

### چکیده

وقوع گسیختگی‌های ناشی از گسلش سطحی زلزله‌های اخیر، ضرورت بررسی اندرکنش گسل - سازه - فونداسیون را در طراحی سازه‌های مهندسی و شریان‌های حیاتی واقع در حریم گسل، بیش از پیش می‌طلبد. در این مقاله، اندرکنش گسلش سطحی حاصل از عملکرد یک گسل معکوس و مجموعه پی شامل؛ فونداسیون سطحی و ریزشمع‌ها و همچنین اثر آن بر جابه‌جایی‌های افقی و قائم فونداسیون، با استفاده از مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. مهم‌ترین فاکتور مورد استفاده در این مطالعه، نسبت فاصله محل برخورد گسلش به زیر پی به عرض پی (S/B) می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد جابه‌جایی افقی فونداسیون به حضور و موقعیت قرارگیری ریزشمع‌ها حساسیت اندکی نشان می‌دهد در حالی که جابه‌جایی قائم و چرخش فونداسیون با وجود ریزشمع‌ها به موقعیت قرارگیری مجموعه پی نسبت به گسلش حساس بوده و وجود ریزشمع‌ها همواره باعث کاهش مقادیر جابه‌جایی قائم فونداسیون می‌گردد. نتایج همچنین نشان می‌دهد بهترین حالت برای کنترل چرخش فونداسیون، حالت  $S/B < 0.5$  است؛ بنابراین موقعیت قرارگیری فونداسیون با مجموعه ریزشمع نسبت به گسلش فاکتوری تعیین‌کننده در بررسی اندرکنش خاک - گسلش - ریزشمع و فونداسیون می‌باشد.

**واژگان کلیدی:** اندرکنش، گسلش، شبیه‌سازی عددی، گسل معکوس، ریزشمع.

## مدل‌سازی عددی اندرکنش ریزشمع‌ها با گسلش سطحی معکوس

مجتبی علیزاده

دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

مهدی خداپرست (نویسنده مسئول)

دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران، khodaparast@qom.ac.ir

علی محمد رجبی

استادیار، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

### ۱- مقدمه

ترکیه  $Mw 7.4$  (۱۹۹۹)، چی چی تایوان  $Mw 7.6$  (۱۹۹۹) و ونگووان چین  $Mw 7.9$  (۲۰۰۸) نمونه‌هایی از تخریب و وقوع خسارت‌ها بر روی سازه‌های ساخته شده در محدوده گسلش هستند.

مطالعات میدانی پس از وقوع این زلزله‌ها نشان داده است که موقعیت فونداسیون و سازه نقش مهمی در اندرکنش سازه با گسلش سطحی داشته و بر روی روند توسعه گسلش اثرگذار می‌باشد [۱-۲].

شکل (۱)، تصویر سازه‌ای چهار سقف با زیرزمین قرار گرفته بر روی فونداسیون پیوسته و باکس شکل را نمایش می‌دهد. این سازه علیرغم جابه‌جایی  $2/3$  متری در جهت قائم، بدون خرابی زیاد برجا مانده و باعث انحراف گسلش شده است [۳].

زمین لرزه‌ها به علت آزاد شدن انرژی ناشی از گسیختگی سریع در گسل‌های پوسته زمین روی می‌دهند. گسل‌ها بر اساس هندسه و جهت جابه‌جایی نسبی ایجاد شده به دو نوع راست‌الغز و شیب‌الغز تقسیم می‌گردند. گسل‌های شیب‌الغز نرمال و معکوس بر اساس جهت حرکت دو قطعه نسبت به هم تعریف می‌شوند. بر این اساس، در صورتی که نیروی وارده فشاری بوده و دو قطعه را به هم نزدیک کند، گسل شیب‌الغز معکوس و در صورت دور شدن دو قطعه از هم، شیب‌الغز نرمال نامیده می‌شود.

این حرکات ضمن انتشار امواج به‌طور غیرمستقیم بر سازه‌های مهندسی در سطح زمین تأثیر می‌گذارد. در زلزله‌های بزرگ ممکن است گسلش به سطح زمین برسد و به‌طور قابل توجهی باعث آسیب به سازه‌ها شود. به عنوان نمونه، زلزله‌های کوجائلی

گزناس و همکاران [۲۰] و آناستاسوپولوس و همکاران [۲۱] نشان دادند که شالوده‌های عمیق نظیر شمع‌ها و کیسون‌ها نقش مهمی در کاهش جابه‌جایی‌های ناشی از گسلش سطحی به‌خصوص برای سازه‌هایی نظیر پل‌های در معرض گسلش دارند؛ بنابراین به‌طور کلی ارائه و پیشنهاد هرگونه روش کاهش خطر، مستلزم بررسی اندرکنش سازه-فونداسیون-گسلش می‌باشد.

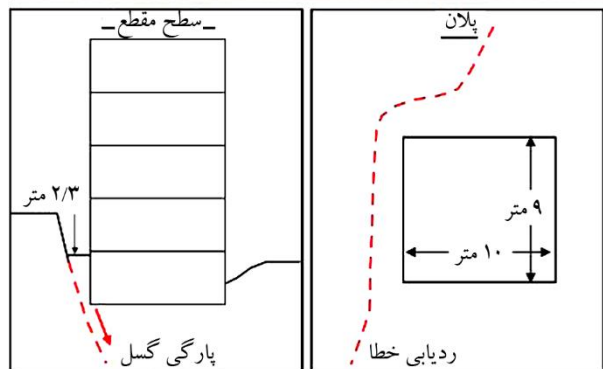
در شهرهای پرجمعیت ایران مانند تهران، بسیاری از ساختمان‌ها بر روی رخنمون و یا حریم گسل بنا شده‌اند که به‌درستی در مقابل خطرات ناشی از جابه‌جایی‌های تکتونیکی طراحی و یا مقاوم‌سازی نشده و هیچ‌یک از روش‌های کاهش خطرات ناشی از گسلش برای محافظت ساختمان‌ها به‌کار برده نشده است. شکل (۲)، به‌عنوان نمونه، سازه بنا شده روی مسیر گسلش را در کلان‌شهر تهران نمایش می‌دهد.



شکل (۲): نمونه‌ای از سازه در حال ساخت مستقر بر رخنمون گسل [۱۵].

مدل‌سازی عددی روش اجزای محدود به‌وسیله محققین زیادی به‌منظور شبیه‌سازی گسلش-خاک در حالت میدان آزاد و اندرکنش آن با سیستم‌های فونداسیون-سازه به‌کار برده شده است [۵-۷، ۱۰، ۱۴، ۱۸، ۱۹، ۲۱-۲۸].

آناستاسوپولوس و همکاران [۲۹]، به بررسی اندرکنش فونداسیون با شمع در مواجهه با گسلش نرمال با استفاده از تحلیل‌های عددی پرداختند. در مطالعه مذکور تعداد شمع‌ها  $4 \times 2$ ، قطر هر شمع  $1/2$  متر با فاصله ۳ متر و حداکثر آرماتور ۴ درصد می‌باشد. مطالعات پارامتریک ایشان نشان داد که توسعه مکانیسم‌های گسیختگی مختلف، تابعی از موقعیت دقیق گروه



شکل (۱): گسل نرمال شرق گولکوک، مسبب زلزله کوجائلی، ترکیه (۱۹۹۹): ساختمان با چهار طبقه و زیرزمین واقع بر فونداسیون پیوسته و قوطی شکل صلب [۳].

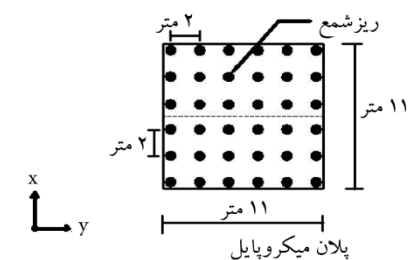
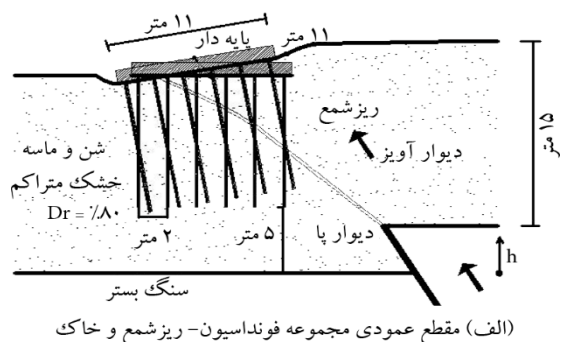
به‌طور ایده‌آل بایستی از اجرای ساختمان‌ها بر روی گسل‌ها اجتناب نمود اما بررسی زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد اجتناب از ساخت‌وساز روی گسل و یا اطراف آن به‌ویژه در مناطق و نواحی شهری تقریباً غیرممکن است [۴-۵]، به‌طوری‌که گاهی اوقات سازه‌ها در حریم و یا همسایگی گسل‌ها بنا می‌شوند و عملاً در معرض خطر گسلش قرار می‌گیرند.

