

چکیده

زلزله‌های ترکیه و تایوان در سال ۱۹۹۹ و چین در سال ۲۰۰۸، خرابی‌هایی را در ساختمان‌ها بر جای گذاشت که ناشی از برخورد مستقیم جابه‌جایی ناشی از گسل به آنها بوده است. پس از این وقایع، نظر جامعه مهندسی بیش از پیش به این پدیده معطوف گردید. لذا از آن سال‌ها به بعد، تحقیقات نسبتاً زیادی در خصوص اندرکنش گسیختگی ناشی از گسل و ساختمان‌ها انجام شده است. اگرچه عملکرد پی‌های سطحی در برابر جابه‌جایی‌های بزرگ ناشی از گسل‌های شیب لغز مورد بررسی قرار گرفته است، اما همچنان نیاز به بررسی‌های بیشتر در خصوص پارامترهای تأثیرگذار بر روی اندرکنش گسیختگی ناشی از گسل - پی احساس می‌شود. در این مقاله، یک سری مدل‌سازی‌های عددی اعتبارسنجی شده با نتایج آزمایش‌های سانتریفیوژ ارائه شدند تا پارامترهای مؤثر بر روی رفتار اندرکنشی بین گسلش معکوس و پی‌های کارگذاری شده در عمق، از قبیل عمق کارگذاری پی، صلیبت خمشی پی، وزن روسازه و موقعیت پی نسبت به بیرون‌زدگی گسیختگی ناشی از گسل در سطح زمین مورد بررسی قرار گیرند. نتایج نشان دادند که عمق کارگذاری پی، موقعیت پی نسبت به گسل و صلیبت خمشی آن در مقایسه با وزن روسازه تأثیر بیشتری بر روی رفتار اندرکنشی پی‌های سطحی و گسلش معکوس دارند.

واژگان کلیدی: پی سطحی^۱، گسل معکوس^۲، جابه‌جایی بزرگ، مدل‌سازی عددی^۳.

پارامترهای تأثیرگذار بر روی اندرکنش پی‌های سطحی کارگذاری شده در عمق و گسلش معکوس

مهدی آشتیانی (نویسنده مسئول)

استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، m.ashtiani@nit.ac.ir

عباس قلندرزاده

دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۱- مقدمه

شد. از جمله این تحقیقات می‌توان به بررسی‌های محلی [۱، ۴]، مطالعات آزمایشگاهی [۵-۸]، مدل‌سازی‌های عددی [۹-۱۰]، بررسی‌های تحلیلی [۱۱-۱۲] و بررسی روش‌های کاهش خطرات [۱۳-۱۴] اشاره نمود. اکثر این تحقیقات به منظور بررسی رفتار ساختمان‌ها در برابر گسیختگی ناشی از گسل‌ها انجام شده‌اند. با نگاهی به تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر (از جمله بررسی‌های میدانی، آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی) می‌توان متوجه شد که نتایج این بررسی‌ها، باعث مشخص شدن تأثیر برخی پارامترهای مهم بر روی اندرکنش ساختمان و گسل شده است. این پارامترها شامل نوع گسل، زاویه شیب گسل، نوع و سختی خاک، عمق روباره بر روی سنگ بستر، وزن ساختمان، نوع و صلیبت پی، موقعیت پی نسبت به بیرون‌زدگی گسیختگی

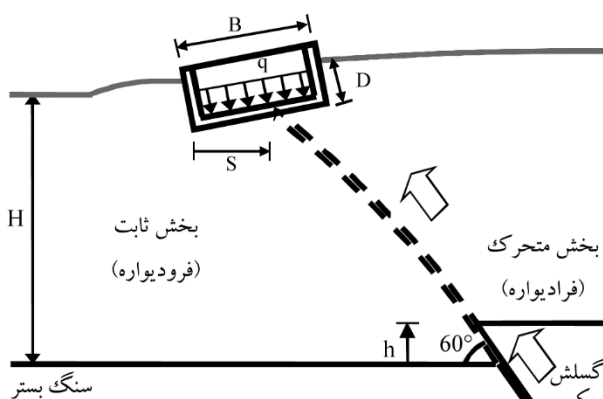
گسیختگی در یک گسل همواره دو اثر بر سازه‌ها خواهد داشت که به صورت انتشار امواج سه‌بعدی دور از محل گسل و همچنین جابه‌جایی‌های شبه‌استاتیک دائمی در محل گسل می‌باشند. با توجه به سطح وسیع تأثیر انتشار امواج بر روی سازه‌های سطحی، این موضوع تاکنون به‌طور گسترده توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته و منجر به تدوین آئین‌نامه‌های طراحی در این خصوص شده است. در مقابل، به دلیل اینکه جابه‌جایی ناشی از گسل تنها زمانی که به سطح زمین برسد اثر آن بر روی سطح زمین و سازه‌ها قابل مشاهده است، نسبتاً کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۱].

تحقیقات در خصوص جابه‌جایی‌های شبه‌استاتیک گسل پس از زلزله‌های ۱۹۹۹ ترکیه [۲] و تایوان [۳] به صورت گسترده‌تری انجام

کارگذاری پی و در دو موقعیت مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است. اما با توجه به نیاز به بررسی پارامترهای بیشتر و با جزئیات بیشتر در خصوص اندرکنش پی‌های کارگذاری شده در عمق و گسلش معکوس، در این تحقیق، تأثیر پارامترهایی از قبیل عمق کارگذاری پی، موقعیت پی نسبت به بیرون‌زدگی گسیختگی ناشی از گسل در سطح زمین، صلیبیت خمشی پی و وزن پی با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود اعتبارسنجی شده با نتایج آزمایش سانتریفیوژ مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- تعریف مسئله

مسئله مورد بررسی شامل یک لایه خاک یکنواخت به ضخامت H ، که در کف آن گسل معکوس با زاویه شیب 60° گسیخته شده و جابه‌جایی روبه بالا، با مؤلفه قائم h ایجاد خواهد کرد. این مسئله به‌طور شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است. گسیختگی ناشی از گسل به پی سطحی با عرض B ، عمق D و با فشار q برخورد می‌کند. لبه سمت چپ پایینی پی نسبت به بیرون‌زدگی گسیختگی ناشی از گسل معکوس در سطح زمین، فاصله‌ای به اندازه S دارد که موقعیت پی را مشخص می‌کند.



شکل (۱): شکل شماتیک اندرکنش پی سطحی کارگذاری شده در عمق و گسیختگی ناشی از گسل معکوس.

۳- متدولوژی مدل‌سازی عددی و پارامترهای مدل

تحلیل‌ها به‌صورت دو بعدی و در شرایط کرنش صفحه‌ای با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس [۱۵] انجام شده است. به‌منظور به حداقل رساندن تأثیر مرزها بر روی نتایج

ناشی از گسل در سطح زمین و ... می‌باشند. اما به دلیل ماهیت ناشناخته گسل‌ها، رفتار غیرقابل پیش‌بینی گسیختگی گسل‌ها و تا حدودی مبهم بودن اندرکنش ساختمان‌ها و گسل‌ها، راه نسبتاً طولانی به‌منظور تدوین آئین‌نامه و تدوین چارچوب طراحی ساختمان‌های واقع در زون‌های گسلی باقی مانده است. لذا، نیاز به بررسی‌های بیشتر در خصوص جنبه‌های مختلف اندرکنش ساختمان - گسل وجود دارد.

شایان ذکر است اکثر تحقیقات مذکور به بررسی خرابی ساختمان‌ها در نتیجه برخورد گسیختگی ناشی از گسل به آنها از نقطه‌نظر تغییرات دوران و جابه‌جایی ساختمان و همچنین لنگر خمشی و نیروی برشی به وجود آمده در پی و اجزای ساختمان پرداخته‌اند. نکته بسیار مهم در این بررسی‌ها این است که بخش اعظم این تحقیقات بر روی ساختمان‌هایی انجام شده است که پی سطحی بر روی سطح زمین (بدون عمق کارگذاری) واقع شده است. این مسئله از دو جهت غیرمنطقی به نظر می‌رسد. از یک سو، پی ساختمان‌ها باید در یک عمق حداقلی برابر عمق یخبندان قرار گیرند. از سوی دیگر، با توجه به نیاز به تأمین پارکینگ در مناطق شهری، گودبرداری انجام شده و پی ساختمان با یک یا چند طبقه زیرزمین اجرا می‌شوند. از این رو، فرض عدم عمق کارگذاری برای پی‌های سطحی به احتمال بسیار زیاد بر روی رفتارهایی که تاکنون بررسی شده تأثیرگذار خواهد بود. لذا، تأثیر عمق کارگذاری پی بر روی اندرکنش ساختمان - گسل و پارامترهای مهم (از قبیل وزن ساختمان، صلیبیت پی، موقعیت پی نسبت به بیرون‌زدگی گسیختگی ناشی از گسل در سطح زمین و همچنین عمق کارگذاری پی) باید مورد بررسی قرار گیرد.

در سال ۲۰۱۵، تحقیق آزمایشگاهی به‌منظور بررسی تأثیر عمق کارگذاری پی با استفاده از سانتریفیوژ انجام شده است [۶]. یک سری آزمایش محدود بر روی تأثیر پارامتر عمق کارگذاری پی انجام شده است. شایان ذکر است خرابی ساختمان تنها از جنبه تغییرات در دوران و جابه‌جایی پی مورد بررسی قرار گرفته است و با توجه به محدودیت‌های موجود، امکان بررسی لنگر خمشی و نیروی برشی اجزای پی وجود نداشت. همچنین، تنها دو عمق

برشی، خاک نرم شونده‌گی را تجربه می‌کند. بلافاصله بعد از نقطه پیک، باند برشی در نمونه ایجاد خواهد شد. بعد از شکل‌گیری باند برشی، فرض شد که تمام تغییر شکل برشی پلاستیک داخل باند برشی اتفاق می‌افتد، درحالی‌که بقیه جسم خاک الاستیک باقی می‌ماند. لذا با فرض پهنای باند برشی برابر با $16d_{50}$ ، که d_{50} اندازه متوسط ذرات ماسه است، کرنش برشی پلاستیک زمانی که نرم‌شوندگی کامل می‌شود، محاسبه گردید. پس از تکمیل نرم‌شوندگی، برش در امتداد باند برشی توسعه یافته و به‌مرور افزایش می‌یابد و خاک شرایط پسماند را تجربه می‌کند. لذا، پس از شکل‌گیری باند برشی و محاسبه مقادیر کرنش برشی مرتبط با این شرایط (یعنی γ_f^p)، کاهش زاویه اصطکاک پیک و زاویه اتساع نمونه تا شروع مرحله پسماند بر اساس مقادیر کرنش برشی پلاستیک (یعنی γ_{oct}^p و با استفاده از روابط ۱ و ۲) انجام گردید. همچنین، به‌منظور لحاظ نمودن اثرات مقیاس [۱۸]، یک سری فرضیات ساده شونده در اصلاح رفتار بعد از پیک مدل موهر-کولمب انجام شده که توسط آناستاسوپولوس و همکاران [۹] با جزئیات توضیح داده شده است.

ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با تراکم نسبی ۶۰ درصد به‌عنوان یک ماسه نسبتاً شل در مدل آزمایشگاهی و مدل‌های عددی مورد استفاده قرار گرفته است. در خصوص مشخصات این خاک به‌طور مفصل توسط آشتیانی و همکاران [۶] توضیح داده شده است. رفتار پیش از تسلیم خاک نیز به‌صورت الاستیک مدل‌سازی شده است. مقدار مدول الاستیسیته خاک به‌طور متغیر در عمق خاک و از ۵ مگاپاسکال در سطح زمین تا ۲۰ مگاپاسکال در عمق ۱۲ متری خاک لحاظ شده است. در تمام مدل‌ها نسبت پواسون برابر 0.33 انتخاب شده است.

پی به عرض B و عمق D با استفاده از المان تیر و رفتار الاستیک مدل شده است. پی داخل خاک قرار داده شده و از طریق المان‌های تماس (المان‌های Gap) به خاک متصل می‌شود. این قبیل المان‌ها در فشار دارای سختی بی‌نهایت بوده اما در کشش مقاومتی از خود نشان نمی‌دهند. همچنین، رفتار این المان‌ها در برش نیز از قانون اصطکاک کولمب پیروی می‌کند.

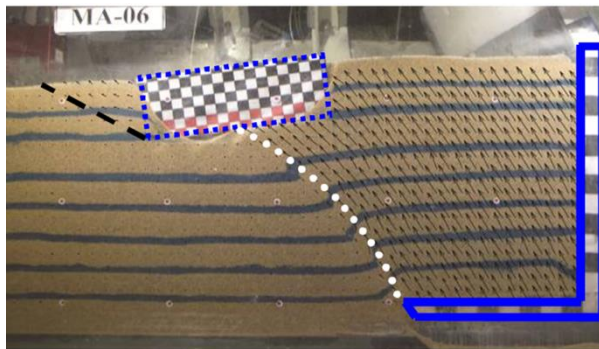
مدل‌سازی‌های عددی، پهنای مدل‌ها برابر $B = 4H$ [۱۶] انتخاب گردید. خاک با استفاده از المان‌های کرنش صفحه‌ای چهار وجهی با بعد $d_{FE} = 1/10$ متر مدل‌سازی شده است [۱۷].

در این تحقیق مدل رفتاری الاستوپلاستیک موهر-کولمب با نرم‌شوندگی همسان کرنش در نظر گرفته شده است که توسط آناستاسوپولوس و همکاران [۹] توسعه داده شده است. در این مدل نرم‌شوندگی کرنش به‌صورت کاهش زاویه اصطکاک بسیج شده (ϕ_{mob}) و زاویه اتساع بسیج شده (ψ_{mob}) با افزایش کرنش برشی پلاستیک (γ^p) تعریف می‌شود.

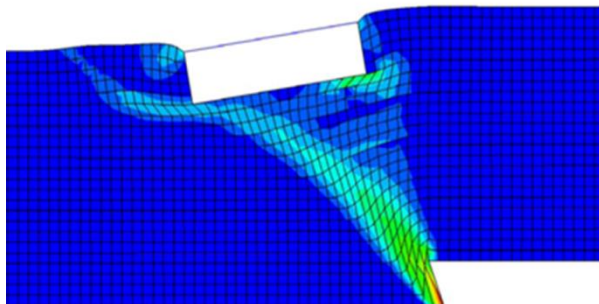
$$\phi_{mob} = \begin{cases} \phi_p - \frac{\phi_p - \phi_{res}}{\gamma_f^p} \gamma_{oct}^p & \text{for } 0 \leq \gamma^p < \gamma_f^p \\ \phi_{res} & \text{for } \gamma^p \geq \gamma_f^p \end{cases} \quad (1)$$

$$\psi_{mob} = \begin{cases} \psi_p \left(1 - \frac{\gamma_{oct}^p}{\gamma_f^p} \right) & \text{for } 0 \leq \gamma^p < \gamma_f^p \\ \psi_{res} = 0 & \text{for } \gamma^p \geq \gamma_f^p \end{cases} \quad (2)$$

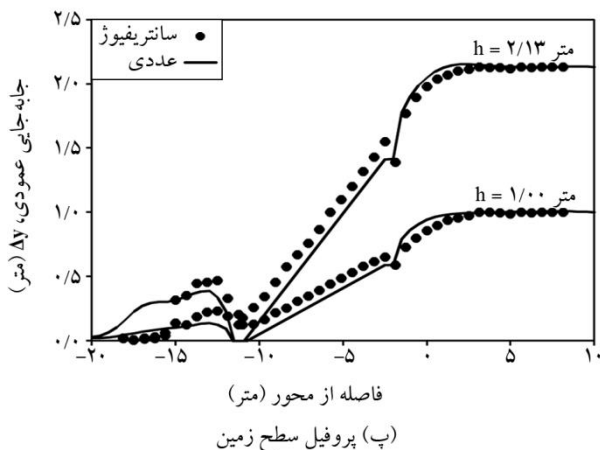
که ϕ_p و ϕ_{res} به‌ترتیب زاویه اصطکاک بسیج شده نهایی و مقدار پسماند آن؛ ψ_p زاویه اتساع نهایی؛ γ_{oct}^p کرنش برشی اکتاهدرال پلاستیک و γ_f^p کرنش برشی پلاستیک که در آن نرم‌شوندگی کامل می‌شود. مدل رفتاری مذکور با استفاده از یک زیربرنامه به برنامه اجزای محدود آباکوس اضافه شده است. از آنجایی که آزمایش برش مستقیم تا حد زیادی، برش ناشی از گسل در خاک را شبیه‌سازی می‌کند، پارامترهای مدل از طریق نتایج این آزمایش کالیبره شده‌اند. برای این کار، پاسخ خاک (با رفتار نرم‌شوندگی) به چهار بخش مجزا تقسیم‌بندی گردید که شامل رفتارهای الاستیک، پلاستیک، نرم‌شوندگی و پسماند می‌باشند. در شرایط الاستیک، رفتار خاک تا حدی غیرخطی و بدون هیچ اتساعی است. در این شرایط، رفتار خاک با استفاده از مدول سکانت، به شکل الاستیک خطی مدل شده است. زمانی که خاک وارد مرحله پلاستیک می‌شود، خاک تسلیم شده و اتساع می‌کند و تا نقطه پیک پیش خواهد رفت. با فرض یکنواخت بودن کرنش برشی در تمام عمق نمونه خاک و همچنین عدم تشکیل باند برشی، کرنش برشی خاک تا شرایط پیک را می‌توان محاسبه نمود. سپس با افزایش مقدار کرنش



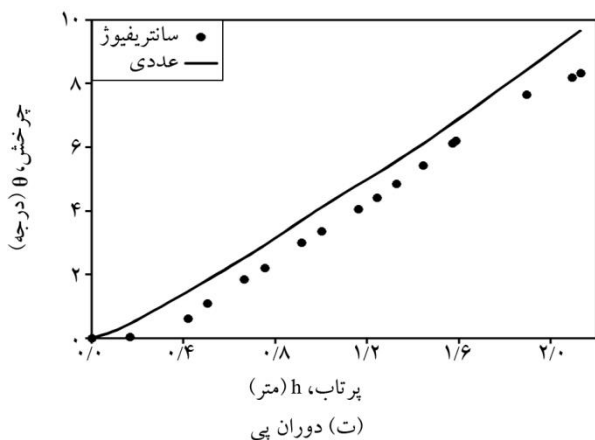
(الف) مدل تغییر شکل یافته آزمایشگاهی [۱۹]



(ب) مدل تغییر شکل یافته عددی



فاصله از محور (متر)
(پ) پروفیل سطح زمین



پرتاب، h (متر)
(ت) دوران پی

شکل (۲): مقایسه نتایج آزمایش سانتریفیوژ اندرکنش گسل معکوس و پی با عرض ۸/۵ متر، عمق کارگذاری $D/B=0/3$ ، فشار $q=81$ کیلوپاسکال و موقعیت $s/B=0/75$ با تحلیل عددی.

مقدار ضریب لغزش بر اساس اصطکاک بین خاک و بتن پی فرض شده و برابر $\frac{2}{3}\phi$ لحاظ شده است. در ضمن، جابه‌جایی غیریکنواخت به بخش راست مدل به صورت شبه‌استاتیکی و به صورت مراحل پی‌درپی با نمونه‌های کم اعمال می‌شود.

۴- اعتبارسنجی نتایج مدل سازی عددی با استفاده از نتایج آزمایش‌های سانتریفیوژ

آزمایش‌های سانتریفیوژ شامل بررسی اندرکنش گسل معکوس با زاویه شیب 60° و پی سطحی به عرض $B=8/5$ متر، فشار باربری $q=81$ کیلوپاسکال، موقعیت $s/B=0/75$ و عمق‌های کارگذاری $D/B=0/3$ ، $0/6$ می‌باشند. عمق مدل آزمایشگاهی در شرایط واقعی برابر ۱۲ متر و خاک از نوع ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با تراکم نسبی ۶۰ درصد می‌باشد [۶]. همان‌طور که در بخش قبلی نیز توضیح داده شد، کالیبراسیون پارامترهای مربوط به خاک مورد استفاده در این تحلیل‌ها، بر اساس نتایج آزمایش‌های برش مستقیم انجام می‌پذیرد. در این خصوص، یک سری آزمایش‌های برش مستقیم بر روی ماسه مذکور انجام شده است که پارامترهای مقاومتی و اتساعی خاک و مقادیر کرنش برشی پلاستیک که در آن نرم‌شوندگی کامل می‌گردد (یعنی γ_f^p)، در جدول (۱) [۱۹] ارائه شده است.

شکل‌های (۲) و (۳) مقایسه نتایج تحلیل‌های عددی و مدل‌های آزمایشگاهی را بر اساس جابه‌جایی قائم سطح زمین (Δy) و میزان دوران پی (θ) نشان می‌دهند. اگرچه نتایج به‌طور دقیق بر یکدیگر منطبق نیستند اما این مقایسه توانایی تحلیل عددی اجزای

جدول (۱): پارامترهای مقاومتی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه بر اساس نتایج آزمایش برش مستقیم [۱۹].

تنش قائم، σ_n (کیلوپاسکال)	تنش برشی، τ_{Peak} (کیلوپاسکال)	زاویه اصطکاک حداکثر، ϕ_{Peak} (درجه)	زاویه اتساع، ψ (درجه)	کرنش برشی پلاستیک، γ_f^p
۳۳	۲۵	۳۷	۵/۰	۰/۲۸
۷۵	۴۵	۳۱	۲/۵	۰/۲۸
۱۳۰	۸۸	۳۴	-	-
۱۹۳	۱۲۹	۳۴	-	-

محدود را به منظور شبیه‌سازی اندرکنش گسل - پی نشان می‌دهد. همچنین، مدل عددی میزان دوران پی ناشی از جابه‌جایی گسل را کمی بیش از مقدار واقعی آن تخمین می‌زند.

