

بررسی ژئوتکنیکی سرعت لغزش گسل در پدیده گسلش سطحی

محمد احمدی

دانشجوی دکتری عمران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
mo.ahmadi@iiees.ac.ir

میثم فدایی

استادیار، دانشگاه علوم تحقیقات، تهران، ایران
m.fadaie@iiees.ac.ir

محمد کاظم جعفری

استاد پژوهشکده ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
jafari@iiees.ac.ir

کلید واژه‌ها: سرعت لغزش گسل، گسلش سطحی، سرعت گسیختگی، مدل‌سازی عددی

۱- چکیده

زلزله‌های قدرتمند ۱۹۹۹ در ترکیه و تایوان سرآغازی بر انجام تحقیقات گسترده بر روی پدیده گسلش سطحی و اثرات آن بر سازه‌های روزمینی و زیرزمینی بوده است. وجود شواهد میدانی بسیار زیادی از گسلش سطحی در این زلزله‌ها باعث گردید، اهمیت این موضوع بر روی طراحی سازه‌ها موردتوجه قرار گیرد. در این زمینه تحقیقات وسیعی انجام پذیرفته که اکثر آن‌ها در دو حوزه مدل‌سازی فیزیکی و عددی تقسیم‌بندی می‌شوند. در این تحقیقات پدیده گسلش به شکل اعمال جابجایی معین به کف مدل شبیه‌سازی می‌گردد. جابجایی اعمال شده هم در مدل‌های فیزیکی و هم در مدل‌های عددی به‌گونه‌ای اعمال می‌گردد که به دلیل سرعت پایین اعمال آن می‌توان از اثرات اینرسی حرکت گسل صرف‌نظر نمود. توجه به این مسئله آن‌قدر اهمیت دارد که در بسیاری از تحقیقات منتشرشده عبارت «رفتار شبه استاتیک» به‌عنوان یکی از مفروضات اصلی تحقیق لحاظ شده است.

هدف تحقیق حاضر بررسی فرض صورت گرفته در اعمال جابجایی گسل با بررسی جامع در ادبیات فنی این حوزه است. ابتدا پیرامون نحوه اعمال جابجایی در تحقیقات انجام‌شده در حوزه گسلش سطحی مطالبی ارائه می‌گردد. سپس به بررسی میزان سرعت لغزش گسل در تحقیقات و همچنین واقعیت پرداخته می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که فرض رفتار شبه استاتیک برای جابجایی گسل‌های سطحی و اعمال جابجایی با سرعت اندک، می‌تواند فرضی منطقی و صحیح باشد.

۲- مقدمه

زلزله و خسارت‌های ناشی از آن بیشتر با حرکت نوسانی زمین شناخته می‌شود. این در حالی است که زلزله می‌تواند خرابی‌های دیگری نیز به سازه‌های روزمینی و زیرزمینی وارد کند. از جمله این خرابی‌ها جابجایی‌های دائمی زمین هستند. جابجایی‌های دائمی زمین ناشی از زلزله به شکل‌های گوناگونی رخ می‌دهد. وقوع رخداد جابجایی دو صفحه گسل نسبت به یکدیگر و رسیدن این جابجایی به سطح زمین یکی از انواع جابجایی‌های دائم زمین است. در ادبیات فنی اصطلاحاً به آن گسلش سطحی می‌گویند. این‌گونه آسیب کاملاً متفاوت با آسیب‌های ناشی از موج زلزله است. تا قبل از سه زلزله معروف ۱۹۹۹ در کوجیلی^۱ و دوزچی^۲ ترکیه و همچنین چی-چی^۳ تایوان کانون توجهات بر خسارت ناشی از زلزله بر روی موج ناشی از آن متمرکز بود. در زلزله‌های ذکرشده موارد بسیار زیادی از گسلش‌های سطحی و آسیب به سازه‌ها در اثر جابجایی دائمی زمین گزارش شده است. برای شناخت این پدیده و آسیب‌های احتمالی وارد بر سازه‌های در معرض خطر گسلش، تحقیقات بسیار زیادی طرح و

1- Kocaeli
2- Duzcci
3- Chi-Chi



اجرا گردیده است. این تحقیقات به وضوح نشان می‌دهد که در مناطق خطر، توجه به طراحی‌های ویژه برای در امان ماندن از آسیب‌های ناشی از جابجایی ماندگار زمین اجتناب‌ناپذیر است. لذا اهمیت مسئله به‌اندازه‌ای است که در دنیا پروژه‌های ویژه‌ای همچون کوئیکر^۴ برای شناخت این پدیده برنامه‌ریزی گردید. بسیاری از آیین‌نامه‌های معتبر دنیا اجتناب کردن از ساخت‌وساز در مناطق با احتمال گسلش را توصیه نموده‌اند (Loukidis et al., 2009). به‌عنوان نمونه در کالیفرنیا ساختن پل بر روی گسل‌های شناخته‌شده و یا در مجاورت آن‌ها ممنوع است (Mualchin, 2004). با این حال ساختن بسیاری از سازه‌ها، خصوصاً سازه‌های طولی مثل بعضی پل‌ها، تونل‌ها، خطوط مدفون لوله در مجاورت گسل‌های سطحی اجتناب‌ناپذیر است. اجتناب کردن از ساخت‌وساز در پهنه‌های گسلی به دلایل گوناگونی قابل‌پذیرش نبوده و تنها راه‌حل ممکن طراحی و یا مقاوم‌سازی آن‌ها جهت مقابله با گسلش‌های احتمالی است که این مسئله خود لزوم شناخت صحیح پدیده را نشان می‌دهد. از جمله این دلایل عبارت‌اند از:

