تاثیر در نظرگیری انعطاف پذیری فونداسیون در اندرکنش پی و گسلش نرمال

محمد داودی
استادیار، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ایران
m-davood@iiees.ac.ir

مجید هاشمی
دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ایران
m.hashemi@iiees.ac.ir

محمد کاظم جعفری
استاد، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ایران
jafari@iiees.ac.ir

کلید واژه‌ها: گسلش نرمال، پی سطحی انعطاف پذیر، روش عددی، مدل رفتار پلاستیک بتن

چکیده

در اثر تغییر مکان تفاضلی زمین در طرفین گسل در زمان وقوع زلزله، سطح زمین دچار گسیختگی شده و چنانچه سازه ای در مجاورت و یا روی سطح مذکور قرار داشته باشد، می تواند دچار خسارت اساسی گردد. علاوه بر این، مشاهدات انجام شده در زلزله‌های گذشته بویژه زمین لرزه های ۱۹۹۹ میلادی در ترکیه و تایوان نشان داده است که علاوه بر اثرات آبرفت سطحی، حضور سازه های سطحی نیز بر نحوه انتشار گسلش موثر است به گونه ای که امروز محققین در معرفی موضوع از اندرکنش پی-سازه-خاک-گسلش(FR-SFSI)بهره می‌گیرند. از آنجاکه در اکثر مطالعات عددی که تاکنون به منظور مدلسازی اندرکنش پی- گسلش انجام شده است، فونداسیون به صورت المان کاملا صلب در نظر گرفته شده است، هدف از این تحقیق، بررسی تاثیر در نظرگیری انعطاف‌پذیری فونداسیون در عملکرد پی‌های گسترده در برخورد با گسلش سطحی نرمال می باشد. در تحقیق حاضر، با مدلسازی عددی لایه خاک و فونداسیون به صورت دو بعدی در نرم افزار ABAQUS و اعمال جابجایی به سطح بستر، پدیده گسلش سطحی مورد مطالعه قرار گرفته است. نوآوری انجام شده در این تحقیق، مدل نمودن فونداسیون به صورت انعطاف پذیر و با مشخصات واقعی و بررسی تنش ها و کرنش ها و درصد خرابی های به وجود آمده در آن می باشد.پس از مدلسازی فونداسیون با سختی واقعی، موقعیت های مختلف قرار گیری فونداسیون نسبت به محل رخنمون گسل در سطح زمین و تاثیر جابجایی های مختلف اعمال شده ناشی از گسلش در اندرکنش فونداسیون و گسل نرمال مورد بررسی قرار گرفته است.

۱- مقدمه

برای بررسی پدیده گسلش، مطالعات جامعی در حوزه های مختلف آزمایشگاهی و عددی انجام گرفته است. تجربیات زلزله های گذشته؛ به خصوص زلزله های سال ۱۹۹۹ در ترکیه و تایوان و زلزله سال ۲۰۰۸ در چین؛ مثالهای متعددی از اندرکنش سازه های مختلف با گسلش را نشان می‌دهد((Anastasopoulos & Gazetas (2007 ، موسوی ۱۳۸۹). بر این اساس در مطالعات پیشین و در حوزه آزمایشگاهی، با استفاده از تستهای سانتریفیوژ و آزمایشات ۱g سعی گردیده است تا پارامترهای مهم در اندرکنش فونداسیون- گسلش از قبیل موقعیت نسبی فونداسیون نسبت به گسل و سربار فونداسیون مورد بررسی قرار گیرد. در این آزمایشها مشخص گردید که سه عامل موقعیت نسبی فونداسیون، نوع فونداسیون و مقدار سربار آن از اهمیت بسیار بالایی برخوردار میباشد.