۵- تحلیل‌های پارامتریک

به منظور بررسی جامع تر اندرکنش برخورد گسیختگی گسل معکوس به پی‌های سطحی کارگذاری شده در عمق، یک سری تحلیل‌های پارامتریک با استفاده از مدل عددی اعتبارسنجی شده با نتایج آزمایش سائتریفیوژ، انجام پذیرفته است. در این مدل‌ها گسل معکوس با زاویه شیب ۶۰ درجه به لایه خاک با عمق ۲۵ متر، پی به عرض ۱۰ متر و خاک ماسه‌ای نسبتاً شل با تراکم نسبی ۶۰ درصد اعمال شده است. پارامترهای زیر در تحلیل‌های پارامتریک مورد بررسی قرار گرفته‌اند:

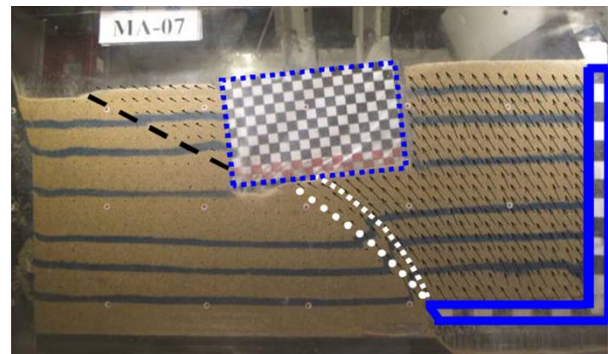
- موقعیت پی نسبت به بیرون‌زدگی گسیختگی سطحی گسل بر روی زمین: ۱/۷، ۱/۶، ۱/۵، ۱/۳، ۱/۲، ۱/۱، ۰/۹، ۰/۷، ۰/۳،

$$s/B = -0/1, -0/2, 0, 0/2$$

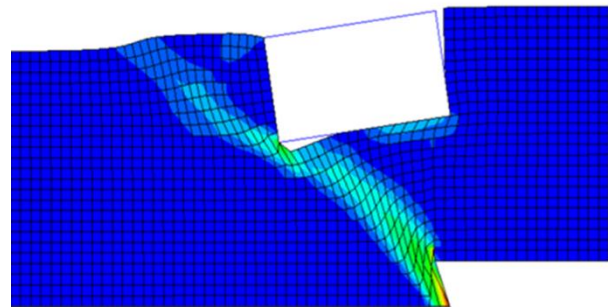
- وزن پی: ۱۰۰، ۸۰، ۴۰، ۲۰ کیلوپاسکال. با فرض اینکه وزن واحد سطح هر طبقه از ساختمان ۱۰ کیلونیوتن بر متر مربع باشد، فشارهای مذکور به ترتیب معادل ساختمان‌های ۲، ۴، ۸ و ۱۰ طبقه هستند. شایان ذکر است که فشارهای متفاوت ناشی از پی (یعنی پارامتر وزن)، با استفاده از تغییر وزن مخصوص مصالح مورد استفاده در پی، در مدل‌های عددی اعمال شده است.

- عمق کارگذاری پی: ۰/۹، ۰/۶، ۰/۳. D/B از آنجایی که عرض پی ۱۰ متر می‌باشد، عمق‌های مذکور معرف یک، ۲ و ۳ طبقه زیرزمین برای ساختمان هستند.

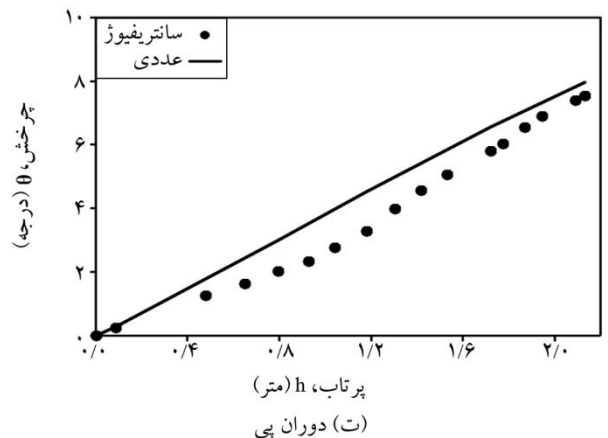
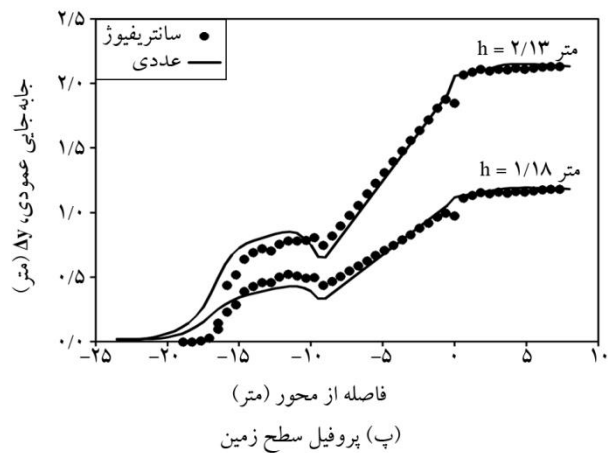
- صلبیت خمشی پی و دیوارهای پیرامون: $EI = 10^4, 10^6, 10^8$ کیلونیوتن مترمربع (که E مدول الاستیسیته پی و I ممان اینرسی آن است). در این حالت، فرض می‌شود که $EI = 10^4$ کیلونیوتن مترمربع معرف پی انعطاف‌پذیر و $EI = 10^8$ کیلونیوتن مترمربع معرف یک پی صلب (با سختی بالا) است. شایان ذکر است که پی مورد استفاده از نوع بتنی (یعنی $E = 20$ گیگاپاسکال) و



(الف) مدل تغییر شکل یافته آزمایشگاهی [۱۹]



(ب) مدل تغییر شکل یافته عددی



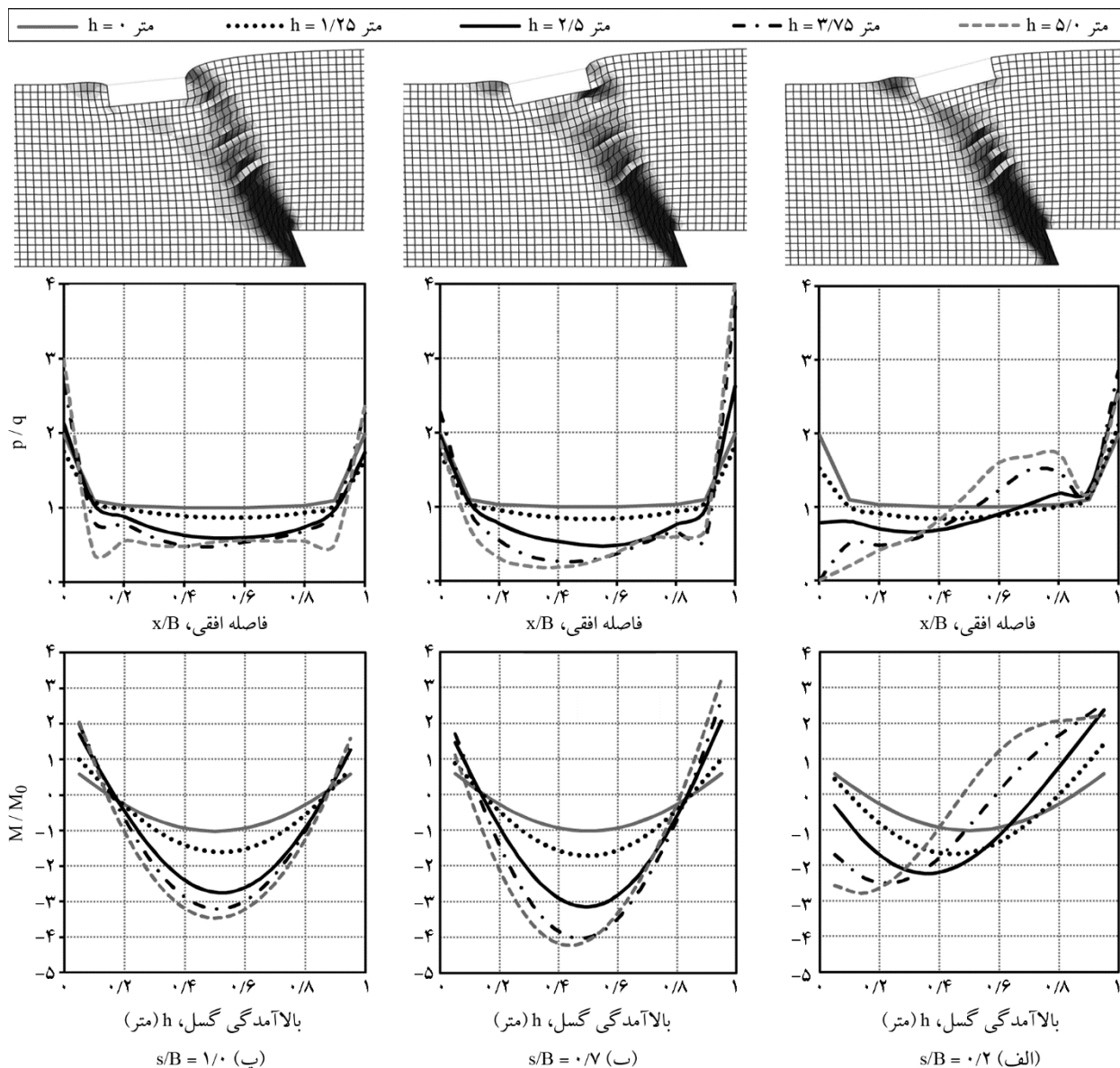
شکل (۳): مقایسه نتایج آزمایش سائتریفیوژ اندرکنش گسل معکوس و پی با عرض ۸/۵ متر، عمق کارگذاری $D/B=0/6$ ، فشار $q=81$ کیلوپاسکال و موقعیت $s/B=0/25$ با تحلیل عددی.

تحلیل‌های پارامتریک ارائه شده و مورد بحث قرار گرفته است.

۵-۱- تأثیر موقعیت پی نسبت به بیرون‌زدگی گسیختگی گسل

به منظور نشان دادن تأثیر موقعیت پی کارگذاری شده در عمق نسبت به بیرون‌زدگی گسیختگی گسل بر روی سطح زمین، پاسخ پی به عرض ۱۰ متر، فشار وارد بر پی ۱۰۰ کیلوپاسکال، عمق کارگذاری $D/B=0/3$ و در موقعیت‌های $s/B=0/2, 0/7, 1/0$ تحت گسلش معکوس مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه سه موقعیت مذکور پی در شکل (۴) نشان داده شده است.

ضخامت‌های معادل صلیب‌های خمشی $10^4, 10^6$ و 10^8 کیلونیوتن مترمربع به ترتیب حدوداً برابر $0/1, 0/4$ و $1/8$ متر می‌باشد. البته بایستی اشاره نمود که ضخامت $0/1$ متر اجرایی نبوده و صرفاً جهت نشان دادن سختی بسیار کم (یعنی، پی کاملاً انعطاف‌پذیر) در المان‌های پی مورد استفاده قرار گرفته است. دیوارهای پیرامونی نیز با صلیب خمشی مشابه صلیب خمشی پی مدل‌سازی شده‌اند. لذا تحلیل‌های عددی با این فرض انجام شده‌اند که صلیب خمشی دیوارهای پیرامونی مشابه صلیب خمشی پی باشد. در ادامه، در هر بخش یک سری نتایج مربوط به برخی از



شکل (۴): تأثیر موقعیت پی صلب نسبت به بیرون‌زدگی گسیختگی گسل برای پی با عمق کارگذاری $D/B=0/3$ و فشار $q=100$ کیلوپاسکال در موقعیت‌های (الف) $s/B=0/2$ ، (ب) $s/B=0/7$ و (پ) $s/B=1/0$.

