

## بررسی روش‌های کاهش خطر ناشی از اندرکنش گسیختگی گسلش معکوس و پی‌های سطحی

علیرضا سعیدی عزیزکندی<sup>۱</sup>\*

سجاد حیدری حسنکو<sup>۲</sup>

محمدحسن بازیار<sup>۳</sup>

### چکیده

مشاهده‌ی خرابی ساختمان‌ها و تلفات جانی ناشی از گسیختگی گسلش باعث ایجاد انگیزه در مهندسان برای در نظرگیری راه‌حلهایی به‌منظور کاهش آسیب وارده بر سازه‌ها شده است. در مواقعی که اجتناب از ساخت و ساز در مجاورت گسل‌های فعال امکان‌پذیر نیست، اقدامات کاهش خطر باید در نظر گرفته شود. آنالیز المان محدود صحت سنجی شده از طریق نتایج آزمایش سانتریفیوژ در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. ابتدا با در نظرگیری زوایای مختلف گسل موقعیت بحرانی فونداسیون (که در آن بیشترین دوران را دارد) مشخص شده است. سپس تأثیر حفر دیوار پر شده با صفحات پلی‌استرنی<sup>۴</sup> در عمق مناسب نزدیک فونداسیون برای برخورد با گسیختگی ناشی از گسلش بررسی شده است. نتایج نشان دادند که دیوار مذکور با توجه به شکل‌پذیری بالا و مقاومت برشی پایین نسبت به خاک توانسته مسیر گسیختگی ناشی از گسلش را منحرف کرده و آسیب وارده به فونداسیون را به حداقل برساند؛ بنابراین پی سطحی دوران و جابجایی کمی را تجربه کرده است. تأثیر دیوار EPS به موقعیت دقیق فونداسیون نسبت به نمود سطحی گسل  $s/b$ ، بزرگی جابجایی نسبی گسل  $(h/H)$  و البته زاویه گسل بستگی دارد.

### واژه‌های کلیدی

گسیختگی گسلش، آنالیز المان محدود، موقعیت بحرانی فونداسیون

\* استادیار دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت ایران، [asaedia@iust.ac.ir](mailto:asaedia@iust.ac.ir)

<sup>۲</sup> فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد دانشگاه علم و صنعت ایران

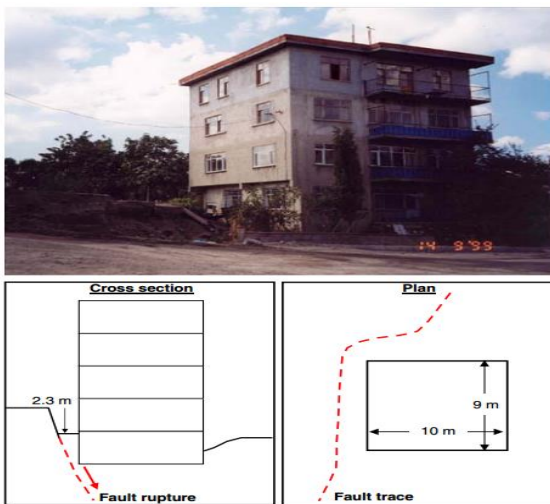
<sup>۳</sup> استاد دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت ایران

## مقدمه

در طول دهه‌های اخیر جنبش‌های قوی زمین باعث ایجاد خسارات شدیدی در تعدادی از ساختمان‌های مهندسی ساز شده و این خسارت‌ها اغلب با تلفات جانی نیز همراه بوده است. زلزله ۷/۴ ریشتری کواکلی<sup>۱</sup> (ترکیه)، گسیختگی گسل چلانگپو<sup>۲</sup> همراه با زلزله‌ی ۱۹۹۹ چی چی<sup>۳</sup> تایوان و زلزله‌ی بزرگ وینچوان<sup>۴</sup> در سال ۲۰۰۸ تعدادی از موارد مهم جنبش‌های قوی زمین در طی سال‌های اخیر بوده است. مشاهدات بعد از گسیختگی اصلی گسلش نشان داد که سیستم فونداسیون نقش مهمی در پاسخ سازه به جابجایی ظاهر شده دارد. ساختمان‌های احداث شده روی فونداسیون‌های صلب و پیوسته ممکن است باعث انحراف مسیر گسیختگی گسل شوند (آناستاسوپولوس و گزتاس<sup>۵</sup> ۲۰۰۷). شکل (۱) نمایی از یک ساختمان چهار طبقه با پی قرار گرفته روی فونداسیون صلب پیوسته را نشان می‌دهد. این ساختمان جابجایی قائم رو به پایین ۲/۳ متر را بدون آسیب عمده تحمل کرده است. علاوه بر این گسیختگی سطحی را به‌طور مؤثری منحرف نموده است. (فاکولی و همکاران<sup>۶</sup> ۲۰۰۸). با در نظرگیری خسارات مادی و جانی نسبتاً شدید در طی زلزله‌های ناشی از فعالیت‌های تکتونیک در طی سالیان اخیر لزوم بررسی اندرکنش گسلش سازه همچنین ارائه‌ی راهکارهایی جهت کاهش آسیب‌های احتمالی ناشی از زمین‌لرزه‌های آتی بیش‌ازپیش مورد توجه قرار گرفته است.

تعدادی از پژوهش‌گران این مسئله را با رویکردهای مختلفی مورد بررسی قرار دادند. این رویکردها شامل مطالعات موردی (اولوسی و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۰۲)، (بری و کلسون<sup>۸</sup>، ۲۰۰۶)، (ژائو همکاران<sup>۹</sup>، ۲۰۱۰)؛ مدل‌سازی آزمایشگاهی (برانزی و همکاران<sup>۱۰</sup> ۲۰۰۸)، (لولی و همکاران، ۲۰۱۱)، (آشتیانی و

همکاران، ۲۰۱۵) و مدل‌سازی عددی (گزتاس و همکاران<sup>۱۱</sup>، ۲۰۰۸)، (بازیار و همکاران، ۲۰۱۵)، (اوتل و بری<sup>۱۲</sup>، ۲۰۱۳) می‌باشد. این پژوهش‌گران بیشتر روی انتشار گسیختگی گسل در شرایط آزاد، اندرکنش گسلش فونداسیون و پارامترهای مؤثر در این زمینه متمرکز بوده‌اند. مشخصات خاک، بزرگی جابجایی نسبی گسل، موقعیت دقیق فونداسیون نسبت به گسل، صلبیت، عمق مدفون و فشار سربار وارده برخی از آن‌ها می‌باشد. استراتژی اولیه برای کاهش خطر ناشی از گسیختگی گسلش سطحی اجتناب از ساخت و ساز در مجاورت گسل‌های فعال می‌باشد (بریانت، ۲۰۱۰). با این حال، به دلیل مشکلات موجود در تعیین موقعیت دقیق گسیختگی گسل و افزایش تقاضا در استفاده از زمین، اجتناب از ساخت و ساز کار منطقی به نظر نمی‌رسد. بیشتر آیین‌نامه‌های دنیا مانند یوروکد و کد یونان (EC8, EAK) ناحیه مشخصی را برای عقب‌نشینی مشخص نمی‌کنند.



