

بررسی اثرات صلبیت فونداسیون در مسیر گسلش در گسل‌های شیب‌لغز معکوس

محسن تهرانی‌زاده* (استاد)

مهسا مرادی شقاقی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۶ (دوره‌ی ۲، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۶۱-۶۷)

وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ در نزدیکی شهرهایی که در حوزه‌ی نزدیک قرار دارند غیرقابل انکار است. حرکت زمین در حوزه‌ی نزدیک، خصوصیات متفاوتی نسبت به حوزه‌ی دوراز گسل دارد. پس از زمین‌لرزه‌های مخربی همانند: لاندروز (کالیفرنیا، ۱۹۹۲)، چی چی (تایوان، ۱۹۹۹)، و کوچالی (ترکیه، ۱۹۹۹)، جامعه‌ی مهندسی به فکر در نظر گرفتن ویژگی‌های متفاوتی در طراحی سازه‌های نزدیک گسل افتاده است؛ که یکی از آنها، گسلش سطحی است. با توجه به اینکه اثر مخرب گسلش سطحی در بسیاری از آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌ها در برابر زلزله نادیده گرفته شده است، در نوشتار حاضر به بررسی اثر مخرب آن پرداخته شده است. در پژوهش حاضر، با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS به بررسی اثر صلبیت فونداسیون در تغییر مسیر گسلش پرداخته شده و لایه‌ی خاک و فونداسیون گسترده با ضخامت‌های مختلف و با اعمال اندرکنش خاک و فونداسیون، تحت جابه‌جایی‌های ناشی از زلزله قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داده است که افزایش صلبیت فونداسیون، موجب تغییر مسیر گسلش می‌شود.

واژگان کلیدی: صلبیت فونداسیون، اندرکنش بین خاک و فونداسیون، گسلش سطحی، حوزه‌ی نزدیک گسل.

dtehz@yahoo.com
mahsa_moradi.sh68@yahoo.com

۱. مقدمه

دارد.^[۳] در سال ۲۰۰۸، نیز در یک مطالعه‌ی میدانی زمین‌لرزه‌هایی از جمله: چی چی، دوزجه و کوچالی، به بررسی اثرات نوع و استحکام فونداسیون در مسیر گسلش آنها پرداخته شده و این نتیجه به‌دست آمده است که در زمین‌لرزه‌های مذکور، فونداسیون‌های با صلبیت بالا عملکرد مناسبی در برابر گسلش داشته‌اند.^[۵] در نوشتار دیگری (۲۰۰۸) نیز به بررسی اثرات سربار در فونداسیون و فاصله‌ی فونداسیون از گسلش در تغییر مسیر گسلش پرداخته شده و این نتیجه به‌دست آمده است که افزایش سربار باعث تغییر مسیر گسلش می‌شود.^[۶] همچنین در سال ۲۰۱۳ به بررسی عوامل ژئوتکنیکی مؤثر در مسیر گسلش، همچون مشخصات و ضخامت لایه‌ی خاکی به همراه نوع فونداسیون پرداخته شده و این نتیجه به‌دست آمده است که در گسل‌های شیب‌لغز، ضخامت و مشخصات لایه‌ی خاکی روی گسل، تأثیر به‌سزایی در مشخصات گسلش سطحی و جذب شدن گسلش در لایه‌ی خاکی دارد.^[۷] در نوشتار حاضر، به بررسی اثرات صلبیت فونداسیون در مسیر گسلش در گسل‌های شیب‌لغز معکوس با استفاده از تحلیل‌های عددی و نیز بررسی راه‌حل مناسبی برای سالم ماندن ساختمان‌های ساخته‌شده در نزدیک محل گسلش پرداخته شده است. در برخی از آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ی، راه‌حل دوری از گسل برای هدف مذکور ارائه شده است. عملی‌ساختن راهکار دوری از گسل‌های فعال به دلایل متعددی دشوار و گاه حتی بی‌معنی است. برخی از این دلایل عبارت‌اند از:

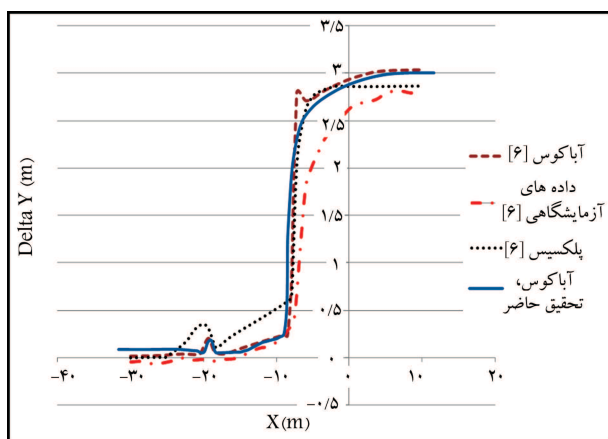
زمین‌لرزه‌ها از نظر فاصله از گسل به ۳ دسته‌ی: حوزه‌ی دور، حوزه‌ی متوسط، و حوزه‌ی نزدیک تقسیم‌بندی می‌شوند. زمین‌لرزه‌ها در حوزه‌ی نزدیک، ویژگی‌های متفاوت و بسیار مهم و مخرب نسبت به زمین‌لرزه‌ها در حوزه‌ی دور دارند، که یکی از آنها، گسلش سطحی حین زلزله است.^[۱] گسلش سطحی، جابه‌جایی یا گسیختگی در سطح زمین است، که در راستای گسل‌ها در اثر وقوع زمین‌لرزه ایجاد می‌شود. اهمیت گسلش سطحی بیش از پیش خود را در زمین‌لرزه‌های اخیر همانند: لاندروز (کالیفرنیا، ۱۹۹۲)^۱، چی چی (تایوان، ۱۹۹۹)^۲، دوزجه و کوچالی (ترکیه، ۱۹۹۹)^۳، و کوبه (ژاپن، ۱۹۹۵)^۴ نشان داده است.^[۵-۲] نوشتاری در سال ۲۰۰۱، در مورد معیارهای کاهش خطرات همراه با گسلش با بررسی میدانی زمین‌لرزه‌هایی همچون: لاندروز (۱۹۹۲)، چی چی (۱۹۹۹)، و دوزجه و کوچالی (۱۹۹۹) منتشر و در آن نشان داده شده است که نحوه‌ی حرکت زمین، عمق مصالح روی سنگ بستر، و جنس خاک تأثیر به‌سزایی در مشخصات گسلش دارد.^[۴] همچنین در سال ۲۰۰۷، به بررسی میدانی اندرکنش خاک و سازه طی انتشار گسلش در زلزله‌ی کوچالی (۱۹۹۹) در ترکیه پرداخته شده و این نتیجه به‌دست آمده است که نوع فونداسیون سازه، نقش مهمی در پاسخ به جابه‌جایی‌های تحمیلی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۲/۱۹، اصلاحیه ۱۳۹۴/۹/۲۲، پذیرش ۱۳۹۴/۱۰/۵.



شکل ۱. مدل المان بندی خاک و فونداسیون و نحوه اعمال جابه جایی.



شکل ۲. مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی اجزاء محدودی پژوهش حاضر با نتایج نوشتار آناستاسوپولوس و همکاران [۶].

۲.۲. صحت‌سنجی مدل‌سازی

برای بررسی درستی عملکرد نرم‌افزار و مدل‌سازی، نمونه‌ی شماره‌ی ۲۹ موجود در نوشتار آناستاسوپولوس و همکاران (۲۰۰۸) مدل شده است. [۶] که شامل لایه‌ی خاکی به ضخامت ۱۵ متر است و تحت گسلش معکوس با جابه‌جایی قائم ۲/۵ متر قرار داشته و فونداسیون مورد استفاده، به طول ۱۰ متر و سربار وارد شده به آن ۹۰ کیلوپاسکال بوده است، که با نرم‌افزارهای آباکوس و پلکسیس^۶ مدل شده است. همچنین برای مقایسه، نمودار مربوط به نتایج نمونه‌ی آزمایشگاهی در نوشتار حاضر ارائه شده است. برای صحت‌سنجی، نمودار جابه‌جایی قائم سطح زمین در طول خاک برای نمونه‌های موجود در نوشتار مذکور با مدل مشابه ساخته شده در پژوهش حاضر در شکل ۲ ارائه شده است. در شکل ۲، X بیان‌گر مختصات سطح لایه‌ی خاکی است، که برحسب متر است و Delta Y نشان‌دهنده‌ی تغییرمکان سطح لایه‌ی خاکی در اثر جابه‌جایی قائم حاصل از گسلش بر حسب متر است. در شکل ذکر شده، منحنی توپر مربوط به نتایج حاصل از مدل‌سازی در پژوهش حاضر است و منحنی خط‌چین بزرگ مربوط به نتایج مدل‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS در نوشتار آناستاسوپولوس و همکاران و منحنی خط‌چین ریز مربوط

تشخیص گسل‌های فعال از غیرفعال، کاری دشوار و پرشائبه است و در سازه‌های طولی مانند: خطوط لوله، پل‌ها، تونل‌ها، خاکریزها، و ... قطع شدن گسل در یک مقطع غیرقابل اجتناب است. [۱]

محل گسلش در سطح زمین متغیر است و گاه از محل ترک‌خوردگی‌های قبلی پیروی نمی‌کند و شکست در صفحات ضعیف‌تر دیگری رخ می‌دهد. لذا حتی در صورت مشخص بودن محل دقیق خط گسیختگی در نقشه، گاه صفحه‌ی گسل چندین کیلومتر جابه‌جا می‌شود. [۸،۴]

انتشار گسلش از سنگ بستر تا سطح زمین، تابع مشخصات خاک روی آن است. هندسه و جنس خاک، تعیین‌کننده‌ی محل گسلش در سطح زمین و میزان تغییرشکل آن است و گاه پدیده‌های تفرق و دو شاخه شدن با تغییر مسیر اصلی شکست، امکان پیش‌بینی محل گسلش را مشکل می‌سازد. [۹،۴]

وجود سازه در گسلش اثر می‌گذارد و به دلیل اندرکنش آن دو، الگوی مسیر شکست می‌تواند با آنچه در سطح آزاد رخ می‌دهد، متفاوت باشد. [۶،۵]

