

## مطالعه برخورد فونداسیون‌های مجاور تحت گسلش امتدادلغز

ارسالان اصولی قره آغاجی، محمد ناصری، علی اخترپور

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد  
arsalan.osouli@mail.um.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد  
mohammad.nasseri@mail.um.ac.ir

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران-ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد  
akhtarpour@um.ac.ir

### خلاصه

امروزه زمین‌لرزه یکی از مهم‌ترین پدیده‌های موثر در طراحی سازه‌ها است. گسلش اثرات متفاوتی بر روی خاک و سازه‌ها دارد که اثر تغییر شکل‌های دائمی بر خاک از جمله اثراتی است که باید مورد بررسی قرار گیرد. در این پژوهش انتشار گسیختگی برشی ناشی از گسل امتدادلغز و تغییر شکل‌های ایجاد شده در توده خاک به کمک نرم افزار آباکوس و روش اجزای محدود مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. در ادامه تاثیر این گسیختگی بر روی برخورد فونداسیون‌های مجاور و پارامترهای موثر بر آن مورد بررسی قرار گرفته است. ارزیابی نتایج نشان‌دهنده وابستگی برخورد دو فونداسیون به زاویه گسلش و موقعیت گسلش است.

کلمات کلیدی: گسل امتدادلغز، فونداسیون گسترده، برخورد فونداسیون، آباکوس

### ۱. مقدمه

فعالیت‌های زمین‌ساختی و جابجایی صفحات پوسته زمین عامل وقوع زمین‌لرزه و چین خوردگی پوسته در مرز صفحات شناخته می‌شود. گسلش به دلیل جابجایی نسبی در دو سمت گسل رخ داده و در نتیجه سطح زمین دچار گسیختگی می‌شود. گسیختگی ناشی از گسلش باعث وقوع دو نوع حرکت در سطح زمین می‌گردد: جابجایی‌های شبه‌استاتیکی دائمی روی گسل و نوسانات دینامیکی گذرای دور از گسل (۱). نوسانات دینامیکی زمین‌لرزه با توجه به سطح وسیع انتشار امواج به طور گسترده توسط پژوهشگران مورد مطالعه قرار گرفته است. اما جابجایی دائمی روی گسل فقط زمانی دارای اهمیت است که به سطح زمین برسد (۲).

به منظور جلوگیری از اندرکنش گسلش-خاک-سازه یا کاهش خسارات احتمالی، اولویت اول آیین‌نامه‌های سازه‌ای، منع ساخت و ساز در مجاورت گسل‌های فعال است اما با توجه به وجود شهرهای بزرگ مانند تهران و تبریز بر روی گسل و ساختمان‌های احداث شده یا در حال ساخت در این شهرها، منع گسترش شهرسازی در این نواحی اقتصادی نیست. همچنین وقوع زلزله‌های قدرتمند دهه ۹۰ میلادی در چی‌چی<sup>۱</sup> (۱۹۹۹)، دوزچه<sup>۲</sup> (۱۹۹۹) و قوجاییلی<sup>۳</sup> (۱۹۹۹) و خرابی‌های ناشی از آن نشان داد که اندرکنش حرکات دائمی گسل و سازه‌ها باید مورد بررسی قرار گیرد. در مشاهدات میدانی اگرچه تعداد زیادی از سازه‌ها آسیب دیده و یا کاملاً تخریب شده بودند، تعدادی از سازه‌ها عملکرد مطلوبی در مقابل گسلش از خود نشان دادند (۲). در زمینه گسل‌های امتدادلغز، مطالعات میدانی (۳، ۴)، آزمایشگاهی (۵، ۶) و عددی (۷-۵) انجام شده و رویکردهایی نیز جهت کاهش خسارات وارده به روسازه‌ها پیشنهاد گردیده است (۸). در این پژوهش مکانیسم‌های حرکتی دو فونداسیون مجاور تحت گسلش امتدادلغز به صورت سه‌بعدی و به کمک نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفته و وضعیت برخورد دو فونداسیون کنترل می‌شود.