باز توزیع فشار تماسی در کف پی شده و افزایش میزان فشار تماسی در بخش سمت راست پی (محدوده $0/8 < x/B < 0/4$) را به همراه خواهد داشت. همچنین، توزیع لنگر خمشی نیز تغییر یافته و از نظر علامت جهت آن عوض خواهد شد.

همان‌طور که در شکل (۴-ب) نشان داده شده است، زمانی که گسیختگی ناشی از گسل در شرایط میدان آزاد در فاصله $s/B=0/7$ به زیر پی برخورد می‌کند، گسیختگی ناشی از گسل پخش شده و برای $h=1/25$ متر تغییرات چندانی در فشار تماسی ایجاد نمی‌کند اما میزان لنگر خمشی تا حدود دو برابر افزایش می‌یابد. با افزایش میزان بالاآمدگی گسل برای $h > 2/5$ متر، فشار تماسی در بخش میانی پی در حال کاهش بوده و برای $h = 5/0$ متر به صفر نزدیک شده است. این مسئله نشان می‌دهد که با پخش شدگی گسیختگی گسل در زیر پی، بخش میانی آن در حال از دست دادن تماس خود با خاک بوده و در نتیجه پی به صورت یک تیر نسبتاً گیردار با دو تکیه‌گاه در دو انتهای خود عمل خواهد نمود. در این حالت نوع تغییر شکل پی به فرم کاسه‌ای^۵ بوده و میزان لنگر خمشی نیز در این بخش افزایش یافته و برای $h > 2/5$ متر تا حدود ۳-۴ برابر میزان اولیه خود می‌رسد. با جابه‌جایی گسیختگی گسل به سمت فرادیواره، یعنی $s/B = 1/0$ انتظار می‌رفت که گسیختگی برخورد چندانی با پی نداشته باشد، اما همان‌طور که در شکل (۴-پ) مشاهده می‌شود به دلیل کارگذاری پی در عمق، گسیختگی گسل پخش شده و یک شاخه از آن نیز به زیر پی برخورد نموده است. این حالت نیز مشابه $s/B=0/7$ پی به صورت یک تیر نسبتاً گیردار با دو تکیه‌گاه در دو انتهای خود عمل نموده و تغییر شکل نیز از نوع کاسه‌ای می‌باشد. تنها تفاوت آن با حالت قبلی این است که نحوه توزیع فشار تماسی و لنگر خمشی تقریباً به صورت متقارن می‌باشد. میزان افزایش لنگر خمشی نیز تا حدود ۳/۵ برابر میزان اولیه مشاهده می‌شود و با وجود کاهش میزان فشار تماسی، پی همچنان تماس خود را با خاک حفظ نموده است.

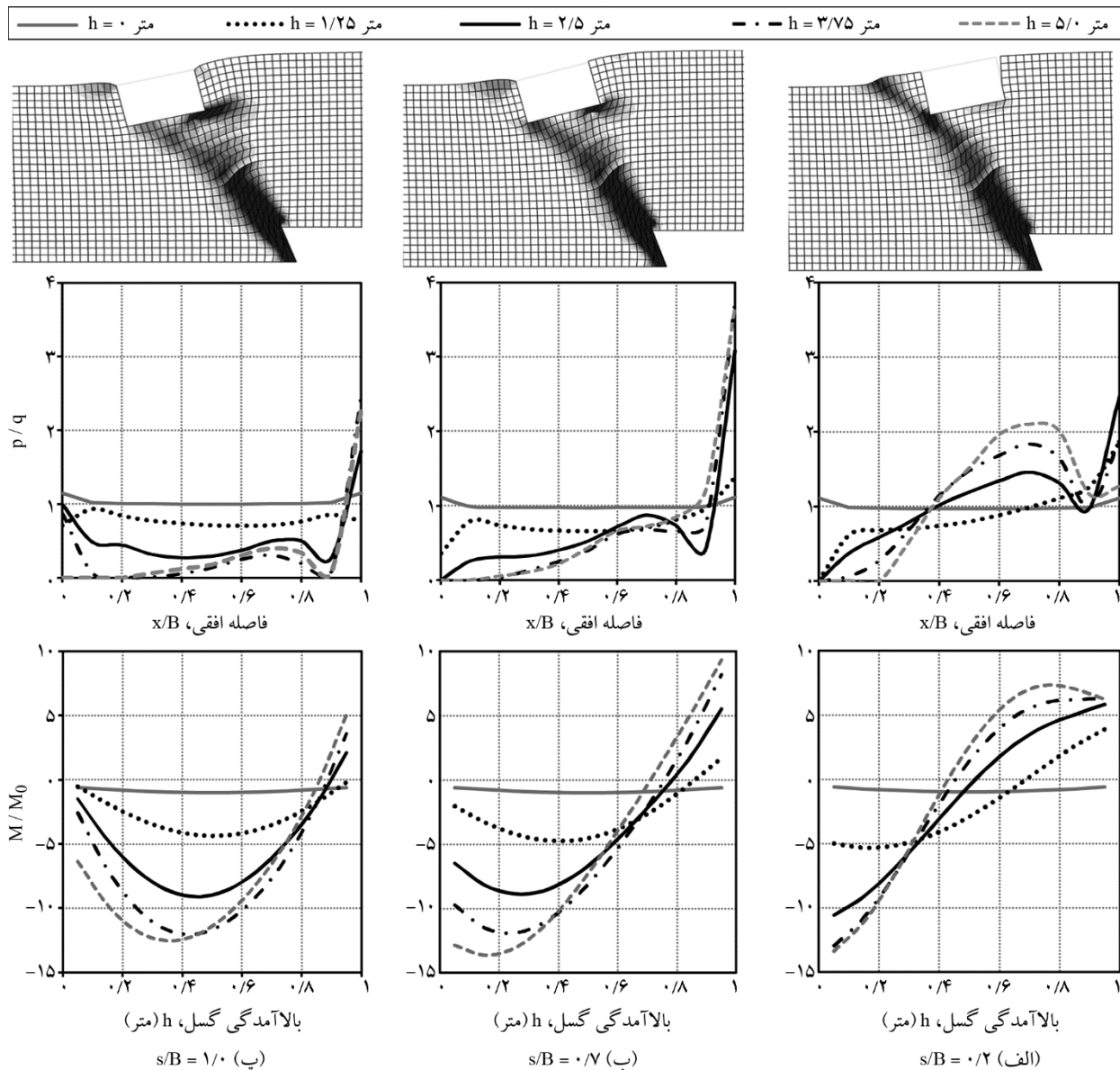
به منظور بررسی تأثیر موقعیت پی در عمق دیگر کارگذاری پی، پاسخ پی مشابه حالت قبلی در عمق $D/B=0/6$ و در موقعیت‌های $0/1$ ، $0/7$ ، $0/2$ s/B تحت گسلش معکوس مورد

در شکل (۴) مش تغییر شکل یافته به همراه کانتور کرنش‌های برشی پلاستیک برای نسبت بالاآمدگی گسل $h/H=20\%$ ، فشار تماسی پی بعد در فصل مشترک کف پی و خاک زیر آن (p/q) به همراه لنگر خمشی پی بعد (M/M_0) ارائه شده‌اند. که p فشار تماسی بین خاک و المان کف پی، q فشار وارد بر پی، M لنگر خمشی المان کف پی و M_0 لنگر خمشی ماکزیمم المان کف پی برای بالاآمدگی گسل $h=0/0$ و در شرایط سکون می‌باشد.

در تمامی موارد مشخص است که گسیختگی ناشی از گسل تا حدود زیادی پخش شده و دو شاخه شده است. این حالت در موقعیت پی $s/B=0/2$ کمتر رخ داده است. همان‌طور که در شکل (۴-الف) نشان داده شده است، برای موقعیت پی $s/B=0/2$ گسیختگی ناشی از گسل تا حدود زیادی به سمت چپ پی (فرودیواره) منحرف شده است. اما با این وجود، پی تنش‌های زیادی را در نتیجه گسلش تجربه نموده است. پیش از اعمال گسلش ($h=0$)، پی در تماس کامل با خاک بوده و در بیشتر طول خود، در حدود $0/8 < x/B < 0/2$ ، مقدار p/q برابر $1/0$ بوده که به جز در دو انتها که تا حدود $2/0$ افزایش یافته است. با افزایش میزان بالاآمدگی گسل تا $h=1/25$ متر، میزان تغییر در فشار تماسی بین کف پی و خاک زیر آن نسبت به حالت قبل از اعمال گسلش زیاد نیست، اما میزان لنگر به وجود آمده در پی تا حدود دو برابر افزایش می‌یابد. برای $h=2/5$ متر تغییرات در نحوه توزیع فشار تماسی و لنگر خمشی قابل ملاحظه خواهد بود. در این حالت لنگر خمشی حداکثر در پی بیشتر از دو برابر مقدار اولیه شده است. با افزایش بیشتر میزان بالاآمدگی گسل، مقدار فشار تماسی در محدوده $0/8 < x/B < 0/4$ بیشتر از $1/0$ شده و در محدوده سمت چپ پی برای $0/3 < x/B$ این مقدار به زیر $1/0$ کاهش می‌باشد تا اینکه در گوشه پی به صفر می‌رسد. این مسئله نشان می‌دهد که گسیختگی ناشی از گسل موجب شده است که گوشه سمت چپ پی در حال از دست دادن تماس خود با خاک می‌باشد. از این رو، میزان لنگر در این بخش از پی برای $h=5/0$ متر تا حدود سه برابر مقدار اولیه افزایش یافته است. در این شرایط نوع تغییر شکل پی در این بخش به فرم خمیده^۴ می‌باشد. در ضمن، از دست رفتن تماس در گوشه چپ پی موجب

با جابه‌جا نمودن پی و قرارگیری آن در موقعیت $s/B = 0.7$ ، گسیختگی ناشی از گسل به‌طور نسبتاً کامل در زیر پی پخش شده است (شکل ۵-ب). همان‌طور که در نمودار مربوط به فشار تماسی مشخص است، با افزایش بالاآمدگی گسل به میزان ۱/۲۵ متر، تماس کف پی با خاک زیرش همچنان باقی است اما از میزان فشار تماسی کاسته شده است. با افزایش بیشتر بالاآمدگی گسل، پی تماس خود را در گوشه چپ پی با خاک از دست داده است و برای محدوده $0 < x/B < 0.7$ پی به‌صورت طره قرار می‌گیرد. از این‌رو در این بخش، میزان لنگر خمشی در حدود ۱۴ برابر مقدار اولیه‌اش شده است.

بررسی قرار گرفته است. مقایسه سه موقعیت مذکور پی در شکل (۵) نشان داده شده است. شکل (۵-الف) نشان می‌دهد که برای پی در موقعیت $s/B = 0.2$ ، گسیختگی ناشی از گسل به گوشه سمت چپ پی برخورد نموده و برای $h > 2/5$ متر پی در حال از دست دادن تماس خود با خاک می‌باشد. از این‌رو، فشار تماسی در این شرایط صفر شده و پی به‌صورت طره‌ای قرار می‌گیرد. لذا، میزان لنگر خمشی در پی با توجه به طره‌ای شدن و اتصال صلب با دیواره پی، به‌شدت افزایش می‌یابد به‌طوری‌که برای $h = 5/0$ متر در حدود ۱۳ برابر مقدار اولیه لنگر خمشی شده است.