۲. روش انجام پژوهش

۱.۲. روش تحلیل اجزاء محدود و مدل‌سازی

در پژوهش حاضر، برای بررسی اثر صلبیت فونداسیون و اندرکنش بین فونداسیون و خاک در مسیر گسلش، از تحلیل استاتیکی غیرخطی اجزاء محدود (نرم‌افزار آباکوس-نسخه‌ی ۱۳) استفاده شده است. در این راستا، بررسی‌ها در گسل معکوس با زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه و در دو نوع خاک انجام شده است. بسیاری از گسل‌های مهم ایران، مکانیزم شیب لغز دارند و همچنین وسعت و شدت خرابی‌ها در محدوده‌ی گسلش در گسل‌های شیب لغز مخصوصاً معکوس، قابل توجه‌تر از سایر موارد است. [۱] به همین دلیل در پژوهش حاضر، گسل‌های شیب لغز معکوس مورد توجه قرار گرفته‌اند. برای مدل‌سازی لایه‌های خاک از مدل رفتاری موهر-کلمب استفاده و رفتار فونداسیون بتنی به صورت خطی در نظر گرفته شده است. [۱۰،۶،۱] مشخصات خاک‌های مورد استفاده در بررسی‌های مذکور مطابق جدول ۱ است. مدل ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس در شکل ۱ نشان داده شده است. گسلش ایجاد شده در لایه‌های خاکی در اثر ایجاد جابه‌جایی لایه‌ی خاکی با ضخامت ۲۵ متر به وجود آمده و با تغییر ضخامت و طول فونداسیون به عنوان متغیرهای پژوهش، اثر صلبیت فونداسیون در تغییر مسیر گسلش بررسی شده است. المان‌های در نظر گرفته شده برای خاک در مدل، از نوع CPEAR با ابعاد $1m \times 1m$ و المان‌های در نظر گرفته شده برای فونداسیون، از نوع CPEAR با ابعاد $0.725m \times 0.725m$ با فرض رفتار خطی بوده است. [۱۱،۱۲] اثرات اندرکنش خاک و فونداسیون با استفاده از المان Interface element مابین خاک و فونداسیون اعمال شده است. [۶] المان‌های ذکر شده با سختی بسیار زیاد در فشار و سختی صفر در کشش هستند و در برش، رفتار آن‌ها تابع قانون اصطکاک کلمب است.

جدول ۱. مشخصات خاک‌های مورد استفاده در تحلیل‌ها.

نوع خاک	چگالی (kg/m^3)	مدول کشسانی (MPa)	ضریب زاویه‌ی		ضریب چسبندگی (KPa)
			پواسون	چسبندگی اتساع	
خاک ماسه‌یی غیرمترکم	۱۸۰۰	۱۰	۰/۳	۳۰	۰
خاک رسی	۲۱۸۰	۲۵	۰/۳۵	۱۸	۳۲

۱.۱.۳. گسل معکوس با زاویه ۴۵°

نتیجه‌ی تحلیل و مسیر گسلش در ضخامت‌های مختلف فونداسیون و تحت گسل با زاویه ۴۵°، در دو نوع خاک ماسه‌یی و رسی در شکل ۳ ارائه شده است، که در آن نتایج حاصل از کانتور کرنش در نرم‌افزار نشان داده شده است، و در آن، ضخامت فونداسیون با پارامتر d مشخص شده است. جابه‌جایی‌های ایجاد شده در لایه‌ی خاک در زیر فونداسیون در ضخامت‌های مختلف مطابق شکل ۳، به صورت منحنی‌های شکل ۴ نشان داده شده است.

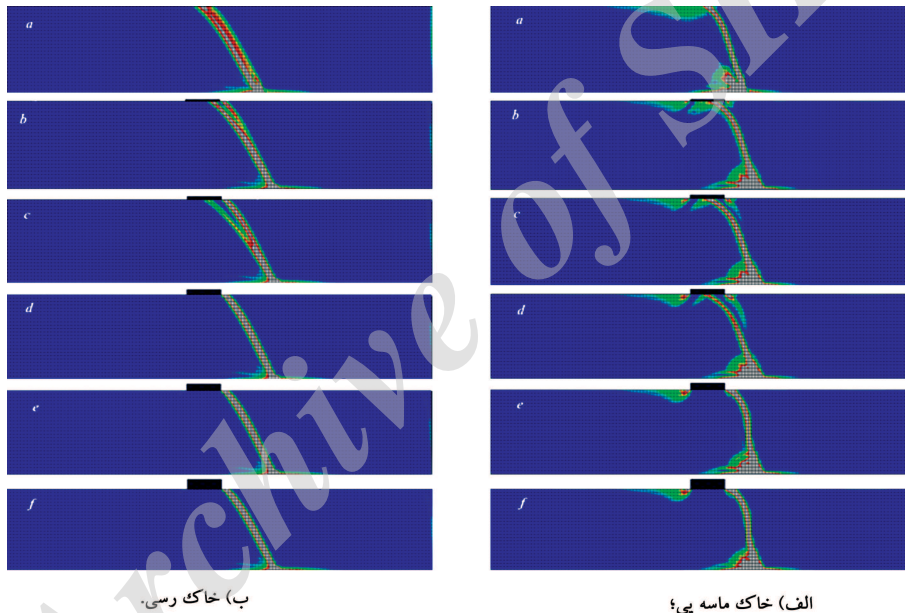
شکل ۳ الف، مربوط به خاک ماسه‌یی تحت گسلش معکوس با زاویه ۴۵ درجه است، که در آن حالت a ، برای خاک بدون در نظر گرفتن فونداسیون و حالت‌های b تا f برای خاک با فونداسیون به ضخامت‌های ۰٫۵ تا ۳ متر است. با توجه به شکل‌های مذکور واضح است که با افزایش ضخامت فونداسیون و در نتیجه افزایش صلبیت آن، گسلش مسیر خود را تغییر داده و از مسیر حالت بدون فونداسیون تبعیت نکرده است و با افزایش هر چه بیشتر ضخامت فونداسیون، مسیر آن و یا جابه‌جایی‌های قائم ناشی از گسلش به بیرون از فونداسیون منتقل شده‌اند. همچنین در شکل مذکور واضح است که در خاک‌های ماسه‌یی با ضخامت‌های فونداسیون بیشتر از ۱٫۵ متر، گسلش کاملاً به بیرون از فونداسیون منتقل شده است.