شکل (۱): گسل نرمال در شرق گولسک<sup>۱۳</sup>، زلزله ۱۹۹۹ کواکلی ترکیه. ساختمان چهار طبقه با فونداسیون قرار گرفته بر روی فونداسیون صلب پیوسته. ساختمان جابجایی قائم رو به پایین ۲/۳ متری را بدون آسیب قابل مشاهده تحمل نموده است. علاوه بر این مسیر گسیختگی گسل را منحرف نموده است. (فاکولی و همکاران ۲۰۰۸).

<sup>۱</sup> Kocaeli  
<sup>۲</sup> Chelungpu  
<sup>۳</sup> Chi-Chi  
<sup>۴</sup> Wenchuan  
<sup>۵</sup> Anastasopoulos and Gazetas  
<sup>۶</sup> Faccioli et al.  
<sup>۷</sup> ULUSAY et al.  
<sup>۸</sup> Bray and Kelson  
<sup>۹</sup> Zhou et al.  
<sup>۱۰</sup> Bransby et al.

<sup>۱۱</sup> Gazetas et al.  
<sup>۱۲</sup> Oettle and Bray  
<sup>۱۳</sup> Gölcük

انجام‌گرفته توسط آشتیانی و همکاران (۲۰۱۵) و (۲۰۱۷) به‌طور کامل مورد صحت‌سنجی قرار گرفته و مطالعه‌ی پارامتری برای یافتن موقعیت بحرانی برای فونداسیون با اعمال گسلش با زوایای مختلف انجام‌گرفته است. سپس تأثیر استفاده از دیوار EPS در کنار فونداسیون برای کاهش جابجایی نسبی اعمالی ناشی از گسیختگی گسلش موردبررسی قرار گرفته است. EPS یک مصالح سبک است که از سال ۱۹۵۰ در مسائل مهندسی مورداستفاده قرار گرفته است و چگالی آن حدود یک‌صدم چگالی خاک است. این مصالح می‌تواند بازیافت شده و در کاربردهای مختلفی نظیر ساخت بتن سبک مورداستفاده قرار گیرد؛ بنابراین مصالحی مناسب با در نظرگیری مسائل زیست‌محیطی است. تلاش‌ها بر یافتن مقدار تأثیر استفاده از دیوار مذکور در کاهش دوران اعمالی بر فونداسیون متمرکز بوده است. نتایج نشان داد که این مصالح با توجه به شکل‌پذیری بالا و مقاومت برشی پایین نسبت به خاک می‌تواند باعث انحراف مسیر گسیختگی گسل شده و باعث شود که فونداسیون بدون تأثیرپذیری از گسیختگی گسل باقی بماند. عملکرد مطلوب دیوار مذکور به موقعیت دقیق فونداسیون نسبت به گسیختگی سطحی گسل  $s/b$ ، بزرگی جابجایی نسبی گسل  $h/H$  و البته مقدار زاویه شیب گسل  $\alpha$  بستگی دارد.

### بیان مسئله

مدل در نظر گرفته‌شده برای اندرکنش گسیختگی ناشی از گسلش معکوس و فونداسیون سطحی در شکل (۲، الف) نشان داده‌شده است. خاک یکنواخت با ضخامت ۱۲ متر  $H$  تحت اعمال گسیختگی گسل با زوایای ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه قرار گرفته است. یک فونداسیون صلب با عرض  $B = 1/5 m$  و ۸۱ کیلو پاسکال (به‌عنوان سربار ناشی از ساختمان ۸ طبقه) در روی زمین نزدیک محل اعمال گسل قرار گرفته است. لازم به ذکر است ابعاد در نظر گرفته‌شده برای مدل‌سازی بر اساس آزمایش سانتریفیوژ انجام‌شده توسط آشتیانی و همکاران (۲۰۱۵) و (۲۰۱۷) انتخاب‌شده است و در ادامه صحت‌سنجی‌های لازم انجام‌گرفته است. موقعیت فونداسیون نسبت به نمود سطحی گسل با استفاده از پارامتر  $S$  مشخص شده است. این

یافتن استراتژی قابل‌اعتماد و مناسب برای محافظت ساختمان‌ها در مجاورت نواحی داری گسل به یکی از اولویت‌هایی تبدیل‌شده که در جوامع مهندسی موردبررسی قرار گیرد. علی‌الخصوص در کشورهایی که دارای گسل‌های فعال بوده و جزو کشورهای لرزه‌خیز در دنیا محسوب می‌شوند. تعدادی از راهکارها در ادبیات فنی موردبررسی قرار گرفته است. جداسازی فونداسیون و خاک از طریق المان‌های ژئوگرید (بری، ۲۰۰۱)، استفاده از دیوارهای زیرزمینی قوی (دانکن و لفره<sup>۱</sup>، ۱۹۷۳)، فونداسیون قوی گسترده (بری، ۲۰۰۱)؛ گزتاس و همکاران (۲۰۰۸)، ساخت وزن‌هایی زیر پی برای انحراف مسیر جابجایی گسل (بریل<sup>۲</sup>، ۱۹۸۳)؛ گزتاس و همکاران (۲۰۰۸) و استفاده از دیوار بنتونیت برای جذب جابجایی ناشی از گسلش (فدایی و همکاران، ۲۰۱۶) تعدادی از آن‌ها است. (اوتل و بری ۲۰۱۳) استفاده‌ی هم‌زمان از فونداسیون صلب و راهکار انحراف مسیر گسیختگی گسل را برای افزایش اطمینان پیشنهاد دادند. در بحث دیوار بنتونیت، زاویه‌ی گسیختگی گسل ۴۵ درجه در نظر گرفته‌شده (که آن را تبدیل به گسل فشاری می‌نماید) و تأثیر احداث دیوار بررسی شده است. باید توجه داشت که SBW (دیوار بنتونیتی) در نسبت جابجایی  $h/H$  معادل ۵ درصد، عملکرد مطلوبی داشته و عملکرد آن در نسبت‌های جابجایی بالا بررسی نشده است. (فلندرزاده و آشتیانی، ۲۰۱۷) تأثیر استفاده از دیوار پرشده با مصالح سبک و مقاومت برشی پایین برای انحراف مسیر گسیختگی گسل را بررسی کردند. نتایج نشان داد که دیوار پرشده با مصالح پلی‌استرنی (EPS) بهترین عملکرد در کاهش خطر گسلش برای فونداسیون مدفون با نسبت عمق مدفون  $D/B = 0/3$ ، قرار گرفته در موقعیت  $s/b = 0/8$  تحت اعمال گسلش با زاویه‌ی  $\alpha = 75^\circ$  را داشته است؛ اما تأثیر استفاده از این دیوار برای موقعیت‌های مختلف فونداسیون سطحی و زوایای مختلف گسل موردبررسی قرار نگرفته است. در مقاله‌ی پیش رو دیوار EPS برای مقادیر مختلف جابجایی گسل تا مقدار  $h/H = 20\%$  و سه زاویه گسیختگی گسل مورداستفاده قرار گرفته است. ابتدا مدل‌سازی عددی اندرکنش گسیختگی گسلش معکوس و فونداسیون سطحی از طریق نتایج آزمایش سانتریفیوژ