Chi-Chi<sup>۱</sup>

Duzce<sup>۲</sup>

Kocaeli<sup>۳</sup>

## ۲. بررسی آیین‌نامه‌های موجود

اکثر آیین‌نامه‌ها و ضوابط لرزه‌ای اطلاعات ناچیزی راجع به اندرکنش گسل-سازه ارائه نموده‌اند. با این حال در این آیین‌نامه‌ها بیان شده که سازه با درجه اهمیت زیاد نباید در نزدیکی گسل‌های فعال احداث شود (۹). بر اساس محدودیت‌های دستورالعمل ساخت و ساز در پهنه‌های گسلی (۱۰)، احداث ساختمان‌های با اهمیت خیلی زیاد و زیاد در پهنه‌های گسلی با خطر خیلی زیاد ممنوع بوده و احداث ساختمان‌های با اهمیت متوسط مانند ساختمان‌های مسکونی ۶ طبقه تنها در صورت انجام مطالعات و اعمال تمهیدات ویژه امکان‌پذیر است. مطابق آیین‌نامه حداقل فاصله از محل رخنمون گسل یا ساختمان مجاور به عنوان درز انقطاع سازه‌ای برابر ۱.۴d (در پهنه‌های گسلی با خطر خیلی زیاد معادل ۲.۸ متر) در نظر گرفته شده است. با توجه به فاصله زیاد و تقریباً غیراقتصادی ذکر شده در آیین‌نامه، این موارد قابل بررسی است.

## ۳. مدل‌سازی اجزای محدود

تحلیل‌های عددی ارائه شده در پژوهش حاضر به کمک نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس (۲۰۲۰) انجام شده است. روش اجزای محدود مورد استفاده در نرم‌افزار، با دقت قابل قبولی تغییرشکل‌های گسلش در حالت میدان آزاد و اندرکنش گسلش-خاک-فونداسیون را پیش‌بینی نموده است (۷-۵). روش تحلیل صریح دینامیکی<sup>۱</sup> به منظور کاهش واگرایی در تحلیل مورد استفاده قرار گرفته است. در این حالت باید نسبت انرژی جنبشی به انرژی کل در تمامی مراحل تحلیل کنترل شود تا تحلیل همچنان به صورت شبه‌استاتیکی برقرار باشد. به علت وجود کرنش‌های بزرگ در المان‌ها، در شبیه‌سازی اعمال گسلش از Nlgeom<sup>۲</sup> استفاده شده است. در ادامه روند حل مسئله در آباکوس بیان شده است.

۱۳ هندسه مدل و شرایط مرزی

در این پژوهش توده خاک و فونداسیون به صورت سه‌بعدی تعریف شده‌اند. به منظور کاهش تاثیر شرایط مرزی، پیشنهاد شده است که در صورت استفاده از شرایط مرزی تناوبی<sup>۳</sup> (PBC)، طول و عرض مدل هندسی ۴ برابر ضخامت آبرفت در نظر گرفته شود (۱۲). اعمال گسلش به کمک دو بلوک ثابت<sup>۴</sup> و محرک<sup>۵</sup> تعریف می‌شود. با توجه به این موضوع که ابعاد توده خاک، فونداسیون و موقعیت فونداسیون نسبت به گسلش، وابسته به مقیاس است، بیشینه جابجایی گسلش نیز وابسته به عمق آبرفت تعریف و برابر H/5 در نظر گرفته شده است. تعریف شرط مرزی تناوبی بدین صورت است که در جبهه جانبی عمود بر راستای گسلش، تمامی تغییرشکل‌های گره‌های متناظر دو وجه که دارای X و Z یکسان هستند، به صورت صلب به یکدیگر متصل شده و حرکت آن‌ها وابسته به یکدیگر است (۷). شروط مرزی مدل به صورت زیر تعریف می‌شود:

۱. در جبهه جانبی موازی و عمود بر راستای گسلش، در شرایط اولیه درجات آزادی X و Y بسته بوده و سپس در مرحله اعمال گسلش، تمامی درجات آزادی برای تغییرشکل آزادانه باز است.