به نتایج مربوط به مدل‌سازی در نرم‌افزار پلکسیس و منحنی خط‌نقطه مربوط به نتایج آزمایشگاهی است. همچنین نمودار مذکور نشان‌دهنده‌ی انطباق خوب بین نتایج مدل‌سازی پژوهش حاضر با نتایج نوشتار آناستاسوپولوس و همکاران، است. [۲]

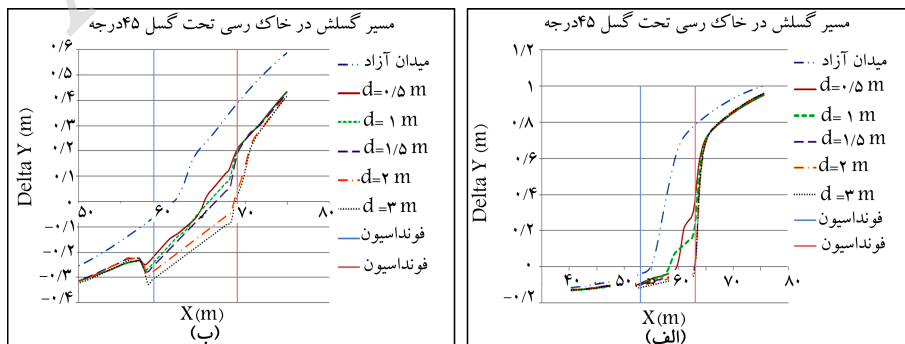
۳. نتایج مطالعات عددی

۱.۳. اثر ضخامت فونداسیون در مسیر گسلش

صلبیت فونداسیون رابطه‌ی مستقیم با ضخامت فونداسیون دارد. در این بخش صلبیت فونداسیون با تغییر ضخامت تغییر داده شده و برای ضخامت‌های مختلف، جابه‌جایی نقاط مختلف سطح خاک در اثر گسلش به دست آمده و با یکدیگر مقایسه شده است. در هر خاک، یک حالت بدون فونداسیون نیز برای مقایسه در نظر گرفته شده است. ضخامت‌های در نظر گرفته شده برای فونداسیون در پژوهش حاضر برای بررسی اثرات افزایش صلبیت آن در مسیرهای گسلش ۰٫۵m، ۱m، ۱٫۵m، ۲m و ۳m بوده است. نمونه‌یی از نحوه‌ی گسلش و تغییر مسیر آن در شکل‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است.



شکل ۳. اثرات ضخامت فونداسیون در مسیر گسلش (کانتور کرنش لایه‌ی خاکی)، گسل معکوس ۴۵° (a) خاک بدون فونداسیون، (b) خاک با فونداسیون $d = 0.5m$ ، (c) $d = 1m$ ، (d) $d = 1.5m$ ، (e) $d = 2m$ ، (f) $d = 3m$.



شکل ۴. اثرات ضخامت فونداسیون در مسیر گسلش در گسل معکوس ۴۵°.

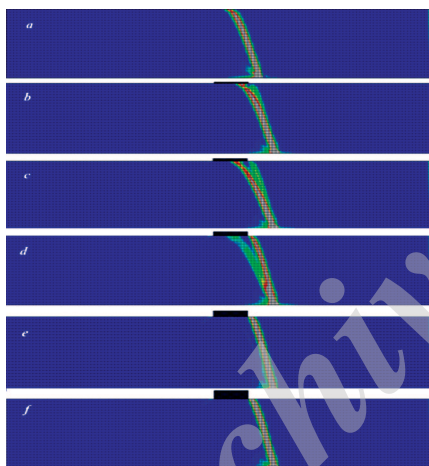
۲.۱.۳. گسل معکوس با زاویه 60°

نتیجه‌ی تحلیل و مسیر گسلش در ضخامت‌های مختلف فونداسیون و تحت گسل با زاویه 60° در دو نوع خاک ماسه‌یی و رسی در شکل ۵ نشان داده شده است، که در آن نتایج حاصل از کانتور کرنش در نرم‌افزار ارائه شده است. جابه‌جایی‌های ایجادشده در لایه‌ی خاک در زیر فونداسیون در ضخامت‌های مختلف مطابق شکل ۵، به‌صورت منحنی‌های شکل ۶ نشان داده شده است.