<sup>۱</sup> Duncan and Lefebvre

<sup>۲</sup> Bray

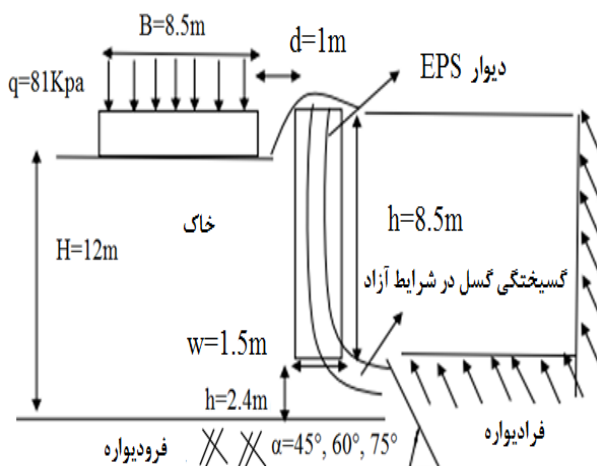
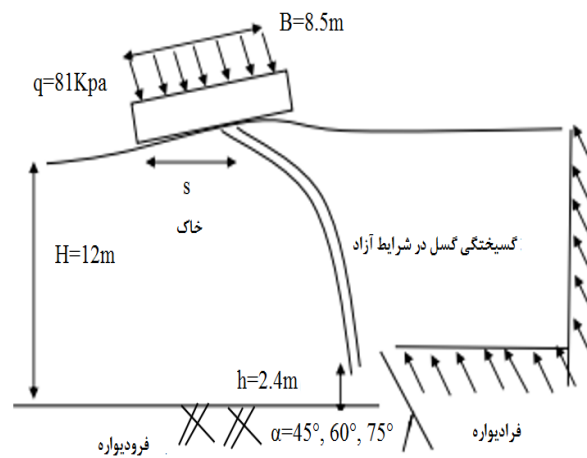
الف) اندرکنش گسیختگی گسلش معکوس و فونداسیون سطحی با عرض  $8/5$  متر و فشار سربار  $q=81\text{Kpa}$ . قرار گرفته در فاصله  $s$  از محل نمود سطحی گسل در حالت انتشار آزاد ب) قرار گیری دیوار EPS برای انحراف مسیر گسیختگی گسل و کاهش خطر.

### صحت سنجی مدل سازی عددی

#### آزمایش سانتریفیوژ

خاک مصالحی با رفتار غیرخطی بوده و مقادیر تنش مؤثر مشخصات مکانیکی خاک‌های دانه‌ای (مقاومت و سختی) با رفتار اتساعی را کنترل می‌کند. مدل‌های کوچک مقیاس (یک g) به دلیل سطح تنش بسیار پایین نسبت به شرایط واقعی نمی‌توانند رفتار مدل‌های واقعی را به صورت صحیح ارائه دهند. (لی و هامادا<sup>۱</sup>، ۲۰۰۵؛ لین و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۰۶). آزمایش حالت آزاد با استفاده از خاک ماسه‌ای فیروزکوه با نسبت تراکم  $60\%$  و ارتفاع  $12$  متر انجام شده که در شکل (۳) نشان داده شده است. آزمایش‌های برش مستقیم روی نمونه‌ای از خاک با درصد تراکم  $60\%$  و درصد رطوبت  $5\%$  انجام شده است. مشخصات خاک در جدول (۱) نشان داده شده است. یک فونداسیون صلب با عرض  $8/5$  متر با عمق مدفون و فشار سربار مشخص در سطح خاک قرار داده شده است. موقعیت فونداسیون با استفاده از پارامتر  $S$  (قبلاً معرفی شده) مشخص شده و پارامتر  $W$  به عنوان فاصله افقی مسیر گسیختگی گسل و محل اعمال جابجایی گسل تعریف شده است. مقدار بیشینه جابجایی گسل اعمالی  $42/6$  میلی‌متر ( $2/4$  متر در حالت واقعی) است. توضیحات کامل درباره جعبه سانتریفیوژ حاوی خاک در آشتیانی و همکاران ۲۰۱۵ ارائه شده است.

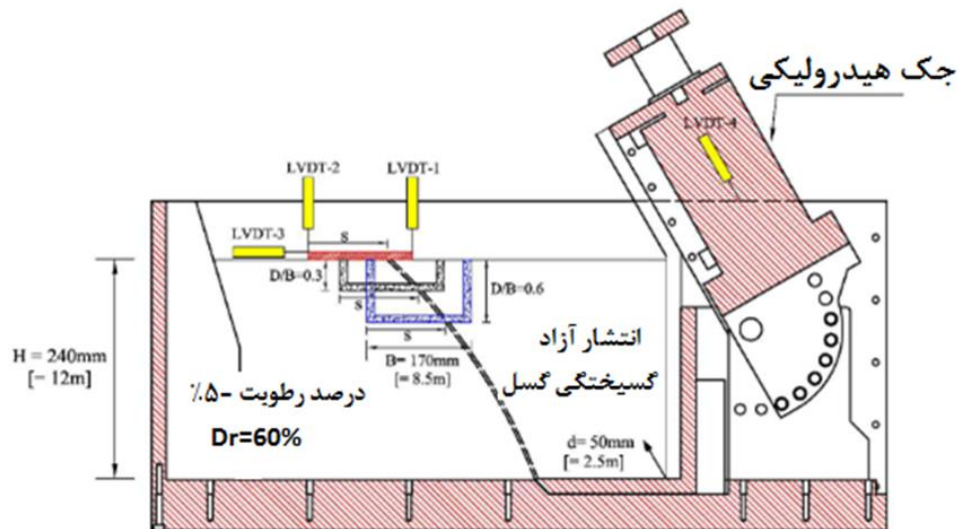
پارامتر بیانگر فاصله‌ی بین گوشه سمت چپ فونداسیون و نقطه‌ای که گسیختگی گسل سطحی در شرایط آزاد با کف فونداسیون برخورد می‌کند است. برای ارزیابی تأثیر راهکار کاهش خطر پیشنهاد شده در محدود کردن آسیب سازهای ناشی از گسیختگی گسلش معکوس، یک دیوار EPS با ارتفاع  $8/5$  متر  $HEPS=$  و عرض  $1/5$  متر  $w=$  در کنار فونداسیون قرار گرفته است (شکل (۲): ب). سپس نتایج حالت‌های محافظت شده و محافظت نشده برای بررسی تأثیر دیوار احداث شده مورد مقایسه قرار گرفته است. شکل شماتیک مسئله‌ی مورد بررسی و مشخصات هندسی آن در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): نمای شماتیک مسئله مورد بررسی و هندسه‌ی آن:

<sup>۱</sup> Lee and Hamada

<sup>۲</sup> lin et al



شکل (۳): شماتیک مقطع عرضی اندرکنش گسیختگی گسل و فونداسیون. (مقادیر داخل پرانتز ابعاد در مقیاس واقعی هستند). (استفاده شده از آشتیانی و همکاران ۲۰۱۵)

جدول (۱): خلاصه‌ی مشخصات خاک استفاده شده برای آزمایش.

$D_{50}$ (mm)	E (MPa)	نسبت پوآسون ( $\nu$ )	$\phi_p$ (درجه)	$\phi_{residual}$ (درجه)	$\Psi$ (درجه)	$\gamma_{wet}$ (KN/m <sup>3</sup> )	$e_{max}$	$e_{min}$
۰/۳	۴۰	۰/۳	۳۳	۳۱	۱	۱۵/۷۷	۰/۹۴۳	۰/۶۰۳

### مدل‌سازی عددی

شوندگی معرفی شده توسط آناستاسوپولوس و گزتاس ۲۰۰۷ برای خاک‌های اتساعی در این مسئله تغییر چندانی ایجاد نمی‌کند. بعد از اطمینان از صحت مدل‌سازی عددی انجام گرفته با در نظرگیری ۳ زاویه‌ی محتمل برای گسیختگی گسل (۴۵،۶۰ و ۷۰ درجه)، عملکرد استفاده از دیوار EPS با مقاومت برشی پایین قرار گرفته در یک متری فونداسیون بررسی شده است.