- مشکلات بسیار زیاد در تعریف شفاف گسل فعال
- محل دقیق رسیدن خط گسلش به سطح زمین به دلایلی همچون وجود لایه خاکی که باعث انحراف خط گسل شده و یا مستقیم نبودن خود خط گسل در محیط سنگی که از نقاط ضعف عبور می‌کند، غیرقابل‌پیش‌بینی است.
- بسیاری از سازه‌های مهم و حیاتی (همچون پل‌ها، شریان‌های حیاتی همچون خطوط انتقال آب و گاز، تونل‌ها و ...) ناگزیر به عبور از پهنه‌های گسلی و گسل‌های فعال هستند. (Gazeta et al., 2008)
- امروزه به دلایل تراکم جمعیتی خصوصاً در مناطق شهری، کمبود زمین لزوم استفاده از آن را به شدت افزایش داده و عملاً اجتناب نمودن از ساخت و ساز در پهنه‌های گسلی امری غیرممکن به نظر می‌رسد.
- به‌طورمعمول در بسیاری از تحقیقات انجام‌شده در حوزه گسلش سطحی، میزان جابجایی دو صفحه گسل از اهمیت بالایی برخوردار است. بخش عمده‌ای از این تحقیقات به نحوه انتشار گسل در لایه‌های خاکی سطح زمین اختصاص پیدا کرده است. در چنین تحقیق‌هایی، چه در تحلیل‌های عددی و چه مدل‌سازی‌های فیزیکی، جابجایی موردنظر به بخش متحرک گسل و در محل سنگ‌بستر وارد می‌شود. آنچه برای یک محقق ژئوتکنیک دارای اهمیت زیادی است، میزان جابجایی ایجادشده در بسترهای سنگی است. از این دیدگاه نحوه ایجاد گسل و همچنین نیروهای ایجادشده در بستر سنگی گسل از اهمیت کمتری برخوردار است لذا آنچه در اکثر این تحقیقات مشاهده می‌گردد، اعمال یک جابجایی مشخص به بستر سنگی و یا بخش‌های زیرین لایه خاکی و مشاهده نحوه توسعه گسلش در این لایه است. با این دید به مسئله سؤال مهمی مطرح می‌گردد. نحوه اعمال این جابجایی به بستر سنگی چگونه باید باشد؟ آیا می‌توان جابجایی موردنظر را به آرامی به مدل وارد نمود. به بیان دقیق‌تر آیا این جابجایی باید به‌صورت استاتیکی اعمال گردد و یا دینامیکی؟ هدف از تحقیق حاضر کنکاشی پیرامون این موضوع باهدف روشن‌تر شدن هر چه بیشتر این مسئله است. جستجو در ادبیات فنی این موضوع نشان می‌دهد که تاکنون تحقیقات جامع پیرامون نحوه این جابجایی و به بیان بهتر سرعت لغزش گسل از دیدگاه مهندسی ژئوتکنیک انجام نشده است.

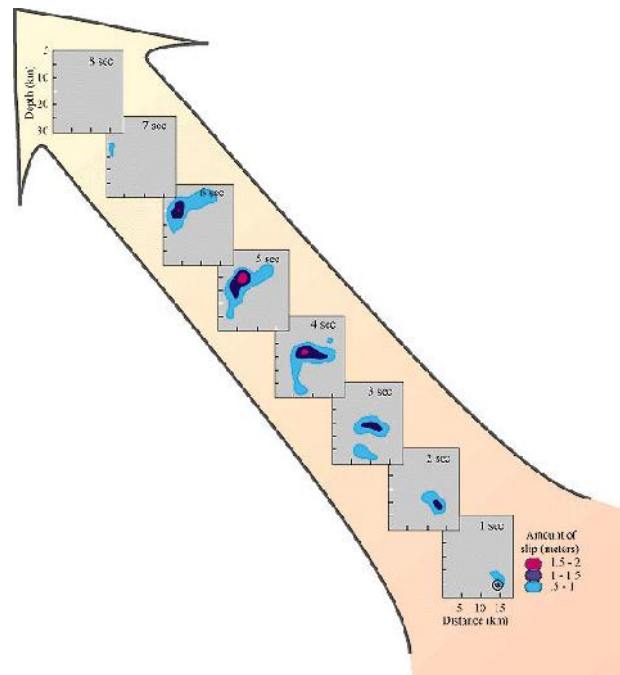
۳- بررسی تفاوت بین سرعت گسیختگی و سرعت جابجایی