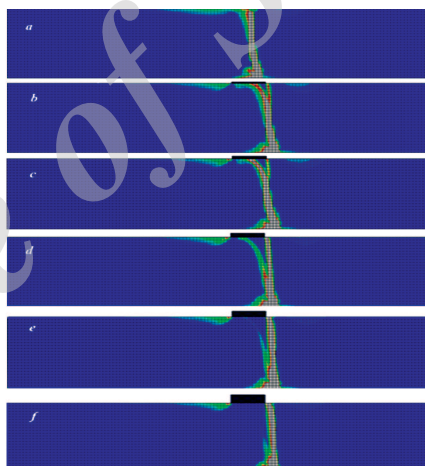
شکل ۵ الف، مربوط به خاک ماسه‌یی تحت گسلش معکوس با زاویه 60° درجه است، که در آن نیز نتایج همانند شکل ۳ است و در ضخامت‌های فونداسیون بیشتر از $1/5$ متر، در خاک‌های ماسه‌یی گسلش به بیرون از فونداسیون منتقل شده است. شکل ۵ ب، مربوط به خاک رسی تحت گسلش معکوس با زاویه 60° درجه است، که در آن نیز نتایج مشابه نتایج خاک رسی شکل ۳ بوده و در ضخامت‌های فونداسیون بیشتر از 1 متر، جابه‌جایی قائم ناشی از گسلش به بیرون از فونداسیون هدایت شده است. شکل ۶، نشان‌دهنده‌ی جابه‌جایی قائم سطح خاک زیر فونداسیون تحت گسلش معکوس با زاویه 60° درجه است، که نمودارهای آن بیان‌گر این واقعیت است که افزایش ضخامت فونداسیون تأثیر آشکاری در مسیر گسلش دارد.

شکل ۳ ب مربوط به خاک رسی تحت گسلش معکوس با زاویه 45° درجه است، که در آن نیز حالت a، برای خاک بدون در نظر گرفتن فونداسیون و حالت‌های b تا f برای خاک با فونداسیون به ضخامت‌های مختلف است. در این حالت نیز نتیجه‌ی یکسان با خاک ماسه‌یی است و با افزایش ضخامت فونداسیون، مسیر گسلش تغییر می‌یابد و در ضخامت‌های بیشتر از 1 متر، گسلش به بیرون از فونداسیون هدایت شده است. شکل ۴، نشان‌دهنده‌ی نمودارهای تغییر مکان قائم سطح لایه‌ی خاکی در دو نوع خاک مورد بررسی در پژوهش حاضر است. خطوط قائم، نشان‌دهنده‌ی مکان فونداسیون هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، گسلش سطحی در حالت بدون وجود فونداسیون در وسط مکانی که قرار است فونداسیون در آنجا احداث شود، رخ داده است؛ ولی با قرارگیری فونداسیون، مسیر گسلش منحرف و با افزایش ضخامت آن، این مسیر به بیرون از فونداسیون منتقل شده است.

با توجه به نمودارهای مربوط به دو نوع خاک ماسه‌یی و رسی، کاملاً واضح است که انحراف مسیر گسلش در خاک رسی محسوس‌تر از خاک ماسه‌یی است و در خاک مذکور با ضخامت‌های فونداسیون کمتر، مسیر گسلش به بیرون از فونداسیون منتقل شده است. با توجه به این مسئله می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک و کاهش تراکم و در نتیجه مقاومت برشی آن، تأثیر اندرکنش خاک و فونداسیون در تغییر مسیر گسلش محسوس‌تر شده است.

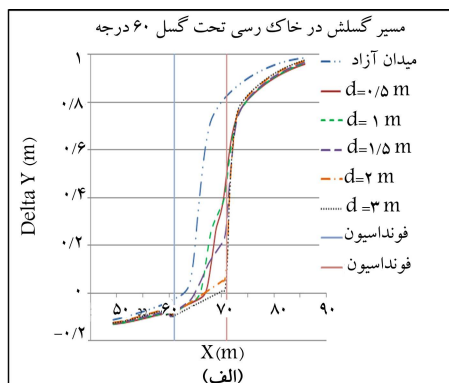
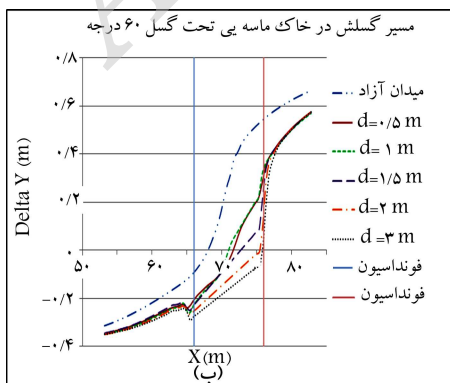


ب) خاک رسی.



الف) خاک ماسه‌یی؛

شکل ۵. اثرات ضخامت فونداسیون در مسیر گسلش (کانتور کرنش لایه‌ی خاکی)، گسل معکوس 60° (a) خاک بدون فونداسیون، (b) خاک با فونداسیون $d = 0.5$ m، (c) $d = 1$ m، (d) $d = 1.5$ m، (e) $d = 2$ m، (f) $d = 3$ m.