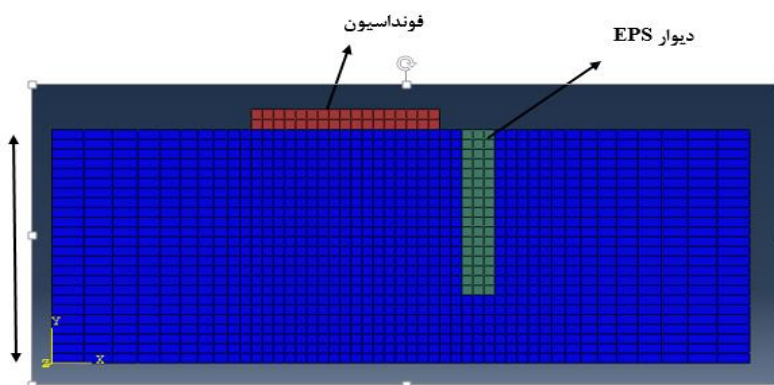
### صحت‌سنجی روش آنالیز

محدودیت‌های ابعاد مش و تأثیر مقیاس با در نظرگیری حالت تقریبی معرفی شده توسط آناستاسوپولوس و گزتاس ۲۰۰۷ اعمال شده است. با توجه به حساسیت سنجی انجام شده در زمینه‌ی مش بندی مدل در نواحی محتمل عبور گسیختگی از مش بندی با ابعاد ۰/۵ در ۰/۵ و در نواحی دورتر و با نزدیک شدن به دیواره‌ها از مش بندی درشت‌تر استفاده شده است.

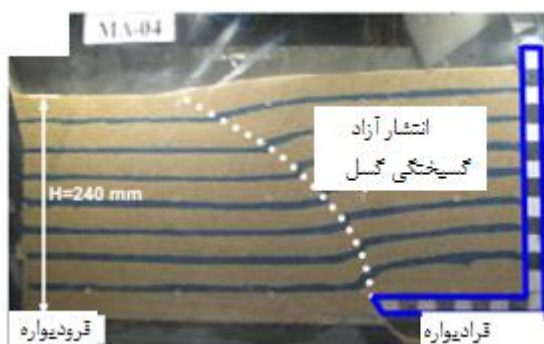
نرم‌افزار آباکوس با رویکرد المان محدود برای مدل‌سازی عددی مورد استفاده قرار گرفته است. آنالیز در شرایط کرنش مسطح و به صورت دوبعدی انجام شده است. برای مش بندی خاک و فونداسیون از المان چهارضلعی استفاده شده است. رفتار اصطکاکی عمودی با استفاده از ضریب اصطکاک  $\tan\phi = 0.6$  معرفی شده است. برای ایجاد شرایط جدایی بین فونداسیون و خاک در محل سطح تماس، المان گپ در مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی شرایط شبه استاتیک اعمال گسیختگی ناشی از گسلش در محیط خاک از آنالیز دینامیک صریح (Dynamic explicit) استفاده شده است. به دلیل رفتار نه‌چندان اتساعی خاک، مدل الاستوپلاستیک ساده با معیار گسیختگی موهر-کولمب برای مدل‌سازی رفتار خاک در نظر گرفته شده است. نتایج آنالیز نشان داد که استفاده از نرم

سمت راست فونداسیون منحرف می‌شوند. نتایج مدل‌سازی عددی به‌خوبی هر دو مسیر گسیختگی گسل را پوشش می‌دهد. فونداسیون در این حالت مکانیسم فرودیواره را تجربه می‌کند (گسیختگی گسل در سمت فرادیواره قرار داشته و فونداسیون در سمت فرودیواره قرار می‌گیرد). شکل (۷) نتایج دوران فونداسیون برای حالت آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی را نشان می‌دهد. مجدداً موفقیت مدل‌سازی عددی در محاسبه ی مقادیر دوران فونداسیون در قیاس با مقادیر آزمایشگاهی مشاهده می‌شود.

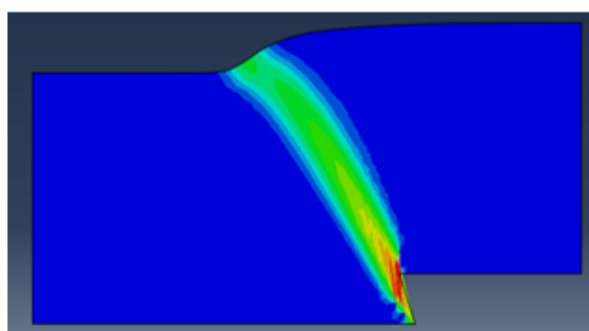
مدل مش بندی استفاده‌شده در شکل (۴) نشان داده‌شده است. سه مورد از آزمایش‌ها به‌صورت عددی مدل‌سازی شده‌اند. ابتدا انتشار گسیختگی ناشی از گسل در شرایط آزاد مدل‌سازی شده است. همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده‌شده است مدل‌سازی عددی به‌خوبی توانسته مسیر انتشار گسیختگی ناشی گسلش را پیش‌بینی نماید. اندرکنش فونداسیون با عرض ۸/۵ متر و سربار  $Kpa_{\lambda 1}$  قرارگرفته در موقعیت  $s/b = 0.75$  گسیختگی گسلش معکوس با زاویه ۶۰ درجه در شکل (۶) نشان داده‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود دو مسیر انتشار گسیختگی گسل ( $F1, F2$ ) به وجود آمده و هر دو به



شکل (۴): مدل مش بندی استفاده‌شده در مدل‌سازی عددی.

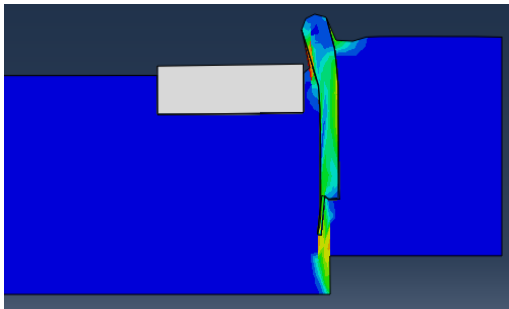


(ب)

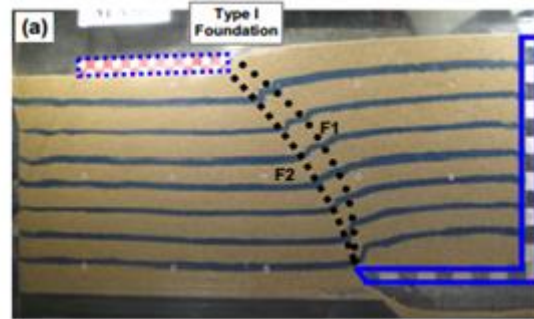


(الف)