۳-۱- سرعت گسیختگی

سرعت حرکت جبهه گسیختگی در سطح گسل را سرعت گسیختگی می‌گویند (Schick, 2002). با تسلیم بخش کوچکی از سطح گسل به دلیل فشارهای ذخیره‌شده تکتونیکی، گسلش آغاز می‌گردد که به‌صورت جابجایی دو طرف گسل خود را نشان می‌دهد. سرعت گسیختگی سرعتی بسیار بالا داشته که می‌توان آن را در محیط سنگی از مرتبه چند کیلومتر بر ثانیه تخمین زد. مراجع گوناگون سرعت گسیختگی در سنگ‌بستر را حدود ۷۰ الی ۹۰ درصد سرعت موج‌برشی در آن محیط می‌دانند. به‌عنوان نمونه شکل ۱ تصویری از نحوه ایجاد گسلش در زلزله نورث‌ریج^۵ ۱۹۹۴ را به نمایش می‌گذارد. هر یک از این فریم‌ها، نقاط گسیخته شده در طول گسل را به همراه میزان جابجایی رخ‌داده در آن نشان می‌دهد. در این زلزله، گسلش با سرعت ۳ کیلومتر بر ثانیه از عمق حدود ۱۹ کیلومتری زمین شروع شده و در طی ۶ ثانیه به عمق حدود ۵ کیلومتری به صورت مورب به سطح زمین می‌رسد که در این فرآیند طولی در حدود ۱۷/۵ کیلومتر از آن گسیخته می‌شود. با این حال میزان جابجایی ایجادشده در دو طرف گسل در زلزله نورث‌ریج به‌طور میانگین حدود ۱ متر بوده است. بیشینه و کمینه جابجایی در طول گسل بین صفر تا ۳ متر گزارش شده است که بیشینه جابجایی در ثانیه‌های بین ۴ تا ۶ رخ داده است (Studying the Setting and Consequences of the Earthquake, n.d.).

4- QUAKER
5- Northridge





شکل ۱: نحوه توسعه گسلش در اعماق زمین و در بازه‌های زمانی یک ثانیه برای زلزله نورتریج ۱۹۹۴

در این مثال مشاهده می‌گردد که سرعت گسیختگی نرخ بسیار بالایی دارد. با این حال سرعتی که در تحقیقات در حوزه مهندسی ژئوتکنیک برای گسل‌های سطحی در نظر گرفته می‌شود این سرعت نیست. سرعت گسیختگی در واقع سرعت توسعه شکست و آغاز جابجایی در طول یک گسلش است و نه سرعت لغزش دو سطح گسل نسبت به یکدیگر. برای یافتن پاسخ مسئله باید سرعت لغزش، و نه سرعت گسیختگی، را در گسل‌ها مورد مطالعه قرار داد.

۳-۲- سرعت جابجایی

سرعتی که باید مورد توجه محقق ژئوتکنیک در زمینه گسلش سطحی قرار بگیرد، سرعت لغزش گسل است. در واقع به میزان سرعتی که دو طرف گسل با آن سرعت نسبت به هم می‌لغزند، سرعت لغزش گفته می‌شود (Schick, 2002). سرعت بسیار متفاوت با سرعت گسیختگی است که در بخش قبلی مورد توجه قرار گرفت. در این بخش به بررسی سرعت‌های جابجایی اشاره شده در منابع معتبر که در طی تحقیقات عددی و آزمایشگاهی به دست آمده است، اشاره خواهد گردید.

