده در طول تیر طبقات، بر اثر اعمال گسلش ($h=2.5m$) افزایش می‌یابد. الگوی تغییرات لنگر خمشی و برش حداکثر در طول تیرهای سازه‌های ۳ و ۷ طبقه مشابه است. همچنین مقادیر حداکثر لنگر خمشی و نیروی برشی ایجاد شده در اعضای سازه‌ها در $S=20m$ نسبت به سایر حالات قرارگیری سازه‌ها نسبت به محل رخنمون گسلش میدان آزاد بیشتر می‌باشد که دلیل اصلی آن نیز ایجاد جدایش بین فونداسیون و خاک زیر آن (با توجه به نمودارهای توزیع تنش تماسی بین فونداسیون و خاک) می‌باشد که باعث کاهش تکیه‌گاه و در نتیجه ایجاد اضافه نیرو و لنگرهای اضافی در اعضای سازه‌ای می‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده بحرانی‌ترین حالت قرارگیری سازه نسبت به محل رخنمون گسلش میدان آزاد باشد. در شکل (۹) روندی



شکل (۸): مقادیر حداکثر لنگر خمشی و نیروی برشی در طول تیر طبقه اول سازه‌ها در موقعیت‌های متفاوت قرارگیری سازه و برای جابه‌جایی پایه $2/5$ متر و ضخامت فونداسیون $0/7$ متر.

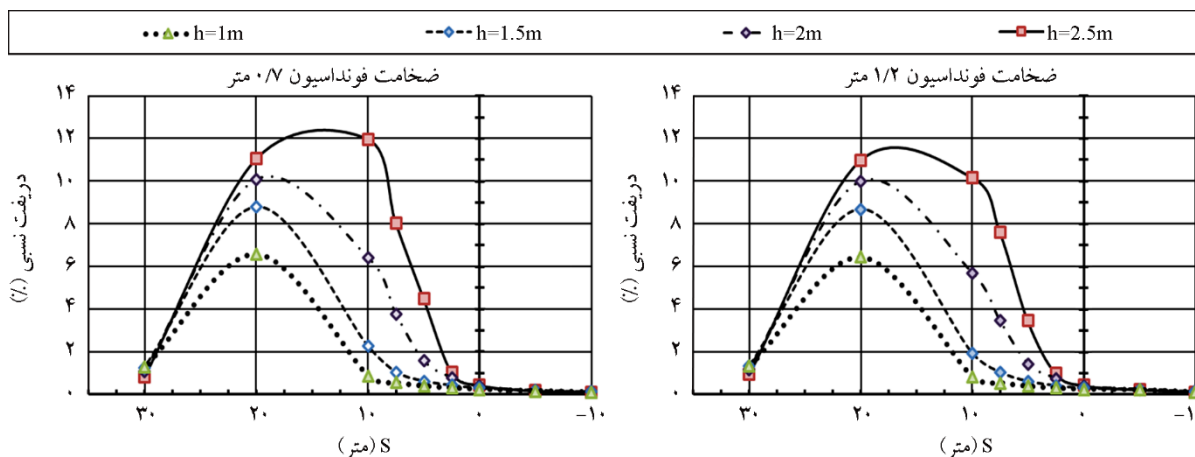


شکل (۹): مقادیر حداکثر لنگر خمشی و نیروی برشی در فونداسیون سازه‌ها در موقعیت‌های متفاوت قرارگیری سازه و برای جابه‌جایی پایه ۲/۵ متر و ضخامت فونداسیون ۰/۷ متر.

هستند. دلیل وجود این مقادیر زیاد دریافت، سختی نسبتاً بالای فونداسیون و شکل هندسی آن (فونداسیون نواری^۸) است که باعث می‌شود تغییر مکان‌های تفاضلی ناشی از گسلش سطحی، به‌جای تبدیل به تغییر مکان‌های نسبی و تفاضلی زیاد در سازه، تنها به چرخش صلب سازه منتج گردند. چنین مقادیر بالایی از دریافت ستون‌ها که ناشی از چرخش صلب سازه هستند منجر به ایجاد خرابی‌های سازه‌ای گسترده در اعضای باربر سازه نخواهند شد اما می‌تواند باعث ایجاد اختلال در خدمت‌رسانی سازه و عملکرد سیستم تأسیسات آن شوند. از سوی دیگر افزایش ضخامت فونداسیون تأثیر چندانی بر نتایج پاسخ دریافت ستون‌ها نداشته است و نمی‌توان از آن به‌عنوان راه‌حلی برای کنترل جابه‌جایی‌های نسبی سازه استفاده نمود.