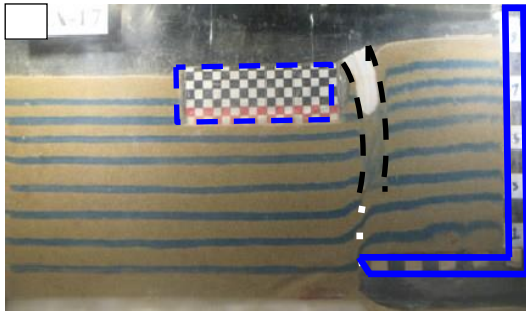
شکل (۵): مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی در شرایط آزاد. (الف) نتایج آنالیز المان محدود شمارگر کرنش برشی برای  $h=2.4m$  و (ب) نتایج آزمایش سانتریفیوژ



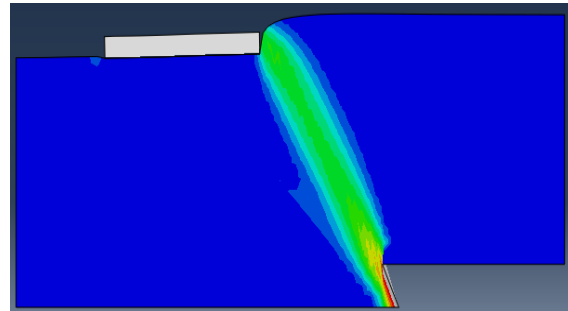
(الف)



(الف)



(ب)

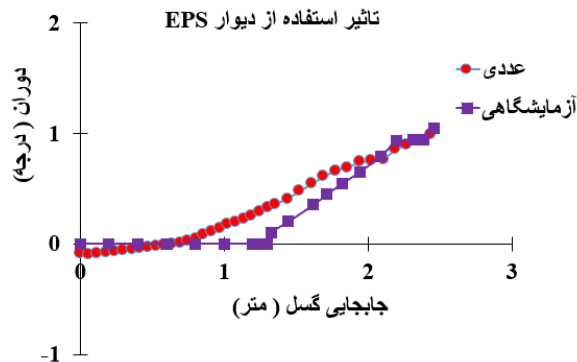


(ب)

شکل (۶): تأثیر فونداسیون در مسیر گسیختگی. الف) عکس مدل

سانتریفیوژ (ب) نتایج کرنش برشی پلاستیک.

$$s/b=0.75, q=81\text{Kpa}, B=8.5\text{m}$$

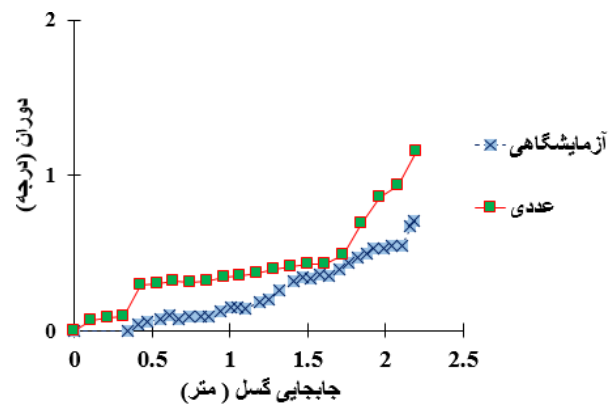


(ج)

شکل (۸): عملکرد استفاده از دیوار EPS در کاهش آسیب وارده به فونداسیون مدفون با نسبت عمق مدفون  $D/B=0.3$  در موقعیت  $s/b=0.8$  و تحت زاویه گسلش ۷۵ درجه. الف) مدل عددی (ب) مدل آزمایشگاهی (ج) نمودار دوران فونداسیون

### مطالعه‌ی پارامتریک

بعد از اطمینان از صحت مدل‌سازی عددی، با تغییر موقعیت فونداسیون و زاویه‌ی گسل تعداد ۲۱ مدل در نظر گرفته شد. سپس موقعیتی که در آن فونداسیون بیشترین مقدار دوران را تجربه می‌کند مشخص گردید. با توجه به اینکه تأثیر سربار فونداسیون و مشخصات خاک در اندرکنش گسلش و فونداسیون در ادبیات فنی مورد بررسی قرار گرفته، تأثیر آن‌ها



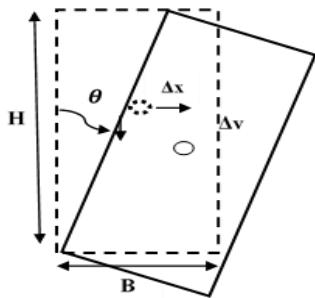
شکل (۷): دوران فونداسیون با  $s/b=0.75$  و  $q=81\text{Kpa}$ ،  $B=8.5\text{m}$

عملکرد مناسب استفاده از دیوار مذکور در جذب مسیر گسیختگی ناشی از گسلش و کاهش آسیب وارده بر فونداسیون مدفون با نسبت عمق مدفون  $D/B=0.3$  قرار گرفته در موقعیت  $s/b=0.8$  تحت زاویه‌ی گسلش ۷۵ درجه در شکل (۸) نشان داده است.

و بهسازی شده می‌شود. ابتدا باید توجه نمود که تنش‌های وارده به فونداسیون و آسیب‌های سازه‌ای با از دست رفتن تکیه‌گاه زیر فونداسیون مستقیماً در ارتباط است (آناستاسوپولوس و همکاران ۲۰۱۰) که می‌تواند منجر به آسیب‌های شدید سازه‌ای شود. این مورد در مسئله پیش رو در نظر گرفته نشده و از مقادیر دوران فونداسیون برای تعیین سطوح مختلف آسیب استفاده شده است. مطابق شکل (۹) زمانی که فونداسیون صلب با عرض  $B$  و ارتفاع  $H$  دوران صلب  $\theta$  و جابجایی‌های افقی و قائم  $\Delta x$  و  $\Delta y$  را می‌توان از روابط (۱) و (۲) محاسبه کرد.

$$\Delta x = [B \cos(\theta) + H \sin(\theta) - B] / 2 \quad (1)$$

$$\Delta y = [H - H \cos(\theta) + B \sin(\theta)] / 2 \quad (2)$$



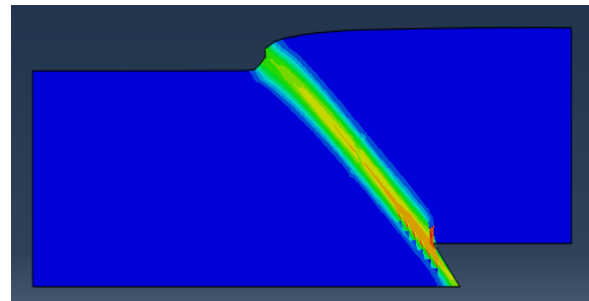
شکل (۱۰): جابجایی مرکز جرم ساختمان ناشی از دوران.