علاوه بر تحقیق (Trifunac, 1995) که سرعت جابجایی را برای زلزله‌هایی با بزرگای ۶-۷ ریشتر حدود ۱ متر بر ثانیه تخمین زده است، تحقیقات دیگری نیز به سرعت جابجایی گسلش در شرایط مختلف اشاره داشته‌اند. آنیل بایراک و همکاران در تحقیق خود به محاسبه سرعت جابجایی برای زلزله‌های هدف بر اساس بررسی طیفی حرکت زمین پرداختند. نتیجه‌ی این تحقیق به دست آمدن سرعت لغزش بین ۰/۲ تا ۰/۶ متر بر ثانیه برای گسل‌های مورد مطالعه بود. زلزله‌های انتخابی برای این تحقیق بزرگایی بین ۴ تا ۶ درجه در مقیاس ریشتر داشته‌اند (Anil Anil-Bayrak, 2009). براون و همکاران در بررسی خود میزان سرعت لغزش را برای زلزله‌های متداول بین ۰/۵ تا ۲ متر بر ثانیه گزارش کرده‌اند (Brown et al., 2007). همچنین ریس نیز این مقدار را بین ۰/۱ تا ۰/۶ متر بر ثانیه به دست آورده است (Rice, 2007). کاناموری و آبه مقدار سرعت لغزش را در تحقیقات خود بین ۰/۴ تا ۰/۵ متر بر ثانیه محاسبه نمودند (Abe, 1974) (Kanamori, 1972). این مقادیر از روی بررسی داده‌های لرزه‌ای زلزله توتوری^۶ ۱۹۴۳ (در ژاپن) و زلزله ۱۹۳۱ سایتاما^۷ به دست آمدند. کاناموری سرعت گسیختگی را برای زلزله توتوری ۱۹۴۳ برابر با ۲/۳ کیلومتر بر ثانیه، میزان جابجایی گسل را ۲/۵ متر و مدت زمانی که جابجایی دو سطح گسل ادامه داشته ۳ ثانیه تخمین زده است. همچنین میزان سرعت لغزش گسل را نیز حدود ۰/۴۲ متر بر ثانیه به دست آورده است. بزرگای این زلزله ۷/۴ ریشتر برآورد شده است (Abe, 1974). سرعت گسیختگی برای زلزله سایتاما ۱۹۳۱ بر اساس محاسبات انجام شده آبه حدود ۲/۳ کیلومتر بر ثانیه به دست آمد. مدت زمان لغزش دو سطح گسل ۲ ثانیه و جابجایی گسل حدود ۱ متر بوده است که به این طریق مقدار سرعت جابجایی حدود ۰/۵ متر بر ثانیه محاسبه می‌گردد (Kanamori, 1972). دی تورو و همکاران در مقاله خود سعی کردند میزان سرعت لغزش را با مدل‌سازی شرایط واقعی زلزله در آزمایشگاه به دست آورند. آن‌ها سرعت جابجایی زلزله‌های واقعی را حدود ۰/۱ الی ۲ متر بر ثانیه به دست آوردند (Di Toro, 2004). سنو نیز بر اساس داده‌های حاصل از

6- Tottori
7- Saitama



لرزه‌نگارهای اطراف محل رخداد گسل در زلزله ۱۹۹۹ تابوان سرعت لغزش را حدود ۱ متر بر ثانیه به دست آورد. وی این مقدار را از تقسیم جابجایی دو سطح گسل که مقدار آن حدود ۸.۸ متر بوده بر مدت زمان این جابجایی که ۹ ثانیه تخمین زده می‌شده است، به دست آورد (Seno). همچنین در تحقیق هیتون می‌توان اطلاعاتی را به دست آورد که با پردازش آن‌ها میزان سرعت جابجایی متوسط برای چند زلزله با بزرگای مختلف به دست می‌آید که خلاصه آن در جدول ۱ اشاره گردیده است (Heaton, 1990).

جدول ۱: سرعت لغزش به دست آمده در تحقیق (Heaton, 1990)

زلزله	مدت زمان انجام جابجایی دو سطح گسل (s)	میانگین جابجایی دو سطح گسل (cm)	سرعت میانگین جابجایی (cm/s)
Michoacan, 1988 (M=8.1)	۵	۲۳۸	۴۷
Borah Peak, 1983 (M=7.3)	۰.۶	۸۲	۱۳۶
San Fernando, 1971 (M=6.5)	۰.۸	۱۲۰	۱۵۰
Imperial Valley, 1979 (M=6.5)	۱.۰	۴۸	۴۸
Morgan Hill, 1984 (M=6.2)	۰.۳	۳۸	۱۲۶
N. Palm Springs, 1986 (M=6.0)	۰.۴	۲۶	۶۵
Coyote Lake, 1979 (M=5.9)	۰.۵	۴۶	۹۲

داده‌های حاصل از این تحقیق نیز سرعت لغزش را کمتر از ۱.۵ متر بر ثانیه در زلزله‌های بزرگ محاسبه نموده است.

۴- سرعت لغزش در تحقیقات پیشین

مروری بر تحقیقات انجام گرفته نشان می‌دهد که تقریباً در بسیاری از آن‌ها فرض رفتار شبه استاتیک و اعمال جابجایی با سرعت کم و حتی به صورت پله‌ای یکی از فرض‌های اصلی بوده است. با اعمال این‌گونه‌ی جابجایی، از اثرات اینرسی چشم‌پوشی می‌شود. باینکه در اکثر تحقیقات انجام شده جابجایی گسل این‌گونه به مدل وارد می‌شود باین حال پیرامون علت آن کمتر بحث و بررسی شده است. جدول ۲ سرعت لغزش گسل را که در تحقیقات به مدل‌ها وارد شده‌اند، بیان می‌دارد. این تحقیقات در دو بخش مدل‌سازی فیزیکی و مدل‌سازی عددی طبقه‌بندی گردیده‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد بسیاری از مراجع گردآوری شده تنها به ذکر فرض رفتار شبه استاتیک بسنده کرده‌اند. در پاره‌ای دیگر از آن‌ها به میزان سرعت لغزش گسل اشاره گردیده است. تحقیقات زیادی نیز هستند که اشاره‌ای به این مسئله در آن‌ها نشده است. برخی از این منابع با توجه به اهمیت مسئله بیشتر مورد واکاوی قرار می‌گیرد.