شکل ۶. اثر ضخامت فونداسیون در مسیر گسلش در گسل معکوس 60° .

۲.۳. اثر طول فونداسیون در مسیر گسلش

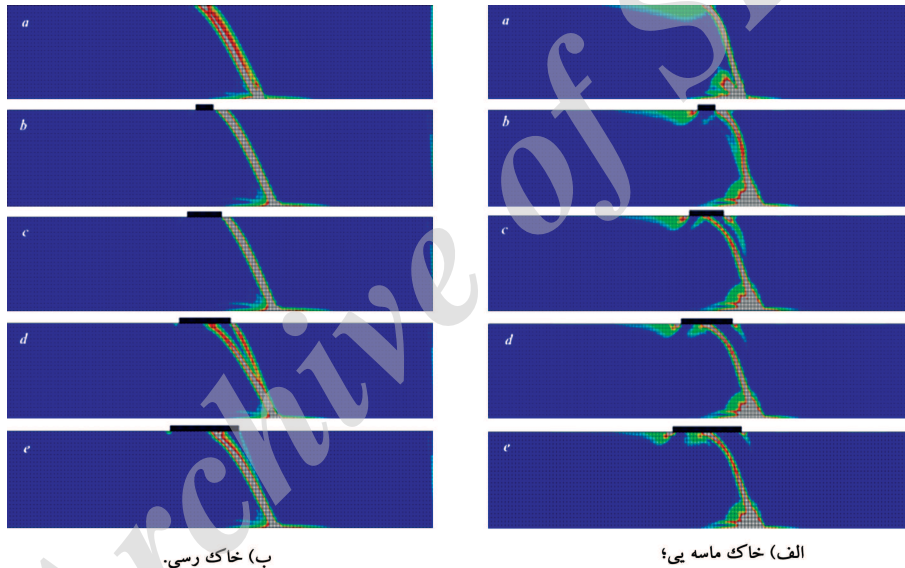
جهت بررسی اثرات طول فونداسیون در مسیر گسلش، فونداسیون به طول های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ m در نظر گرفته شده است. در تمامی حالت ها، ضخامت فونداسیون ۱٫۵m است و بار روی فونداسیون وارد نمی شود.

۱.۲.۳. گسل معکوس با زاویه ۴۵°

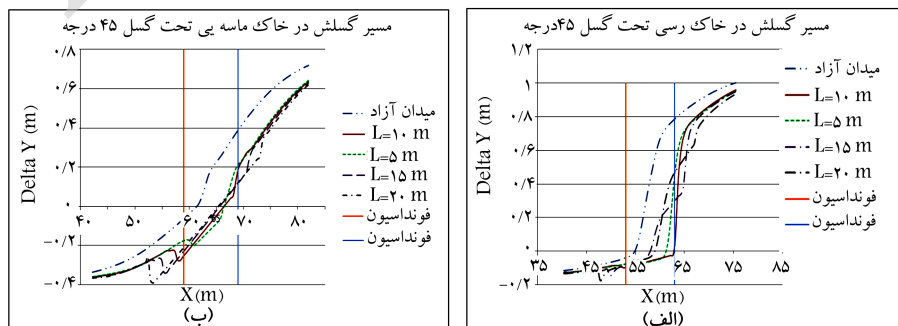
نتیجه ی تحلیل و مسیر گسلش در طول های مختلف فونداسیون و تحت گسل با زاویه ۴۵ درجه در ۲ نوع خاک ماسه یی و رسی در شکل ۷ ارائه شده است. همچنین در شکل مذکور، نتایج حاصل از کانتور کرنش در نرم افزار ارائه و طول فونداسیون با پارامتر L مشخص شده است. همچنین جابه جایی های ایجاد شده در لایه ی خاک در زیر فونداسیون و در طول های مختلف مطابق شکل ۷، به صورت منحنی های شکل ۸ نشان داده شده است. شکل ۷ الف، مربوط به اثرات طول فونداسیون در مسیر گسلش در خاک ماسه یی تحت گسلش معکوس با زاویه ۴۵ درجه است. در شکل مذکور، حالت a برای خاک بدون در نظر گرفتن فونداسیون و حالت های b تا e برای خاک با فونداسیون به طول های ۵ تا ۲۰ متر است. همچنین شکل مذکور نشان می دهد که با افزایش طول فونداسیون، که رابطه ی عکس با صلبیت فونداسیون دارد، مسیر گسلش

به بیرون از فونداسیون منتقل نشده و گسلش فونداسیون را قطع کرده و با افزایش هر چه بیشتر طول فونداسیون، مسیر گسلش به حالت آزاد بدون فونداسیون متمایل شده است. شکل ۷ ب، مربوط به خاک رسی تحت گسلش معکوس با زاویه ۴۵ درجه است، که در آن حالت a برای خاک بدون در نظر گرفتن فونداسیون و حالت های b تا e برای خاک با فونداسیون با طول های مختلف است. همان طور که در شکل مذکور مشخص است، افزایش طول فونداسیون اثرات منفی در مسیر گسلش دارد، بدین معنی که افزایش طول فونداسیون موجب هدایت مسیر گسلش به زیر فونداسیون شده است، که موجب خسارات به فونداسیون شده است.