با توجه به نتایج مطالعات آزمایشگاهی و بررسی مطالعات میدانی در زلزله های گذشته توسط Anastasopoulos et al. (2007), Bransby et al. (2008), Anastasopoulos et al. (2008), Anastasopoulos et al. (2009), Fadaee et al. (2012)، مدلهای عددی برای بررسی پدیده گسلش سطحی گسترش یافته است. این مدلها قادر هستند مسیر گسلش را از سنگ بستر به سطح زمین و همچنین اثر وجود سازه را برسطح زمین و اندرکنش آنرا با گسلش مدل نمایند که در اکثر این مطالعات، فونداسیون به صورت تیر کاملا صلب در نظر گرفته شده است. واضح است که

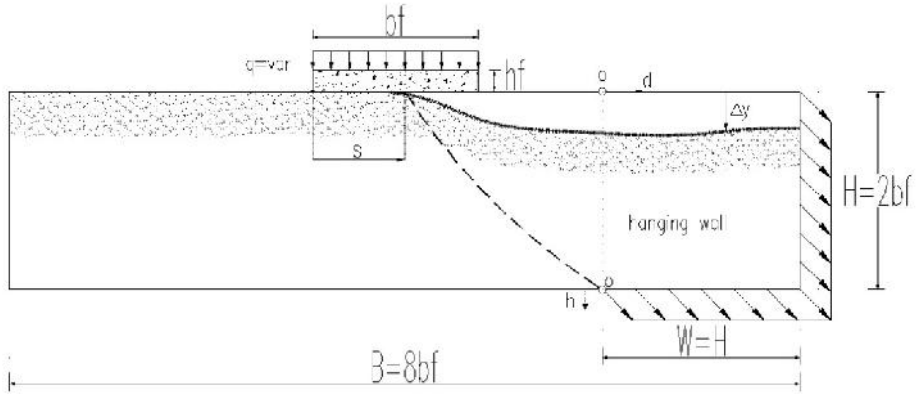
با فرض تیر صلب، امکان بررسی تنش های به وجود آمده در فونداسیون و پیش بینی درصد خرابی در آن ممکن نبوده است. همچنین مطالعات گذشته نشان می‌دهد در صورتی که بار فونداسیون کم بوده و جدایش با خاک زیر پی اتفاق بیفتد، پی به صورت یک تیر طره و یا یک تیر با دو تکیه گاه ساده عمل خواهد نمود که با توجه به محل قرارگیری فونداسیون نسبت به محل رخنمون گسلش در سطح زمین و وزن سربار قرار گرفته بر روی فونداسیون، تنش ها و کرنش های بسیار بزرگی در پی به وجود خواهد آمد. وقوع این پدیده حتی می‌تواند به تخریب کامل پی منجر شود.

در ادامه مطالعات قبلی صورت گرفته در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله در زمینه گسلش سطحی – آبرفت – پی – سازه و با توجه به سابقه مطالعات ذکر شده در ادبیات فنی و از آنجاکه نوع فونداسیون و سختی آن می‌تواند یکی از پارامترهای تاثیر گذار در اندرکنش با گسلش باشد، سعی شد با در نظر گیری پی سطحی از جنس بتن با مشخصات واقعی، به بررسی تاثیر سختی فونداسیون در اندرکنش آن با گسلش نرمال پرداخته شود. همچنین، پس از مدلسازی فونداسیون با سختی واقعی، موقعیت های مختلف قرار گیری فونداسیون نسبت به محل رخنمون گسلش در سطح زمین و تاثیر جابجایی های مختلف اعمال شده ناشی از گسلش در اندرکنش فونداسیون و گسلش نرمال مورد بررسی قرار گرفت (هاشمی، ۱۳۹۲). لازم به ذکر است در مطالعه حاضر، تنها قسمتی از نتایج مطالعات جامعی ارائه می‌شود که در قالب طرح پژوهشی در پژوهشگاه درحال انجام است.

۲– تعریف موضوع و مشخصات مصالح

در این پژوهش نتایج اندرکنش گسلش نرمال با پی گسترده ارائه خواهد شد. در این مطالعه، گسل و پی به صورت دوبعدی در نظر گرفته شده است. هندسه موضوع در شکل ۱ نشان داده شده است. این هندسه در ادبیات فنی نیز مورد مطالعه بوده است که در این تحقیق به منظور درک ساده تر مسئله، سعی شده است بین پارامترهای مختلف، نسبت های مشخص به کار رود. در این راستا و به منظور بررسی ابعاد مختلف مسئله و تاثیر پارامترهای مختلف بر اندرکنش گسلش نرمال و پی گسترده، پارامترهای موثر بر این پدیده مورد بررسی قرار گرفته است که پس از معرفی مشخصات مصالح و روند مدلسازی، نتایج تحلیل های پارامتریک در اندرکنش گسلش نرمال و پی گسترده انعطاف پذیر ارائه شده است.