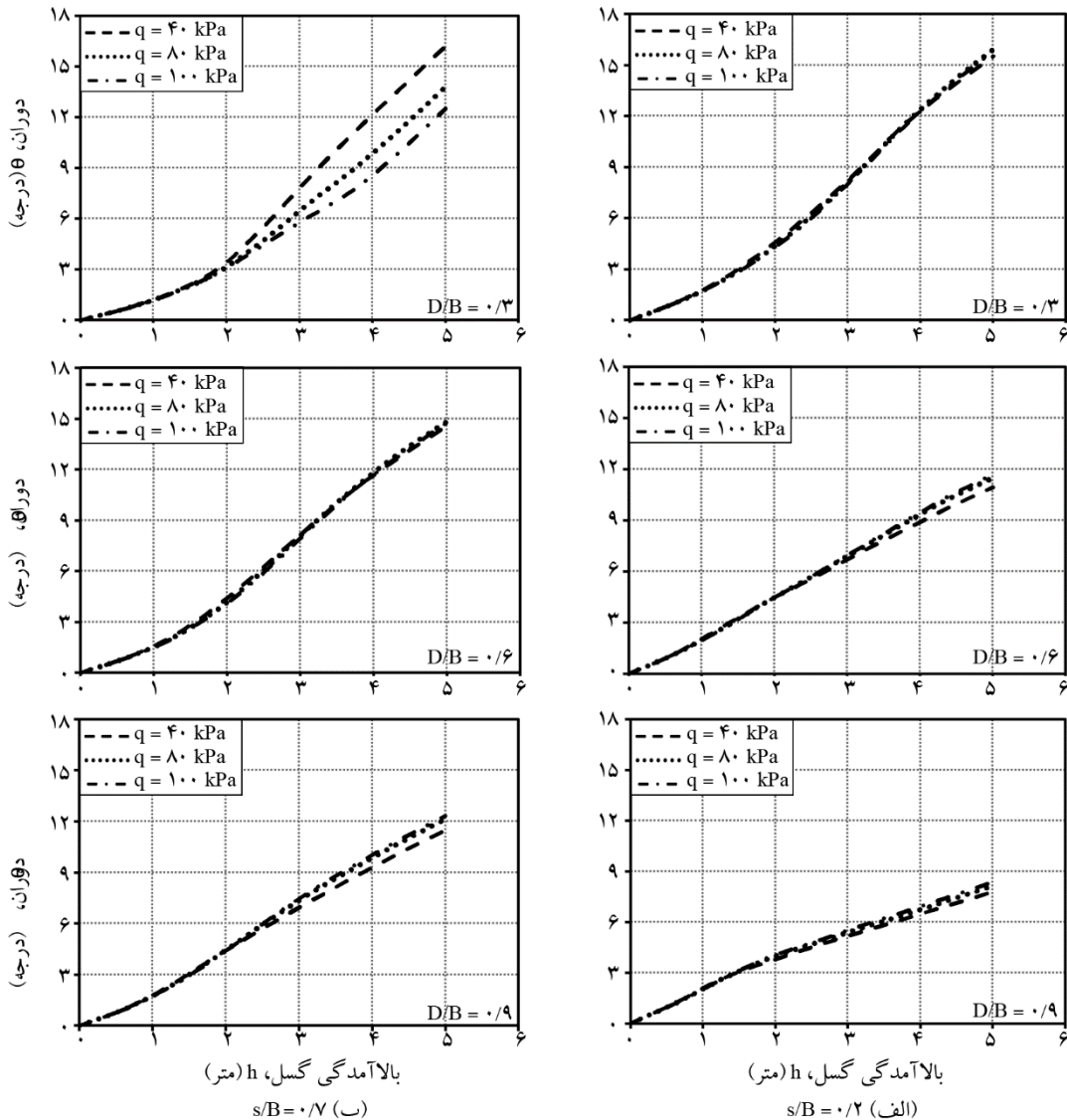
شکل (۵): تأثیر موقعیت پی صلب نسبت به بیرون‌زدگی گسیختگی گسل برای پی با عمق کارگذاری $D/B = 0.6$ و فشار $q = 100$ کیلوپاسکال در موقعیت‌های (الف) $s/B = 0.2$ ، (ب) $s/B = 0.7$ و (پ) $s/B = 1.0$.

خواهد یافت. با افزایش بالاآمدگی گسل تا حدود ۵/۰ متر مشخص است که پی تماس خود را در محدوده $0/4 < x/B < 0$ از دست داده و در این محدوده به صورت طره‌ای عمل می‌کند.

۵-۲- تأثیر فشار وارد بر پی (وزن ساختمان)

برای تعیین تأثیر فشار وارد بر پی یا به عبارت دیگر وزن ساختمان در اندرکنش گسل معکوس و پی سطحی کارگذاری شده در عمق، پاسخ پی به عرض ۱۰ متر، با عمق‌های کارگذاری $D/B = 0/3, 0/6, 0/9$ و در موقعیت‌های $s/B = 0/7, 0/2$ تحت گسلش معکوس مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه سه موقعیت مذکور پی در شکل (۶) نشان داده شده است.

با دورتر نمودن پی از محل گسیختگی گسل و قرار دادن آن در موقعیت $s/B = 1/0$ ، گسیختگی ناشی از گسل همچنان به کف پی برخورد نموده و پخش شدگی آن به شکلی است که تا حدودی به سمت فرادواره نیز متمایل شده است. این موضوع در شکل (۵-پ) نشان داده شده است. با افزایش میزان بالاآمدگی گسل تا ۱/۲۵ متر، تغییر چندانی در میزان فشار تماسی کف پی ایجاد نشده اما میزان لنگر خمشی در پی به حدود پنج برابر میزان اولیه رسیده است. کاهش مقدار فشار تماسی مؤید این مطلب است که پی در حال از دست دادن تماس خود بوده و پی به صورت یک تیر نسبتاً گیردار با تکیه‌گاه‌هایی در دو انتهای خود عمل می‌نماید. در نتیجه میزان لنگر خمشی آن به مرور و با افزایش میزان بالاآمدگی گسل، افزایش



شکل (۶): تأثیر وزن پی بر روی دوران پی صلب با عمق‌های کارگذاری مختلف در موقعیت‌های (الف) $s/B = 0/2$ و (ب) $s/B = 0/7$.