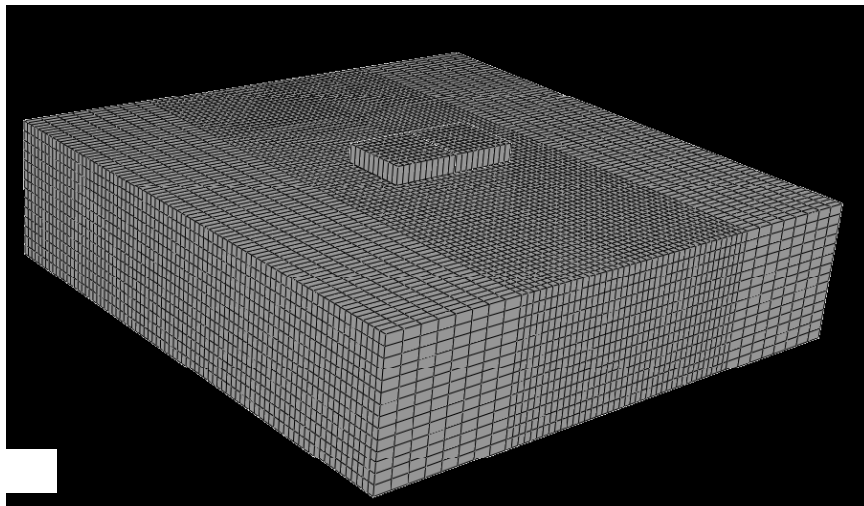
۲. کف بلوک متحرک ابتدا در سه درجه آزادی بسته بوده و سپس در مرحله اعمال جابجایی گسلش، جابجایی در راستای Y اعمال می‌شود.

۳. هر سه درجه آزادی کف بلوک ثابت در تمام مراحل تحلیل بسته است.

در مدل‌سازی اندرکنش فونداسیون-خاک، از الگوریتم تماسی سطح به سطح<sup>۶</sup> استفاده شده است. این الگوریتم، در مطالعات پیشین بین خاک و فونداسیون‌های گسترده صلب نیز مورد استفاده قرار گرفته است (۱۳). تماس شامل الگوریتم تماس سخت<sup>۷</sup> و تماس مماسی بین سطوح اندرکنش است. الگوریتم تماس سخت اجازه نفوذ سطوح بین یکدیگر را نمی‌دهد و زمانی نیروی تماس از نوع کششی شود، امکان جداشدگی سطوح از یکدیگر وجود

Dynamic Explicit<sup>۱</sup>  
nonlinear geometric effects<sup>۲</sup>  
periodic boundary condition<sup>۳</sup>  
stationary block<sup>۴</sup>  
moving block<sup>۵</sup>  
surface to surface<sup>۶</sup>  
hard contact<sup>۷</sup>

دارد. در رفتار مماسی نیز نیروی برشی بین دو سطح در تماس، بر اساس قانون اصطکاک کولمب<sup>۱</sup> محاسبه می‌شود. آنگالیانوس و همکاران (۷) مقدار زاویه اصطکاک خارجی ماسه و بتن ( $\mu$ ) را ۰.۳-۰.۷ پیشنهاد نموده‌اند. در پژوهش حاضر این ضریب برابر ۰.۷ در نظر گرفته شده‌است. همچنین از المان‌های سه‌بعدی (3D stress) هشت گرهی با اندازه ۰.۳۷۵ متر جهت انجام تحلیل‌ها استفاده شده‌است. این مقدار صرفاً تا فاصله ۱۵ متری خط برش که دارای اهمیت بیشتری از لحاظ دقت بوده، تخصیص داده شده و در فواصل دورتر، اندازه المان در راستای عمود بر راستای گسلش افزایش می‌یابد. ابعاد مدل‌سازی و اندازه مش در طول مدل در شکل (۱) نشان داده شده‌است.