در این مدلسازی، مصالح خاکی به صورت ماسه متراکم با چگالی ۱۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول یانگ به صورت تابعی از عمق و ضریب پواسون ۰.۳در نظر گرفته شده است. مدل رفتاری مصالح خاکی، الاستوپلاستیک با معیار تسلیم موهرکولمب همراه با نرم شدگی کرنش مدل شده است. مقدار چسبندگی ماسه ۵ کیلوپاسکال، زاویه اصطکاک حداکثر خاک ۴۵ درجه و مقدار باقیمانده زاویه اصطکاک ۳۰ درجه در نظر گرفته شده است ضمن اینکه حداکثر زاویه اتساع ۱۸ درجه و زاویه اتساع باقیمانده ۱ درجه در نظر گرفته شده است.

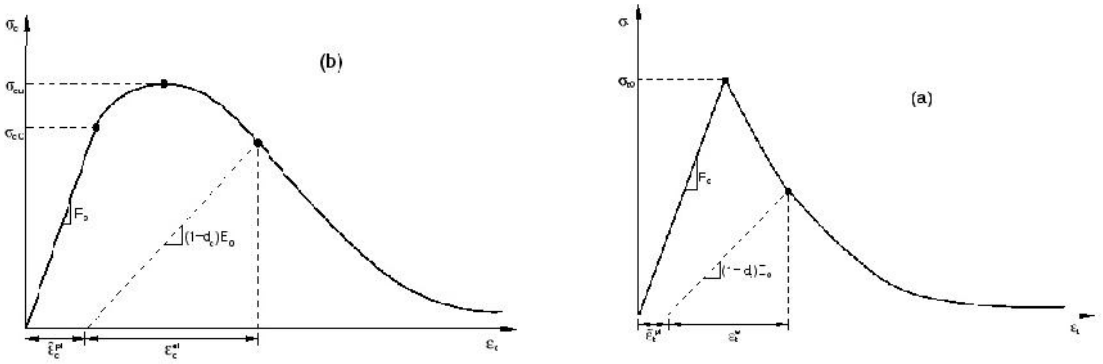


شکل۱: هندسه مسئله مورد بررسی و معرفی پارامترهای متغیر

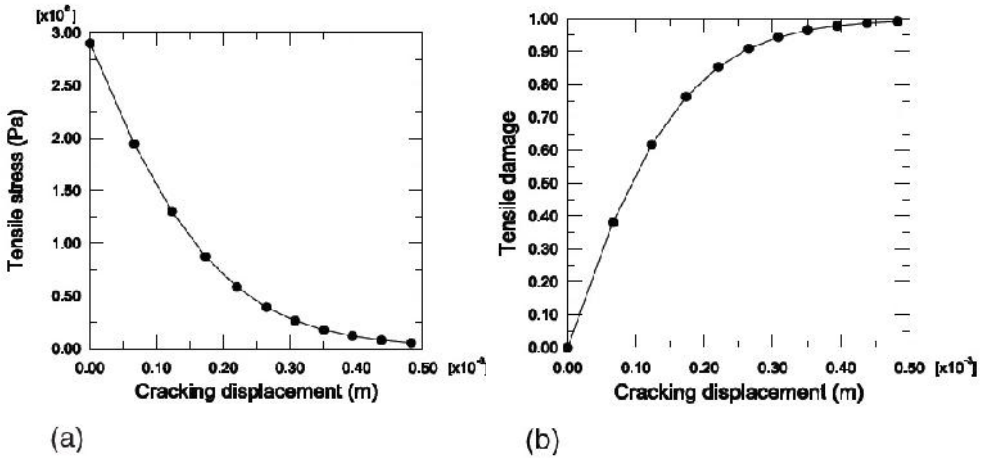
فونداسیون مورد مطالعه به صورت یک پی گسترده بتنی با عرض ۱۰ متر و ضخامت ۱ متر می‌باشد که سربار q=90 KPa بر آن وارد میشود که در مدلسازی عددی، با استفاده از المان پوسته به صورت دو بعدی و انعطاف پذیر مدل شده است. مدل رفتاری بتن، الاستوپلاستیک فرض شده است و رفتار پلاستیک بتن با استفاده از مدل Concrete Damage Plasticity که در نرم افزار ABAQUS ویژه مدلسازی رفتار پلاستیک بتن و بررسی خرابی های به وجود آمده در آن تحت بارگذاری های مختلف می‌باشد مدلسازی شده است. مشخصات رفتار ذکر شده برای بتن در جدول ۱ آمده است. مشخصات در نظر گرفته شده برای بتن مشابه مثال راهنمای نرم افزار در مورد این مدل رفتاری برداشت شده است. براساس تغییر شکلهای پلاستیک به وجود آمده در فونداسیون، رفتار فشاری و کششی بتن و پارامتر خرابی در مود کششی (DamageT)، به صورت شکل ۲ و شکل ۳ تعریف شده است.