جدول (۲): سطوح آسیب فونداسیون و روسازه صلب ناشی از جابجایی اعمالی

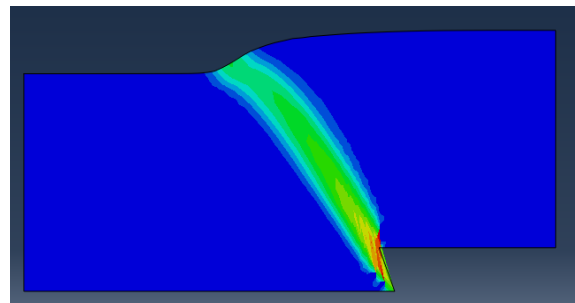
سطح آسیب	دوران صلب (درجه)
قابل چشم‌پوشی تا کم	$0 \leq \theta < 1^\circ$
کم تا متوسط	$1^\circ \leq \theta < 2^\circ$
شدید	$2^\circ \leq \theta < 5^\circ$
تهدید پایداری	$\theta \geq 5^\circ$

مورد مطالعه قرار نگرفت. در ابتدا باید توجه داشت که با افزایش زاویه گسل پارامتر  $W$  (فاصله‌ی افقی محل نمود گسیختگی سطحی گسل و محل اعمال تغییر شکل) کاهش می‌یابد (شکل (۹)).

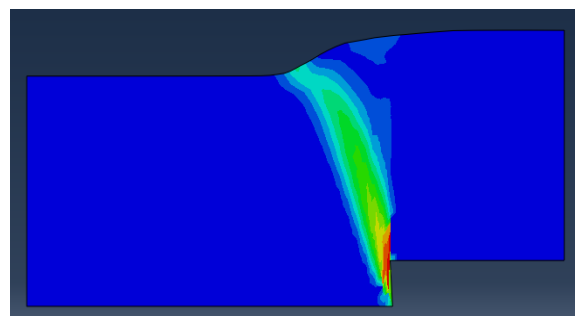
این مشاهده با خوبی با نتایج مطالعات لین و همکاران در سال ۲۰۰۶ انطباق دارد؛ بنابراین موقعیت بحرانی برای فونداسیون با اعمال زوایای مختلف جابجایی گسل تغییر خواهد کرد.



(الف)



(ب)



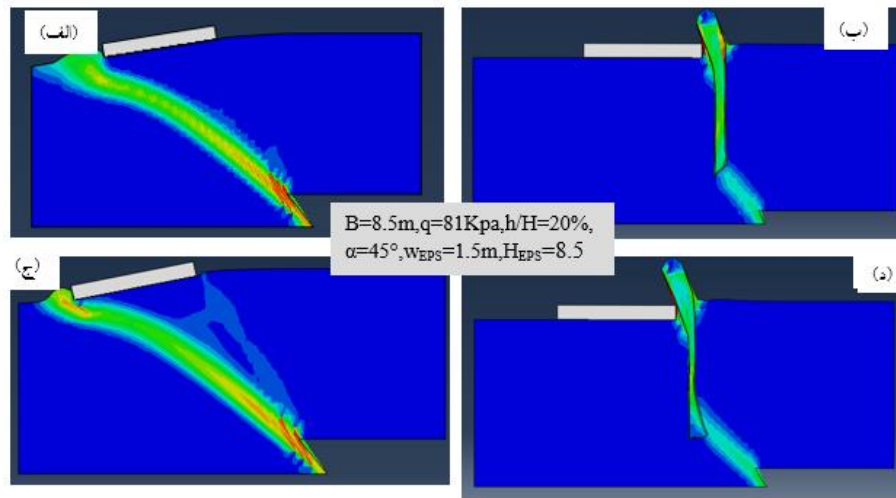
شکل (۹): خروجی تغییر شکل ناشی از گسیختگی گسل با زوایای مختلف. (الف) ۴۵ درجه (ب) ۶۰ درجه (ج) ۷۵ درجه

انتخاب معیار مناسب برای تعیین سطوح مختلف آسیب وارده به فونداسیون منجر به آنالیز بهتر عملکرد سازه در حالت عادی

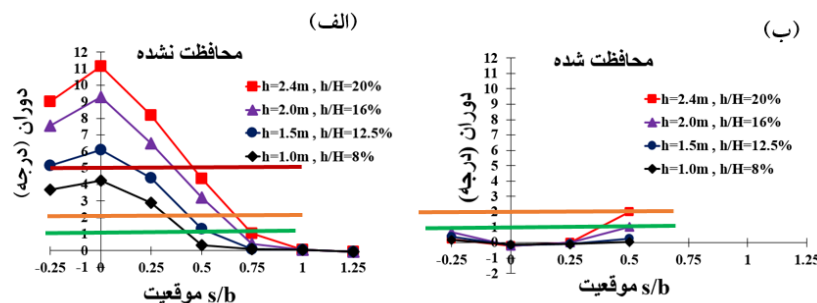


احداث دیوار EPS با ایجاد ناحیه ضعیف در خاک جابجایی فشاری اعمالی را جذب کرده و گسیختگی گسل را منحرف نموده است. برای ارائه بهتر تأثیر استفاده از دیوار، شکل ۱۲ دوران فونداسیون  $\theta$  به‌عنوان تابعی از موقعیت آن را نشان می‌دهد.

اندرکنش گسلش و فونداسیون در حالت اعمال گسیختگی با زاویه ۴۵ درجه در حالت محافظت نشده و محافظت شده برای دو موقعیت بحرانی فونداسیون در شکل (۱۰) نشان داده شده است. جابجایی پسیو در سمت فرود دیواره برای هر دو موقعیت فونداسیون اتفاق افتاده و پی مجبور به دوران بیشتر شده است.



شکل (۱۱): تأثیر استفاده از دیوار در اندرکنش گسلش پی سطحی: (الف) و (ب):  $s/b = -0.25$  و (ج) و (د):  $s/b = 0$



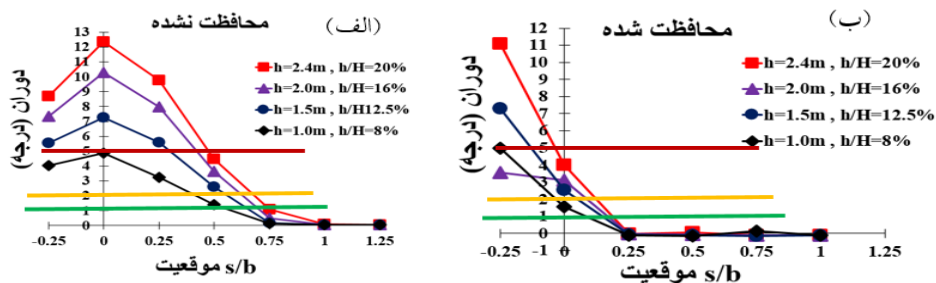
شکل (۱۲): تأثیر دیوار EPS در کاهش آسیب وارده به فونداسیون قرارگرفته در موقعیت‌های  $(-0.25, 0.125)$  و با اعمال ۴ نسبت جابجایی گسل با زاویه ۴۵ درجه. (الف) حالت محافظت نشده (ب) حالت محافظت شده

نیازی به کاهش آسیب وجود ندارد. با حرکت فونداسیون به سمت فراد دیواره  $s/b < 0.125$ ، مقادیر دوران افزایش می‌یابد و برای  $s/b < 0.125$  و  $h/H > 0.125$  آسیب متوسط تا شدید برای ساختمان اتفاق می‌افتد. موقعیت بحرانی فونداسیون که در آن بیشینه مقادیر دوران اتفاق می‌افتد در  $s/b > 0.125$