شکل ۱- هندسه مدل عددی و مش‌بندی

۲.۳ مدل رفتاری

مطالعات آزمایشگاهی نشان‌دهنده این است که خاک‌های ماسه‌ای نیمه‌متراکم و متراکم در زمان برش رفتار نرم‌شونده از خود بروز می‌دهند. بدین شکل که پس از رسیدن به نقطه اوج، پارامترهای مقاومتی زاویه اصطکاک داخلی بسیج‌شده ( $\varphi_{mob}$ ) و زاویه اتساع بسیج‌شده ( $\psi_{mob}$ ) با افزایش کرنش برشی کاهش یافته تا به یک مقدار باقی‌مانده در حالت بحرانی همگرا شوند (۱۴، ۱۵). با این وجود که نرم‌شوندگی نقش پررنگی در شکل‌گیری کرنش‌ها هنگام اعمال نیروی برشی دارد، به منظور بازتولید رفتار واقعی خاک، مدل رفتاری پلاستیک سخت‌شونده-نرم‌شونده با معیار گسیختگی موهر-کولمب (MC-HS) در نظر گرفته شده‌است. مطابق روابط (۱) و (۲)، پس از تسلیم، سخت‌شوندگی غیرخطی شروع شده و مقادیر  $\varphi_{mob}$  و  $\psi_{mob}$  با افزایش کرنش برشی پلاستیک اوکتهدرال ( $\varepsilon_{oct}^p$ ) به مقادیر بیشینه خود ( $\varphi_p$  و  $\psi_p$ ) می‌رسند. سپس نرم‌شوندگی خطی تا رسیدن مقادیر به  $\varphi_{res}$  و  $\psi_{res}$  ادامه می‌یابد. در نهایت با افزایش  $\varepsilon_{oct}^p$ ، پارامترهای مقاومتی بسیج‌شده ثابت می‌مانند.

$$\frac{\varphi_{mob}}{\varphi_p} = \begin{cases} 1 - ae^{-c\varepsilon_{oct}^p} - fe^{-j\varepsilon_{oct}^p} & 0 \leq \varepsilon_{oct}^p < \varepsilon_{oct,p}^p \\ 1 - \left(1 - \frac{\varphi_{res}}{\varphi_p}\right) \left(\frac{\varepsilon_{oct}^p - \varepsilon_{oct,p}^p}{\varepsilon_{oct,f}^p - \varepsilon_{oct,p}^p}\right) & \varepsilon_{oct,p}^p \leq \varepsilon_{oct}^p < \varepsilon_{oct,f}^p \\ \frac{\varphi_{res}}{\varphi_p} & \varepsilon_{oct,f}^p < \varepsilon_{oct}^p \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\psi_{mob}}{\psi_p} = \begin{cases} 1 - me^{-r\varepsilon_{oct}^p} & 0 \leq \varepsilon_{oct}^p < \varepsilon_{oct,p}^p \\ 1 - \left(1 - \frac{\psi_{res}}{\psi_p}\right) \left(\frac{\varepsilon_{oct}^p - \varepsilon_{oct,p}^p}{\varepsilon_{oct,f}^p - \varepsilon_{oct,p}^p}\right) & \varepsilon_{oct,p}^p \leq \varepsilon_{oct}^p < \varepsilon_{oct,f}^p \\ \frac{\psi_{res}}{\psi_p} & \varepsilon_{oct,f}^p < \varepsilon_{oct}^p \end{cases} \quad (2)$$

Coulomb<sup>۱</sup>

که  $\varepsilon_{oct,p}^P$  کرنش برشی پلاستیک اوکتهدرال در نقطه تسلیم و  $\varepsilon_{oct,f}^P$  کرنش برشی پلاستیک اوکتهدرال در نقطه پایان نرم‌شوندگی است. همچنین  $a$ ،  $C$ ،  $\mu$ ،  $m$  و  $r$  ضرایب ثابت و مثبت هستند که با نتایج آزمایشگاهی کالیبره می‌شوند. جدول (۱) مشخصات خاک مورد استفاده در تحلیل عددی را نمایش می‌دهد. همچنین در جدول (۲) مشخصات بتن استفاده‌شده در فونداسیون آورده شده‌است.