شاید یکی از قدیمی‌ترین منابعی که به سرعت گسلش اشاره داشته، تحقیق روس و همکاران باشد (Roth et al., 1982). در این تحقیق که هم به کمک مدل‌سازی عددی و هم به وسیله آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی در سانتریفیوژ انجام پذیرفته است، نتیجه‌گیری گردیده که در سرعت‌های لغزش کم گسل، نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی و مدل‌سازی فیزیکی با سانتریفیوژ یکسان است. باین حال اشاره می‌گردد که در گسلش سریع به دلیل اثرات اینرسی، می‌تواند دو باند برشی مختلف در مدل‌سازی عددی و مدل‌سازی فیزیکی ایجاد گردد. در این تحلیل حد سرعت ۲.۵ متر بر ثانیه برای گسلش معکوس در نظر گرفته شده است. بدین معنی که در سرعت‌های لغزش کمتر از این مقدار، رفتار خاک در مدل‌سازی عددی با مدل فیزیکی در سانتریفیوژ یکسان فرض می‌گردد. در این تحقیق دو سری آزمایش با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ و با سرعت‌های لغزش تند و کند انجام پذیرفت. در آزمایش‌های تند جابجایی موردنظر طی چند ده میلی‌ثانیه و در آزمایش‌های کند طی چندین ثانیه به نمونه اعمال گردید. این دو نوع جابجایی‌ها معادل حرکت دینامیکی و همچنین شبه استاتیکی گسل فرض گردیدند. در تحلیل‌های عددی سرعت جابجایی برابر با ۲.۵ متر بر ثانیه برای گسلش تند و سرعت جابجایی برابر با ۰.۵ - ۰.۲۵ متر بر ثانیه برای گسلش کند به نمونه اعمال گردیدند. نتایج نشان می‌دهد که در سرعت جابجایی برابر با ۰.۵ متر بر ثانیه اثرات اینرسی قابل چشم‌پوشی است. وی از نتایج مدل‌سازی‌های فیزیکی و عددی خود در این تحقیق در زمینه اثر سرعت گسلش نتایج زیر را استنباط نمود: الف) باند برشی ایجاد شده در هر دو نوع خاک ماسه‌ای سست و متراکم در حالت گسلش کند باریک‌تر از حالت گسلش تند است. ب) زاویه توسعه گسلش در حالت گسلش کند، خوابیده‌تر از حالت گسلش تند است.

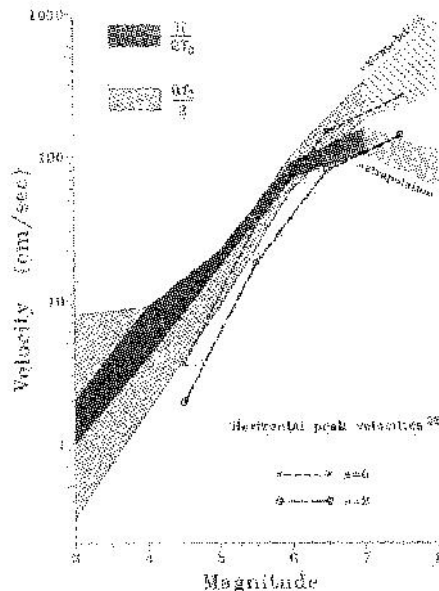
جدول ۲: سرعت لغزش در نظر گرفته شده برای گسل در تحقیقات پیشین