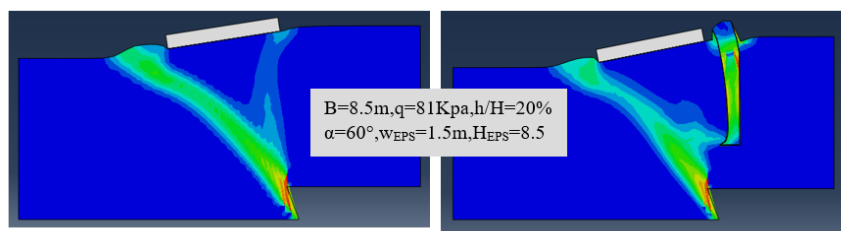
مطابق سطوح آسیب طبقه‌بندی شده برای ساختمان (جدول (۲)) با افزایش جابجایی گسل سطح آسیب افزایش می‌یابد. برای موقعیت  $s/b > 0.125$  فونداسیون به ازای تمامی مقادیر جابجایی گسل در شرایط آسیب قابل چشم‌پوشی قرار داشته و عملکرد فونداسیون محافظت نشده رضایت‌بخش است بنابراین

موقعیت  $s/b=0$  (بحرانی ترین موقعیت فونداسیون) مقادیر دوران  $0.25 < s/b \leq 0.10$  کاهش یافته و برای موقعیت های  $s/b < 0.25$ ،  $0.10$ ٪ کاهش دوران مشاهده می شود؛ بنابراین در مقایسه با حالت محافظت نشده که در آنجا برای  $s/b < 0.5$  و  $h/H > 0.8$  آسیب شدید تا ناپایداری سازه اتفاق می افتاد در حالت محافظت شده فقط در موقعیت  $s/b = -0.25$  و  $h/H > 0.12/5$  پایداری سازه به مخاطره می افتد. در حالت  $s/b = -0.25$  مطابق شکل (۱۴) مسیر اصلی گسیختگی گسل به سمت فونداسیون منتشر شده و دیوار نتوانسته آن را جذب کند. دلیل این مسئله فاصله ی نزدیک فونداسیون نسبت به محل اعمال جابجایی گسل و در واقع عدم قرارگیری دیوار حفرت شده در مسیر گسیختگی گسل است.

قرار دارد. از آنجایی که خدمت پذیری ساختمان نیازمند کمترین مقادیر دوران صلب بعد از اعمال گسیختگی گسل است، همان طور که در شکل (۱۱) و (۱۲): (ب) نشان داده شده است. دیوار EPS به طور مؤثری مسیر گسیختگی گسل را جذب کرده و به ازای تمامی موقعیت های پی و جابجایی گسل سطح آسیب قابل چشم پوشی تا کم است. در نتیجه در مورد اعمال گسیختگی گسل با زاویه ۴۵ درجه استفاده از دیوار EPS برای کاهش آسیب وارده به طور کامل مؤثر بوده است. با افزایش زاویه گسل فونداسیون دوران بیشتری نسبت به حالت با زاویه ی ۴۵ درجه تجربه می کند. شکل ۱۳ نتایج برای زاویه گسل ۶۰ درجه را نشان می دهد. در اینجا نیز موقعیت بحرانی فونداسیون بین  $s/b > 0.25$  قرار دارد. با استفاده از دیوار EPS در



شکل (۱۳): تأثیر دیوار EPS در کاهش آسیب وارده به فونداسیون قرار گرفته در موقعیت های  $(-0.25, 1.25)$  و با اعمال ۴ نسبت جابجایی گسل با زاویه ۶۰ درجه. الف) حالت محافظت نشده ب) حالت محافظت شده

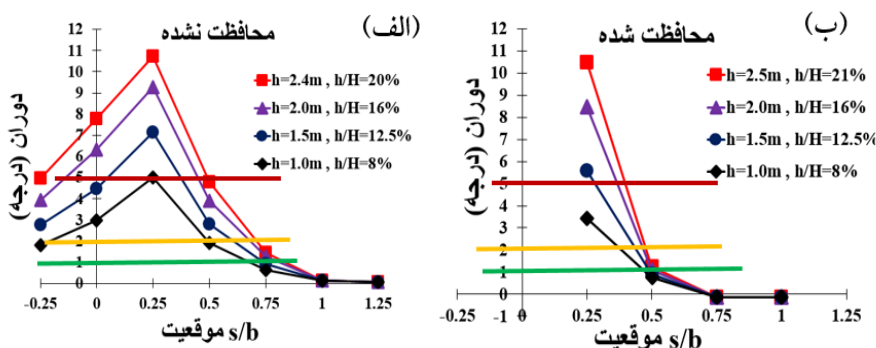


شکل (۱۴): تأثیر دیوار EPS در اندرکنش گسلش فونداسیون  $s/b=0$

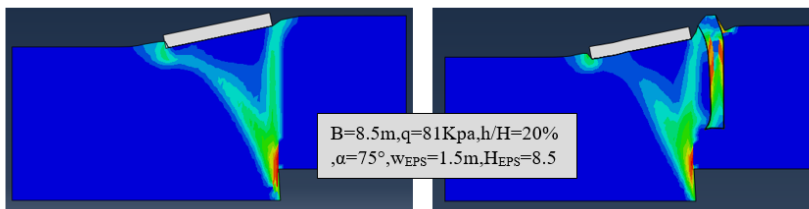
موقعیت های  $s/b > 0.5$  مؤثر بوده و دوران ناشی از اندرکنش گسیختگی ناشی از گسلش با پی در مقایسه با حالت محافظت نشده ۵۰٪ کاهش یافته و سطح آسیب از شدید به آسیب کم تقلیل یافته است. همان طور که در شکل (۱۶) نشان داده شده است، برای حالت  $s/b = 0.25$  با تشکیل دو مسیر گسیختگی

در نهایت نتایج برای حالت اعمال گسیختگی گسل با زاویه ۷۵ درجه در شکل (۱۵) نشان داده شده است. در این حالت موقعیت بحرانی برای فونداسیون که دوران بیشتری اتفاق می افتد در  $s/b > 0.25$  قرار دارد و با دور کردن فونداسیون از فرادیواره مقادیر آن کاهش می یابد. دیوار معرفی شده در

گسل و انتشار آن به دو سمت فونداسیون شرایط کمی پیچیده جذب نماید. شده و حفر دیوار ترانشه نتوانسته مسیر گسیختگی گسل را



شکل (۱۵): تأثیر دیوار EPS در کاهش آسیب وارده به فونداسیون قرار گرفته در موقعیت‌های (۱/۲۵, -۰/۲۵) و با اعمال ۴ نسبت جابجایی گسل با زاویه ۷۵ درجه. الف) حالت محافظت نشده ب) حالت محافظت شده



شکل (۱۶): تأثیر استفاده از دیوار در اندرکنش گسلش فونداسیون  $s/b=0.25$

### نتیجه‌گیری

با افزایش زاویه‌ی گسل تأثیر دیوار در کاهش آسیب وارده در برخی از موقعیت‌های قرارگیری فونداسیون کاهش می‌یابد. در واقع در حالت اعمال گسیختگی با زاویه ۴۵ درجه عملکرد دیوار کاملاً مطلوب است اما در حالت‌های ۶۰ درجه و ۷۵ درجه در برخی از موقعیت‌های پی که دیوار نمی‌تواند در مسیر گسیختگی قرار گیرد، حفر دیوار مذکور تأثیر چندانی در کاهش آسیب وارده ندارد. اگرچه نتایج نشان دادند که در صورت قرارگیری فونداسیون در موقعیتی با فاصله مناسب از فرادیوار، احداث دیوار EPS در کاهش آسیب وارده تأثیر چشم‌گیری دارد، اما بایستی آنالیز کامل و دقیقی برای بررسی تأثیر استفاده از دیوار مذکور با تغییر شرایط ثابت در نظر گرفته شده انجام شود. شرایط مذکور شامل به عمق بردن فونداسیون، تغییر عرض و ارتفاع دیوار، سربار فونداسیون و نسبت مقاومت برشی خاک و دیوار است.