جدول۱: مشخصات مقاومتی بتن

Young's modulus:	$E = 31027$ MPa
Poisson's ratio:	$\nu = 0.15$
Density:	$\rho = 2643$ kg/m^3
Dilation angle:	$\psi = 36.31^{o}$
Compressive initial yield stress:	$\sigma_{c0} = 13.0$ MPa
Compressive ultimate stress:	$\sigma_{cu} = 24.1$ MPa
Tensile failure stress:	$\sigma_{t0} = 2.9$ MPa



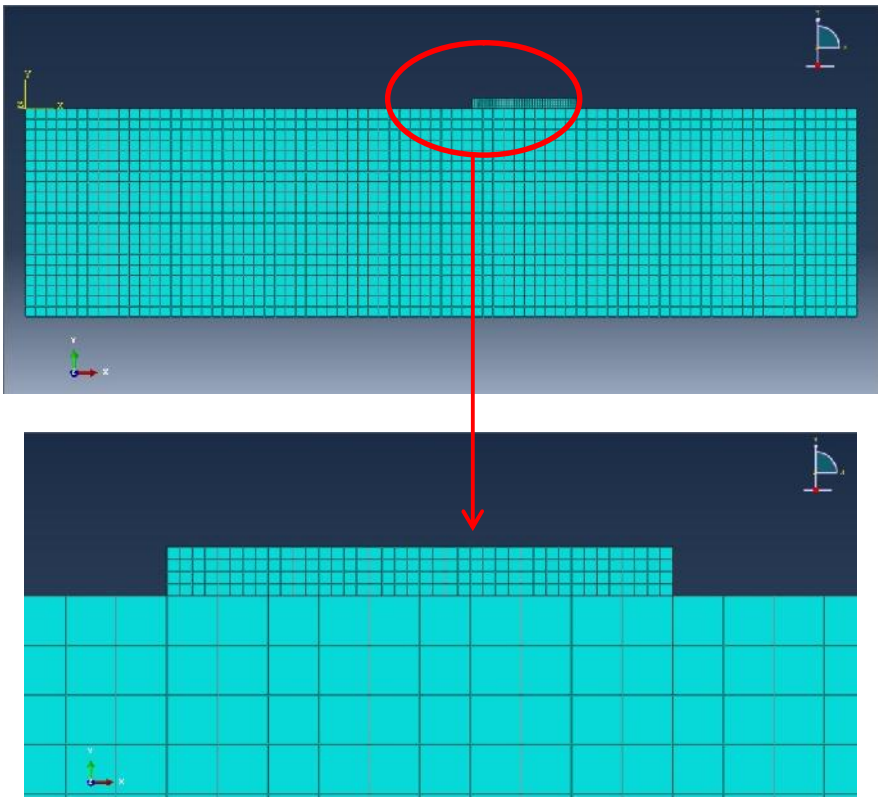
شکل ۲: منحنی رفتاری بتن a) در کشش b) در فشار



شکل ۳: مشخصات بتن در کشش a) رفتار پلاستیک کششی بتن b) معیار خرابی بتن

با توجه به نمودار شکل ۳، پارامتر خرابی به صورت یک پارامتر بدون بعد که به صورت یک عدد مثبت بین صفر (برای بتن بدون ترک) و یک (برای بتنی که مقاومت خود را به طور کامل از دست داده است) معرفی می‌شود.