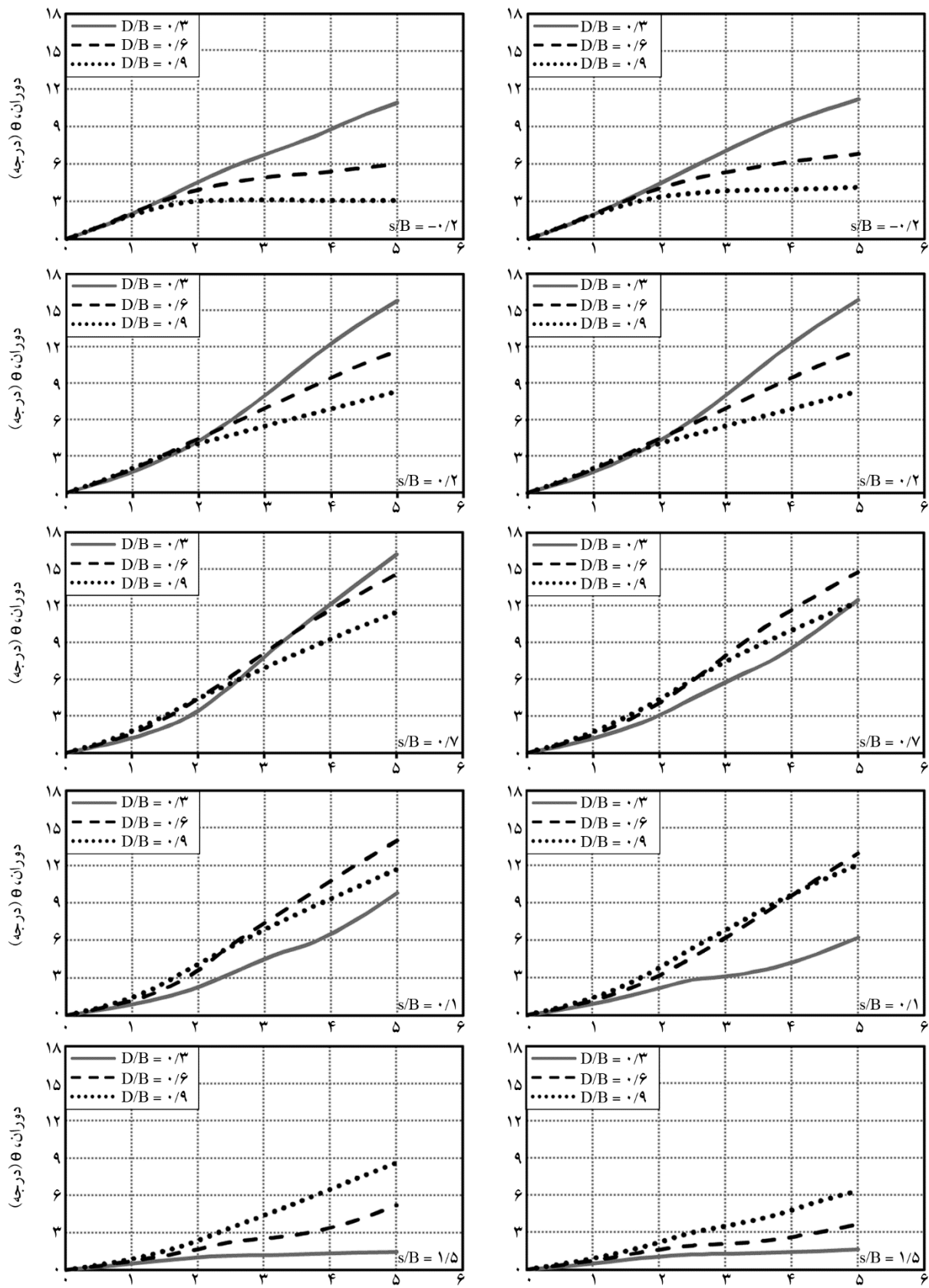
۵-۳- تأثیر عمق کارگذاری پی

به منظور بررسی تأثیر عمق کارگذاری پی بر روی اندرکنش گسل معکوس و پی سطحی، پی به عرض ۱۰ متر، با فشارهای وارد بر پی ۱۰۰، ۴۰، $q = ۴۰$ کیلوپاسکال و در موقعیت‌های ۱/۵، ۱/۰، ۰/۷، ۰/۲، ۰/۲، $s/B = -۰/۲$ برای عمق‌های کارگذاری ۰/۹، ۰/۶، $D/B = ۰/۳$ تحلیل شده است. مقایسه تأثیر سه عمق پی به صورت تغییرات دوران پی به‌ازای جابه‌جایی قائم گسل در شکل (۷) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر افزایش عمق (D/B) بر روی اندرکنش پی - گسل تا حد زیادی به موقعیت پی نسبت به گسیختگی سطحی گسل (s/B) وابسته است. برای هر دو مقدار فشار وارد بر پی، به‌ازای تغییر موقعیت پی از ۱/۵ تا $s/B = -۰/۲$ (یعنی دور شدن پی از گسیختگی سطحی ناشی از گسل)، پی‌های سطحی با عمق کمتر، به ترتیب دوران بیشتر تا کمتری را نسبت به پی‌های سطحی عمیق‌تر تجربه خواهند نمود. دلیل این مسئله را می‌توان به تغییر مکانیسم خرابی پی ناشی از برخورد گسیختگی گسل نسبت داد. بدین ترتیب که با تغییر عمق کارگذاری پی و همچنین تغییر موقعیت پی نسبت به گسیختگی گسل، مکانیسم اندرکنش بین سه حالت مکانیسم فرادیواره^۶ (یعنی پی واقع بر روی فرادیواره گسل)، مکانیسم فضای خالی^۷ (یعنی گسیختگی ناشی از گسل به زیر پی برخورد نماید) و مکانیسم فرودیواره^۸ (پی واقع بر روی فرودیواره گسل) تغییر خواهد نمود. این مکانیسم‌ها توسط احمد و برانسی [۷] و موسوی و همکاران [۸] توضیح داده شده‌اند. به منظور بررسی بیشتر این مسئله، تغییرات مکانیسم اندرکنش پی - گسل به‌ازای پارامترهایی از قبیل عمق کارگذاری پی، موقعیت پی و میزان بالاآمدگی گسل در شکل (۸) نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود به‌ازای تغییر عمق پی و برای موقعیت‌های مختلف پی، مکانیسم‌های خرابی متفاوت خواهد بود. برای پی با عمق کارگذاری $D/B = ۰/۳$ ، در محدوده $۰/۸ < s/B < ۰/۱$ مکانیسم خرابی از نوع فضای خالی بوده و برای محدوده $s/B > ۰/۱$ مکانیسم از نوع فرادیواره و محدوده $s/B > ۰/۸$ مکانیسم از نوع فرودیواره می‌باشد.

همان‌طور که در شکل (۶) مشخص است در عمق‌های کارگذاری بیشتر (یعنی $D/B = ۰/۹$)، مقدار فشار وارد بر پی، زیاد تأثیرگذار نیست. اگرچه به دلیل محصور بودن ساختمان در عمق‌های بیشتر، در صورت برخورد گسیختگی به پی، دوران زیادی به ساختمان اعمال خواهد شد؛ اما تأثیرپذیری زیادی از فشار وارد بر پی ندارند. برای پی با عمق کارگذاری $D/B = ۰/۳$ بسته به موقعیت پی، تأثیر وزن ناشی از ساختمان متفاوت است، بدین ترتیب که در موقعیت $s/B = ۰/۷$ ، وزن کمتر پی موجب دوران بیشتر پی شده است و با افزایش وزن، دوران پی کاهش می‌یابد. اما در موقعیت $s/B = ۰/۲$ ، با کاهش وزن پی دوران آن نیز کاهش یافته است. این موضوع می‌تواند به دلیل تغییر محل برخورد گسیختگی ناشی از گسل به دو طرف مرکز ثقل پی (برای موقعیت‌های s/B متفاوت پی) باشد. لذا در صورت برخورد گسیختگی ناشی از گسل به سمت چپ مرکز ثقل (یعنی نیمه سمت چپ پی)، پی سبک‌تر به همراه گسیختگی ناشی از گسل جابه‌جا شده و پی سنگین‌تر علاوه بر جابه‌جایی ممکن است به دوران بیشتر نیز کمک کند. اما در صورت برخورد گسیختگی به نیمه سمت راست پی، پی سبک‌تر دوران زیادتری را تحمل خواهد نمود؛ مسئله‌ای که به وضوح برای پی با عمق کارگذاری $D/B = ۰/۳$ و موقعیت $s/B = ۰/۷$ قابل مشاهده است. این مکانیسم توسط آشتیانی و همکاران [۶] به‌طور مفصل بحث شده است. به‌طور کلی می‌توان بیان نمود که تأثیر وزن پی بر روی اندرکنش پی - گسل وابسته به موقعیت پی نسبت به گسیختگی سطحی ناشی از گسل می‌باشد.

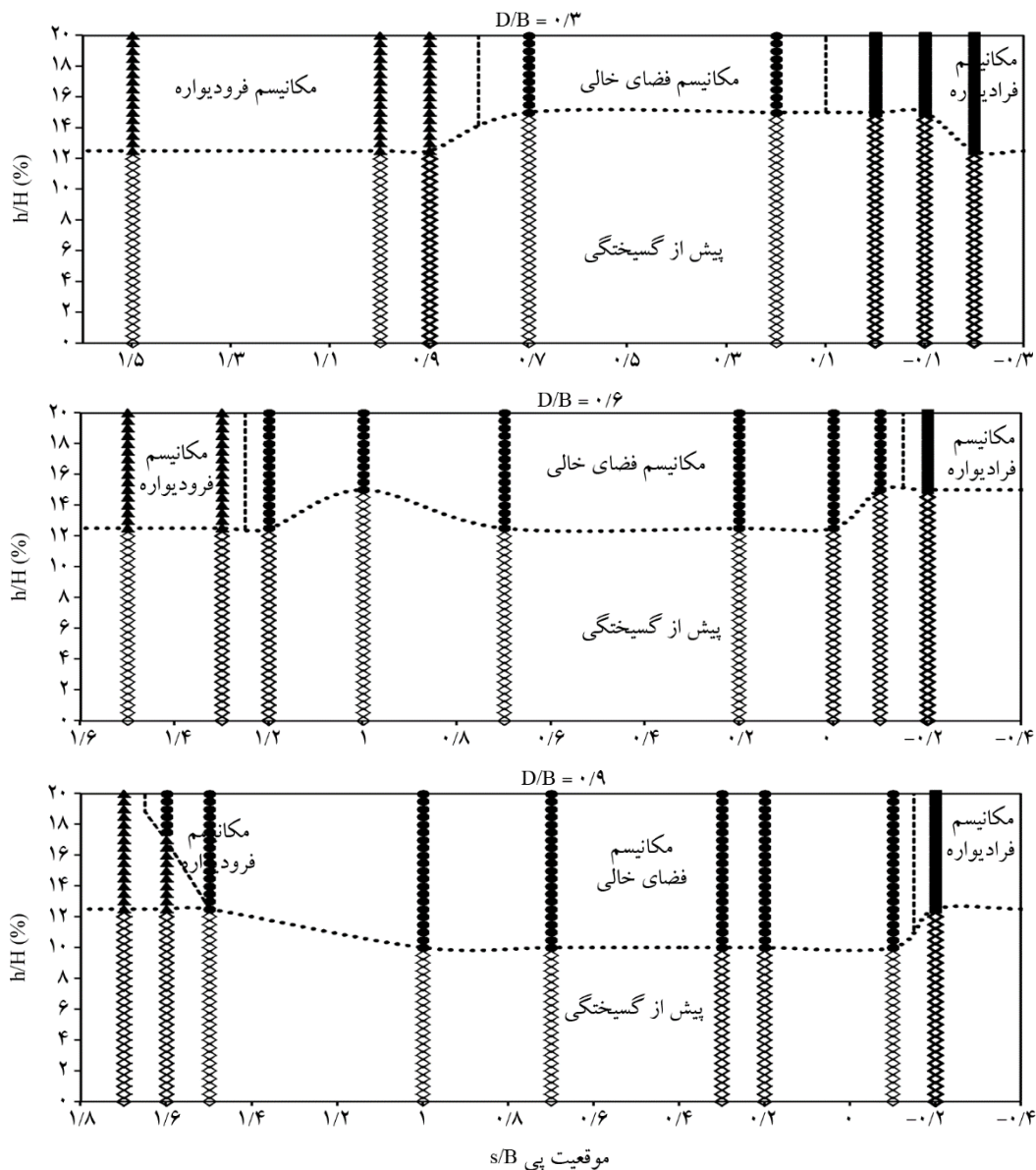
مسئله دیگری که در شکل‌ها مشاهده می‌شود کاهش مقدار دوران پی برای پی‌های با عمق کارگذاری بیشتر است (کاهش دوران از حدود ۱۶ درجه به ۸ درجه برای $s/B = ۰/۲$). به نظر می‌رسد هر چه عمق کارگذاری پی افزایش می‌یابد صلبیت پی و دیوارهای اطراف آن موجب می‌گردد که این مجموعه به شکل یک پی نیمه عمیق (یا کیسونی) عمل نماید. این مشاهدات مشابه نتایج به‌دست آمده توسط لولی و همکاران [۲۰] می‌باشد.



بالا آمدگی گسل، h (متر)
 (ب) $q = 100$ کیلو پاسکال

بالا آمدگی گسل، h (متر)
 (الف) $q = 40$ کیلو پاسکال

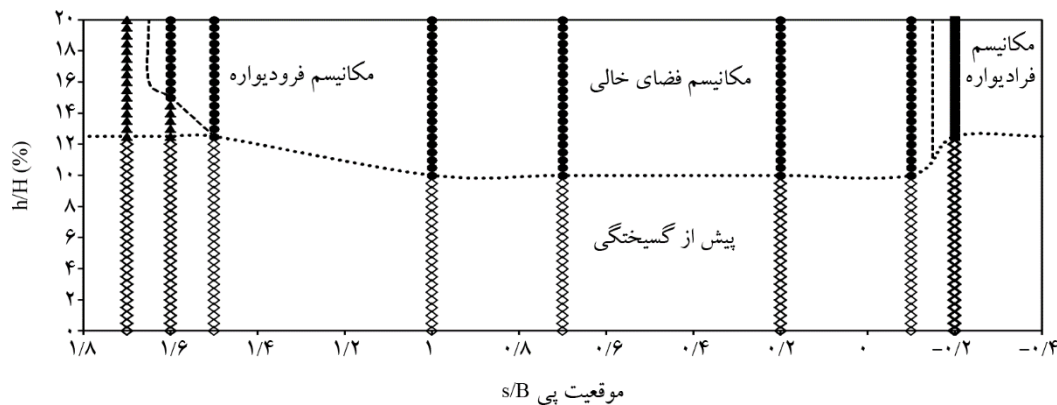
شکل (۷): تأثیر عمق کارگذاری پی صلب بر روی اندرکنش پی-گسل معکوس برای فشارهای (الف) $q = 40$ کیلو پاسکال و (ب) $q = 100$ کیلو پاسکال.



شکل (۸): مکانیسم گسیختگی پی صلب به ازای موقعیت‌های مختلف پی و میزان بالآمدگی گسل برای پی با فشار $q=100$ کیلوپاسکال.