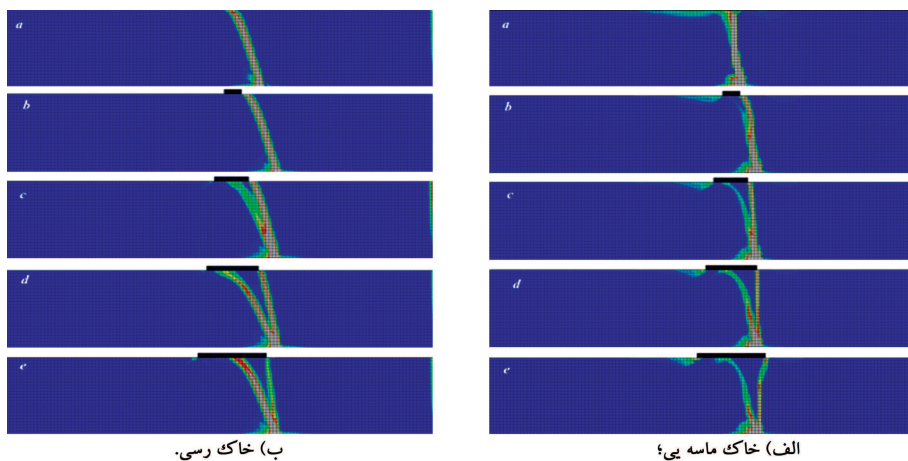
شکل ۸، نشان دهنده ی نمودارهای تغییر مکان قائم سطح لایه ی خاکی در بررسی اثرات افزایش طول فونداسیون در گسلش معکوس با زاویه ۴۵ درجه است. در شکل مذکور نیز گسلش سطحی در حالت بدون وجود فونداسیون در وسط مکانی که قرار است فونداسیون در آنجا احداث شود، رخ داده است؛ ولی با قرار گرفتن فونداسیون، مسیر گسلش منحرف شده است، در حالی که مشاهده می شود با افزایش طول فونداسیون، مسیر گسلش منحرف شده دوباره به زیر فونداسیون برگشته و به حالت بدون فونداسیون نزدیک تر شده است. همچنین در شکل مذکور نیز همانند شکل ها و نمودارهای قبلی می توان به تفاوت محسوس خاک های رسی با ماسه یی و تأثیر بیشتر اندرکنش خاک و فونداسیون در تغییر



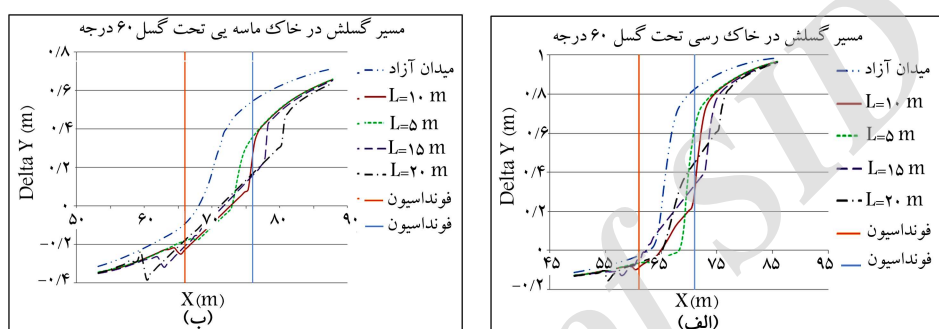
شکل ۷. اثرات طول فونداسیون در مسیر گسلش (کانتور کرنش لایه ی خاکی)، گسل معکوس ۴۵° (a) خاک بدون فونداسیون، (b) خاک با فونداسیون $L = 5m$ ، (c) $L = 10m$ ، (d) $L = 15m$ ، (e) $L = 20m$.



شکل ۸. اثرات طول فونداسیون در مسیر گسلش در گسل معکوس ۴۵°.



شکل ۹. اثرات طول فونداسیون (کانتور کرنش لایه‌ی خاکی)، گسل معکوس 60° (a) خاک بدون فونداسیون، (b) خاک با فونداسیون $L = 5m$ (c) $L = 10m$ (d)، $L = 20m$ (e)، $L = 15m$



شکل ۱۰. اثرات طول فونداسیون در مسیر گسلش در گسل معکوس 60°

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج تحلیل با نرم‌افزار آباکوس، برای ۲ نوع خاک در گسل معکوس با زوایای 45° و 60° درجه و با متغیرهای ضخامت و طول فونداسیون، این نتایج حاصل شده است، که در اینجا فقط موارد مربوط به گسلش زمین لحاظ شده و مسائل سازه‌یی که می‌توانند مورد توجه و مهم باشند، در نظر گرفته نشده است:

- افزایش صلبیت فونداسیون (افزایش ضخامت یا کاهش طول) باعث تغییر مسیر گسلش می‌شود و با افزایش صلبیت فونداسیون، گسلش سطحی به بیرون از فونداسیون انتقال می‌یابد.
- در خاک ماسه‌یی متراکم برای ضخامت‌های فونداسیون بیشتر از $1/5$ متر و برای خاک رسی برای ضخامت فونداسیون بیشتر از 1 متر، گسلش سطحی زمین از زیر فونداسیون به بیرون از آن تغییر مسیر می‌دهد.
- نتایج نشان می‌دهند که در فونداسیون‌های با ضخامت $1/5$ متر در دو نوع خاک ماسه‌یی غیرمتراکم و رسی و گسل معکوس با زوایای 45° و 60° درجه، افزایش طول فونداسیون بیشتر از 15 متر در مسیر گسلش آثار منفی دارد و در طول‌های 15 متر به بالا، گسلش سطحی، فونداسیون را قطع می‌کند.
- با کاهش زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک و کاهش تراکم و در نتیجه‌ی مقاومت برشی آن، تأثیر اندرکنش خاک و فونداسیون در تغییر مسیر گسلش محسوس‌تر است.