جدول ۱- مشخصات ماسه در مدل عددی

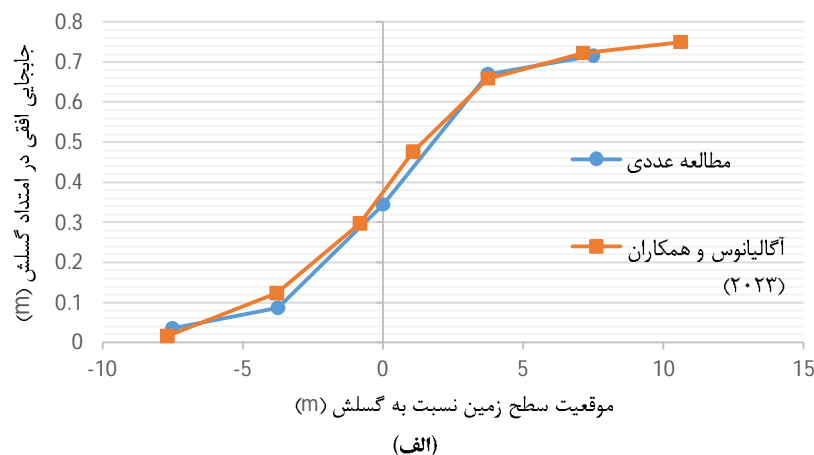
پارامتر	مقدار
دانشیه ( $\text{kg/m}^3$ )	۱۷۰۰
مدول الاستیسیته (MPa)	۱۵
ضریب پواسون	۰.۲۹
$\varphi_0$	۳۳.۳
$\varphi_p$	۴۵.۹
$\varphi_{res}$	۳۱.۲
$\psi_0$	۷.۶
$\psi_p$	۲۳.۶
$\psi_{res}$	۲.۴

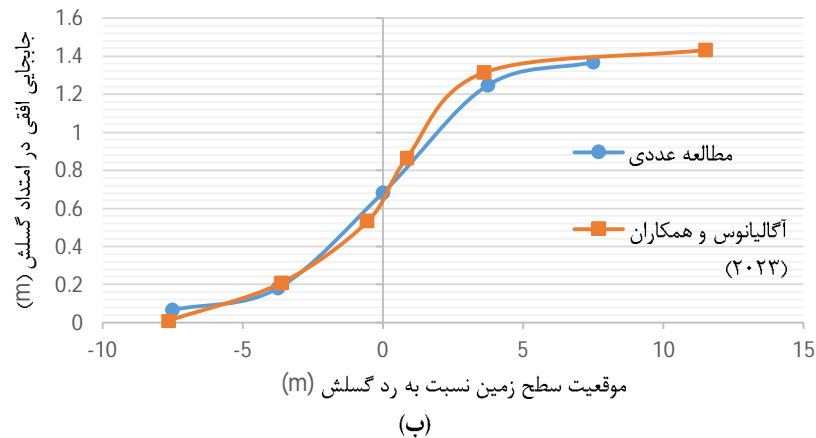
جدول ۲- مشخصات بتن مورد استفاده در فونداسیون

پارامتر	مقدار
دانشیه ( $\text{kg/m}^3$ )	۲۴۰۰
مدول الاستیسیته (MPa)	۲۵۰۰۰
ضریب پواسون	۰.۳

#### ۴. صحت‌سنجی مدل عددی

به منظور بررسی مدل‌سازی هندسی و رفتاری در نرم‌افزار آباکوس از نتایج آگالیانوس و همکاران (۶) جهت ارزیابی استفاده شده‌است. مشخصات مصالح در مدل‌سازی عددی مطابق مقادیر ارائه‌شده در پژوهش مذکور است. پروفیل سطح زمین در جابجایی‌های نسبی ۱۰ درصد و ۹ درصد در شکل (۲) مقایسه شده‌است. همان‌طور که مشخص است، مدل عددی مسیر گسیختگی برشی و پروفیل سطح زمین در جابجایی‌های مختلف را به‌خوبی پیش‌بینی نموده‌است.