نسبت به گسیختگی سطحی گسل و میزان جابه‌جایی گسل نیز توجه داشت. اما مسئله‌ای که مشخص است این است که در صورت یکسان بودن مکانیسم گسیختگی پی‌های با عمق‌های مختلف (به‌طور مثال، $s/B = 0.2$ در شکل‌های ۷ و ۸)، دوران پی با عمق کارگذاری کمتر، بیشتر از دوران پی با عمق کارگذاری بیشتر است. دلیل این موضوع را نیز می‌توان به محصور بودن بیشتر پی با عمق کارگذاری بیشتر و رفتار مشابه آن با پی‌های صلب و نیمه‌عمیق نسبت داد. برای بررسی تأثیر وزن پی بر روی مکانیسم خرابی پی،

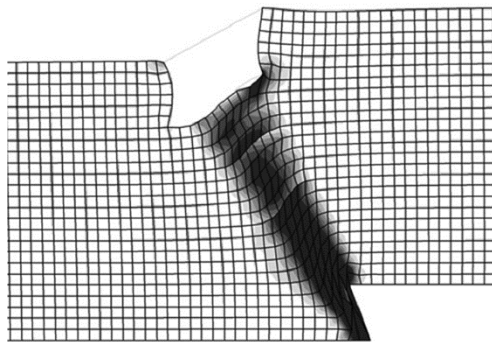
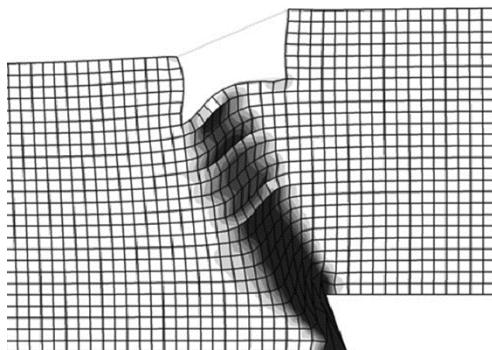
این در حالی است که با افزایش عمق پی به $D/B = 0.6$ ، محدوده مکانیسم فضای خالی به $1/25 < s/B < 0.15$ افزایش می‌یابد. همین‌طور برای پی با عمق کارگذاری $D/B = 0.9$ ، در محدوده $1/65 < s/B < 0.15$ مکانیسم خرابی از نوع فضای خالی می‌باشد. در این شرایط برای موقعیت $s/B = 1/6$ ، به‌ازای $h/H > 1.2/5$ مکانیسم از نوع فرود پیواره است اما پس از اینکه نسبت بالآمدگی گسل (h/H) از $16/5$ درصد بیشتر شد نوع مکانیسم به فضای خالی تغییر پیدا کرد. لذا، در صورت مقایسه رفتار پی‌ها با عمق‌های کارگذاری متفاوت باید به موقعیت آنها



شکل (۹): مکانیسم گسیختگی پی صلب به‌ازای موقعیت‌های مختلف پی و میزان بالاآمدگی گسل برای پی با فشار $q=20$ کیلوپاسکال و عمق کارگذاری $D/B=0.06$.

می‌توان نتیجه گرفت که صلبیت بالای پی موجب پخش شدن خط گسیختگی ناشی از گسل به اطراف پی می‌شود. این رفتار برای پی‌های انعطاف‌پذیر به صورت یک خط گسیختگی بدون انحراف بوده و به‌طور مستقیم به پی برخورد می‌نماید. مسئله‌ای که در اینجا مشخص است فرم تغییر شکل پی می‌باشد که کاملاً از تغییر شکل اعمالی توسط گسل به سطح زمین تبعیت می‌کند.

مکانیسم گسیختگی پی صلب برای پی با عمق کارگذاری $D/B=0.06$ و وزن $q=20$ کیلوپاسکال در شکل (۹) نشان داده شده است. در مقایسه با شکل (۸) مشخص است که محدوده مکانیسم فضای خالی از $0.15 < s/B < 1/25$ - برای پی با وزن $q=100$ کیلوپاسکال به محدوده مکانیسم فضای خالی $0.15 < s/B < 1/65$ - برای پی با وزن $q=20$ کیلوپاسکال افزایش پیدا است. لذا، محدوده مکانیسم فضای خالی برای پی با وزن کمتر، بیشتر از پی با وزن زیاد است. به عبارتی دیگر، وزن بالای پی به انحراف گسیختگی ناشی از گسل از پی کمک خواهد نمود.

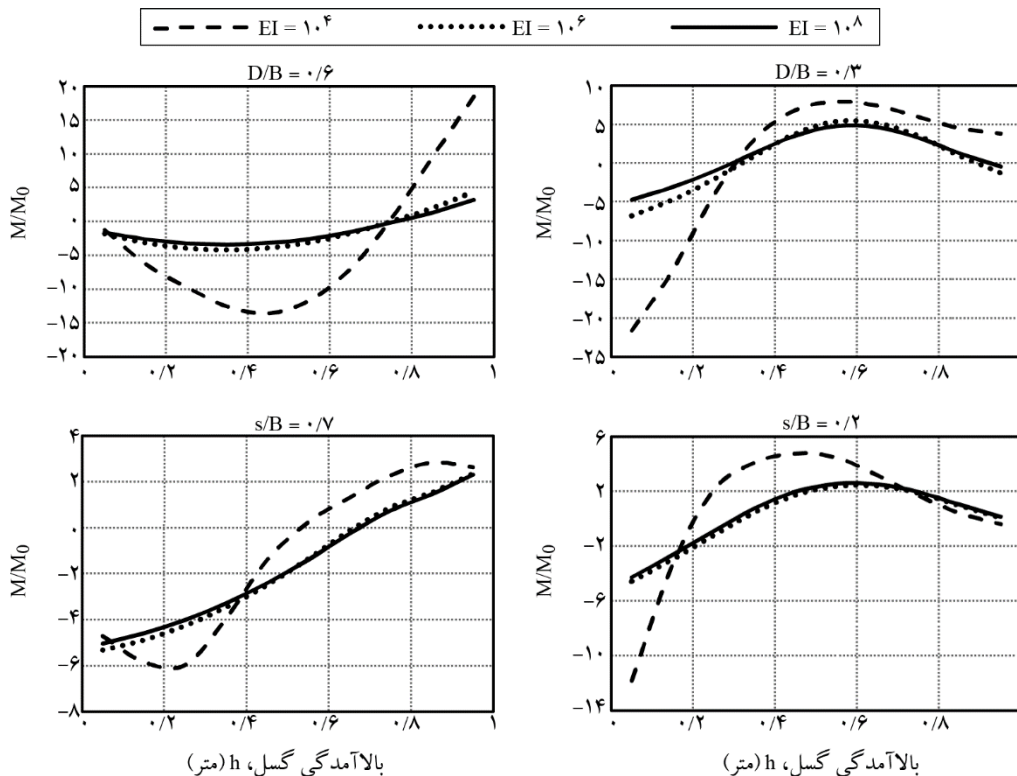


شکل (۱۰): تأثیر موقعیت پی انعطاف‌پذیر نسبت به بیرون‌زدگی گسیختگی گسل برای پی با عمق کارگذاری $D/B=0.06$ و فشار $q=20$ کیلوپاسکال در موقعیت‌های (الف) $s/B=0.2$ و (ب) $s/B=0.7$.

۴-۵- تأثیر صلبیت خمشی پی

به‌منظور بررسی تأثیر صلبیت پی بر روی اندرکنش پی-گسل، پی به عرض $B=10$ متر، فشار وارد بر پی $q=20$ کیلوپاسکال، عمق کارگذاری $D/B=0.06$ با صلبیت‌های خمشی $EI=10^4, 10^6, 10^8$ کیلونیوتن مترمربع و در موقعیت‌های $s/B=0.7$ ، $s/B=0.2$ تحت گسلش معکوس تحلیل شده است.

مقایسه کانتور کرنش‌های برشی پلاستیک پی انعطاف‌پذیر برای صلبیت خمشی $EI=10^4$ کیلونیوتن مترمربع، نسبت بالاآمدگی گسل $h/H=20\%$ و موقعیت‌های $s/B=0.7$ در شکل (۱۰) نشان داده شده است. با مقایسه خطوط گسیختگی (کانتور کرنش‌های برشی پلاستیک) در مش‌های تغییر شکل یافته مربوط به شکل‌های (۴) و (۵) برای پی‌های صلب و همچنین خطوط گسیختگی شکل (۱۰) برای پی انعطاف‌پذیر



شکل (۱۱): تأثیر صلبیت خمشی پی بر روی رفتار اندرکنشی پی با فشار $q=20$ کیلوپاسکال در موقعیت‌های (الف) $s/B=0.2$ و (ب) $s/B=0.7$ برای بالآمدگی گسل $h/H=20\%$.

مقدار نرمالایز شده لنگر خمشی 200% درصد افزایش داشته است. با وجود افزایش مقدار لنگر نرمالایز شده در نتیجه کاهش صلبیت خمشی پی‌ها، افزایش عمق کارگذاری پی موجب می‌شود که میزان افزایش این مقدار کمتر باشد. نکته‌ای که در خصوص افزایش مقدار نرمالایز شده M/M_0 باید توجه داشت این است که این تغییرات به دلیل افزایش مقدار لنگر خمشی ناشی از نیروی تک‌تونیکی، M نیست بلکه کاهش مقدار M_0 موجب افزایش مقدار نرمالایز شده لنگر خمشی می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک سری تحلیل‌های پارامتریک در خصوص اندرکنش برخورد گسیختگی گسل معکوس به پی‌های سطحی کارگذاری شده در عمق، با استفاده از مدل عددی اعتبارسنجی شده با نتایج آزمایش سائتریفیور، انجام پذیرفته است. نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌ها و بررسی‌ها به شرح زیر است:
- رفتار پی و بازتوزیع تنش در آن کاملاً به موقعیت پی نسبت به

تأثیر پارامتر EI بر روی مقدار نرمالایز شده M/M_0 به‌ازای تغییر عمق کارگذاری پی و موقعیت پی نسبت به گسیختگی سطحی گسل در شکل (۱۱) نشان داده شده است. با کاهش صلبیت خمشی از 10^8 کیلونیوتن مترمربع به 10^6 کیلونیوتن مترمربع (یعنی کاهش ۲ مرتبه‌ای در مقدار صلبیت خمشی) تغییر قابل توجهی در M/M_0 مشاهده نمی‌شود. هرچند، کاهش صلبیت خمشی به 10^4 کیلونیوتن مترمربع موجب افزایش مقدار نرمالایز شده لنگر خمشی خواهد شد. در این ارتباط، برای پی با عمق کارگذاری $D/B=0.3$ و موقعیت $s/B=0.7$ ، کاهش صلبیت خمشی از 10^8 کیلونیوتن مترمربع به 10^6 کیلونیوتن مترمربع باعث افزایش 50% درصد مقدار M/M_0 شده و با کاهش صلبیت خمشی به 10^4 کیلونیوتن مترمربع، مقدار نرمالایز شده لنگر خمشی 600% درصد افزایش داشته است. این در حالی است که برای پی با عمق کارگذاری $D/B=0.6$ ، کاهش صلبیت خمشی از 10^8 کیلونیوتن مترمربع به 10^6 کیلونیوتن مترمربع باعث افزایش 20% درصد مقدار M/M_0 شده و با کاهش صلبیت خمشی به 10^4 کیلونیوتن مترمربع،

فضای خالی و مکانیسم فرود یواره، برای گسیختگی یک پی به وقوع پیوندد. لذا در صورت متفاوت بودن مکانیسم‌های گسیختگی، مقایسه رفتار پی‌ها با یکدیگر جهت تعیین تأثیر عمق کارگذاری درست نیست. اما مسئله‌ای که مشهود می‌باشد این است که در صورت یکسان بودن مکانیسم گسیختگی پی‌های با عمق‌های کارگذاری مختلف، دوران پی با عمق کارگذاری کمتر (به‌طور مثال $D/B=0.3$)، بیشتر از دوران پی با عمق کارگذاری بیشتر (به‌طور مثال $D/B=0.9$) است.