۵-۳- بررسی تأثیر ضخامت فونداسیون

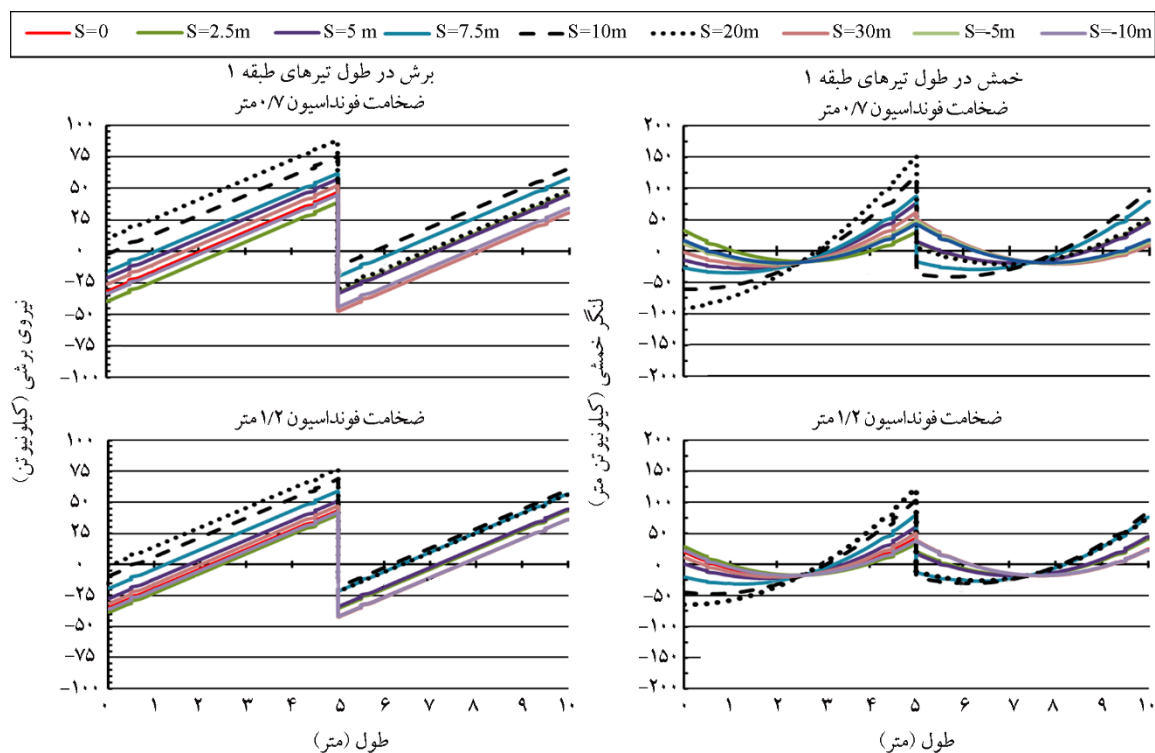
برای بررسی تأثیر تغییر ضخامت فونداسیون بر پاسخ‌های سیستم کوپل در حالت اعمال گسلش، تحلیل‌های سازه ۷ طبقه، با دو ضخامت متفاوت فونداسیون (1.2m و TF=0.7) انجام شده است. برای بررسی و تفسیر نتایج تحلیل‌های عددی، تعدادی از پاسخ‌های اساسی در المان‌های فونداسیون و اعضای سازه‌ای بررسی شده‌اند. مقدار دریافت نسبی ستون محور وسط سازه برای دو ضخامت فونداسیون ۷۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر نیز در شکل (۱۰) نشان داده شده است. مقدار حداکثر دریافت در جابه‌جایی پایه ۲/۵ متر و TF=0.7m برابر با ۱۲/۲ درصد و در حالت TF=1.2m برابر با ۱۱/۶ درصد است. این مقادیر بسیار بالا و بیش از محدوده دریافت مجاز سازه‌های ساختمانی