در این مقاله موقعیت بحرانی فونداسیون سطحی که در آن بیشترین مقدار دوران را در اثر اندرکنش با گسیختگی ناشی از گسلش تجربه می‌نماید و همچنین تأثیر استفاده از دیوار EPS برای کاهش آسیب وارده به سازه از طریق مدل‌سازی عددی صحت سنجی شده مورد مطالعه قرار گرفت. خلاصه‌ی نتایج در جداول (۳) و (۴) ارائه شده است. نتایج اصلی این تحقیق عبارت‌اند از: با افزایش زاویه‌ی گسل موقعیت بحرانی فونداسیون به سمت فرادیوار جابجا می‌شود. استفاده از دیوار قائم از جنس EPS به‌عنوان راهکاری جهت بهسازی فونداسیون در مواقعی که دیوار در مسیر گسیختگی ناشی از گسلش قرار گیرد باعث کاهش چشم‌گیر مقادیر دوران حتی به ازای نسبت‌های جابجایی گسل زیاد  $h/H=20\%$  می‌شود.

جدول (۳): موقعیت بحرانی فونداسیون نسبت به حالت آزاد انتشار گسیختگی گسل.

$s/b=-0,25$	$s/b=0$	$s/b=0,25$	$s/b=0,5$	$s/b=0,75$	$s/b=1$	$s/b=1,25$	موقعیت زاویه گسل
x	x	x					۴۵ درجه
x	x	x					۶۰ درجه
	x	x					۷۵ درجه

جدول (۴): عملکرد دیوار EPS در کاهش آسیب وارد شده بر فونداسیون سطحی.

$s/b=-0,25$	$s/b=0$	$s/b=0,25$	$s/b=0,5$	$s/b=0,75$	$s/b=1$	$s/b=1,25$	موقعیت زاویه گسل
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	۴۵ درجه
		✓	✓	✓	✓	✓	۶۰ درجه
			✓	✓	✓	✓	۷۵ درجه

## منابع

1. ANASTASOPOULOS, I. & GAZETAS, G. 2007a. Foundation-structure systems over a rupturing normal fault: Part I. Observations after the Kocaeli 1999 earthquake. Bulletin of Earthquake Engineering, 5, 253-275.
2. ANASTASOPOULOS, I. & GAZETAS, G. 2007b. Foundation-structure systems over a rupturing normal fault: Part II. Analysis of the Kocaeli case histories. Bulletin of Earthquake Engineering, 5, 277-301.
3. ANASTASOPOULOS, I. ANTONAKOS, G. & GAZETAS, G. 2010. Slab foundation subjected to thrust faulting in dry sand: Parametric analysis and simplified design method. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30, 912-924.
4. ASHTIANI, M. GHALANDARZADEH, A. & TOWHATA, I. 2015. Centrifuge modeling of shallow embedded foundations subjected to reverse fault rupture. Canadian Geotechnical Journal, 53, 505-519.
5. ASHTIANI, M. GHALANDARZADEH, A. MAHDAVI, M. & HEDAYATI, M. 2017. Centrifuge modeling of geotechnical mitigation measures for shallow foundations subjected to reverse faulting. Canadian Geotechnical Journal.
6. BAZIAR, M. H. NABIZADEH, A. & JABBARY, M. 2015. Numerical modeling of interaction between dip-slip fault and shallow foundation. Bulletin of Earthquake Engineering, 13, 1613-1632.
7. BERRILL, J. 1983. Two-dimensional analysis of the effect of fault rupture on buildings with shallow foundations. International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2, 156-160.
8. BRANSBY, M. DAVIES, M. EL NAHAS, A. & NAGAOKA, S. 2008a. Centrifuge modelling of

17. GHALANDARZADEH, A. & ASHTIANI, M. 2017. Geotechnical mitigation measures for interaction of reverse faulting and shallow foundations: centrifuge modeling. The 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
18. LEE, J. W. & HAMADA, M. 2005. An experimental study on earthquake fault rupture propagation through a sandy soil deposit. *Structural Engineering/Earthquake Engineering*, 22, 1s-13s.
19. LIN, M.L. CHUNG, C.F. & JENG, F.S. 2006. Deformation of overburden soil induced by thrust fault slip. *Engineering Geology*, 88, 70-89.
20. LOLI, M. ANASTASOPOULOS, I. BRANSBY, F. M. & GAZETAS, G. 2011. Normal and Reverse Fault Rupture Interaction with Caisson Foundations: Centrifuge Modeling and Numerical Simulation. *Santiago*, 10, 13.
21. OETTLE, N. K. & BRAY, J. D. 2013a. Fault Rupture Propagation through Previously Ruptured Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139, 1637-1647.
22. OETTLE, N. K. & BRAY, J. D. 2013b. Geotechnical mitigation strategies for earthquake surface fault rupture. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139, 1864-1874.
23. ULUSAY, R. AYDAN, Ö. & HAMADA, M. 2002. The behaviour of structures built on active fault zones: examples from the recent earthquakes of Turkey. *Structural Engineering/Earthquake Engineering*, 19, 149s-167s.
24. ZHOU, Q. XU, X. YU, G. CHEN, X. HE, H. & YIN, G. 2010. Width distribution of the surface ruptures associated with the Wenchuan earthquake: implication for the setback zone of the seismogenic faults in postquake reconstruction. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100, 2660-2668.
9. BRANSBY, M. DAVIES, M. & NAHAS, A. E. 2008b. Centrifuge modelling of normal fault–foundation interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6, 585-605.
10. BRAY, J. D. Developing mitigation measures for the hazards associated with earthquake surface fault rupture. Workshop on seismic fault-induced failures—possible remedies for damage to urban facilities. University of Tokyo Press, 2001. 55-79.
11. BRAY, J. D. & KELSON, K. I. 2006. Observations of Surface Fault Rupture from the 1906 Earthquake in the Context of Current Practice. *Earthquake Spectra*, 22, 69-89.
12. BRYANT, W. A. 2010. History of the Alquist-Priolo Earthquake Fault Zoning Act, California, USA. *Environmental & Engineering Geoscience*, 16, 7-18.
13. DUNCAN, J. M. & LEFEBVRE, G. 1973. Earth pressures on structures due to fault movement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 99.
14. FACCIOLI, E. ANASTASOPOULOS, I. GAZETAS, G. CALLERIO, A. & PAOLUCCI, R. 2008. Fault rupture–foundation interaction: selected case histories. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6, 557-583.
15. FADAEI, M. EZZATYAZDI, P. ANASTASOPOULOS, I. & GAZETAS, G. 2016. Mitigation of reverse faulting deformation using a soil bentonite wall: Dimensional analysis, parametric study, design implications. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 89, 248-261.
16. GAZETAS, G. PECKER, A. FACCIOLI, E. PAOLUCCI, R. & ANASTASOPOULOS, I. 2008. Preliminary design recommendations for dip-slip fault–foundation interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6, 677-687.