شرح	سرعت گسلش اعمالی	موضوع بررسی	نوع تحلیل (مدل سازی عددی یا فیزیکی)	مرجع
تحلیل شبه استاتیک	نمو جابجایی در هر مرحله تحلیل ۰.۰۱ میلی متر	حالت آزاد	عددی	(Loukidis et al., 2009)
بررسی سرعت گسلش در دو حالت تند و کند	به توضیحات مفصل آن مراجعه گردد	حالت آزاد	عددی-فیزیکی با دستگاه سانتریفیوژ	(Roth et al., 1982)
	۶.۵ سانتی متر بر ثانیه در مدل سازی فیزیکی	حالت آزاد	عددی-فیزیکی در محیط 1g	(Johansson & Konagai, 2006)
برای مدل سازی با سانتریفیوژ اشاره‌ای به سرعت گسلش نشده ولی می توان آن را برابر با مدل سازی فیزیکی 1g دانست.	۲ میلی متر بر دقیقه برای مدل فیزیکی 1g	حالت آزاد	مدل فیزیکی 1g و سانتریفیوژ	(LEE et al., 2004)
بر اساس قوانین مقیاس در واقعیت نیز همین مقدار وارد شده است.	۰.۱ متر بر ثانیه	حالت آزاد	مدل فیزیکی در سانتریفیوژ	(Ng et al., 2012)
بر اساس قوانین مقیاس در واقعیت نیز همین مقدار وارد شده است.	۰.۱ متر بر ثانیه	حالت آزاد	مدل فیزیکی در سانتریفیوژ	(CAI et al., 2013)
	حداکثر ۲.۵ میلی متر بر دقیقه	حالت آزاد	مدل فیزیکی در سانتریفیوژ	(Chang et al., 2013)
در مقاله ذکر گردیده که سرعت گسلش با یک موتور قابل کنترل بوده است اما اشاره‌ای به سرعت آن نگردید.	اشاره نگردید	حالت آزاد	مدل فیزیکی 1g	(Lin et al., 2006)
	اعمال گام‌های بسیار کوچک به صورت پله‌ای جهت عکس برداری	پی سطحی	مدل فیزیکی 1g	(Moosavi et al., 2010)
اشاره گردید که جابجایی به صورت شبه استاتیک وارد می شود	اعمال جابجایی به صورت پله‌ای و به آرامی	پی سطحی	مدل فیزیکی سانتریفیوژ	(El Nahas et al., 2006)
اشاره گردید که جابجایی به صورت شبه استاتیک وارد می شود (El Nahas et al, 2006)	اعمال جابجایی به صورت پله‌ای و به آرامی	پی سطحی	مدل فیزیکی سانتریفیوژ	(Ahmed & Bransby, 2009)
	جابجایی به صورت منوتونیک به مدل وارد گردید.	پی سطحی	مدل عددی	(Anastasopoulos, et al., 2008)
اشاره گردید که جابجایی به صورت شبه استاتیک وارد می شود	جابجایی به صورت مراحل بسیار کوچک به مدل وارد گردید.	پی سطحی	مدل عددی	(Anastasopoulos & Gazetas, 2007b)
در مقاله اشاره نگردیده ولی از همان دستگاهی استفاده شد که در (Ahmed & Bransby, 2009) مورد استفاده قرار گرفت	اعمال جابجایی به صورت پله‌ای و به آرامی	پی سطحی	مدل فیزیکی سانتریفیوژ	(Bransby et al., 2008)
جابجایی به صورت شبه استاتیک وارد می شود	اعمال جابجایی به آرامی و مرحله به مرحله	پی سطحی	مدل فیزیکی 1g	(Fadaee et al., 2013)
	جابجایی به صورت شبه استاتیک وارد می شود	پی سطحی	مدل فیزیکی 1g	(Moosavi & Jafari, 2012)
	جابجایی به وسیله عملگر هیدرولیکی به گونه‌ای کنترل می گردد که رفتار شبه استاتیک باشد.	پی کیسونی	مدل فیزیکی سانتریفیوژ	(Loli et al., 2011)
	نمونه‌های جابجایی آن قدر کوچک در نظر گرفته شدند تا جابجایی شبه استاتیک باشد.	پی عمیق	مدل عددی	(ANASTASOPOULOS et al., 2013)
	نرخ جابجایی قائم ۰.۴۸ میلی متر بر ثانیه تعیین و به وسیله موتوری کنترل گردید.	تونل	مدل فیزیکی	(Lin et al., 2007)

لوکیدیس و همکاران به بررسی انتشار گسلش در لایه خاک همگن با استفاده از مدل سازی عددی پرداخته است (Loukidis et al., 2009). در این تحقیق نحوه توسعه گسلش در دو حالت نرمال و معکوس مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق بیان داشته می شود که بر اساس پژوهش‌هایی همچون دی سرعت جابجایی با سرعت موج برشی رابطه دارد (Day, 1982). همچنین برای زلزله‌هایی با بزرگای ۶-۷ ریشتر، سرعت جابجایی در کانون زلزله حدود ۱ متر بر ثانیه خواهد بود (Trifunac, 1995). لذا از آنجایی که سرعت موج برشی با کاهش عمق و رسیدن به سطح



زمین به طور معمول کاهش پیدا کرده، به طوری که سرعت موج برشی در خاک می‌تواند تا یک‌دهم آن در سنگ باشد، در نتیجه سرعت جابجایی گسل در سطح زمین بسیار کمتر از مقدار ذکر شده خواهد بود. پس می‌توان این‌گونه فرض نمود که گسلش، بدون در نظر گرفتن اثرات موج زلزله، پدیده‌ای شبه استاتیکی است. شکل ۲ رابطه تقریبی بین سرعت لغزش گسل در مرکز زلزله با بزرگای آن نشان می‌دهد. همچنین جدول ۳ همین مقادیر را در قالب جدول نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود متوسط سرعت جابجایی برای زلزله‌هایی با بزرگای بیشتر حدود ۱ تا ۱.۵ متر بر ثانیه و مقدار حداکثر آن به ۳ متر بر ثانیه در مرکز زلزله می‌رسد.



شکل ۲: رابطه بین بزرگای زلزله و میزان تقریبی سرعت جابجایی (Trifunac, 1995)

جدول ۳: ارتباط بزرگای زلزله با سرعت جابجایی متوسط و حداکثر (Trifunac, 1995)

بزرگای زلزله	سرعت متوسط جابجایی (سانتی‌متر بر ثانیه)	سرعت حداکثر جابجایی (سانتی‌متر بر ثانیه)
۳	۱-۲	۰.۳-۸
۴	۴-۹	۱.۷-۹
۵	۱۷-۲۲	۹-۲۰
۶	۷۲-۹۰	۵۸-۱۰۱
۷	۱۰۴-۱۵۷	۱۷۹-۳۳۲

همچنین علاوه بر این تحقیقات، شواهدی را نیز می‌توان از حدود تقریبی سرعت لغزش گسل در واقعیت پیدا نمود. آناستوپولوس و همکاران در تحقیق میدانی خود برای گسلش‌های سطحی در زلزله ۱۹۹۹ کویلی ترکیه به احساس ساکنان حاضر در ساختمانی که گسلش سطحی با آن برخورد داشته است، اشاره می‌کنند. در این تحقیق بیان می‌شود که ساکنان حاضر در ساختمان هیچ‌گونه سقوطی به سمت پایین را در هنگام گسلش احساس نکرده‌اند و تنها یک حرکت پیچشی را که منطبق با جابجایی مشاهده شده در گسلش عبوری از آن بوده است، حس نموده‌اند. این مسئله ناشی از فرارگیری ساختمان در بخش فرادایره گسل است. با مشاهده این پدیده نتیجه‌گیری می‌شود که جابجایی در راستای قائم باید ماهیتی شبه استاتیکی داشته باشد. این مسئله به‌وضوح نشان می‌دهد که سرعت جابجایی به قدری آرام بوده که می‌توان آن را پدیده‌ای شبه استاتیکی نام‌گذاری و از اثرات اینرسی چشم‌پوشی نمود (Anastasopoulos & Gazetas, 2007a).

۵- نتیجه‌گیری

- در بسیاری از تحقیقات انجام شده جابجایی اعمالی بسیار کند به مدل وارد گردیده است. در واقع سرعت لغزش اندک در نظر گرفته شده است. این فرض هم در مدل‌سازی فیزیکی و هم در مدل‌سازی عددی مورد استفاده قرار گرفته است.
- در صورتی که سرعت لغزش از مقدار معینی کمتر باشد، می‌توان از اثرات اینرسی گسل چشم‌پوشی نمود.

- میزان سرعت لغزش گسل‌ها در زلزله‌های بزرگ، کمتر از ۲ متر بر ثانیه است. این مقادیر برای محل ایجاد زلزله در اعماق زمین است.
- سرعت لغزش گسل با سرعت موج‌برشی در آن محیط رابطه مستقیم دارد لذا از آنجایی که سرعت موج‌برشی در خاک به‌مراتب کمتر است، در نتیجه سرعت لغزش نیز در خاک کمتر از سنگ‌بستر است.
- سرعت لغزش در سطح زمین به‌مراتب کمتر از اعماق زمین است، لذا به نظر می‌رسد فرض رفتار شبه استاتیک در گسلش‌های سطحی از منظر مهندسی ژئوتکنیک می‌تواند فرضی صحیح و منطبق با واقعیت باشد.
- وارد نمودن جابجایی گسل با سرعت کند در تحلیل‌های عددی و مدل‌سازی فیزیکی، فرضی قابل قبول است.