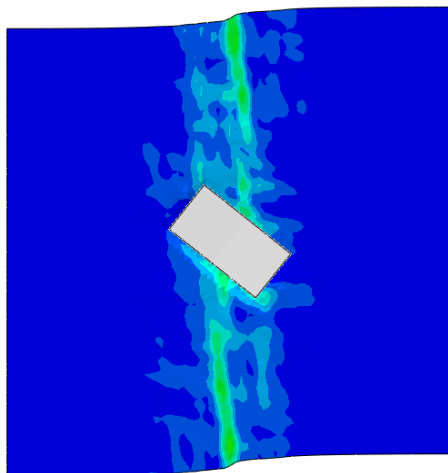
شکل ۲- مقایسه نتایج عددی پروفیل عمودی سطح زمین در حالت میدان آزاد الف) جابجایی نسبی ۱۰ درصد ب) جابجایی نسبی ۱۹ درصد

## ۵. نتایج

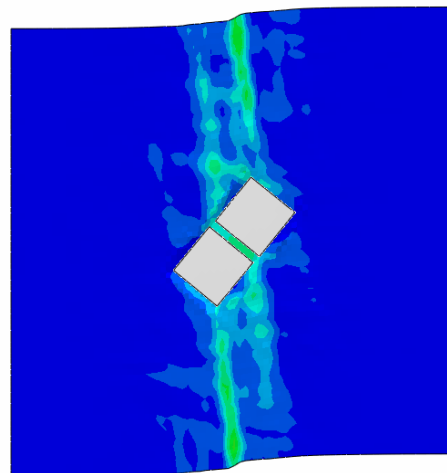
سربار ناشی از وزن سازه در رخنمون گسل در سطح زمین، تأثیر زیادی دارد. این رخنمون به دلیل وجود افزایش تنش در خاک زیر فونداسیون منحرف شده و تأثیرات متفاوتی در حرکت‌های فونداسیون می‌گذارد. برخورد دو فونداسیون نیز کاملاً وابسته به رخنمون گسلش است.

۱.۵ بررسی زاویه گسلش

به منظور بررسی تأثیر زاویه گسلش در حرکت و برخورد دو فونداسیون، دو زاویه گسلش ۴۵ و ۱۳۵ درجه در  $S=0$  m مورد مطالعه قرار گرفتند. همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است، زاویه گسلش تأثیر مستقیمی در برخورد دو فونداسیون با یکدیگر دارد. دو فونداسیون در زاویه ۴۵ درجه گسلش پس از اعمال گسلش ۲۰ در صد، از یکدیگر فاصله گرفته‌اند. در مقابل دو فونداسیون در زاویه ۱۳۵ درجه گسلش با یکدیگر برخورد داشته‌اند.



(ب)



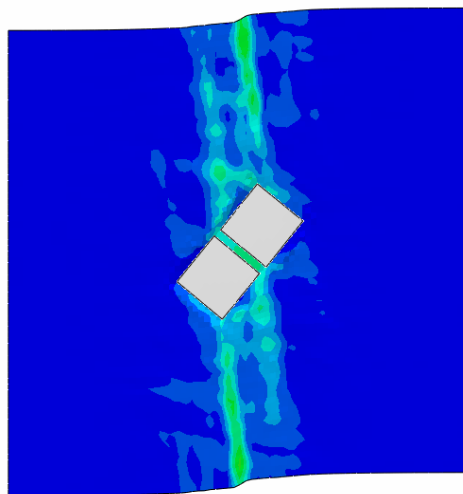
(الف)

شکل ۳- وضعیت برخورد دو فونداسیون در  $S=0$  m الف) زاویه گسلش ۱۳۵ درجه ب) زاویه گسلش ۴۵ درجه

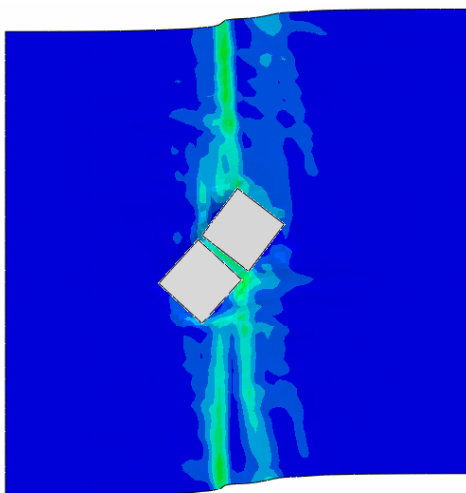
۲.۵ بررسی موقعیت فونداسیون نسبت به گسلش

۲.۵

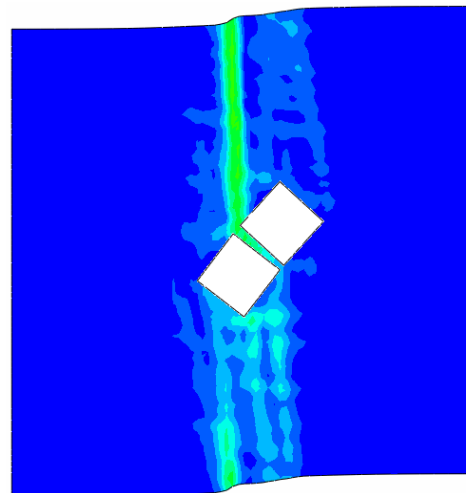
به منظور بررسی تاثیر موقعیت گسلش در برخورد دو سازه، گسلش در سه فاصله  $0\text{ m}$ ،  $+0.9875\text{ m}$  و  $-0.9875\text{ m}$  نسبت به مرکز دو فونداسیون و در زاویه گسلش  $45^\circ$  درجه مورد مطالعه قرار گرفته است. مطابق شکل (۴) برخورد سازه وابسته به موقعیت گسلش نبوده و دو فونداسیون در هر سه موقعیت گسلش با زاویه  $45^\circ$  درجه، برخوردی نداشته‌اند. با این وجود، مکانیسم‌های حرکتی سازه وابسته به موقعیت گسلش بوده و این پارامتر در نوع برخورد تاثیر گذار است. دو سازه هنگامی که رخنمون گسلش در فاصله  $\pm 0.9875\text{ m}$  است، دوران‌های غیر یکسانی تجربه کرده و برخورد احتمالی به دلیل دوران‌های دو سازه است. در مقابل هنگامی که رخنمون گسلش در فاصله  $0\text{ m}$  باشد، دو فونداسیون نسبت به یکدیگر دوران‌های برابری داشته و بین آن دو فقط حرکت انتقالی دیده می‌شود. برخورد احتمالی نیز به دلیل حرکت‌های انتقالی دو فونداسیون است.



(الف)



(ب)



(ب)

شکل ۴- مکانیسم‌های حرکتی دو فونداسیون در  $45^\circ$  (الف)  $s = 0\text{ m}$  (ب)  $s = +0.9875\text{ m}$  (پ)  $s = -0.9875\text{ m}$



## ۶. نتیجه گیری

در این مقاله برخورد دو فونداسیون مجاور واقع بر گسل امتدادلغز مورد مطالعه قرار گرفته و پارامترهای موثر بر این پدیده شامل زاویه و موقعیت گسلش نسبت به دو فونداسیون مورد ارزیابی قرار گرفت. در این زمینه نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- سربار ناشی از وزن سازه باعث تغییرات در رخنمون گسلش در سطح زمین می‌شود. این افزایش سربار که باعث افزایش تنش زیر فونداسیون شده، مسیر گسلش زیر فونداسیون را منحرف می‌کند.
- ۲- زاویه گسلش نسبت به دو فونداسیون به طور مستقیم در برخورد دو سازه اثر گذار است به شکلی که در زوایای بزرگتر از ۹۰ درجه (۱۳۵ درجه) برخورد دو سازه مشاهده می‌شود. در مقابل در زوایای کوچکتر از ۹۰ درجه (۴۵ درجه) برخوردی بین دو فونداسیون دیده نمی‌شود.
- ۳- موقعیت گسلش نسبت به دو سازه بر مکانیسم‌های حرکتی فونداسیون اثر می‌گذارد. مکانیسم حرکتی انتقالی زمانی که فاصله گسلش از مرکز دو فونداسیون برابر صفر باشد، فعال می‌شود. در مقابل مکانیسم حرکتی دورانی هنگامی مشاهده می‌شود که موقعیت گسلش از مرکز دو فونداسیون فاصله بگیرد ( $|s| > 0$ ).

## ۱۲. مراجع

1. Jackson, J., "Living with earthquakes: know your faults", Journal of Earthquake Engineering, 5(spec01), pp 5-123, 2001.
2. E. Faccioli, I. Anastasopoulos, G. Gazetas, A. Callerio, and R. Paolucci, "Fault rupture–foundation interaction: selected case histories", Bulletin of Earthquake Engineering, 6, pp 557-583, 2008.
3. M. Niccum and LS. Cluff, "Banco Central de Nicaragua: a case history of a high-rise building that survived surface fault rupture", Engineering Geology and Soils Engineering Symposium, 14, pp 133-144, 1976.
4. Agalianos, M. Sieber, and I. Anastasopoulos, "Cost-effective analysis technique for the design of bridges against strike-slip faulting", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 49, 11, pp 1137-57, 2020.
5. A. Agalianos and I. Anastasopoulos, "Numerical analysis of surface foundation subjected to strike–slip faulting: model boundaries, pre-softening volumetric response, parametric study", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 151, pp 106979, 2021.
6. A. Agalianos, E. Korre, T. Abdoun, and I. Anastasopoulos, "Surface foundation subjected to strike-slip faulting on dense sand: Centrifuge testing versus numerical analysis", Géotechnique, vol. 73, no. 2, pp 165-182, 2023.
7. A. Agalianos, OD. De Coquereumont, and I. Anastasopoulos, "Rigid slab foundation subjected to strike–slip faulting: mechanisms and insights", Geotechnique, vol. 70, no. 4, pp 354-373, 2020.
8. H. Rasouli and B. Fatahi, "Geosynthetics reinforced interposed layer to protect structures on deep foundations against strike-slip fault rupture", Geotextiles and Geomembranes, vol. 49, no. 3, pp 722-736, 2021.
9. EN 1998-5, "Eurocode 8-design of structures for earthquake resistance - part 5: foundations, retaining structures and geotechnical aspects", 2004.
10. دستورالعمل ساخت و ساز در پهنه‌های گسلی، ویرایش دوم، تهران: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۹.
11. D. S. Simulia, "Abaqus 6.14 Documentation", in Providence, Rhode Island, US, ed, 2014.
12. J. D. Bray, The effects of tectonic movements on stresses and deformations in earth embankments, Ph.D. dissertation, University of California, Berkeley, 1990.



13. Loli M, Bransby MF, Anastasopoulos I, Gazetas. G, “Interaction of caisson foundations with a seismically rupturing normal fault: centrifuge testing versus numerical simulation”, *Geotechnique*, 62(1), pp 29-43, 2012.
14. D. A. Cole Jr and P. V. Lade, “Influence zones in alluvium over dip-slip faults”, *Journal of Geotechnical Engineering*, 110, pp 599-615, 1984.
15. P. V. Lade, D. A. Cole Jr, and D. Cummings, “Multiple failure surfaces over dip-slip faults”, *Journal of Geotechnical Engineering*, 110, 5, pp 616-627, 1984.