دراین تحقیق برای مدل‌سازی اندرکنش گسلش و پی سطحی،دوگام تعریف شده است. درگام اول،تنشهای ژئواستاتیکی برجا به تعادل می-رسند و درگام دوم، باایجاد حرکت درمرزهای بلوک محرک،حرکت گسل شبیه سازی می‌شود. با بررسی های انجام شده بر روی اندازه مش و با صحت سنجی با ادبیات فنی موجود در این حوزه اندازه مش خاک به صورت مربعی با بعد۱ متر انتخاب شده است و از آنجاکه هدف اصلی در این تحقیق بررسی تنش های به وجود امده در فونداسیون می باشد، سعی شده است تا آنجاکه ممکن است مش فونداسیون ریز انتخاب شود. به همین منظور مش مربعی مطابق شکل ۴ با بعد ۰.۲۵متر برای فونداسیون در نظر گرفته شده است.



شکل ۴: تصویر مش بندی لایه خاک و فونداسیون در نرم افزار ABAQUS

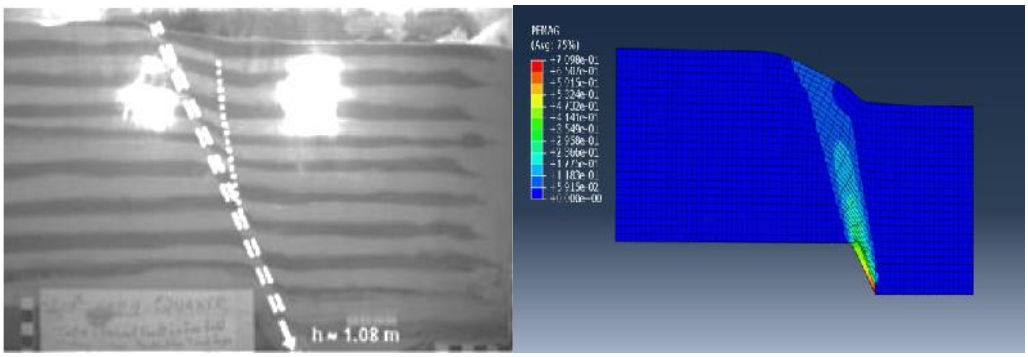
به منظور بررسی اندرکنش گسلش و پی گسترده، ابتدا بر اساس هندسه در نظر گرفته شده مطابق شکل ۱ مدلسازی بدون حضور پی انجام شده و پس از اعمال جابجایی به سطح بستر، محل بیرون زدگی گسل در سطح زمین به دست آمده است. با توجه به محل بیرون زدگی گسل در میدان آزاد، فونداسیون در موقعیت های مختلف نسبت به آن قرار داده می‌شود. فاصله فونداسیون از رخنمون گسل(S)، فاصله لبه سمت چپ پی از رخنمون می‌باشد که با پارامتر بی بعد S/b معرفی می‌شود که b عرض فونداسیون می‌باشد. جابجایی اعمال شده به سطح بستر نیز بر ضخامت لایه خاک تقسیم شده و پارامتر h/H را معرفی می‌نماید.

در تحلیل های پارامتریک که نتایج آن در ادامه ذکر خواهد شد، اثر متغیرهای مختلف بر روی پارامترهایی همچون حداکثر تنش کششی، حداکثر کرنش پلاستیک (PE) و پارامتر خرابی بررسی شده است.

۳– گسلش در میدان آزاد

با توجه به اینکه در پژوهش های پیشین در حوزه گسلش در میدان آزاد مطالعات آزمایشگاهی نسبتا جامعی انجام گردیده و نتایج آنها در ادبیات فنی موجود می باشد، هدف از مدلسازی میدان آزاد در پژوهش حاضر در وهله نخست صحت سنجی مدل عددی مورد استفاده می باشد. در شکل ۵ نتایج حاصل از مقایسه جابجایی قائم سطح زمین در هر دو مدل آزمایشگاهی و عددی دیده می‌شود. نتایج مطالعه صحت سنجی، حکایت

از انطباق قابل قبول بین نتایج عددی و آزمایشگاهی دارد و تنها اختلاف کوچک به دلیل وجود خط گسل ثانویه در مدل آزمایشگاهی می‌باشد که در مدل عددی قابل پیش‌بینی نیست.