آناستاسوپولوس و همکاران [۶-۷]، برنزی و همکاران [۸-۹]، احمد و برنزی [۱۰]، موسوی و همکاران [۱۱]، اوتل و بری [۱۲]، فدایی و همکاران [۱۳-۱۴]، آشتیانی و همکاران [۱۵-۱۶]، احمدی و همکاران [۱۷]، گارسیا و بری [۱۸] و مرتضوی و سروش [۱۹] به‌منظور بررسی روش‌شناسی، روند توسعه گسلش و روش‌های کاهش مخاطرات ناشی از گسلش سطحی، پژوهش‌های آزمایشگاهی و عددی زیادی روی پاسخ سازه‌ها به جابه‌جایی تکتونیکی زمین انجام داده‌اند.

خاک ماسه‌ای به ضخامت ۱۵ متر با مشخصاتی مطابق با جدول (۱) در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور بررسی اندرکنش پی-گسلش-ریزشمع، مجموعه‌ای از ۳۶ ریزشمع بتنی به قطر ۲۰ سانتی‌متر، طول ۱۰ متر و به فاصله ۲ متر از یکدیگر در نظر گرفته شده است. اولین ردیف ریزشمع‌ها به فاصله نیم متر از لبه فونداسیون قرار گرفته است. در مدل مورد بررسی یک گسل معکوس با زاویه شیب ۶۰ درجه در نظر گرفته شده که با جابه‌جایی تفاضلی  $h$  تا سطح زمین گسترش می‌یابد (شکل ۳).

جدول (۱): مشخصات خاک ماسه‌ای مورد استفاده این مطالعه [۲۶].

مقدار	پارامتر
۱۶/۱۱	وزن مخصوص (کیلونیوتن بر مترمکعب) $\gamma$
۱۲۰۰Z	مدول برشی (کیلوپاسکال) $G_s$
۰/۳	ضریب پواسون، $\mu$
۳۷	زاویه اصطکاک حداکثر (درجه) $(\phi_p)$
۳۱	زاویه اصطکاک حالت بحرانی (درجه)، $(\phi_{cs})$
۱۰	زاویه اتساع حداکثر (درجه)، $\Psi_p$
۰	زاویه اتساع حالت بحرانی (درجه)، $\Psi_{cs}$
۰/۰۱۱	کرنش تسلیم، $\gamma_{yield}$
۰/۰۱۷	کرنش برشی حداکثر پلاستیک هشت‌وجهی، $\gamma_{peak}^{pl}$
۰/۱۷	کرنش برشی پلاستیک هشت‌وجهی در انتهای نرم شوندگی، $\gamma_f^{pl}$



(ب) پلان فونداسیون و نحوه قرارگیری ریزشمع‌ها در زیر فونداسیون

شکل (۳): شماتیکی از مدل مورد بررسی در این مطالعه.

فونداسیون و شمع نسبت به گسل و مقدار جابه‌جایی تفاضلی گسل است. همچنین ایشان نشان دادند که حتی شمع‌های با حجم آرماتور حداکثر در مقابل گسلش نرمال بسیار آسیب‌پذیرند. گزتاس و همکاران [۳۰]، با انجام آزمایشات فیزیکی و تحلیل‌های عددی به بررسی اندرکنش گسلش و کیسون پرداختند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که بسته به موقعیت کیسون نسبت به گسلش، مکانیسم‌های اندرکنشی متفاوتی ایجاد شده و کیسون باعث انحراف گسلش به یک طرف و یا طرفین خود می‌گردد.

همچنین در بسیاری از پروژه‌های عمرانی به‌ویژه ساختمان‌های در مواجهه با خاک‌های مسئله‌دار (نظیر خاک‌های سست با قابلیت باربری کم، نشست‌پذیری زیاد، روانگرا، خاک‌های دستی و ...) به منظور افزایش ظرفیت باربری خاک و بهسازی خاک از میکروپایل‌ها در زیر پی سازه‌ها استفاده می‌شود. این در حالی است که معمولاً در صورت قرار گرفتن این سازه‌ها در حریم گسل به مسئله اندرکنش گسلش و ریزشمع‌های واقع در حریم گسلش کمتر توجه می‌شود. از این رو در این پژوهش، با استفاده از نرم افزار آباکوس و مدل‌سازی پی و ریزشمع‌های واقع در زیر آن و با در نظر گرفتن موقعیت‌های مختلف قرارگیری مجموعه پی نسبت به گسلش، اندرکنش گسلش-فونداسیون-ریزشمع مورد مطالعه قرار گرفته است.

## ۲- مدل‌سازی عددی

علیرغم محدودیت‌های روش‌های عددی در پیش‌بینی مقادیر دقیق کرنش برشی، تحلیل‌های عددی شکل دقیقی از مسیر گسیختگی و موقعیت رخنمون گسلش در سطح را پیش‌بینی می‌کنند. این موضوع به‌طور جامع توسط آناستاسوپولوس و همکاران [۲۶] بررسی شده است.

در مطالعه حاضر سیستم خاک، فونداسیون و ریزشمع به صورت سه‌بعدی با استفاده از روش اجزای محدود و نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و تحلیل شده است. برای این منظور یک فونداسیون سطحی با طول و عرض برابر با ۱۱ متر و باری معادل با ۹۱ کیلوپاسکال و معادل با وزن یک ساختمان ۹ طبقه بر روی لایه

فونداسیون، صلب در نظر گرفته شده و مرز بین ریزشمع‌ها و خاک با المان‌های تماسی خاصی که اجازه لغزش با ضریب اصطکاک ۰/۴۵ را می‌دهد، مدل‌سازی شده است.

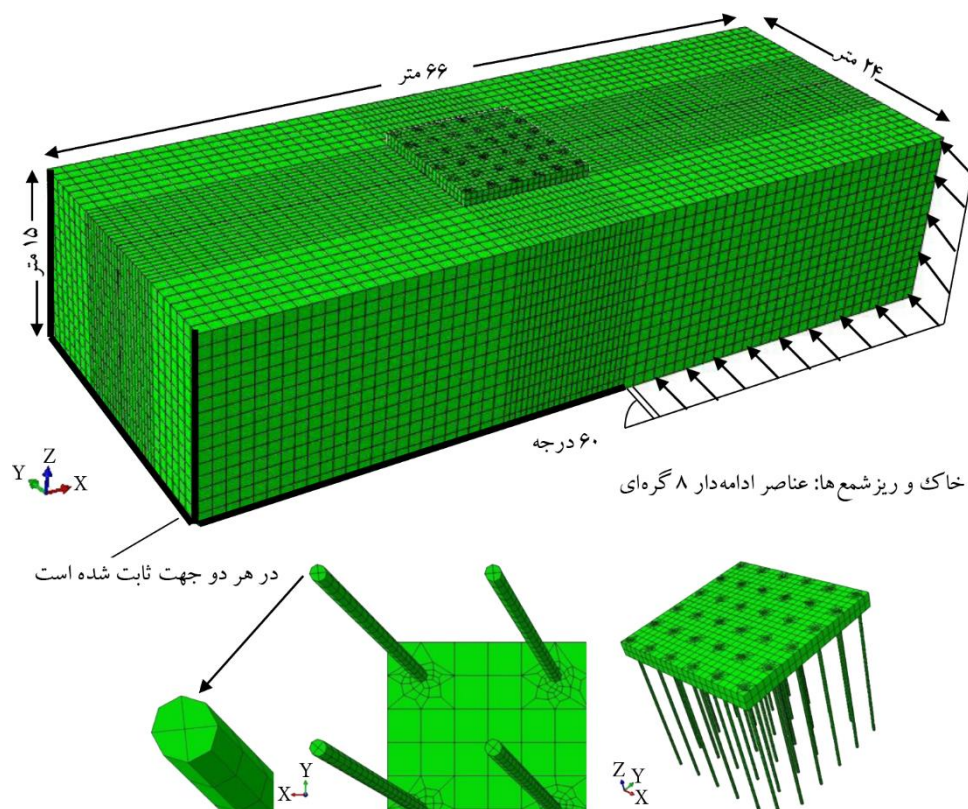
مرز پایینی مدل، مرز بین لایه خاک و سنگ بستر را نمایش می‌دهد. از این‌رو، برای آنکه مدل قابلیت جابه‌جایی برای شبیه‌سازی گسل معکوس را فراهم نماید به دو بخش فرودیواره (ثابت) و فرادیواره (متحرک) تقسیم شده است.

تحلیل‌ها در سه گام انجام می‌شود، ابتدا شرایط ژئواستاتیک (عملکرد وزنی خاک) فعال می‌شود (گام اول). سپس به وسیله بارگذاری ثقلی تحلیل ادامه می‌یابد (گام دوم) و در مرحله بعد (گام سوم) جابه‌جایی تفاضلی گسل به قسمت فرادیواره در جزءهای تحلیل شبه‌استاتیکی کوچک اعمال می‌شود (شکل ۴).