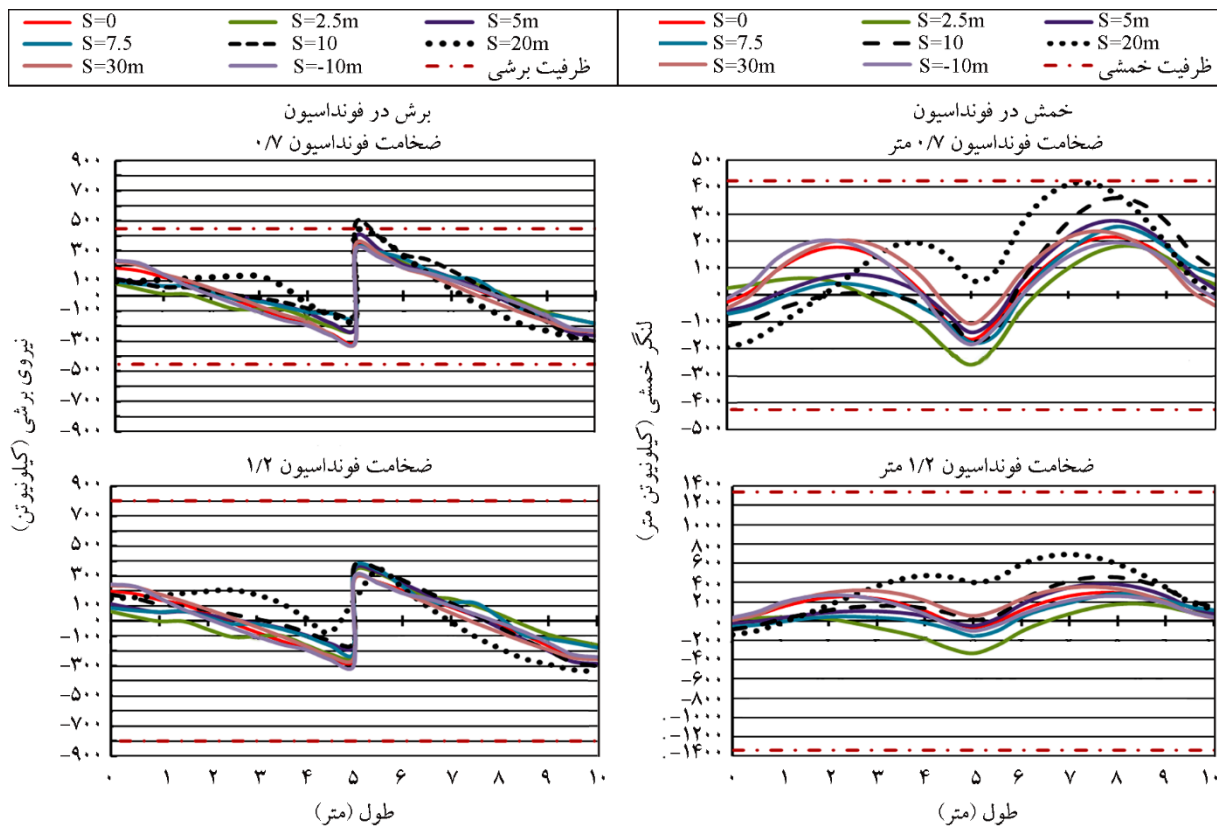
شکل (۱۰): تأثیر ضخامت فونداسیون بر مقادیر دریافت نسبی، برای سازه ۷ طبقه در موقعیت‌های متفاوت (S) و مقادیر مختلف جابه‌جایی پایه (h).

همچنین ملاحظه می شود که مقدار لنگر خمشی فونداسیون، حاصل از اعمال گسلش، با افزایش ضخامت فونداسیون از ۰/۷ به ۱/۲ متر، افزایش چشمگیری در حدود ۶۵ درصد پیدا کرده است. در ادامه در همان شکل (۱۲) مشاهده می شود که نیروی برشی ایجاد شده در فونداسیون با ضخامت ۷۰ سانتی متر در اثر اعمال گسلش به مقدار ۵۰۰ کیلونیوتن می رسد که این مقدار از حداکثر نیروی برشی که فونداسیون برای آن طراحی شده (ظرفیت برشی فونداسیون) بیشتر است و می تواند منجر به ایجاد شکست و تخریب فونداسیون گردد، در صورتی که در حالت $TF=1.2m$ حداکثر نیروی برشی ایجاد شده در فونداسیون کمتر از ظرفیت برشی فونداسیون و در محدوده مجاز می باشد. همچنین مشاهده می شود که برش ایجاد شده در فونداسیون، حاصل از اعمال گسلش، با افزایش ضخامت فونداسیون از ۰/۷ متر به ۱/۲ متر در حدود ۲۵ درصد کاهش پیدا کرده است. در انتهای این بخش، این موضوع بایستی ذکر شود که مقادیر درصدی کاهش و افزایش خمش و برش ارائه شده، متناسب با افزایش ضخامت فونداسیون از ۰/۷ به ۱/۲ متر می باشد و بدیهی است که تغییرات متفاوت ضخامت فونداسیون، می تواند روی این مقادیر درصدها تأثیر گذار باشد.