- صلیبت خمشی بالای یک پی (یعنی یک پی نسبتاً صلب)، موجب پخش شدن خط گسیختگی ناشی از گسل به اطراف پی می‌شود. این رفتار برای پی‌های انعطاف‌پذیر به صورت یک خط گسیختگی بدون انحراف بوده و به‌طور مستقیم به پی برخورد می‌نماید و تغییر شکل اعمالی توسط گسل به سطح زمین مستقیماً به پی اعمال می‌گردد. همچنین، کاهش صلیبت خمشی پی‌ها موجب می‌شود که مقدار لنگر نرمالایز شده پی (M/M_0) افزایش یابند. این در حالی است که با افزایش عمق کارگذاری پی، نرخ افزایش این مقدار کمتر شده است. نکته‌ای که در خصوص افزایش مقدار نرمالایز شده M/M_0 باید توجه داشت این است که تغییرات مقدار لنگر نرمالایز شده پی (M/M_0) در نتیجه کاهش صلیبت خمشی پی‌ها، به دلیل افزایش مقدار لنگر خمشی ناشی از نیروی تکتونیک، M نیست بلکه کاهش مقدار M_0 موجب افزایش این مقدار شده است.

- نتایج این تحقیق تنها بر روی خاک ماسه‌ای نسبتاً شل انجام شده است و تمامی خاک‌ها را شامل نمی‌شود. وزن ساختمان به صورت متمرکز در کف پی اعمال شده است که با توجه به وجود روسازه در ساختمان، این موضوع باید به‌درستی در تحلیل‌ها وارد شود. همچنین به‌منظور بررسی تأثیر صلیبت خمشی پی، سختی روسازه در تحلیل‌ها وارد نشده است.

مراجع

1. Faccioli, E., Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Calliero, A., and Paolucci, R. (2008) Fault rupture–foundation interaction: selected case histories. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **6**, 557-583.

گسیختگی ناشی از گسل بر روی سطح زمین بستگی دارد. بسته به موقعیت برخورد گسیختگی ناشی از گسل به زیر پی، این امکان وجود دارد که بخش‌های میانی یا دو طرف پی تماس خود را با خاک از دست داده و بازتوزیع نیروها و لنگر خمشی در پی رخ دهد. همچنین، حتی با دور شدن کامل گسیختگی گسل از زیر پی، باز هم ممکن است بخشی از تماس خاک با پی از دست برود و بازتوزیع تنش در پی اتفاق بیفتد. این موضوع در نوع مکانیسم خرابی ایجاد شده در پی در نتیجه برخورد گسیختگی گسل به آن قابل مشاهده است.

- وزن ساختمان در پی‌های با عمق کارگذاری کمتر (به‌طور مثال $D/B=0.3$)، روی رفتار دورانی پی و همچنین منحرف نمودن گسیختگی ناشی از گسل تأثیرگذار است. در این خصوص، قاعدتاً افزایش وزن پی موجب انحراف بیشتر گسیختگی ناشی از گسل می‌شود. اما در ارتباط با دوران پی باید اذعان نمود که تأثیر وزن پی، کاملاً به موقعیت پی نسبت به گسیختگی گسل دارد. یعنی با تغییر موقعیت پی، رفتار دورانی پی نیز تغییر می‌کند. همچنین با افزایش عمق کارگذاری پی، مقدار فشار وارد بر پی خیلی تأثیرگذار نیست. اگرچه به دلیل محصور بودن ساختمان در عمق‌های بیشتر، در صورت برخورد گسیختگی به پی، دوران زیادی به ساختمان اعمال خواهد شد، اما تأثیرپذیری زیادی از فشار وارد بر پی ندارد.

- با افزایش عمق کارگذاری پی، دوران آن تا حدودی کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد هر چه عمق کارگذاری پی افزایش می‌یابد صلیبت پی و دیوارهای اطراف آن موجب می‌گردد که این مجموعه به شکل یک پی نیمه‌عمیق (یا کیسونی) عمل نماید. اما نحوه تغییرات دوران پی‌ها با عمق‌های کارگذاری مختلف نسبت به یکدیگر، کاملاً به موقعیت آنها نسبت به گسیختگی سطحی گسل و همچنین مقدار جابه‌جایی گسل بستگی دارد. نتایج نشان می‌دهد که برای یک عمق کارگذاری مشخص پی و در یک موقعیت خاص آن و با توجه به میزان خاصی از جابه‌جایی اعمالی گسل به پی، ممکن است مکانیسم‌های متفاوتی از قبیل مکانیسم فرادیواره، مکانیسم

- mental Engineering*, **139**(11), 1864-1874.
13. Bray, J.D., Seed, R.B., and Seed, H.B. (1993) 1g small-scale modeling of saturated cohesive soils. *Geotech. Test. J.*, **16**(1), 46-53.
 14. Oettle, N.K., Bray, J.D., and Dreger, D.S. (2015) Dynamic effects of surface fault rupture interaction with structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **72**, 37-47.
 15. ABAQUS, Inc. (2004) *ABAQUS V.6.5. User's manual*. Providence, R.I.
 16. Bray, J.D., Seed, R.B., and Seed, H.B. (1994) Analysis of earthquake fault rupture propagation through cohesive soil. *J. Geotech. Engrg.*, **120**(3), 562-580.
 17. Anastasopoulos, I., Callerio, A., Bransby, M.F., Davies, M.C.R., El Nahas, A., Faccioli, E., Gazetas, G., Masella, A., Paolucci, R., Pecker, A., and Rossignol, E. (2008) Numerical analyses of fault–foundation interaction. *Bull. Earthquake Eng.*, **6**, 645-675.
 18. Muir Wood, D. (2004) *Geotechnical Modeling*. Spon Press, London.
 19. Ashtiani, M. (2016) *Study on Mitigation Measures of Reverse Faulting on the Performance of Shallow Foundations*. Ph.D. Thesis. The University of Tehran, Tehran, Iran (in Persian).
 20. Loli, M., Anastasopoulos, I., 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.
 2. Ulusay, R., Aydan, O., and Hamada, M. (2002) The behavior of structures built on active fault zones: Examples from the recent earthquakes of Turkey. *Struct. Eng. Earthq. Eng.*, **19**(2), 149-167.
 3. Lin, A. and Ren, Z. (2009) *The Great Wenchuan Earthquake of 2008: A Photographic Atlas of Surface Rupture and Related Disaster*. Springer Science & Business Media, Berlin.
 4. Lin, M.L., Chung, C.F., and Jeng, F.S. (2006) Deformation of overburden soil induced by thrust fault slip. *Engineering Geology*, **88**, 70-89.
 5. Bransby, M.F., Davies, M.C.R., El Nahas, A., and Nagaoka S. (2008) Centrifuge modeling of reverse fault-foundation interaction. *Bulletin of Earthquake Eng.*, **6**(4), 607-628.
 6. Ashtiani, M., Ghalandarzadeh, A., and Towhata, I. (2015). Centrifuge modeling of shallow embedded foundations subjected to reverse fault rupture. *Canadian Geotechnical Journal*, **53**(3), 505-519.
 7. Ahmed, W. and Bransby, M.F. (2009) Interaction of Shallow Foundations with Reverse Faults. *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **135**(7), 914-924.
 8. Moosavi, S.M., Jafari, M.K., Kamalian, M., and Shafiee, A. (2010) Experimental investigation of reverse fault rupture – rigid shallow foundation interaction. *International Journal of Civil Engineering*, **8**(2), 85-98.
 9. 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.
 10. Oettle, N.K. and Bray, J.D. (2016) Numerical procedures for simulating earthquake fault rupture propagation. *International Journal of Geomechanics*, **17**(1), 04016025.
 11. Yilmaz, M.T. and Paolucci, R. (2007) Earthquake fault rupture–shallow foundation interaction in undrained soils: a simplified analytical approach. *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, **36**(1), 101-118.
 12. Oettle, N.K. and Bray, J.D. (2013) Geotechnical mitigation strategies for earthquake surface fault rupture. *Journal of Geotechnical and Geoenviron-*

واژه‌نامه

Shallow Foundation	۱- پی سطحی
Revese Fault	۲- گسل معکوس
Numerical Modeling	۳- مدل‌سازی عددی
Hogging	۴- فرم خمیده
Sagging	۵- فرم کاسه‌ای
Hangingwall Mechanism	۶- مکانیسم فرادیواره
Gapping Mechanism	۷- مکانیسم فضای خالی
Footwall Mechanism	۸- مکانیسم فرودیواره

Parameters Affecting the Interaction of Shallow Embedded Foundations and Reverse Faulting

Mehdi Ashtiani^{1*} and Abbas Ghalandarzadeh²

1. Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, *Corresponding Author, email: m.ashtiani@nit.ac.ir
2. Associate Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Observations after the 1999 Turkey and Taiwan earthquakes and the 2008 China earthquake have indicated that the structures experience different levels of damages induced by faulting dislocation. Numerous studies have been conducted on the most common types of foundations such as shallow foundations, pile and caisson foundations subjected to faulting by means of numerical and experimental investigations. The parameters affecting the interaction of a reverse fault rupture with a shallow embedded foundation have been investigated by experimentally validated numerical models using ABAQUS software. These parameters are the embedment depth of foundation, the bearing pressure of foundation, the rigidity of foundation and the foundation position. The reverse fault rupture at a dip angle of 60° propagates in a moderately dense sand layer and interplays with the embedded foundation. A summary of conclusions is as follows:

- The behavior of foundation and the development of rupture mechanisms are fully dependent on the location of the foundation relative to the fault rupture and the magnitude of the fault offset. Depending on the foundation position, the loss of support of the foundation takes place either under the edges (i.e. the hogging deformation) or under the middle (i.e. the sagging deformation) of the foundation. The foundation experiences the loss of support and stressing even for the indirect-hit case when the fault rupture emerges outside the foundation width.
- The increase of the weight of the foundation leads to diverting the fault rupture and less stressing of the foundation. However, the rotation of foundation depends strongly on the foundation position relative to the fault outcrop compared to the weight of the foundation. By increasing the embedment depth of the foundation, the weight of the foundation has no beneficial effect for the behavior of shallow foundation and the kinematic constraint of deeper foundation causes to significantly increase the rotation of the embedded foundations.
- As the embedment depth increases, the rotation of the foundation decreases for the same rupturing mechanism. It can be attributed to the similar performance of a deeper shallow embedded foundation to that of a deep foundation (such as a caisson foundation). However, the rotation of the foundations with the different embedment depths is largely dependent on the position of the foundation relative to the outcropping fault rupture and the magnitude of the fault offset. Also, the results show that the different fault-induced mechanisms such as footwall, gapping and hanging wall may happen depending on the magnitude of fault offset for a given embedment depth and position of the foundation.
- Depending on the rigidity of the foundation, the rigid shallow foundation may diffuse/divert the fault rupture beyond the foundation, whereas by contrast with a flexible foundation, the fault rupture will develop as a distinct rupture and strike the foundation underneath. In all cases, the foundation rigidity is an important parameter controlling the stressing of the foundation. Decreasing the rigidity of the foundation causes to increase the normalized bending moment of the foundation and the foundation may experience substantial distress. The results indicate that rigid shallow foundations are more suitable than flexible ones for a structure subjected to a major reverse fault rupturing underneath.

Keywords: Shallow Foundation, Reverse Fault, Large Dislocation, Numerical Modeling.