در این تحقیق مدل رفتاری الاستو پلاستیک برای خاک مطابق با جزئیات مطالعه آناساسوپولوس و همکاران [۶] و با استفاده از نرم افزار آباکوس و همچنین سابروتین نوشته شده توسط ایشان مورد استفاده قرار گرفته است.

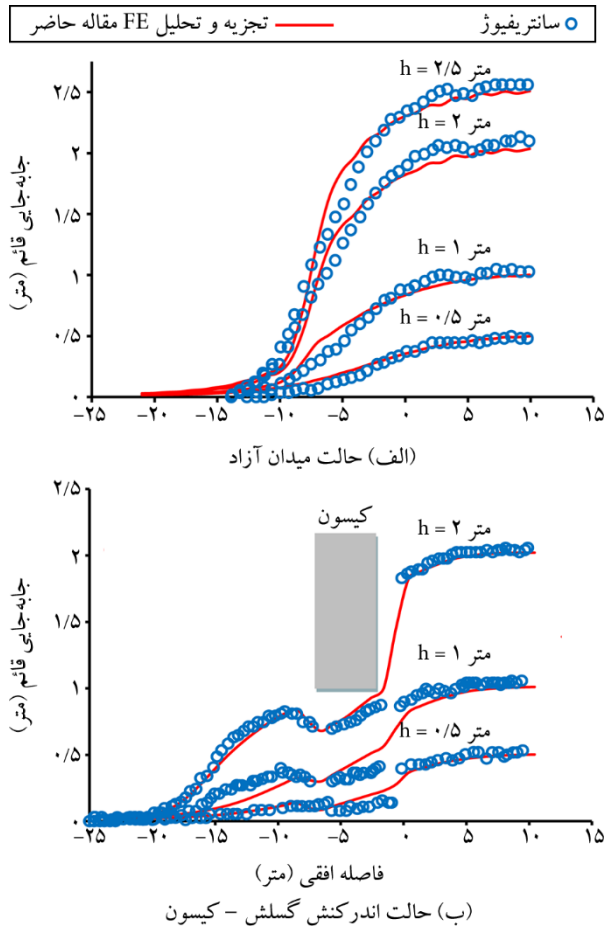
برای کاهش و جلوگیری از اثرات مرزی هندسه مدل و برای جلوگیری از وقوع پارازیت در مرزها، نسبت طول به عرض بی‌مطابق با پیشنهاد بری و همکاران [۲۷] بیش از ۴ در نظر گرفته شده است.

در شکل (۴)، هندسه، شرایط مرزی و مشخصات مش‌بندی مدل نشان داده شده است. ابعاد مدل استفاده شده برابر با  $۱۵ \times ۲۴ \times ۶۶$  متر در نظر گرفته شده و اندازه مش در قسمت میانی مدل، ریزتر و با ابعاد  $۰/۵ \times ۰/۵ \times ۱$  متر و در لبه‌ها که جابه‌جایی کمتری قابل انتظار است، درشت‌تر و برابر با  $۱ \times ۱ \times ۱$  متر انتخاب شده است. همچنین خاک، فونداسیون و ریزشمع‌ها با المان‌های پیوسته ۸ نقطه‌ای شبیه‌سازی شده‌اند. نتایج حاصل از تحلیل‌های حساسیت انجام شده نشان می‌دهد که تأثیر تغییر ابعاد المان‌ها بر نتایج قابل چشم‌پوشی است، به طوری که نتایج حاصل از تحلیل با ابعاد  $۰/۵ \times ۰/۵ \times ۱$  متر و  $۰/۵ \times ۰/۵ \times ۰/۵$  متر تفاوت زیادی با یکدیگر ندارند. همچنین فونداسیون سطحی و ریزشمع‌ها الاستیک خطی و با مدول الاستیسیته ۲۵ گیگاپاسکال (بتن) تعریف شده‌اند. اتصال ریزشمع‌ها به فونداسیون با فرض اجرای ریزشمع‌ها قبل از



شکل (۴): هندسه، شرایط مرزی و مشخصات مش‌بندی مدل مورد استفاده در مطالعه.

مرکزی کیسون برای مقادیر مختلف جابه‌جایی اولیه در سنگ بستر نشان می‌دهد. مطابق این شکل نیز تحلیل عددی حاصل از مطالعه حاضر، فرآیند گسیختگی اندرکنش گسل - کیسون را در مقایسه با نتایج لولی و همکاران [۲۸] به‌خوبی پیش‌بینی می‌کند.



شکل (۵): جابه‌جایی قائم در سطح خاک برای نتایج سانتریفوژ و شبیه‌سازی.

#### ۴- نتایج و بحث

در این بخش پاسخ فونداسیون و ریزشمع‌ها به جابه‌جایی‌های تفاضلی بر اساس مدل‌سازی عددی برای حالت‌های مختلف اندرکنش گسلش - خاک - فونداسیون در شرایط وجود و عدم وجود ریزشمع در حالت میدان آزاد و اندرکنشی بررسی شده است. در مطالعه حاضر و در همه اشکال، جابه‌جایی‌ها مربوط به نقطه مرکز سطح فونداسیون می‌باشد. شکل (۶) وضعیت برخورد گسلش به زیر فونداسیون را در طول فرآیند گسلش برای حالت با و بدون وجود ریزشمع نشان می‌دهد.

در این خصوص رفتار قبل از تسلیم، الاستیک فرض شده و با مدول برشی خاک ( $G_s$ ) که با افزایش عمق خاک به‌طور خطی افزایش می‌یابد تعریف شده است. برای تعریف گسیختگی خاک معیار گسیختگی موهر کولمب استفاده شده است. این معیار با قانون نرم‌شوندگی کرنش سازگار است. قانون مذکور با کاهش زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) و اتساع ( $\psi$ ) مطابق با رابطه (۱) به‌صورت خطی با افزایش کرنش برشی پلاستیک هشت‌وجهی همراه است.

$$\phi; \psi = \begin{cases} \phi_p - \frac{\phi_p - \phi_{res}}{\gamma_f^p} \gamma_{oct}^p; \psi_p, & \text{for } 0 \leq \gamma_{oct}^p \leq \gamma_f^p \\ \phi_{res}; \psi_{res} = 0, & \text{for } \gamma_{oct}^p \geq \gamma_f^p \end{cases} \quad (1)$$

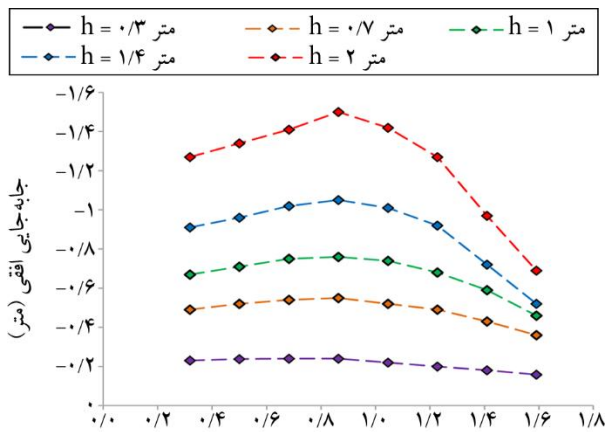
که در آن  $\phi_p$  و  $\phi_{res}$  به ترتیب زوایای اصطکاک داخلی حداکثر و حالت بحرانی،  $\psi_p$  زاویه اتساع حداکثر و  $\psi_{res}$  کرنش برشی پلاستیک هشت‌وجهی در انتهای نرم‌شوندگی است.

#### ۳- صحت‌سنجی

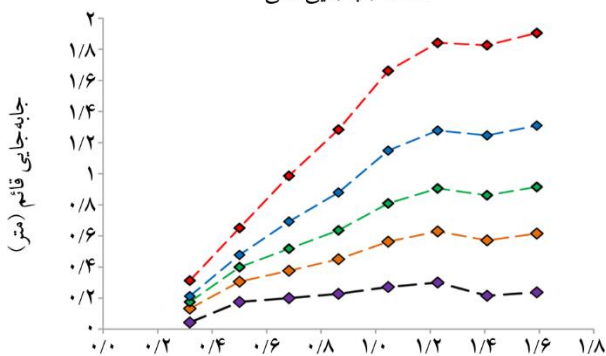
در این مطالعه به منظور صحت‌سنجی مدل از نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط لولی و همکاران [۲۸]، استفاده شده است. ایشان با انجام آزمایش‌های سانتریفوژ به بررسی اندرکنش گسل معکوس - کیسون پرداخته‌اند. در این آزمایش‌ها، از گسل با زاویه شیب ۶۰ درجه و خاک ماسه‌ای با تراکم ۸۰ درصد استفاده شده است.