(b) (a)

شکل۵: نمایش کرنش برشی پلاستیک در انتشار گسل نرمال، (a): مدل عددی، (b): آزمایش گریز از مرکز[3]

با توجه به اشکال فوق، برای تعیین محل بیرون زدگی گسل در سطح زمین، نقطه ای که بیشترین میزان دوران را تجربه نموده است را به عنوان رخنمون گسلش در سطح زمین در نظر گرفته و کلیه فواصلی که در ادامه تحت عنوان فاصله فونداسیون از رخنمون گسل که پس از نرمال سازی نسبت به بعد پی، تحت عنوان S/b مطرح خواهد شد همگی نسبت به این نقطه سنجیده می‌شوند.

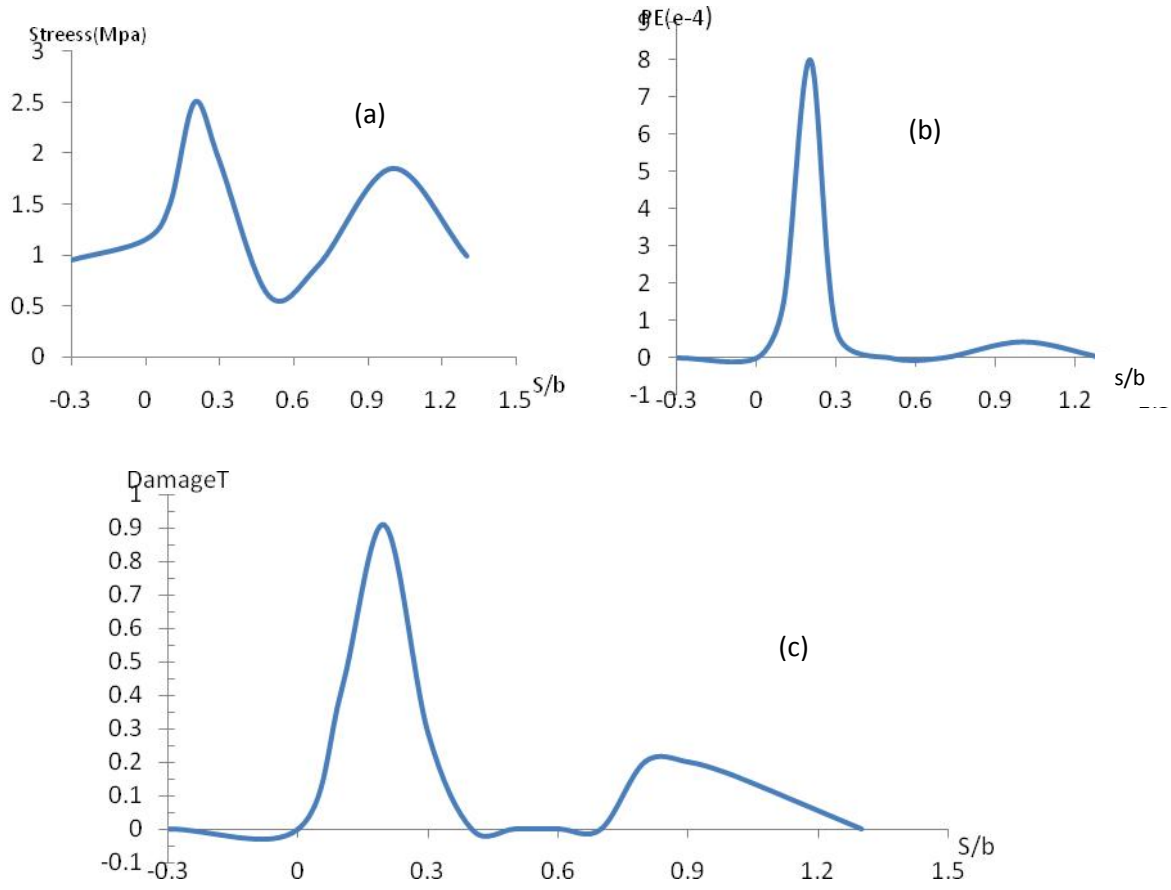
۴-اندرکنش گسلش نرمال و پی گسترده

به منظور بررسی اندرکنش گسلش نرمال و پی گسترده، ابتدا بر اساس هندسه در نظر گرفته شده در شکل ۱، مدلسازی بدون حضور پی انجام شده و پس از اعمال جابجایی به سطح بستر، محل بیرون زدگی گسل در سطح زمین به دست آمده است. در مرحله بعد با قرار دادن فونداسیون بر روی محل مورد نظر نسبت به رخنمون گسل، با تحلیل پارامتریک به بررسی اثر هر یک از پارامترها بر روی تنش، کرنش و خرابی ایجاد شده در پی پرداخته شده است. در ادامه، گزیده‌ای از نتایج حاصله ارائه خواهد شد.

۴-۱-بررسی موقعیت قرار گیری پی نسبت به محل رخنمون گسل