در ادامه تأثیر اعمال گسلش بر پاسخ لنگر خمشی و نیروی برشی تیرهای طبقه اول سازه ۷ طبقه با دو ضخامت فونداسیون ۷۰ و ۱۲۰ سانتی متر بررسی شده است. در شکل (۱۱) مشاهده می شود که لنگرهای تکیه گاهی همچنین نیروی برشی ایجاد شده در تیرهای طبقه اول در حالت $S=10m$ تا $S=20m$ برای هر دو ضخامت فونداسیون، بیشترین مقدار را دارند و این مقادیر در سازه با ضخامت فونداسیون کمتر ($TF=0.7m$) بیشتر می باشد. افزایش ضخامت فونداسیون از ۰/۷ متر به ۱/۲ متر باعث کاهش حدوداً ۲۰ درصد حداکثر مقدار لنگر و کاهش ۱۴ درصد مقادیر نیروی برشی ایجاد شده در تیر طبقه اول در اثر اعمال گسلش ($h=2.5m$) شده است. در شکل (۱۲) تأثیر اعمال گسلش بر پاسخ لنگر خمشی و نیروی برشی فونداسیون سازه ۷ طبقه با دو ضخامت فونداسیون ۷۰ و ۱۲۰ سانتی متر بررسی شده است. چنانچه مشاهده می شود، مقدار حداکثر لنگر خمشی برای فونداسیون با ضخامت ۷۰ سانتی متر برابر با ۴۱/۵ نیوتن متر و تقریباً برابر با لنگر حداکثری است که فونداسیون برای آن طراحی شده است، در صورتی که در حالت $TF=1.2m$ حداکثر لنگر ایجاد شده در فونداسیون کمتر از لنگر حداکثر طراحی آن و در محدوده مجاز می باشد.



شکل (۱۱): توزیع مقادیر لنگر خمشی و نیروی برشی تیرهای طبقه اول برای ۹ موقعیت قرارگیری سازه ۷ طبقه، جابه جایی پایه ۲/۵ متر و ضخامت فونداسیون ۰/۷ و ۱/۲ متر.



شکل (۱۲): توزیع مقادیر لنگر خمشی و نیروی برشی فونداسیون برای ۹ موقعیت قرارگیری سازه ۷ طبقه جابه‌جایی پایه ۲/۵ متر و ضخامت فونداسیون ۰/۷ و ۱/۲ متر.

۶- نتیجه‌گیری

اعمال گسلش ($h=2.5m$) بسیار کم و در محدوده مجاز می‌باشد و خطر چندانی سازه را تهدید نمی‌کند؛ اما در صورت قرارگیری سازه بر روی فرادیواره و نزدیک محل برون‌زد گسلش ($0 < S < 30m$) مقادیر جابه‌جایی افقی و دوران سازه و فونداسیون قابل توجه (بیش از مقادیر مجاز ساختمانی) می‌باشد و امکان ایجاد آسیب‌های جدی در سازه‌ها وجود دارد، در این حالت تأثیر افزایش تعداد طبقات (سربرار) بر روی نتایج متفاوت و بدین صورت می‌باشد که در صورت قرارگیری سازه در ناحیه،

(a) $0 < S < 10m$: افزایش تعداد طبقات = کاهش مقادیر دررفت، دوران و افزایش عملکرد بهتر سازه‌ها

(b) $10 \leq S < 30m$: افزایش تعداد طبقات = افزایش مقادیر دررفت، دوران و کاهش عملکرد بهتر سازه‌ها

بنابراین در صورتی که امکان پرهیز از احداث سازه در ناحیه

۱- بحرانی‌ترین موقعیت قرارگیری، برای حالتی است که سازه بر روی فرادیواره و در فاصله ۱۵ تا ۲۵ متری از محل رخنمون گسلش میدان آزاد (S) قرار می‌گیرد. در این حالت در اثر اعمال گسلش سطحی، جدایشی بین فونداسیون و خاک زیر آن در گوشه سمت چپ فونداسیون ایجاد می‌شود. جدایی فونداسیون از خاک، باعث کاهش تکیه‌گاه فونداسیون و در نتیجه توزیع تنش و لنگرهای اضافی در اعضای سازه‌ای و فونداسیون می‌شود که می‌تواند حتی باعث ایجاد آسیب و تخریب اعضای سازه‌ای و فونداسیون در جابه‌جایی پایه گسلش بالاتر شود.

۲- در صورت قرارگیری سازه بر روی فرادیواره ($S \leq 0$) یا بر روی فرادیواره و دور از محل رخنمون گسلش ($S \geq 30m$)، مقادیر جابه‌جایی افقی و دوران سازه و فونداسیون در اثر

- Engineering*, **6**(4), 607-628.
5. Moosavi, S.M. (2010). *Engineering Measures Seeking to Build Buildings in Dip-Slip Fault Zones Active*. Ph.D. Dissertation, University of Iran, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (in Persian).
 6. Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Bransby, M.F., Davies, M.C.R. and El Nahas, A. (2007) Fault Rupture Propagation through Sand: Finite-Element Analysis and Validation through Centrifuge Experiments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, **133**(8), 943-958.
 7. Yilmaz, M.T. 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.
 8. 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), 1389-1404.
 9. 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.
 10. Fadaee, M. (2013) Proposing Geotechnical Solution to Reduce Reverse Fault Rupture Hazard by Physical and Numerical Modeling. Ph.D. Dissertation, University of Iran, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (in Persian).
 11. Anastasopoulos, I., Callerio, A., Bransby, M.F., Davies, M.C.R., El Nahas A, Faccioli E and Rossignol E (2008) Numerical Analyses of Fault-Foundation Interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **6**(4), 645-675.
 12. Hashemi, K. (2012) 3D Experimental and Numerical Analysis of Fault Rupture-Soil-Foundation-Structure Interaction. M.Sc. Thesis, National Technical University of Athens.
 13. Salajegheh, A., Davoodi, M., Jafari, M.K., Fadaee,

0 < S < 30m وجود نداشته باشد، به منظور عملکرد بهتر سازه در صورت وقوع گسلش سطحی معکوس، در ناحیه a احداث سازه با تعداد طبقات بیشتر (سربار بزرگ تر) و در ناحیه b روندی مخالف و احداث سازه با سربار کمتر پیشنهاد می گردد.

۳- افزایش تعداد طبقات باعث ایجاد نیرو و لنگرهای بزرگ تر در اعضای سازه ای نظیر تیرها و فونداسیون در اثر اعمال گسلش (h=2.5m) می شود.

۴- افزایش ضخامت فونداسیون تأثیری بر پروفیل قائم سطح خاک، مقادیر دررفت ستون ها و چرخش صلب سازه نداشته است.

افزایش ضخامت فونداسیون (افزایش سختی فونداسیون) باعث کاهش مقادیر نیروهای داخلی ایجاد شده در اعضای سازه ای (نظیر تیرها) و به عبارتی کاهش آسیب دیدگی و افزایش عملکرد بهتر قاب ساختمانی در مواجهه با پدیده گسلش سطحی به هنگام وقوع زلزله می شود. در نتیجه افزایش ضخامت فونداسیون می تواند به عنوان یک راهکار مناسب در جهت عملکرد بهتر سازه در مواجهه با پدیده اندرکنشی سیستم کوپل مورد توجه و استفاده قرار گیرد.

مراجع

1. 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.
2. Faccioli, E., Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Callerio, A. and Paolucci, R. (2008) Fault rupture-foundation interaction: selected case histories. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **6**(4), 557-583.
3. 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.
4. Bransby MF, Davies MCR, Nahas A and Nagaoka S (2008) Centrifuge Modelling of Reverse Fault-Foundation Interaction. *Bulletin of Earthquake*

M. (2015) Validation of numerical modeling of surface fault-structure interaction. 7th *International Conference on Seismology & Earthquake engineering* (in Persian).

واژه‌نامه

Surface Fault Rupture	۱- گسلش سطحی
Free Field	۲- میدان آزاد
Dundee University	۳- دانشگاه داندی
ABAQUS	۴- آباکوس
ETABS	۵- ایتبس
Image Process	۶- پردازش تصویر
Hanging Wall	۷- فرا دیواره
Strip Foundation	۸- فونداسیون نواری