مسیر گسلش و جابه‌جایی قائم سطح خاک پی برد و می‌توان نتیجه گرفت که زاویه‌ی اصطکاک داخلی و مقاومت برشی خاک، تأثیر زیادی در مسیر گسلش دارند.

۲.۲.۳. گسل معکوس با زاویه‌ی 60°

نتیجه‌ی تحلیل و مسیر گسلش در طول‌های مختلف فونداسیون و تحت گسل با زاویه‌ی 60° درجه در ۲ نوع خاک ماسه‌یی و رسی در شکل ۹ ارائه و در آن، نتایج حاصل از کانتور کرنش در نرم‌افزار نشان داده شده است. جابه‌جایی‌های ایجاد شده در لایه‌ی خاک در زیر فونداسیون در طول‌های مختلف طبق شکل ۹، به صورت منحنی‌های شکل ۱۰ نشان داده شده است. در شکل ۹ (الف و ب) نیز همانند شکل ۷ می‌توان به اثرات منفی افزایش طول فونداسیون و در نتیجه کاهش صلبیت آن در مسیر گسلش پی برد، به این ترتیب که در هر دو نوع خاک ماسه‌یی و رسی با افزایش طول فونداسیون، گسلش به زیر فونداسیون منتقل شده و موجب خرابی و خسارات شدید فونداسیون و در نتیجه سازه شده است. همچنین در شکل ۱۰، اثرات افزایش طول فونداسیون در جابه‌جایی قائم سطح خاک ناشی از گسلش معکوس با زاویه‌ی 60° درجه نشان داده شده است، که نتایج مشابهی با شکل ۸ دارد. شکل‌های ۸ و ۱۰ نشان می‌دهند که افزایش طول فونداسیون، تأثیر زیادی در تغییر مسیر گسلش دارد و در طول‌های بیشتر از $15m$ ، در اثر کاهش صلبیت فونداسیون گسلش از زیر فونداسیون عبور کرده و موجب دوران بیش از حد آن شده است.

پانوشتها

1. Landers (California)
2. Chichi (Taiwan)
3. Kocaeli and Duzce (Turkey)
4. Kobe-Japan
5. V.13 ABAQUS
6. PLAXIS

منابع (References)

1. Mortazavi, M. "Two-dimensional numerical modeling of reverse fault rupture propagation through soil and its application for earth dams", PhD Thesis, Amirkabir University of Thechnology, Tehran, Iran (2014).
2. Anastasopoulos, I. and Gazetas, G. "Foundation-Structure systems over a rupturing normal fault: Part I: Observation after the Kocaeli 1999 earthquake", *Bulletin of Earthquake Engineering*, **5**(3), pp. 253-275 (2007).
3. Anastasopoulos, I. and Gazetas, G. "Foundation-Structure systems over a rupturing normal fault: Part II: Analysis of the Kocaeli case histories", *Bulletin of Earthquake Engineering*, **5**(3), pp. 277-301 (2007).
4. Bray, J.D. "Developing mitigation measures for the hazard associated with earthquake fault rupture", Seismic Fault-Induced Failures-Possible Remedies for Damage to Urban Facilities, University of Tokyo press, pp. 55-80 (2001).
5. Faccioli, E., Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Callerio, A. and Paulocci, R. "Fault rupture-foundation interaction: Selected case histories", *Bulletin of Earthquake Engineering*, **6**(4), pp. 557-583 (2008).
6. Anastasopoulos, I., Callerio, A., Bransby, M.F., Davies, M.C.R., El Nahas, A., Faccioli, E., Gazetas, G., Masella, A., Paulocci, R., Pecker, A. and Rossignol, E. "Numerical analyses of fault-foundation interaction", *Bulletin of Earthquake Engineering*, **6**(4), pp. 645-675 (2008).
7. Oettle, N.K. and Bray, J.D. "Geotechnical mitigation strategies for earthquake surface fault rupture", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **139**(11), pp. 1864-1874 (2013).
8. Bray, J.D., Seed, R.B. and Seed, H.B. "Analysis of earthquake fault rupture propagation through cohesive soil", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **120**(3), pp. 562-580 (1994).
9. Cole Jr., D.A. and Lade, P.V. "Influence zones in alluvium over dip-slip faults", *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **110**(5), pp. 599-615 (1984).
10. Mortazavi Zanjani, M. and Soroush, A. "Numerical modeling of fault rupture propagation through two-layered sands", *Scientia Iranica*, **21**(1), pp. 19-29 (2014).
11. Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Bransby, M.F., Davies, M.C.R. and El Nahas, A., "Fault rupture propagation through sand: Finite-element analysis and validation through centrifuge experiments", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133**(8), pp. 943-958 (2007).