در این قسمت با قرار دادن فونداسیون با عرض ۱۰ متر در فواصل مختلف از رخنمون گسل به بررسی اثر این متغییر برروی پارامترهای مورد نظر پرداخته خواهد شد. میزان جابجایی اعمال شده به سطح بستر در این قسمت، h/H=5% می‌باشد. منظور از S/b های منفی نیز این است که پی به صورت کامل در سمت راست رخنمون قرار گرفته است. مقدار سرباری که در این مرحله بر روی پی قرار داده شده است برابر با ۹۰ کیلوپاسکال می‌باشد.

همانطور که در شکل۶ مشخص شده است درصورتی که گسل به فاصله تقریبی ۱/۳ کناری پی برخورد نماید، بیشترین تنش ها و کرنش ها و به تبع آن بیشترین میزان آسیب به پی وارد خواهد شد. علت این امر این است که در صورتی که گسل به ۱/۳ سمت چپ پی برخورد نماید، فونداسیون همانند یک تیر دوسر ساده عمل می نماید (به این حالت Sogging گفته می شود) و تنش های زیادی در آن به وجود می آید. درحالیکه اگر گسل به ۱/۳ سمت راست پی برخورد نماید، همانند یک تیر طره عمل نموده (به این حالت Hogging گفته میشود) و مجددا تنش های زیادی در پی به وجود می آید. ولی اگر گسل به میانه های پی برخورد نماید پتانسیل انحراف گسل از هر دو سمت پی وجود دارد و احتمال اینکه نقاطی از فونداسیون بدون تکیه گاه شوند کمتر می‌گردد. بنابراین میزان تنش ها، کرنش ها و همچنین خرابی به وجود آمده در پی نیز به حداقل می‌رسد.

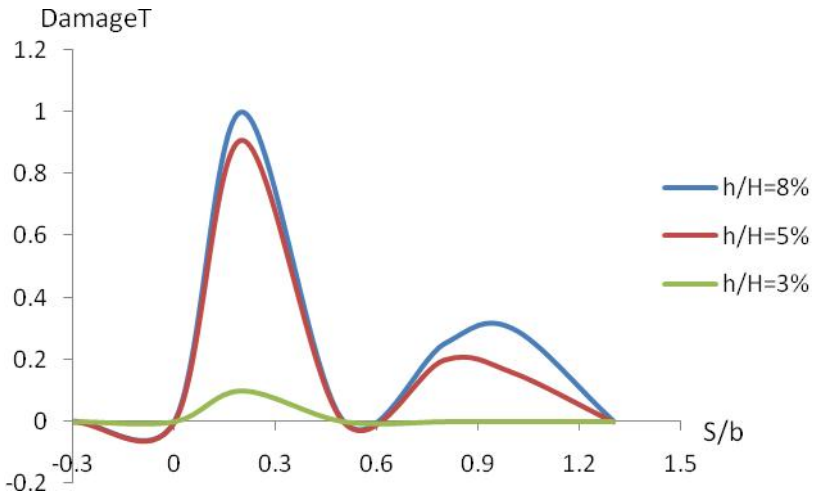


شکل ۶: اثر محل قرار گیری پی بر روی تنش، کرنش و خرابی در حالت h/H=5% ***a) حداکثر تنش کششی ایجاد شده در پی، b) حداکثر کرنش پلاستیک ایجاد شده در پی، c) مقدار خرابی ایجاد شده در پی***