۶- مراجع

- Abe K (1974) Seismic displacement and ground motion near a fault: The Saitama Earthquake of September 21, 1931, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 79(29): 4393
- Ahmed W, and Bransby M (2009) Interaction of Shallow Foundations with Reverse Faults. *JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING*, 135(7)
- Anastasopoulos I and Gazetas G (2007) Foundation–structure systems over a rupturing normal fault: Part I. Observations after the Kocaeli 1999 earthquake. *Bull Earthquake Eng*, 5(3), 253–275
- Anastasopoulos I and Gazetas G (2007) Foundation–structure systems over a rupturing normal fault: Part II. Analysis of the Kocaeli case histories, *Bull Earthquake Eng*, 5(3), 277–301
- Anastasopoulos I, Callerio A, Bransby MF, Davies MC, El Nahas A, Faccioli E and Rossignol E (2008) Numerical analyses of fault–foundation interaction, *Bull Earthquake Eng*, doi:10.1007/s10518-008-9078-1
- ANASTASOPOULOS I, KOURKOULIS R, GAZETAS G and TSATSIS A (2013) Interaction of piled foundation with a rupturing normal fault, *Geotechnique*, 63(12): 1042–1059
- Ani Anil-Bayrak NIA (2009) Fault Slip Velocities Inferred from the Spectra of Ground Motions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(2A): 876–883
- Bransby MF, Davies MC and El Nahas A (2008) Centrifuge modelling of normal fault–foundation interaction, *Bull Earthquake Eng*(6), 585-605, doi:10.1007/s10518-008-9079-0
- Brown KM, Fialko Y and Hartsig C (2007) Complex Evolution of Friction During Seismic Slip: New Experimental Results, *American Geophysical Union*
- CAI Q, NG CW and LUO GH (2013) Influences of pre-existing fracture on ground deformation induced by normal faulting in mixed ground conditions, *Journal of Central South University*, 20, 501–509
- Chang Y, Lee C, Huang W, Huang W, Lin M, Hung W and Lin YH (2013) Use of centrifuge experiments and discrete element analysis. *International Journal of Civil Engineering*, 11(2): 79-89
- Day S (1982) Three-dimensional finite difference simulation of fault dynamics: rectangular faults with fixed rupture velocity, *Bulleting of the Seismological Society of America*, 72(3): 705–27
- Di Toro GGD (2004) Friction falls towards zero in quartz rock as slip velocity approaches seismic rates, *NATURE*, 427
- El Nahas A, Bransby M and Davies M (2006) Interaction between normal fault rupture and rigid strong raft, *Physical Modelling in Geotechnics*, 6th ICPMG. Ng, Zhang & Wang
- Fadaee M, Anastasopoulos I, Gazetas G, Jafari M and Kamalian M (2013) Soil bentonite wall protects foundation from thrust faulting: analyses and experiment, *Earthq Eng & Eng Vib*, 12(3), 473-486. doi:10.1007/s11803-013-0187-8
- Gazetas G, Pecker A, Faccioli E, Paolucci R and Anastasopoulos I (2008) Preliminary design recommendations for dip-slip fault–foundation interaction, *Bull Earthquake Eng*, 6(5): 677-687, doi:10.1007/s10518-008-9082-5
- Heaton TH (1990) Evidence for and implications of self-healing pulses of slip, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 64, 1-20
- Johansson J and Konagai K (2006) Fault induced permanent ground deformations—an experimental comparison of wet and dry soil and implications for buried structures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26, 45–53



- Kanamori H (1972) Determination of effective tectonic stress associated with earthquake faulting, The Tottori earthquake of 1943, *Phys. Earth Planet.*, 426–434
- LEE J, HAMADA M, TABUCHI G and SUZUKI K (2004) PREDICTION OF FAULT RUPTURE PROPAGATION BASED ON PHYSICAL MODEL TESTS IN SANDY SOIL DEPOSIT, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, BC, Canada
- Lin M, Chung C and Jeng F (2006) Deformation of overburden soil induced by thrust fault slip. *Engineering Geology*, 88(1-2), 70–89
- Lin M, Chung C, Jeng F and Yao T (2007) The deformation of overburden soil induced by thrust faulting and its impact on underground tunnels, *Engineering Geology*, 92, 110-132. doi:10.1016/j.enggeo.2007.03.008
- Loli, Anastasopoulos, Bransby, Ahmed and Gazetas (2011) Caisson Foundations Subjected to Reverse Fault Rupture-Centrifuge Testing and Numerical Analysis, *JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING*
- Loukidis, Bouckovalas and Papadimitriou (2009) Analysis of fault rupture propagation through uniform soil cover, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29, 1389–1404
- Moosavi SM, Jafari MK, Kamalian M and Shafiee A (2010) Experimental Investigation of Reverse Fault Rupture – Rigid Shallow Foundation Interaction, *International Journal of Civil Engineering*, 8(2)
- Moosavi S, and Jafari M (2012) Investigation of the Surface Fault Rupture Hazard Mitigation by Geosynthetics, *15 WCEE*, Lisbon
- MUALCHIN L (2004) SEISMIC HAZARD ASSESSMENT FOR BRIDGE ENGINEERING IN CALIFORNIA, *13th World Conference on Earthquake Engineering (13WCEE)*, Vancouver, BC, Canada
- Ng CW, Cai QP and Hu P (2012) Centrifuge and Numerical Modeling of Normal Fault-Rupture Propagation in Clay with and without a Preexisting Fracture, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(12): 1492-1502, doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000719
- Rice JR (2007) Heating and Weakening of Major Faults During Seismic Rupture, *American Geophysical Union*
- Roth W, Kalsi G, Papastamatiou O and Cundall P (1982) Numerical Modeling of Fault Propagation in Soil. *Proc, 4th Int. Conf. on Num. Meth. Geomech*, pp. 487-494
- Schick R (2002) *The little book of earthquakes and volcanoes*. COPERNICUS BOOKS - Springer-Verlag
- Studying the Setting and Consequences of the Earthquake* (n.d.), Retrieved from <http://pubs.usgs.gov/of/1996/ofr-96-0263/mainshk.htm>
- Trifunac MDNE (1995) Duration of Earthquake Fault Motion in California. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 24, 781-799
- Withdrawal of the slow slip of the surface faulting* (n.d.), (Seno, Producer) Retrieved from <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/seno/withdrawal.slowsip.eng.html>