شکل (۵) پروفایل جابه‌جایی قائم در سطح خاک را برای نتایج سانتریفوژ و شبیه‌سازی عددی انجام شده در این مطالعه در دو حالت میدان آزاد و اندرکنش گسلش - کیسون نشان می‌دهد. در شکل (۵)، مبدأ بر روی محور افقی بیانگر موقعیت شروع گسلش در سنگ بستر و با علامت مثبت به‌طرف فرادیواره در نظر گرفته شده است. برای همه مقادیر جابه‌جایی سنگ بستر ( $h$ ) نتایج صحت‌سنجی و انطباق نمودارهای حاصل از مدل‌سازی عددی و سانتریفوژ لولی و همکاران [۲۸] در حالت میدان آزاد رضایت‌بخش است (شکل ۵-الف).

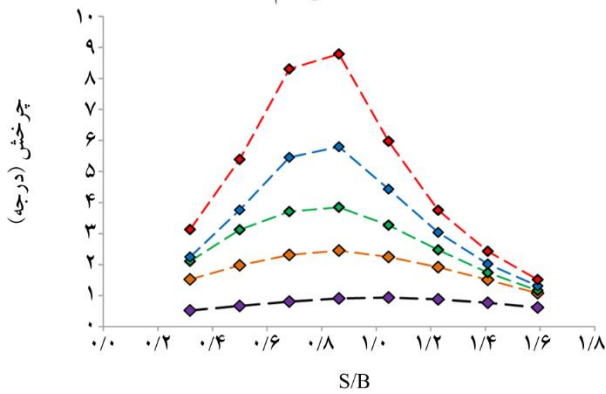
شکل (۵-ب) نیز مقایسه پروفایل جابه‌جایی قائم را در خط



(الف) جابه‌جایی افقی



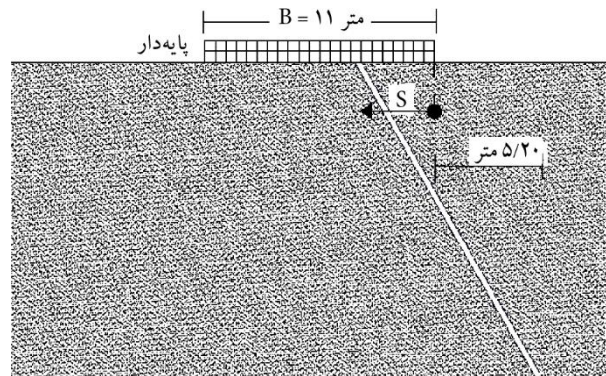
(ب) جابه‌جایی قائم



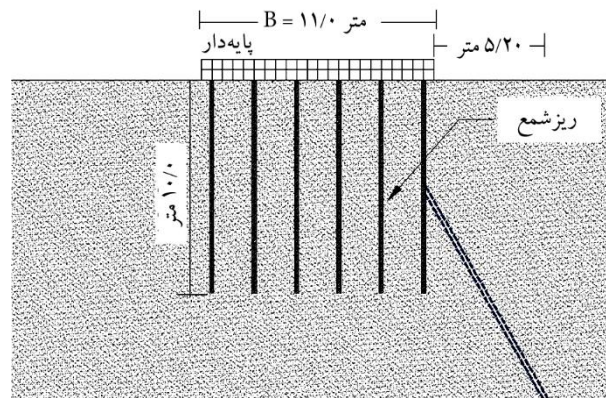
(پ) چرخش فونداسیون

شکل (۷): تغییرات جابه‌جایی فونداسیون در حالت بدون ریزشمع برای  $S/B$  های مختلف در جابه‌جایی‌های سنگ بستر متفاوت.

فونداسیون بر روی فرادیواره، مقادیر جابه‌جایی افقی روند کاهشی دارد که با افزایش مقدار جابه‌جایی تفاضلی این تغییرات با شیب بزرگ‌تری مواجه است. شکل (۷-ب)، جابه‌جایی قائم فونداسیون را به‌ازای مقادیر مختلف  $S/B$  نمایش می‌دهد. مطابق با این شکل، برای مقادیر  $S/B < 1/2$ ، جابه‌جایی قائم روند افزایشی داشته و با نزدیک شدن رخنمون گسلش به فونداسیون، به دلیل برخورد



(الف) بدون ریزشمع



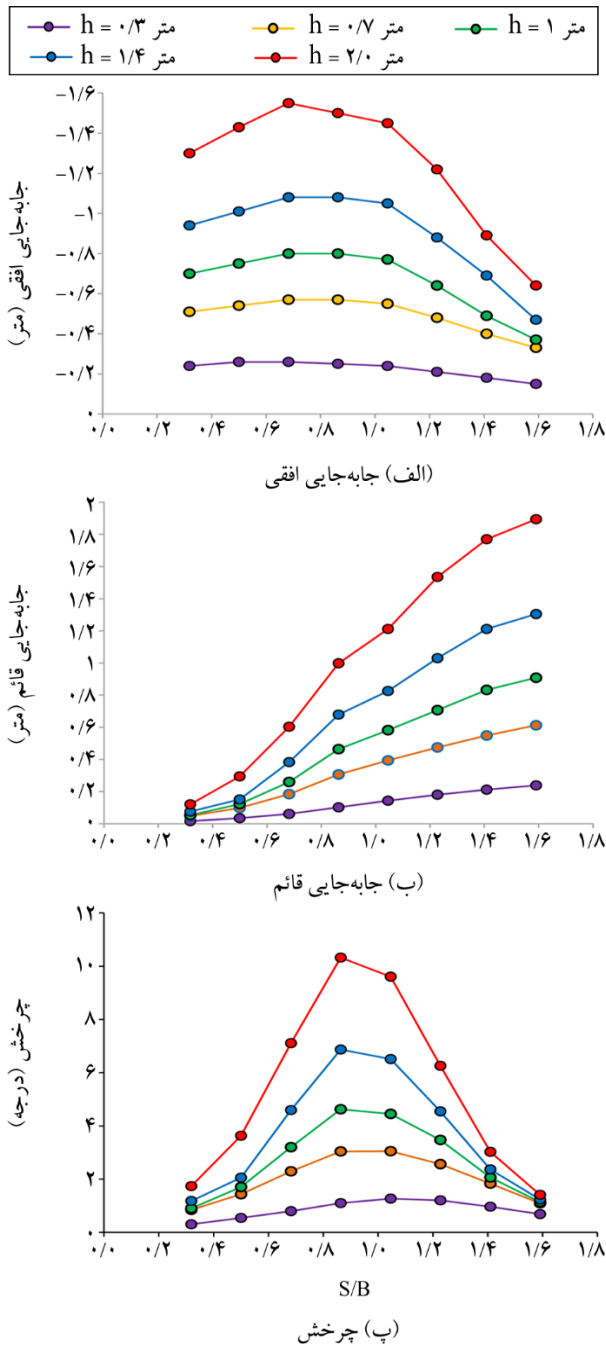
(ب) با ریزشمع

شکل (۶): شماتیک مسیر گسلش در حالت وجود فونداسیون (S فاصله محل برخورد گسلش به زیر پی از لبه سمت راست و B عرض پی است).

$S$  مطابق آنچه در شکل (۶-الف) نشان داده شده است، بیانگر فاصله محل برخورد گسلش به زیر پی از لبه سمت راست پی می‌باشد و B، عرض پی است. براین اساس در ادامه این مطالعه رابطه بین این دو پارامتر به صورت نسبت بی بعد  $S/B$  تعریف شده است. شکل (۶-ب)، به‌صورت شماتیک مسیر گسلش در حالت وجود فونداسیون و ریزشمع پس از گسیختگی سنگ بستر تا رسیدن به مجموعه ریزشمع‌ها در حالت  $S/B = 0.3$  را نشان می‌دهد.

#### ۱-۴- اندرکنش خاک- گسلش- فونداسیون

شکل (۷)، جابه‌جایی‌های افقی، قائم و دورانی فونداسیون به‌ازای مقادیر  $S/B$  مختلف را نشان می‌دهد. در شکل (۷-الف) مشاهده می‌شود که مقادیر جابه‌جایی افقی برای  $S/B < 0.9$  تغییرات اندکی را نشان می‌دهد در حالی که برای  $S/B > 0.9$  به دلیل عبور گسلش از لبه سمت چپ فونداسیون و قرار گرفتن



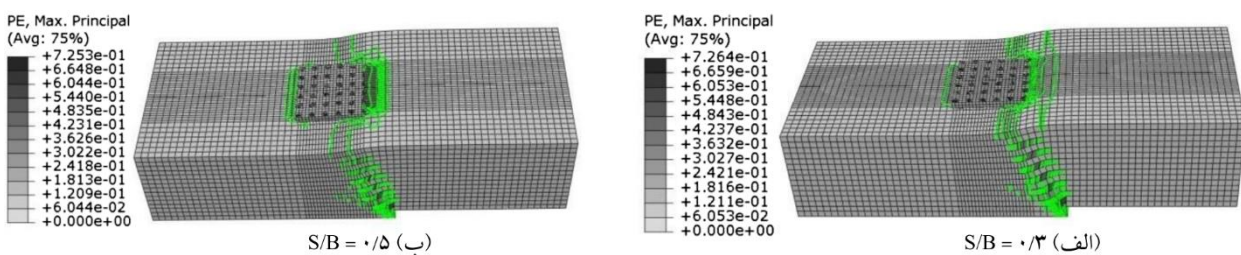
شکل (۸): تغییرات جابه‌جایی فونداسیون در حالت وجود ریزشمع برای  $S/B$  های مختلف در جابه‌جایی‌های سنگ بستر متفاوت.

گسلش به زیر فونداسیون و همچنین افزایش بازوی لنگر محرک، جابه‌جایی قائم مرکز فونداسیون افزایش می‌یابد. از این‌رو، روند تغییرات جابه‌جایی قائم فونداسیون تا  $S/B = 1/2$  افزایش یافته و برای  $S/B > 1/2$  به دلیل عبور گسلش به سمت فرو دیواره، چرخش و جابه‌جایی قائم فونداسیون کاهش و از جابه‌جایی فرادیواره تبعیت می‌نماید. همچنین بر اساس شکل (۷-پ)، مقادیر چرخش فونداسیون تا مقدار  $S/B = 0/9$ ، افزایش و پس از آن به دلیل کاهش بازوی لنگر و حرکت محل برخورد گسلش به طرف چپ، با شیب بیشتری کاهش می‌یابد.

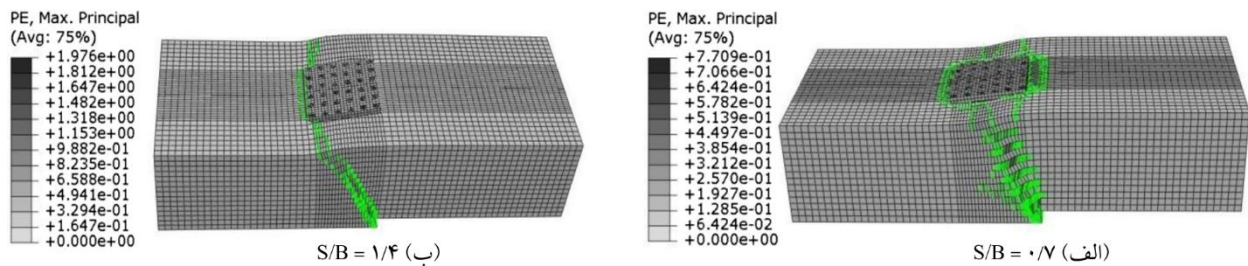
#### ۴-۲- اندرکنش خاک-گسلش- فونداسیون و ریزشمع‌ها

شکل (۸)، تغییرات جابه‌جایی افقی، قائم و چرخش فونداسیون با حضور میکروپایل را نسبت به مقادیر مختلف  $S/B$  و به‌ازای تغییرات جابه‌جایی تفاضلی مختلف سنگ بستر ( $h$ ) نشان می‌دهد. در شکل (۸-الف) با افزایش مقادیر  $S/B$  تا  $S/B < 1/0$ ، تغییر محسوسی در جابه‌جایی افقی فونداسیون بوجود نیامده و پس از آن با افزایش مقدار  $S/B$ ، مشابه حالت فونداسیون بدون ریزشمع کاهش اندکی در جابه‌جایی افقی فونداسیون به وقوع می‌پیوندد. همچنین مجموعه فونداسیون و ریزشمع‌ها مانند بلوکی در مقابل گسلش عمل نموده و همواره با افزایش  $S/B$ ، مقادیر جابه‌جایی قائم افزایش می‌یابد (شکل ۸-ب).

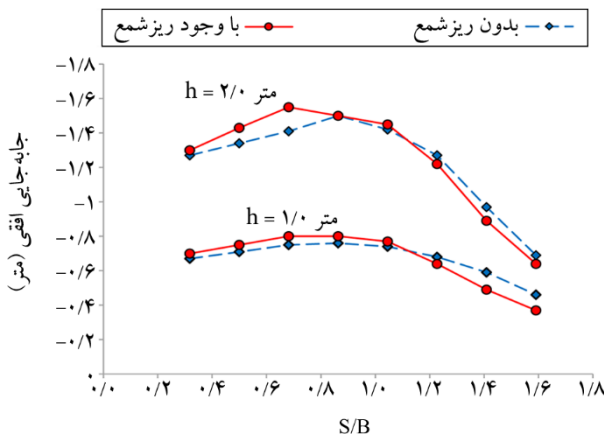
شکل (۸-پ)، تغییرات چرخش فونداسیون برای  $S/B$  های مختلف نشان می‌دهد. برای حالت  $S/B < 0/5$ ، گسلش به بدنه ریزشمع‌ها در سمت راست (سمت فرادیواره) برخورد کرده و باعث بازتوزیع و انکسار گسلش به سمت راست فونداسیون می‌شود. این موضوع در شکل (۹) قابل بررسی است.



شکل (۹): تغییرات کرنش پلاستیک در مسیر گسلش برای  $h = 1/9$  (متر).



شکل (۱۰): تغییرات کرنش پلاستیک در مسیر گسلش برای  $h = 1/9$  (متر).



شکل (۱۱): تغییرات جابه‌جایی افقی فونداسیون با  $S/B$  های مختلف به‌ازای جابه‌جایی‌های سنگ بستر  $h = 1$  (متر) و  $h = 2$  (متر) برای دو حالت فونداسیون بدون ریزشمع و با وجود ریزشمع.

افقی در حالت با وجود ریزشمع، گرچه اندک ولی بیش از مقادیر آن در حالت بدون ریزشمع است؛ درحالی‌که برای  $S/B > 1/0$ ، وجود ریزشمع‌ها در کاهش جابه‌جایی افقی، هر چند اندک، مؤثر هستند.

### ۳-۴-۳- مقایسه تغییرات جابه‌جایی فونداسیون در حالت‌های با و بدون ریزشمع

#### ۳-۴-۲- جابه‌جایی قائم

شکل (۱۲)، تغییرات جابه‌جایی قائم فونداسیون را با  $S/B$  های مختلف به‌ازای جابه‌جایی‌های تفاضلی  $h = 1$  و  $2$  متر برای دو حالت فونداسیون با و بدون وجود ریزشمع نشان می‌دهد. واضح است که با افزایش مقدار  $S/B$ ، همواره وجود ریزشمع‌ها باعث کنترل و کاهش جابه‌جایی قائم فونداسیون شده و نشان‌دهنده کارآیی ریزشمع‌ها در کنترل جابه‌جایی قائم فونداسیون می‌باشد.

مطابق با شکل (۹)، به‌عنوان نمونه، برای جابه‌جایی تفاضلی  $h = 1/9$  (متر)، تغییرات کرنش پلاستیک در مسیر گسلش در دو حالت  $S/B$  مطابق با شکل (۸)، در  $S/B < 0.7$  به دلیل حبس شدن اثرات جابه‌جایی و کرنش‌های ناشی از گسلش بین ردیف‌های ریزشمع‌ها نیروی وارده به فونداسیون بیشتر و به‌تبع آن جابه‌جایی قائم و چرخش فونداسیون افزایش می‌یابد.

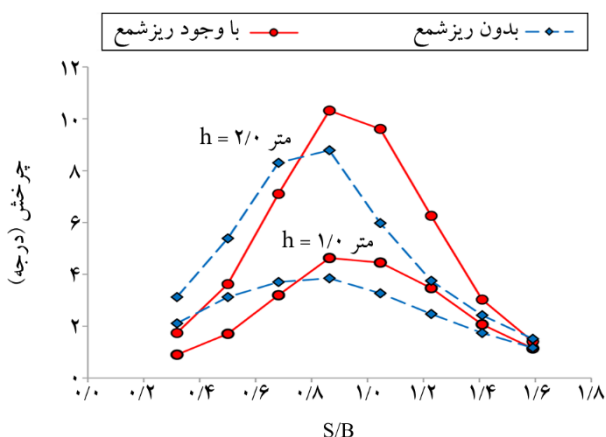
در نهایت، در  $S/B > 1/0$ ، گسلش از ریزشمع‌ها عبور نموده و جابه‌جایی‌های فونداسیون تابع جابه‌جایی و تغییر شکل فرادیواره خواهد بود و در نتیجه مقادیر چرخش فونداسیون کاهش می‌یابد. شکل (۱۰) نیز به‌طور نمونه تغییرات کرنش پلاستیک در مسیر گسلش برای جابه‌جایی تفاضلی  $h = 1/9$  (متر) در حالت‌های مختلف  $S/B = 1/4$  و  $S/B = 0.7$  را نشان می‌دهد. بدیهی است با افزایش مقدار جابه‌جایی گسل بر روی سنگ بستر  $h$ ، مقادیر جابه‌جایی افقی، قائم و چرخش افزایش می‌یابد.

### ۳-۴-۱- جابه‌جایی افقی

شکل (۱۱)، تغییرات جابه‌جایی افقی فونداسیون را نسبت به مقادیر مختلف  $S/B$  به‌ازای جابه‌جایی‌های تفاضلی  $h = 1$  و  $2$  متر و برای دو حالت فونداسیون با و بدون وجود ریزشمع نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، روند کلی جابه‌جایی افقی فونداسیون در حالت اندرکنش گسلش با فونداسیون با وجود ریزشمع و بدون ریزشمع تفاوت چندانی با یکدیگر ندارد؛ به عبارت دیگر وجود ریزشمع‌ها برای کنترل جابه‌جایی‌های افقی خیلی مؤثر نیستند؛ اما با بررسی دقیق‌تر شکل (۱۱) و با مقایسه دو حالت با و بدون ریزشمع، واضح است که روند تغییرات جابه‌جایی افقی، قبل و بعد از  $S/B = 1/0$  متفاوت است. برای  $S/B < 1/0$ ، مقادیر جابه‌جایی

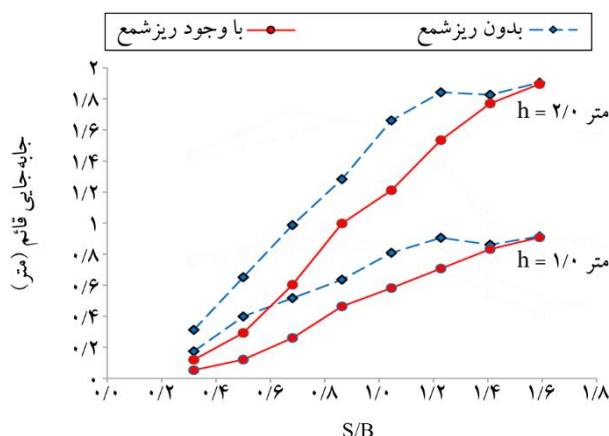


ریزشمع، مقدار چرخش بیشتری را به فونداسیون تحمیل کند. با این وجود در حدود  $S/B = 0/9$ ، روند حبس شدن تنش و کرنش‌ها بیشتر شده و موجب می‌شود دوران فونداسیون وارد مرحله افزایشی نسبت به حالت بدون ریزشمع‌ها شود. این روند در مراحل بعدی نیز تکرار شده و مقادیر چرخش فونداسیون در حالت با ریزشمع نسبت به حالت بدون ریزشمع بیشتر می‌شود. مطابق با شکل (۱۳) همچنین روند کلی تغییرات چرخش فونداسیون برای  $S/B > 0/9$ ، کاهش یافته و در حالت اندرکنش با ریزشمع برای  $S/B = 1/6$  مقادیر جابه‌جایی به مقادیر آن در حالت بدون اندرکنش با ریزشمع نزدیک می‌شود.



شکل (۱۳): تغییرات چرخش فونداسیون با  $S/B$  های مختلف به‌ازای جابه‌جایی‌های سنگ بستر  $h = 1$  (متر) و  $h = 2$  (متر) برای دو حالت فونداسیون بدون ریزشمع و با وجود ریزشمع.

در شکل (۱۴)، مقادیر نسبت جابه‌جایی افقی، قائم و چرخش فونداسیون در حالت با و بدون ریزشمع با تغییرات جابه‌جایی تفاضلی گسل در سنگ بستر ( $h$ ) مقایسه شده است. مطابق با شکل (۱۴-الف)، گرچه نسبت جابه‌جایی افقی در دو حالت با ریزشمع (X1) و بدون ریزشمع (X2) به عدد یک نزدیک است، این نسبت برای  $S/B < 1$  بیشتر از یک بوده و وجود ریزشمع‌ها باعث افزایش جابه‌جایی افقی نسبت به حالت عدم وجود ریزشمع‌ها می‌شود. این در حالی است که برای  $S/B > 1/0$ ، وجود ریزشمع‌ها در کاهش جابه‌جایی افقی هر چند اندک مؤثر بوده و حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد باعث کاهش مقادیر جابه‌جایی افقی فونداسیون نسبت به حالت بدون ریزشمع می‌شود.



شکل (۱۲): تغییرات جابه‌جایی قائم فونداسیون با  $S/B$  های مختلف به‌ازای جابه‌جایی‌های سنگ بستر  $h = 1$  (متر) و  $h = 2$  (متر) برای دو حالت فونداسیون بدون ریزشمع و با وجود ریزشمع.

بدیهی است با افزایش مقدار جابه‌جایی گسل بر روی سنگ بستر ( $h$ ) در هر دو حالت با ریزشمع و بدون ریزشمع مقادیر جابه‌جایی افقی و قائم فونداسیون افزایش می‌یابد.

#### ۴-۳-۴ چرخش

شکل (۱۳)، تغییرات چرخش فونداسیون را نسبت به  $S/B$  های مختلف به‌ازای مقادیر جابه‌جایی‌های تفاضلی ( $h$ )، ۱ و ۲ متر برای دو حالت فونداسیون با و بدون وجود ریزشمع نشان می‌دهد. اگرچه روند تغییرات چرخش با جابه‌جایی تفاضلی در هر دو حالت با و بدون ریزشمع مشابه است، اما در حالت اندرکنش گسلش با فونداسیون بدون ریزشمع، حداکثر چرخش فونداسیون در شرایط  $S/B = 0/9$  اتفاق می‌افتد و پس از آن دچار روند کاهشی می‌شود. در حالی که در حالت با وجود ریزشمع مقادیر دوران در شرایط  $S/B < 0/9$  نسبت به حالت بدون ریزشمع کمتر است، زیرا ریزشمع‌ها شبیه حائل عمل کرده و موجب بازتوزیع و انکسار گسلش شده و مقادیر جابه‌جایی کمتری را نشان می‌دهند.

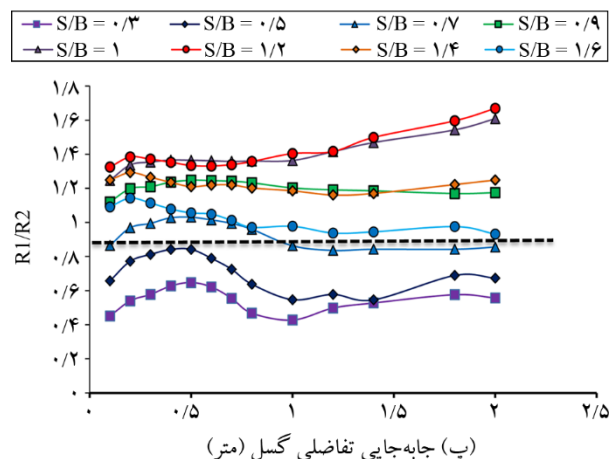
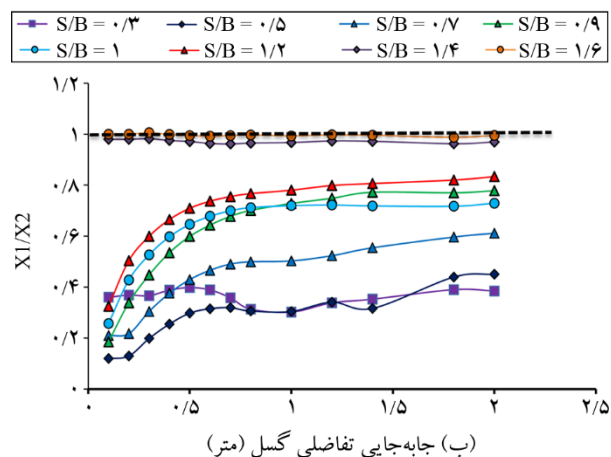
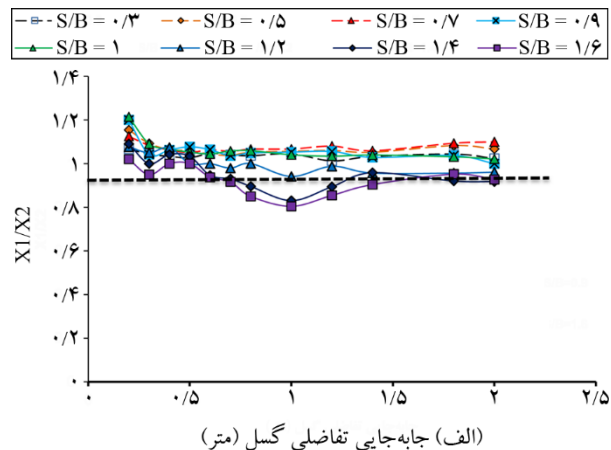
برای حالت با وجود ریزشمع و در شرایط  $S/B < 0/9$ ، اگرچه برخورد گسلش بین دو ردیف ابتدایی ریزشمع‌ها و در نتیجه حبس تنش‌ها در این محدوده باعث افزایش مقدار چرخش فونداسیون می‌گردد، اما میزان تنش‌های محبوس شده ناشی از جابه‌جایی گسل آنقدر نیست که در مقایسه با حالت بدون

در کاهش جابه‌جایی افقی نشان می‌دهد.

شکل (۱۴-ب) نسبت جابه‌جایی‌های قائم ( $Z1/Z2$ ) را نسبت به تغییرات جابه‌جایی تفاضلی ( $h$ ) نشان می‌دهد. خط نسبت یک بر روی این شکل نشان می‌دهد که همه گراف‌ها زیر این خط قرار گرفته است یعنی نسبت جابه‌جایی قائم در حالت با ریزشمع به حالت بدون ریزشمع همواره کمتر از یک است و ریزشمع‌ها باعث کاهش مقادیر جابه‌جایی قائم می‌شوند. واضح است که وجود ریزشمع‌ها در کنترل و کاهش جابه‌جایی قائم فونداسیون در زمان برخورد گسلش به پی تأثیر قابل توجهی دارد؛ به طوری که در  $S/B < 0.7$ ، مقدار جابه‌جایی قائم فونداسیون نسبت به حالت بدون ریزشمع بیشترین کاهش (در حدود ۶۰ درصد) را نشان می‌دهد. این موضوع به این دلیل است که با برخورد گسلش به بدنه بلوک ریزشمع‌ها و فونداسیون، این بلوک به مثابه دیوار حائل عمل نموده و باعث انکسار، بازتوزیع و انحراف گسلش می‌گردد.

مطابق شکل (۱۴-پ) نسبت جابه‌جایی‌های دورانی ( $R1/R2$ ) برای  $0.9 < S/B < 1.5$  مقادیری بیش از یک دارد با در نظر گرفتن خط نسبت یک بر روی شکل واضح است که مقادیر چرخش فونداسیون در حالت با وجود ریزشمع نسبت به بدون ریزشمع به طور متوسط حدود ۴۰ درصد افزایش داشته است. این موضوع، عدم کارایی ریزشمع‌ها را در کنترل چرخش فونداسیون از نقطه نظر قرارگیری در چنین موقعیتی ( $0.9 < S/B < 1.5$ ) نمایش می‌دهد. نتیجه اینکه بهترین حالت قرارگیری مجموعه فونداسیون و ریزشمع‌ها برای کنترل و کاهش چرخش فونداسیون، حالت  $S/B < 0.5$  است که نشان‌دهنده‌ی عملکرد قابل قبول ریزشمع نسبت به کاهش مقادیر تغییر مکان است.

بنابراین به طور خلاصه بررسی نسبت جابه‌جایی‌های افقی، قائم و دورانی فونداسیون برای دو حالت با و بدون وجود ریزشمع‌ها نشان می‌دهد که وجود ریزشمع‌ها در کنترل و کاهش جابه‌جایی افقی فونداسیون تأثیر قابل توجهی ندارد. در حالی که جابه‌جایی‌های قائم فونداسیون با وجود ریزشمع‌ها همواره کاهش می‌یابد. این نتایج همچنین نشان می‌دهد که بهترین وضعیت



شکل (۱۴): مقادیر نسبت جابه‌جایی افقی، قائم و چرخش فونداسیون در حالت با ریزشمع ( $X1, Z1, R1$ ) به حالت بدون ریزشمع ( $X2, Z2, R2$ ) بر اساس تغییرات جابه‌جایی‌های متفاوت گسل در سنگ بستر.

خط فرضی نسبت یک، این موضوع را واضح نشان می‌دهد که در سه گراف  $S/B = 1/2$ ،  $S/B = 1/4$  و  $S/B = 1/6$  مقادیر نسبت جابه‌جایی‌ها کمتر از یک می‌باشد. قرار گرفتن مجموعه ریزشمع‌ها و فونداسیون در این حالت کارایی نسبی ریزشمع‌ها را

حدود ۶۰ درصد کاهش می‌دهد. علت آن است که با برخورد گسلش به بدنه بلوک ریزش‌ها و پی، این بلوک به مثابه دیوار حائل عمل نموده و باعث انکسار، انتشار و انحراف گسلش می‌گردد. اما پاسخ‌ها برای چرخش فونداسیون در حالات مختلف متفاوت است. به گونه‌ای که در  $1/5 < S/B < 0/9$  به دلیل حبس شدن تنش‌ها میان ردیف‌های ریزش‌ها، اندرکنش گسلش با ریزش‌ها مقادیر چرخش فونداسیون در حالت با وجود ریزش‌ها نسبت به بدون ریزش‌ها به طور متوسط حدود ۴۰ درصد افزایش داشته است. این موضوع، عدم کارایی ریزش‌ها را در کنترل چرخش فونداسیون از نقطه نظر قرارگیری در چنین موقعیتی نشان می‌دهد.

بنابراین بهترین وضعیت ممکن در کنترل چرخش فونداسیون در شرایط  $S/B < 0/5$ ، اتفاق می‌افتد و می‌توان با مطالعه و بررسی مقادیر جابه‌جایی‌های افقی، قائم و به‌ویژه چرخش فونداسیون با تغییرات نسبت  $S/B$ ، برای جلوگیری از آسیب‌های کمتر، بهترین جانمایی سازه را نسبت به گسل و مسیر گسلش انتخاب نمود.

## مراجع

1. Anastopoulos, I. and Gazetas, G. (2007a) Foundation-structure systems over a rupturing normal fault: Part I. Observations after the Kocaeli 1999 earthquake. *Bull. Earthquake Engng.*, **5**(3), 253-275.
2. Anastopoulos, I. and Gazetas, G. (2007b) Behaviour of structure-foundation systems over a rupturing normal fault: Part II. Analysis of the Kocaeli case histories. *Bull. Earthquake Engng.*, **5**(3), 277-301.
3. Faccioli, E., Anastopoulos, I., Callerio, A., and Gazetas, G. (2008) Case histories of fault-foundation interaction. *Bull. Earthquake Engng.*, **6**(4), 557-583.
4. Konagai, K. (2005) Data archives of seismic fault-induced damage. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **25**(7-10), 559-570, doi:10.1016/j.soildyn.2004.11.009.
5. Loukidis, D., Bouckovalas, G., and Papadimitriou, A.G. (2009) Analysis of fault rupture propagation

ممکن در کنترل چرخش فونداسیون در شرایط  $S/B < 0/5$ ، اتفاق می‌افتد. به بیان دیگر، مجموعه فونداسیون و ریزش‌ها مانند یک قید استاتیکی عمل کرده و باعث انتشار، بازتوزیع و انحراف گسلش شده و جابه‌جایی‌های قائم و دورانی را به خوبی کنترل می‌نماید که نشان از کارآمدی وجود ریزش‌ها در کاهش چرخش فونداسیون می‌باشد؛ بنابراین در صورتی که بسته به هدف، اهمیت، محدودیت‌ها و سایر عوامل تأثیرگذار در جانمایی سازه‌های مهندسی، ضرورت احداث سازه با ترکیبی از «فونداسیون و میکروپایل» در همسایگی و حریم گسل باشد، موقعیت قرارگیری فونداسیون با مجموعه ریزش‌ها نسبت به گسلش عاملی تعیین‌کننده در نتایج اندرکنش خاک-گسلش-ریزش‌ها و فونداسیون می‌باشد. بر این اساس می‌توان با مطالعه و بررسی مقادیر جابه‌جایی‌های افقی، قائم و به‌ویژه چرخش فونداسیون با تغییرات نسبت  $S/B$ ، برای جلوگیری از آسیب‌های کمتر، بهترین جانمایی سازه را نسبت به گسل و مسیر گسلش انتخاب نمود.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله اندرکنش گسلش معکوس و ریزش‌ها با استفاده از مدل‌سازی عددی در محیط نرم‌افزار آباکوس مورد مطالعه قرار گرفته است. صحت‌سنجی تحلیل روش عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی انجام شده و مطالعه پارامتریک بررسی اثر موقعیت فونداسیون با ریزش‌ها نسبت به گسلش با انتخاب پارامتر  $S/B$ ، انجام شده است. پاسخ فونداسیون و ریزش‌ها نسبت به موقعیت قرارگیری آن نسبت به گسل حساس بوده و در موقعیت‌های مختلف سازه، پاسخ‌ها برای انحراف یا انتشار گسلش اطراف سازه متفاوت است. به طور کلی نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که وجود ریزش‌ها در کنترل جابه‌جایی افقی خیلی مؤثر نبوده و برای مقادیر  $S/B > 1/0$ ، اثر حدود ۱۰-۱۵ درصدی در کاهش جابه‌جایی افقی نسبت به حالت بدون ریزش‌ها دارد. وجود ریزش‌ها برای کنترل جابه‌جایی قائم فونداسیون همواره مؤثر بوده و مقادیر جابه‌جایی قائم را نسبت به حالت بدون ریزش‌ها

- Gazetas, G. (2016) Mitigation of reverse faulting deformation using a soil bentonite wall: Dimensional analysis, parametric study, design implications. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, **89**, 248-261, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.04.007>.
15. Ashtiani, M., Ghalandarzadeh, A., and Towhata, I. (2016) Centrifuge modeling of shallow embedded foundations subjected to reverse fault rupture. *Canadian Geotechnical Journal*, **53**(3), 505-519, doi:10.1139/cgj-2014-0444.
  16. Ashtiani, M., Ghalandarzadeh, A., Mahdavi, M., and Hedayati, M. (2017) Centrifuge modeling of geotechnical mitigation measures for shallow foundations subjected to reverse faulting. *Canadian Geotechnical Journal*, **55**(8), 1130-1143, <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0093>.
  17. Ahmadi, M., Moosavi, M., and Jafari, M.K. (2018) Experimental investigation of reverse fault rupture propagation through cohesive granular soils. *Geomechanics for Energy and the Environment*, **14**, 61-65, <https://doi.org/10.1016/j.gete.2018.04.004>.
  18. Garcia, F.E. and Bray, J.D. (2018) Distinct element simulations of earthquake fault rupture through materials of varying density. *Soils and Foundations*, **58**(4), 986-1000, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.05.009>.
  19. Mortazavi Zanjani, M. and Soroush, A. (2019) Numerical modelling of fault rupture propagation through layered sands. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **23**(9), <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1344148>.
  20. Gazetas, G., Pecker, A., Faccioli, E., Paolucci, R., and Anastasopoulos, I. (2008) Design recommendations for fault–foundation interaction. *Bull. Earthquake Engineering*, **6**(4), 677-687.
  21. Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Drosos, V., Georgarakos, T., and Kourkoulis, R. (2008) Design of bridges against large tectonic deformation. *Earthquake Engng. Engng. Vib.*, **7**(4), 345-368.
  22. Roth, W.H., Sweet, J., and Goodman, R.E. (1982) Numerical and physical modeling of flexural Slip phenomena and potential for fault movement. *Rock Mech.*, **12**, 27-46.
- through uniform soil cover. *Soil Dynam. Earthquake Engng.*, **29**(11-12), 1389-1404.
6. Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Bransby, M.F., Davies, M.C.R., and El Nahas, A. (2007) Fault Rupture Propagation through Sand: Finite-Element Analysis and Validation through Centrifuge Experiments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133**(8), 943-958, doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:8(943).
  7. Anastasopoulos, I., Antonakos, G., and Gazetas, G. (2010) Slab foundation subjected to thrust faulting in dry sand: Parametric analysis and simplified design method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**(10), 912-924, doi:10.1016/j.soildyn.2010.04.002.
  8. Bransby, M.F., Davies, M.C.R., El Nahas, A., and Nagaoka, S. (2008a) Centrifuge modelling of normal fault-foundation interaction. *Bull. Earthquake Engng.*, **6**(4), 585-605.
  9. Bransby, M.F., Davies, M.C.R., El Nahas, A., and Nagaoka, S. (2008b) Centrifuge modelling of reverse fault-foundation interaction. *Bull. Earthquake Engng.*, **6**(4), 607-628.
  10. Ahmed, W. and Bransby, M.F. (2009) The interaction of shallow foundations with reverse faults. *J. Geotech. Geoenviron. Engng.*, **135**(7), 914-924.
  11. Moosavi, S.M., Jafari, M.K., Kamalian, M., and Shafiei, A. (2010) Experimental Investigation of Reverse Fault Rupture - Rigid Shallow Foundation Interaction. Geotechnical mitigation strategies for earthquakesurface fault rupture. *International Journal of Civil Engineering*, **8**(2), 85-98.
  12. Oettle, N.K. and Bray, J.D. (2013b) Geotechnical mitigation strategies for earthquakesurface fault rupture. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **139**(11), 1864-1874, doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000933.
  13. Fadaee, M., Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Jafari, M.K., and Kamalian, M. (2013) Soil bentonite wall protects foundation from thrust faulting: analyses and experiment. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **12**(3), 473-486, doi:10.1007/s11803-013-0187-8.
  14. Fadaee, M., Ezzatyazdi, P., Anastasopoulos, I., and

23. Bray, J.D., Seed, R.B., Cluff, L.S., and Seed, H.B. (1994a) Earthquake fault rupture propagation through soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, **120**(3), 543-561, doi:10.1061/(ASCE)0733-9410 (1994)120:3(543).
24. Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Bransby, M.F., Davies, M.C.R., and El Nahas, A. (2009) Normal fault rupture interaction with strip foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, **135**(3), 359-370.
25. Loli, M., Anastasopoulos, L., Bransby, M.F., Ahmed, W., and Gazetas, G. (2012) Interaction of caisson foundations with a seismically rupturing normal fault: centrifuge testing versus numerical simulation. *Geotechnique*, **62**(1), 29.
26. Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Bransby, M.F., Davies, M.C.R., and El Nahas, A. (2007c) Fault rupture propagation through sand: Finite element analysis and validation through centrifuge experiments. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **133**(8), 943-958.
27. Bray, J.D., Seed, R.B., and Seed, H.B. (1994b) Analysis of earthquake fault rupture propagation through cohesive soil. *J. Geotech. Engng.*, **120**(3), 560-580.
28. Loli, M., Anastasopoulos, L., Bransby, M.F., Ahmed, W., and Gazetas, G. (2011) Caisson foundations subjected to reverse fault rupture: centrifuge testing and numerical analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **137**(10), 914-925, DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000512.
29. Anastasopoulos, I., Kourkoulis, R., Gazetas, G., and Tsatsis, A. (2013) Interaction of piled foundation with a rupturing normal fault. *Geotechnique*, **63**(12), 1042-1059.
30. Gazetas, G., Zarzouras, O., Drosos, V., and Anastasopoulos, I. (2015) Bridge-Pier Caisson foundations subjected to normal and thrust faulting: physical experiments versus numerical analysis. *Meccanica*, **50**, 341-354.

## Numerical Modeling of the Interaction of Micropile with Reverse Faulting

Mojtaba Alizadeh<sup>1</sup>, Mahdi Khodaparast<sup>2\*</sup>, and Ali M. Rajabi<sup>3</sup>

1. Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran
2. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran,  
\*Corresponding Author, email: khodaparast@qom.ac.ir
3. Assistant Professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

Failures caused by surface rupture in recent earthquakes emphasize the need to investigate fault-structure-foundation interaction while designing engineering structures and life lines in fault zones. Many civil projects, especially buildings on problematic soils (e.g. loose soils with low carrying capacity, high settleability and liquefaction, made grounds, and others), use micropiles in the sub-base to improve the soil and increase its carrying capacity. If such structures are positioned in fault zones, however, the interaction between the faulting and the micropiles located at the faulting zone is often neglected. Therefore, this paper used numerical modeling in Abacus to investigate the reverse fault-micropile interaction, and modeled and analyzed the three-dimensional soil, foundation and micropile system using the finite element method in Abacus. In this regard, a footing with an 11m length and width and a 91 kPa load (equivalent to a 9-floor building) was modeled atop a 15m-thick sandy soil layer. A set of 36 concrete micropiles with 20cm diameter, 10m length and 2m distance to each other were also used for investigating the base-fault-micropile interaction.

The numerical analysis was validated using laboratory results. The ratio of the distance between the faulting and sub-base contact to base width ( $S/B$ ) was the most important criterion used in this study, and the parametric study investigated the effect of the micropile foundation's location relative to faulting after selecting the  $S/B$  parameter.

Results show that the foundation and micropile response depends on their position relative to the fault, and responses to deviation or rupture propagation around the structure differ by structure position. The overall results show that the presence of micropiles does not significantly affect horizontal displacement control, resulting in a 10-15% reduction in horizontal displacement compared to the no-micropile state for  $S/B > 1.0$ . Micropiles are consistently effective for controlling vertical foundation displacement and reduce vertical displacement by about 60% compared to the non-micropile state. This is caused by the faulting's contact with the micropile-foundation block, which makes it act as a retaining wall and leads to rupture diffraction, distribution, and diversion. However, results differ by foundation rotation in different conditions. Due to the residual stress between micropile rows in  $0.9 < S/B < 1.5$ , the faulting-micropile interaction increases the foundation rotation in the micropile state by approximately 40% compared to the non-micropile state, that points to the inefficiency of micropiles in controlling foundation rotation when put in such a condition. Therefore, if the objective, importance, limitations and other criteria affecting engineering structure placement call for a mixed "foundation and micropile" structure adjacent to the fault, the position of the foundation with the micropile set relative to the faulting is a determinant factor of soil-faulting-micropile and foundation interaction results. Accordingly, investigating horizontal and vertical displacement as well as foundation rotation with  $S/B$  ratio changes can determine the optimal structure position relative to the fault and fault path and prevent damages.

**Keywords:** Interaction, Fault rupture, Numerical modeling, Reverse fault, Micropile.