۴-۲-بررسی اثر میزان جابجایی اعمال شده

به منظور توسعه نتایج برای حالات مختلف h/H و بررسی اثر میزان جابجایی اعمال شده بر روی خرابی پی، تحلیلهای عددی با انتخاب مقادیر مختلف برای پارامتر مذکور انجام گرفت و درصد خرابی پی برحسب پارامتر S/b بدست آمد. نتایج حاصله در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مذکور مشخص می‌باشد با افزایش میزان جابجایی پایه اعمال شده؛ به خصوص در حالتی که نسبت جابجایی پایه از ۳ درصد به ۵ درصد افزایش می یابد؛ درصد خرابی های به وجود آمده در فونداسیون به طرز چشمگیری افزایش می یابد.

همانطور که در نمودار دیده می‌شود الگوی خرابی در جابجایی های مختلف پایه، تقریبا یکسان شده است و عملکرد تیر دوسرساده و تیر طره در هر سه حالت مورد بررسی قابل مشاهده می باشد. با این وجود، عملکرد تیر ساده باعث ایجاد خرابی های بیشتری در پی امی‌شود. حداکثر خرابی نیز در وضعیت S/b=0.2 رخ می‌دهد. بعلاوه، نتیجه دیگری که از نمودار فوق استخراج می‌شود این است که در جابجایی h/H=3% به دلیل کوچک بودن میزان جابجایی پایه اعمالی، در اکثر S/b ها خرابی قابل توجهی در پی رخ نمی‌دهد .



شکل۷: مقایسه درصد خرابی پی در جابجایی پایه h/H=3% , 5% , 8%

۵–نتیجه‌گیری

در این تحقیق سعی شده است تا با بررسی پارامترهای مختلف موثر بر اندرکنش گسلش نرمال و پی گسترده، میزان خرابی‌های به وجود آمده در فونداسیون تحت گسلش سطحی ارزیابی شود. با بررسی های به عمل آمده مشخص گردید که با اختصاص مشخصات واقعی به پی، تنش های به وجود آمده در پی در اثر برخورد گسل به آن، در برخی موارد بیش از مقاومت مقطع پی می‌باشد که منجر به ایجاد خرابی در فونداسیون می گردد.

در گسلش سطحی، دو مکانیزم Sogging و Hogging احتمال وقوع دارند که در مکانیزم اول، فونداسیون در اثر از دست دادن تکیه گاه به صورت تیر دوسر ساده عمل خواهد نمود و در مکانیزم دوم به دلیل اخیر، به صورت تیر کنسول تحت بار قرار خواهد گرفت. در اینصورت، با توجه به وزن بسیار زیاد سربار قرار گرفته بر روی فونداسیون در هر مورد، تنش های کششی بسیار زیاد در فونداسیون ایجاد می‌گردد به گونه ای که این تنش ها از حداکثر تنش کششی قابل تحمل توسط مقطع فونداسیون فراتر رفته و منجر به ایجاد ترک و گسیختگی در پی می‌گردد.

در مجموع، با بررسی های انجام شده در این تحقیق در زمینه اندرکنش پی با گسلش نرمال مشخص گردید که در صورت برخورد گسل به کناره های پی، بیشترین خرابی ایجاد خواهد شد. همچنین با تغییر مقدار جابجایی اعمال شده در سطح بستر، الگوی نمودار خرابی بر حسب فاصله از رخنمون تقریبا ثابت می‌ماند.

مراجع

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

Anastasopoulos, I and Gazetas G (2007) "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

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

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

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 from1g Modelling via High Resolution Optical Image Processing Techniques. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering (JSEE), 14(5), 271-283*

هاشمی م (۱۳۹۲)" عملکرد پی های گسترده در گسلش سطحی". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله