

بررسی اندرکنش گروه شمع با گسلش معکوس

محمد داودی* (استادیار)

محمد کاظم جعفری (استاد)

فاطمه احمدی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

در برخی از زلزله‌های قوی، گسلش سطحی در آبرفت نرم انتشار یافته و به سازه برخورد کرده است. اگرچه پژوهش‌های مهندسان زلزله در ۴ دهه‌ی اخیر، عمدتاً بر روی مطالعه‌ی پاسخ دینامیکی خاک و سیستم‌های سازه‌یی به ارتعاشات حاصل از انتشار امواج زمین‌لرزه متمرکز شده است، لیکن تجربه‌ی زلزله‌های پیشین نشان می‌دهد که جابه‌جایی‌های استاتیکی بزرگ زمین نیز می‌تواند برای سازه‌ها مشکلات جدی ایجاد کند. از جمله زمین‌لرزه‌هایی که در ارتباط با پدیده‌ی گسلش سطحی بسیار حائز اهمیت بوده‌اند و می‌توان آن‌ها را نقطه‌ی عطفی در نگرش به پدیده‌ی گسلش سطحی دانست، زمین‌لرزه‌های ترکیه و تایوان (۱۹۹۹)، و زلزله‌ی لندرز (۱۹۹۲) در کالیفرنیا است. در اندک مطالعات انجام شده در زمینه‌ی اندرکنش گسلش شمال و گروه شمع مشخص شده است که شمع‌ها به دلیل تبعیت از تغییر شکل‌های ناشی از گسلش و انتقال آن به سازه، اعمال تغییر مکان نسبی افقی و قائم بر سازه، ایجاد ممان خمشی بسیار زیاد در محل اتصال شمع به سر شمع در گروه شمع‌های با اتصال صلب، رفتار مناسبی در مقابل گسلش ندارند. در مطالعات پیشین نشان داده شده است که انحراف مسیر گسلش بسیار حائز اهمیت بوده و در این زمینه تمهیداتی صورت گرفته است. هدف این نوشتار، بررسی مکانیزم گسلش معکوس و اندرکنش آن با گروه شمع، به کمک نرم‌افزار سه‌بعدی المان محدود است. به این منظور، یک گروه شمع در مسیر گسلش معکوس قرار گرفته و با انجام تحلیل‌های عددی مشخص شده است که شمع‌ها در برخورد با گسلش، به مقدار ناچیزی، مسیر گسلش را منحرف می‌سازند.

واژگان کلیدی: گسلش سطحی، پی شمعی، روش المان محدود، گسل معکوس.

۱. مقدمه

اغلب زمین‌لرزه‌های با منشأ تکتونیکی با گسل‌های لرزه‌یی و فعال در ارتباط هستند، که جابه‌جایی آن‌ها در هنگام زلزله در صورت گسترش تا سطح زمین موجب گسلش سطحی می‌شود. برای بررسی اثر جابه‌جایی ماندگار گسل بر روی سازه، کارهای مختلفی در ۳ حوزه‌ی: ۱. بررسی مطالعات میدانی زلزله‌های گذشته، ۲. مطالعات آزمایشگاهی، ۳. تجزیه و تحلیل‌های عددی انجام شده است. تا پیش از زلزله‌های ترکیه و تایوان، مطالعات ارزنده‌یی را در حوزه‌ی مطالعات میدانی مخاطرات گسلش می‌توان برشمرد^[۱،۲] اما عمده‌ی کارهای انجام شده با رویکرد مطالعات میدانی پس از وقایع زلزله‌های سال ۱۹۹۹ میلادی انجام شده است.^[۳-۹] نکته‌ی مهم قابل توجه در این مطالعات این است که دو نوع جابه‌جایی مختلف می‌تواند در زمان وقوع زلزله در سطح زمین ایجاد شود. در واقع، با وقوع گسیختگی در صفحه‌ی یک گسل، علاوه بر اینکه ارتعاشات دینامیکی گذرا از کانون زلزله به همه طرف ارسال می‌شود، جابه‌جایی شبه استاتیک دائمی نیز بر روی صفحه‌ی گسل

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۵/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۴/۲/۱۳، پذیرش ۱۳۹۴/۲/۲۷.

m-davood@iiees.ac.ir
jafari@iiees.ac.ir
f.ahmadi@iiees.ac.ir

ایجاد می‌شود. جابه‌جایی نوع اول، که توسط انتشار امواج سه‌بعدی زلزله از کانون به محیط اطراف و تا فواصل دور ایجاد می‌شود، همواره در سطح زمین سازه‌ها را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد و بیشترین نگرانی از پایداری سازه‌ها در زمان وقوع زلزله برای این نوع جابه‌جایی است. در حالی که جابه‌جایی دوم در برخی موارد به سطح زمین می‌رسد و سازه‌ها را متأثر می‌سازد. نتایج مطالعات برخی پژوهشگران در سال‌های اخیر^[۱۰] نشان می‌دهد جابه‌جایی دوم بر روی آبرفت‌های نرم (و نه سنگ زمین‌شناسی)، برخلاف جابه‌جایی نوع اول از جنس شبه‌استاتیکی است. در مطالعات میدانی صورت‌گرفته در زمینه‌ی گسلش سطحی و پی‌های عمیق، فقط می‌توان به مطالعه‌ی اخیر (۲۰۰۷)^[۱۰] اشاره کرد که خرابی‌های ناشی از زلزله‌ی کوچالی (۱۹۹۹) ترکیه مورد بررسی قرار گرفته است.

در آزمایش‌های مقیاس تحت شتاب جاذبه، مطالعات خوبی برای صحت‌سنجی نتایج در مقایسه با آزمایش‌های سانتریفیوژ انجام شده است.^[۱۱-۱۶] در حوضه‌ی مطالعات آزمایشگاهی، هیچ‌گونه مطالعه‌یی در زمینه‌ی پی عمیق انجام نشده است. در حوضه‌ی مطالعات عددی فونداسیون شمعی می‌توان به پژوهش‌های زیر اشاره کرد:

در سال ۲۰۰۷، [۱۷] با استفاده از نرم افزار آباکوس، یک مدل بزرگ مقیاس سه بعدی مورد تحلیل قرار گرفته است. این مدل یک گروه شمع 3×3 بوده است، که در نزدیکی گسل واقع شده است. در مطالعه مذکور نشان داده شده است که وجود شمع‌ها با بارگذاری محوری، مسیر گسلش را به سمت چپ منحرف و در میان شمع‌ها پراکنده می‌سازد. دوران و جابه‌جایی قابل توجهی در سرشمع به وجود آمده، شمع‌های ردیف جلو با حرکت به سمت پایین فرادایره به طرف بیرون و پایین کشیده شده و لنگر قابل توجهی در سرشمع به وجود آمده است. الگوی توزیع لنگر در شمع‌های ردیف جلو و عقب کاملاً متفاوت بوده و در شمع‌های ردیف جلو، بیشینه‌ی لنگر در بالا و در ردیف عقب در وسط شمع رخ داده است. برخی پژوهشگران (۲۰۰۸)، [۱۸] نیز مهم‌ترین نتایج به دست آمده از پژوهش‌های حاصل از پروژه QUAKER را به صورت توصیه‌هایی برای طراحی‌های مرتبط با گسلش مطرح ساخته‌اند: ۱. متصل کردن شمع‌ها به هم به وسیله‌ی سرشمع صلب، ۲. استفاده از ایده‌ی شمع ضعیف - سازی قوی (برخلاف فلسفه‌ی طراحی براساس ظرفیت باربری).

همچنین در سال ۲۰۰۸ پژوهشگران، [۱۹] به بررسی سیستم پل در مقابل گسلش پرداخته و برای مدل‌سازی سه بعدی در آباکوس از روش المان محدود استفاده کرده‌اند. در مطالعه‌ی ذکر شده، برای بهبود عملکرد شمع با توجه به آنکه بیشترین لنگر خمشی در محل اتصال شمع به سرشمع رخ می‌دهد، از اتصال مفصلی شمع به سرشمع استفاده شده است، که نتایج آن عبارتند از: ۱. کاهش شدید ممان خمشی ایجاد شده در اثر اعمال گسلش، ۲. عملکرد شمع‌ها همچون تیر قائم دو سر مفصل. تاکنون در مطالعات انجام شده در این حوزه، بیشتر به بررسی مکانیزم گسلش و اندرکنش آن با فونداسیون‌ها پرداخته شده است، در حالی که پژوهش‌های اندکی در زمینه‌ی راهکارهایی برای انحراف مسیر گسلش به منظور مقابله با این خطر و یا تقویت سازه‌های ساخته شده در محدوده‌ی خطر گسلش سطحی وجود دارد. از این میان می‌توان به مطالعات آزمایشگاهی و عددی انجام گرفته در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله در رابطه با پی سطحی اشاره کرد.

در پژوهشی در سال ۲۰۱۰، [۱۵] راهکار استفاده از ژئوگرید برای مقاوم‌سازی خطر گسلش ارائه و با استفاده از المان قوی افقی در زیر سازه، پخش کردن تغییر مکان در زیر فونداسیون انجام شده است. در پژوهش دیگری ۲۰۱۳، [۱۶] نیز جهت محافظت سازه‌ها در مقابل خطر گسلش سطحی از یک المان ضعیف قائم در کنار سازه استفاده شده و در کل نتایج تجزیه و تحلیل حاکی از عملکرد مثبت دیوار ضعیف در هنگام گسلش بوده است. همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۱۴، [۲۰] با در نظر گرفتن رفتار کشسان خمیری برای بتن شمع نشان داده شده است که شمع‌ها با ورود به ناحیه‌ی غیرخطی، لنگر خمشی کمتری متحمل می‌شوند و در نتیجه، تنش در سرشمع و کرنش در خاک به صورت یکنواخت‌تر توزیع می‌شود. در پژوهش دیگری در همان سال نیز نشان داده شده است که در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری برای فونداسیون‌های گسترده، عملکرد آنها را در مقابل گسلش تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ به گونه‌ی که تنش‌ها و کرنش‌هایی که در فونداسیون ایجاد خواهد شد، در برخی موارد بیش از مقاومت فونداسیون است. [۲۱]

در صورتی که برای المان‌های ۴ و ۸ گره‌ی، نوار برشی فقط در یک المان رخ دهد، عرض نوار برشی برابر با اندازه‌ی المان خواهد بود. بنابراین به طور ایده‌آل d_{FE} باید برابر با عرض نوار برشی واقعی ($d_E = 16d_0$) شود. البته در تعریف مذکور، d_B فقط برای حالتی کار بردی است که صفحه‌ی گسیختگی از پیش تعریف شده باشد. این در حالی است که معمولاً، d_{FE} و بالتبع عرض نوار برشی به طور قابل توجهی از مقدار واقعی d_B بیشتر می‌شود. با فرض شرایط برش ساده برای یک جابه‌جایی افقی δ_x ، کرنش برشی در المان γ_{FE} از رابطه‌ی ۴ به دست می‌آید:

$$\begin{cases} \varphi_{mob} = \varphi_p - \frac{\varphi_p - \varphi_{res}}{\gamma_f^p} \gamma_{oct}^p \\ \psi_{mob} = \psi_p \left(1 - \frac{\gamma_{oct}^p}{\gamma_f^p} \right) \end{cases} \quad (1)$$

کرنش برشی خمیری، با فرض اینکه نوار برشی هنوز شکل نگرفته است، به صورت رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:

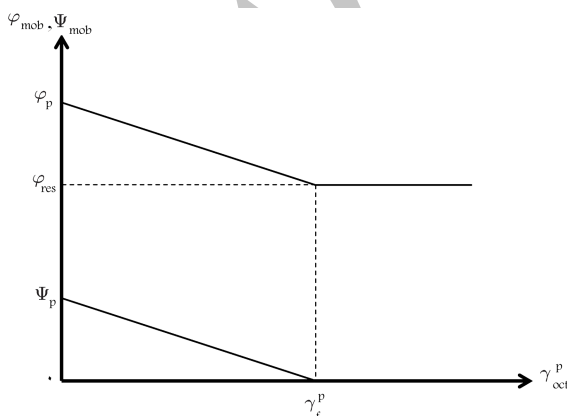
$$\gamma_p^p = \frac{\delta_{X_p} - \delta_{X_y}}{D} \quad (2)$$

در حالتی که نمونه‌ی خاک در ناحیه‌ی فراتر از بیشینه‌ی نسبت تنش برشی به تنش محوری قرار داشته باشد، نوار برشی شکل گرفته است. پژوهشگران در مطالعات مشابه فرض می‌کنند که تمام تغییر شکل برشی خمیری در امتداد نوار برشی رخ داده است، در حالی که بخش دیگر خاک به صورت کشسان باقی مانده است. [۲۲] با فرض عرض نوار برشی d_B برابر با $16d_0$ ، که در آن متوسط اندازه‌ی ذرات ماسه است، کرنش برشی خمیری در حالتی که نرم‌شدگی کامل شده باشد، با استفاده از رابطه‌ی ۳ ارائه می‌شود:

$$\gamma_f^p = \gamma_p^p + \frac{\delta_{X_f} - \delta_{X_p}}{16d_0} = \frac{\delta_{X_p} - \delta_{X_y}}{D} + \frac{\delta_{X_f} - \delta_{X_p}}{16d_0} \quad (3)$$

در صورتی که برای المان‌های ۴ و ۸ گره‌ی، نوار برشی فقط در یک المان رخ دهد، عرض نوار برشی برابر با اندازه‌ی المان خواهد بود. بنابراین به طور ایده‌آل d_{FE} باید برابر با عرض نوار برشی واقعی ($d_E = 16d_0$) شود. البته در تعریف مذکور، d_B فقط برای حالتی کار بردی است که صفحه‌ی گسیختگی از پیش تعریف شده باشد. این در حالی است که معمولاً، d_{FE} و بالتبع عرض نوار برشی به طور قابل توجهی از مقدار واقعی d_B بیشتر می‌شود. با فرض شرایط برش ساده برای یک جابه‌جایی افقی δ_x ، کرنش برشی در المان γ_{FE} از رابطه‌ی ۴ به دست می‌آید:

$$\gamma_{FE} = \frac{\delta_x}{d_{FE}} \quad (4)$$



شکل ۱. تغییرات زاویه‌ی اصطکاک φ_{mob} و زاویه‌ی اتساع ψ_{mob} با کرنش برشی خمیری. [۲۲]

۲. مدل ساختاری آبرفت

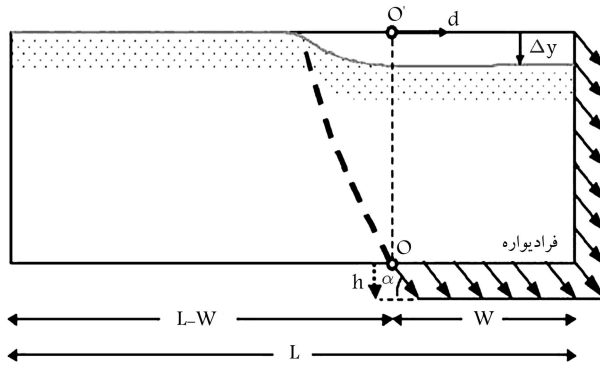
مطالعات آزمایشگاهی و عددی نشان داده است که رفتار خاک پس از گسیختگی، عاملی بسیار مهم در انتشار گسلش و موقعیت برون زد آن بر سطح زمین است. مدل

جدول ۱. خلاصه‌ی مشخصات مصالح مدل. [۲۲]

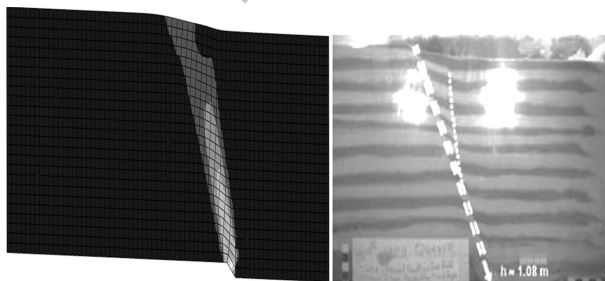
واحد	مشخصات مدل	مصالح
--	۰/۳	نسبت پواسون (ν)
KPa	۵	چسبندگی (c)
درجه	۳۹	زاویه‌ی اصطکاک نهایی (φ_p)
درجه	۳۰	زاویه‌ی اصطکاک باقیمانده (φ_{res})
درجه	۱۱	زاویه‌ی اتساع نهایی (ψ_p)
--	۰/۲۱۵	کرنش برشی خمیری (γ_f^p)
(KN/m ²)	۱۷/۶۴	وزن مخصوص خشک خاک (γ)
--	۰/۵	ضریب فشار خاک در حالت سکون (k_0)

جدول ۲. خلاصه‌ی ابعاد مدل. [۲۲]

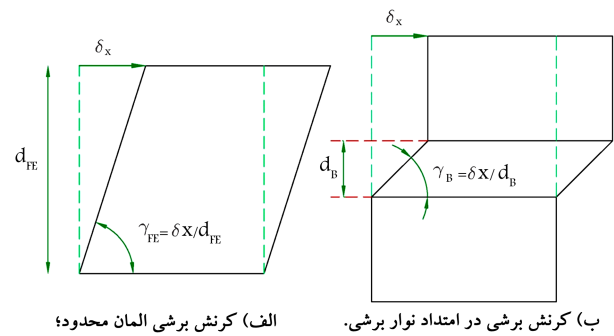
واحد	نرمال	ابعاد
--	۱۰۰	شتاب گریز از مرکز (g)
(%)	۸۰	Dr
(m)	۲۵	H
(m)	۶۸	L
(m)	۲۰	W
(m)	۲	h _{max}
--	۶۰	α



شکل ۳. پارامترها و ابعاد آزمایش گریز از مرکز. [۲۲]



شکل ۴. نمایش کرنش برشی خمیری در انتشار گسل نرمال.



شکل ۲. شرایط برش ساده. [۲۲]

در شرایط پیش از تشکیل نوار برشی، رابطه‌ی ۴ یک ساده‌سازی منطقی است و بعد از شکل‌گیری نوار برشی، کرنش برشی γ_B مطابق شکل ۲ به طور قابل توجهی بزرگ‌تر می‌شود (رابطه‌ی ۵):

$$\gamma_B = \frac{\delta_x}{d_B} \quad (5)$$

نسبت بین کرنش برشی محاسبه‌شده از المان محدود و کرنش برشی واقعی (λ) به صورت رابطه‌ی ۶ تعریف شده است:

$$\lambda = \frac{\gamma_B}{\gamma_{FE}} = \frac{\delta_x / d_B}{\delta_x / d_{FE}} = \frac{d_{FE}}{d_B} \quad (6)$$

بنابراین با تقسیم γ_f^p به λ ، γ_{FE} به صورت رابطه‌ی ۷ با کرنش واقعی همساز می‌شود:

$$\gamma_f^p = \gamma_p^p + \frac{\delta_{X_f} - \delta_{X_p}}{16d_0} \frac{16d_0}{d_{FE}} = \frac{\delta_{X_f} - \delta_{X_p}}{D} + \frac{\delta_{X_f} - \delta_{X_p}}{d_{FE}} \quad (7)$$

۳. صحت‌سنجی مدل عددی در میدان آزاد

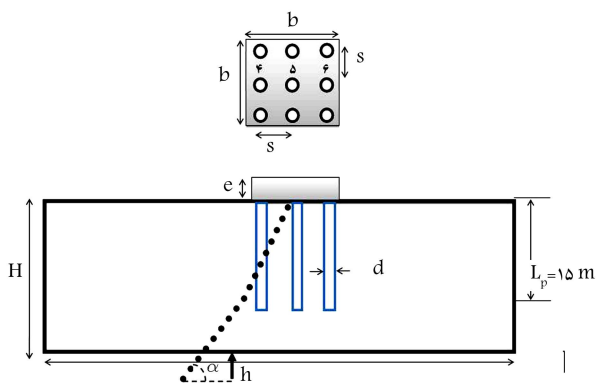
در این پژوهش، به منظور صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی عددی در شرایط میدان آزاد و بدون حضور فونداسیون، داده‌های آزمایش گریز از مرکز انجام‌شده در دانشگاه Dundee [۲۲] استفاده شده است. در آزمایش گریز از مرکز، گسل نرمال با زاویه‌ی $\alpha = 60^\circ$ به خاک خشک با چگالی نسبی ۸۰٪ اعمال شده است. پارامترها و ابعاد خاک استفاده‌شده در آزمایش، در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده‌اند.

همچنین معرفی پارامتری ابعاد و شرایط مرزی مدل آزمایشگاهی مطابق شکل ۳ است. در این مدل‌سازی، دوگام^۳ تعریف شده است. درگام اول، تنش‌های ژئواستاتیکی برجا به تعادل رسیده‌اند و درگام دوم، با ایجاد حرکت در مرزهای بلوک محرک^۴، حرکت گسل شبیه‌سازی شده است. از مدل رفتاری موهر-کولمب و کرنش نرم‌شونده^۵ استفاده شده است. [۲۲]

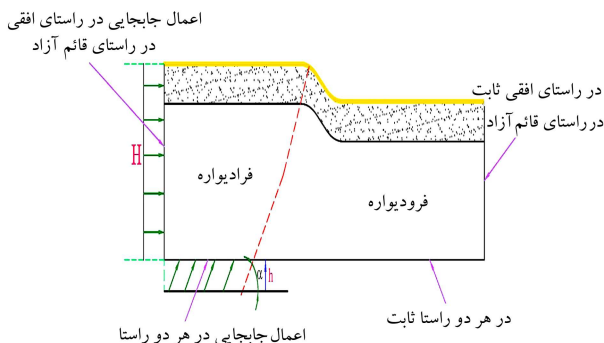
۱.۳. مقایسه‌ی کرنش برشی خمیری

در شکل ۴، منش تغییرشکل یافته‌ی آنالیز عددی و مدل آزمایشگاهی با استفاده از کرنش برشی خمیری انتشار یافته نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نتایج انطباق خوبی با یکدیگر دارند.

اختلاف کوچک بین تغییرشکل‌های اعمال شده (h) در آنالیز المان محدود (۱) $h = 1.08$ و در آزمایش گریز از مرکز ($h = 1.08$) می‌تواند قابل قبول باشد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در مدل آزمایشگاهی، گسل ثانویه‌ی تشکیل شده است، که در مدل عددی وجود این گسل پیش‌بینی نشده است.



شکل ۶. نمودار شماتیک گسل معکوس در برخورد با گروه شمع با جابه‌جایی گسل h .



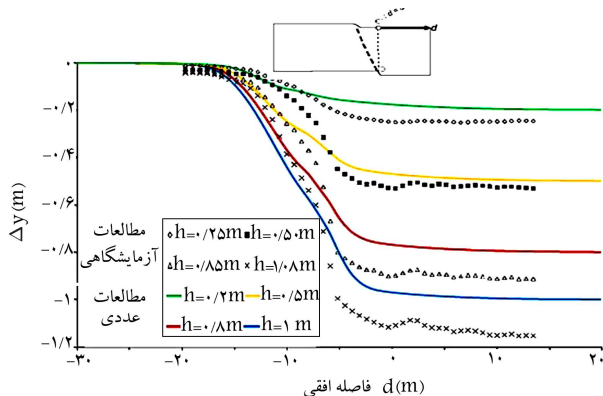
شکل ۷. شرایط مرزی استفاده‌شده در آنالیز عددی.

- اعمال بار مرده‌ی سازه روی پی؛
- اعمال جابه‌جایی گسلش.

شرایط مرزی مدل عددی مطابق شکل ۷ معرفی شده است. پروفیل زمین مفروض، از یک لایه‌ی خاک قرارگرفته بر روی بستر سنگی صلب تشکیل و طول و ارتفاع مدل، براساس نتایج مطالعات بهینه‌یابی ابعاد مدل عددی مطابق شکل مذکور انتخاب شده است. صفحه‌ی گسل کاملاً در بستر سنگی تا نقطه‌ی حد فاصل تماس با لایه‌ی خاک قرارگرفته است، به طوری که منحصراً روی انتشارگسلش درون لایه‌ی خاکی به حالت یک بانده برشی خمیری منتشرشونده به سمت بالا تمرکز و فرض شده است که سطح مشترک خاک بستر سنگی و زمین، در ابتدا مسطح و افقی هستند. مرز پایین به دو قسمت تقسیم شده است، که یکی ثابت باقی می‌ماند و دیگری حرکت فرادواره‌ی گسل را دنبال می‌کند. در این روش فرض شده است که لایه‌ی خاکی ذاتاً و کاملاً به بستر سنگی پیوسته است. این فرض از آنجایی که سطوح تماس مصالح خاکی بیشتر زبر هستند و این زبری به طور کلی از لغزش جلوگیری می‌کند، کاملاً واقع‌گرایانه است. در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده از هر تأثیری ناشی از انتشارگسلش در بستر سنگی صرف‌نظر شده است.

۵. نتایج آنالیز

به منظور بررسی اثر تغییر موقعیت گسل در این بخش موقعیت‌های 10° ، 15° ، 20° ، 30° ، 45° ، 60° ، 75° ، 90° مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. ذکر این نکته حائز اهمیت است که در هر ۳ موقعیت از ۲٪ فولاد برای شمع‌ها استفاده شده است. همچنین میزان تغییرمکان پایه‌ی اعمالی در هر ۳ موقعیت از 1% تا 5% h/H در نظر گرفته شده است، که در اینجا نتایج برای $S = 10^\circ$ با جزئیات بررسی شده است.



شکل ۵. مقایسه‌ی جابه‌جایی قائم سطح زمین (Δy) ، در مدل آزمایشگاهی و آنالیز عددی برای جابه‌جایی گسل $h = 0.2$ m تا $h = 1$ m.

۲.۳. مقایسه‌ی جابه‌جایی در سطح زمین

مطابق شکل ۵، انطباق خوبی بین نتایج مشاهده می‌شود. اختلاف اندک موجود به دلیل وجود خط گسل ثانویه در مدل آزمایشگاهی و عدم پیش‌بینی گسل ثانویه‌ی مذکور در مدل عددی است.

۴. مدل عددی آبرفت - شمع - گسلش

به منظور انجام مطالعات عددی، مدل‌سازی گسلش معکوس و پی به صورت سه‌بعدی صورت گرفته است. مطابق شکل ۶، این پی شامل یک گروه شمع 3×3 است، که با شمع‌های بتنی مسلح به قطر $d = 1$ m و طول $L_p = 15$ m لحاظ شده است، به طوری که فاصله‌ی محور به محور شمع‌ها، ۴ برابر قطر شمع شده است. بتن مقطع شمع با مقدار فولاد ثابت $\rho = 2\%$ مسلح شده است. سرشمع به صورت یک قطعه صلب با ابعاد $b = 10$ m مدل شده است، که اتصال آن با شمع‌ها به صورت صلب در نظر گرفته شده است. عمق لایه‌ی خاک $H = 20$ m در نظر گرفته شده است، که فاصله‌ی بین نوک شمع و انتهای لایه‌ی خاک برابر با ۵ متر است.

مصالح خاک، ماسه‌ی شل با مدل کشسان‌خمیری، معیار تسلیم موهر - کولمب اصلاح‌شده و با نرم‌شدگی کرنشی مدل شده است. برای چسبندگی، مقدار ۵ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است. براساس آزمایش‌های برش مستقیم، زاویه‌ی اصطکاک برابر با 32° درجه و رفتار کشسان خاک با مدول یانگ ثابت در عمق خاک و ضریب پواسون 0.3 است. در مدل‌سازی محیط پیوسته‌ی خاک، از المان‌های هشت‌گه‌ی مکعبی با ابعاد $d_{FE} \leq 1$ m استفاده شده و در مجاورت شمع‌ها، ابعاد المان خاک برابر $d_{FE} = 0.5$ m بوده است.

شمع‌ها با المان‌های سازه‌ی تیر مدل و با المان‌های پیوسته‌ی هشت‌گه‌ی مکعبی با سختی تقریباً صفر محدود شده‌اند. گره‌های المان‌های تیر، که نمایش‌گر شمع‌ها هستند، به طور صلب با گره‌های المان جامد^۷ مجازی در همان ارتفاع به طور نظیر به نظیر متصل شده‌اند. بنابراین هر مقطع شمع به صورت یک دیسک صلب عمل می‌کند. این روش مدل‌سازی اجازه می‌دهد نیروی داخلی شمع‌ها مستقیماً از المان‌های تیر به دست آید. همچنین در نظر گرفتن اندرکنش شمع و خاک با استفاده از المان‌های مجازی اطراف تیر میسر شده است. این مدل‌سازی در ۳ گام انجام شده است:

- اعمال وزن خاک برای ژئواستاتیک اولیه؛

۱.۵. حالت $S = 5 \text{ m}$

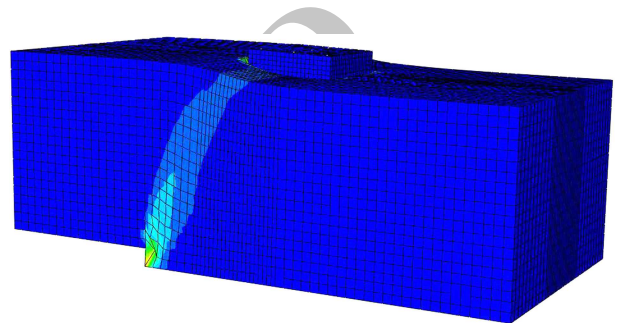
شمع ۶، کمتر از ۳ مگانیوتن - متر بوده است. همان طور که در شکل ۹ الف مشاهده می شود، در شمع های کناری افزایش جابه جایی گسلش همواره باعث افزایش نیروی داخلی شمع ها شده و با بالا رفتن جابه جایی گسلش، از نرخ این افزایش کاسته شده است، که نشان دهنده ی عدم به کارگیری کامل جابه جایی گسلش در افزایش نیروی داخلی شمع ها بوده است. لیکن در شمع های میانی، افزایش جابه جایی گسلش تا یک مقدار مشخص باعث افزایش نیروی داخلی شمع ها شده و فراتر از آن مقدار، تأثیری مشاهده نشده است. در شکل ۹ ب، نمودار ظرفیت مقطع شمع برای بحرانی ترین المان شمع ها رسم شده است.

بررسی ها نشان داده است که شمع های کناری، ظرفیت مشابهی داشته و به ازا ی پیشینه ی لنگر خمشی فراتر از ۲ مگانیوتن متر، انحنایی در حدود $1/10^6$ را متحمل شده اند. شمع های ردیف میانی به نسبت دوردیف دیگر، ظرفیت بسیار کمی داشته اند (به ازا ی پیشینه ی لنگر خمشی فراتر از 700 کیلونیوتن - متر، انحنایی در حدود $1/10^6$ را تحمل کرده است).

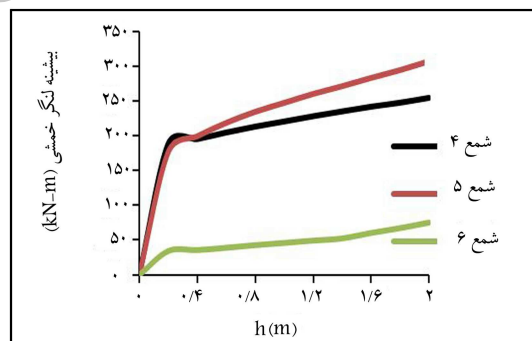
۲.۵. حالت $S = 10 \text{ m}$

در این حالت نیز مانند حالت قبل، مطابق شکل ۱۰ مشاهده می شود که گسل در میدان آزاد با گروه شمع برخورد کرده است، با این تفاوت که در این حالت گسلش در نقطه یی به سطح زمین رسیده است که برخوردی با سرشمع نداشته و در فاصله یی دورتر از گوشه ی راست سرشمع به سطح زمین رسیده است. وجود شمع هایی که به صورت محوری بارگذاری شده اند، این نتایج را به دنبال داشته است: ۱. مسیر گسل را مقداری به سمت راست منحرف ساخته است، ۲. گسلش را در ناحیه یی بین شمع ها پراکنده ساخته است. جابه جایی افقی و دوران قابل توجهی در سرشمع رخ داده و دوران گروه شمع به سمت راست فرودپواره، موجب ایجاد فشارهای جانبی از نوع مقاوم در خاک قسمت فرودپواره شده است. خاک زیر پی به دلیل دوران پی، در معرض کرنش قابل توجهی قرار گرفته و گسیختگی خاک سمت فرودپواره، انحراف مسیر گسلش به سمت راست را تسهیل بخشیده است. در جابه جایی گسلش 0.4 متر، نوار کرنش برشی تشکیل شده و تقریباً به صورت قائم به طرف سطح زمین انتشار یافته است، در جابه جایی 0.8 متر، این نوار برشی بسط یافته و به سمت فرودپواره منحرف شده است. گسلش به فاصله یی از گوشه ی راست سرشمع به سطح زمین برخورد کرده و به آن نیرو وارد کرده است و در نتیجه ی این نیرو، گروه شمع به سمت راست (فرودپواره) دوران کرده است. این رفتار گروه شمع با انتشار گسلش ترکیب شده و یک مکانیسم پیچیده را ایجاد کرده است، که از گسیختگی کرنشی

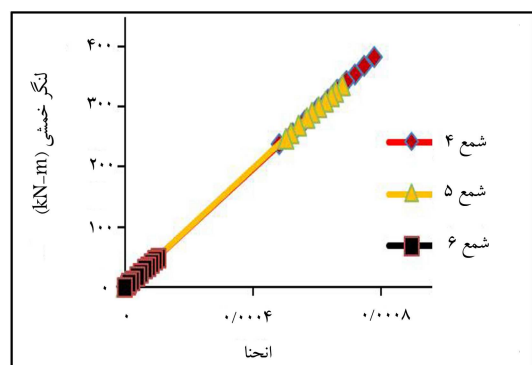
در این حالت گروه شمع در موقعیتی قرار می گیرد که خط گسل در میدان آزاد در وسط سرشمع به سطح زمین رسیده و بیشترین گروه شمع در فرودپواره واقع شده است (شکل ۸). مسیر گسلش، نسبت به میدان آزاد کمتر از 5 متر به سمت چپ سرشمع منحرف شده و بنابراین، پهنای فرادپواره نسبت به میدان آزاد کمتر شده است. در جابه جایی گسلش 0.4 متر، تغییر شکل خاک وسیع شده و یک نوار برشی باریک قابل مشاهده است، که به صورت قائم به طرف سطح زمین انتشار یافته و با افزایش جابه جایی، پهنای این نوار افزایش یافته و به کف سرشمع نیرو وارد کرده است. این نیرو بسیار اندک بوده و در نتیجه، دوران ناچیزی در گروه شمع مشاهده شده است. در تمامی شمع ها، پیشینه ی لنگر خمشی در محل اتصال شمع به سرشمع رخ داده است، که مطابق شکل ۹ الف، این مقدار پیشینه ی لنگر، در شمع ۴، در حدود 3 مگانیوتن - متر؛ در شمع های ردیف میانی، کمتر از 1 مگانیوتن - متر؛ و در انتها در



شکل ۸. تغییر شکل مدل المان محدود در موقعیت $S = 5 \text{ m}$ ، با جابه جایی گسلش کل $h = 2 \text{ m}$.

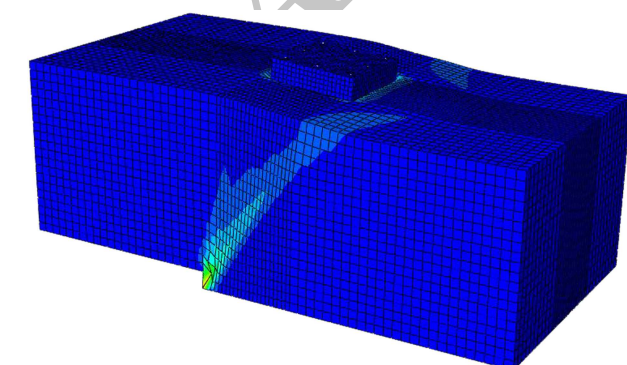


الف) پیشینه ی لنگر خمشی در شمع ها

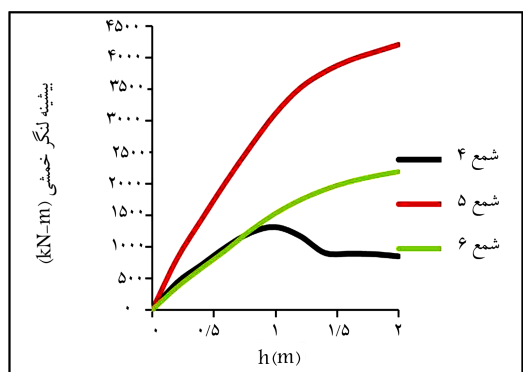


ب) ظرفیت خمش مقطع شمع ها ($S=5 \text{ m}$)

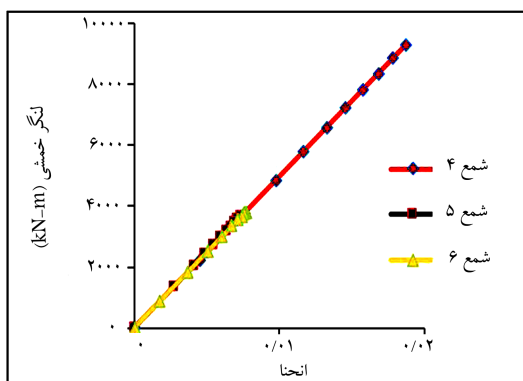
شکل ۹. لنگر داخلی شمع ها در موقعیت $S = 5 \text{ m}$.



شکل ۱۰. تغییر شکل مدل المان محدود در موقعیت $S = 10 \text{ m}$ با جابه جایی گسلش کل $h = 2 \text{ m}$.



الف) بیشینه ی لنگر خمشی در شمع ها؛



ب) ظرفیت خمشی مقطع شمع ها ($S=10\text{ m}$)؛

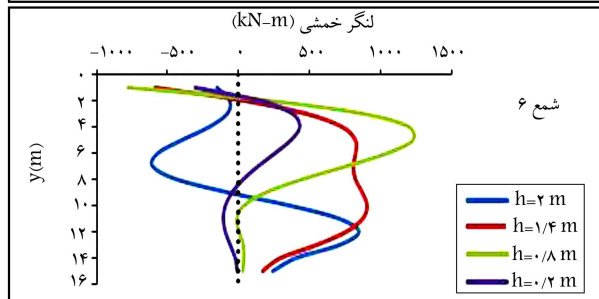
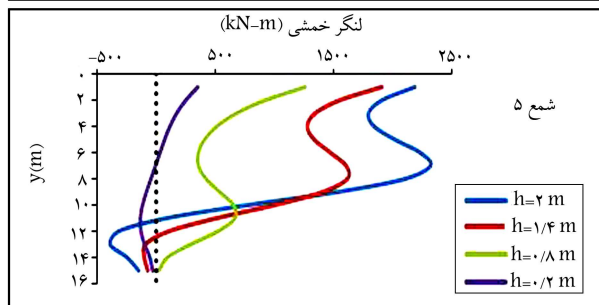
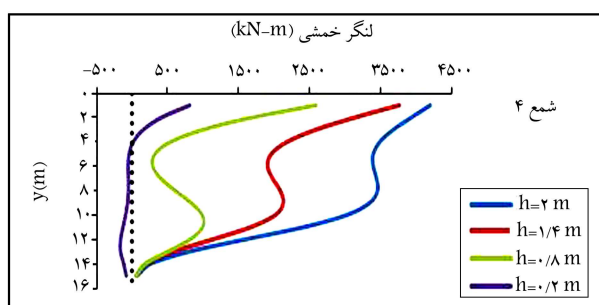
شکل ۱۲. لنگر داخلی شمع ها در موقعیت $S = 10\text{ m}$.

(شماره ی ۴) در جابه جایی گسل ۲ متر، بیشینه ی لنگری در حدود ۵ مگانیوتن - متر را متحمل شده اند. بیشینه ی لنگر در ردیف میانی (شماره ی ۵)، فراتر از ۲ مگانیوتن - متر و در شمع های سمت فرادیواره فراتر از ۱ مگانیوتن - متر بوده است. در شمع ۶ مشاهده می شود که در جابه جایی گسلش بیشتر از ۱ متر، بیشینه ی لنگر خمشی با افزایش جابه جایی گسلش کاهش یافته است. این کاهش می تواند به این دلیل باشد که با افزایش جابه جایی و بسط نوار کرنش برشی خمیری، محدوده ی وسیع تری از شمع در محدوده ی این نوار قرار گرفته و با تغییر جهت لنگر خمشی از میزان لنگر در جابه جایی گسلش، بیشتر کاسته شده است.

در شکل ۱۲ ب، ظرفیت مقطع المان های شمع مورد بررسی قرار گرفته است. نمودار لنگر انحنا به صورت خطی است که شیب ثابت نمودار نشان دهنده ی سختی مقطع شمع است. بیشترین لنگر خمشی در شمع سمت فرادیواره، به ازاء انحنایی در حدود 0.09 m^2 ، در شمع ۵ (ردیف میانی) به ازاء انحنایی فراتر از 0.04 m^2 ، و در آخر در شمع های سمت فرادیواره، در انحنایی کمتر از 0.02 m^2 ایجاد شده است.

۳.۵. حالت $S = 15\text{ m}$

در شکل ۱۳ مشاهده می شود که گسل در میدان آزاد در فاصله ی ۵ متری از سمت راست سرشمع به سطح زمین رسیده است. شمع ها با حضورشان و بارهای منتقل شده، مسیر گسل را به دلیل نشست های نابرابر و جابه جایی های بزرگ غیر یکنواخت، پراکنده و اندکی به سمت راست منحرف ساخته اند. ناحیه ی تحت کرنش برشی در سمت راست پی، با توسعه ی گوهی فعال در نتیجه ی دوران ساعتگرد پی، افزایش یافته است. دوران گروه شمع به سمت راست فرادیواره، فشارهای جانبی از نوع مقاوم را



شکل ۱۱. توزیع لنگر خمشی در شمع ها با رفتار کشسان در گروه شمع 3×3 ، $S = 10\text{ m}$.

برشی تحت گسلش و ظرفیت باربری خاک تشکیل شده است، که این گسیختگی در فرادیواره با کاهش تنش و رسیدن به پوش گسیختگی رخ داده است.

توزیع لنگر خمشی شمع ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. شمع های سمت فرادیواره با حرکت فرادیواره به سمت داخل و بالا کشیده شده و به عنوان یک نتیجه ی بسیار مهم، بیشترین لنگر خمشی در محل اتصال شمع به سرشمع ایجاد و این ردیف شمع بیشترین لنگر خمشی را متحمل شده اند. شمع های دو ردیف دیگر، که فقط بخشی از آنها در فرادیواره واقع شده اند، نسبت به شمع های سمت فرادیواره، لنگر خمشی کمتری را متحمل شده اند. شمع های سمت فرادیواره (شماره ی ۶) در نزدیکی وسط طول شمع تحت فشار قرار گرفته است. دوران ساعتگرد قابل توجهی در گروه شمع اتفاق افتاده است، که تنش هایی را در شمع ها، به همراه تسلیم خاک اطراف شمع ها در بخش وسیعی از طول آنها ایجاد کرده است.

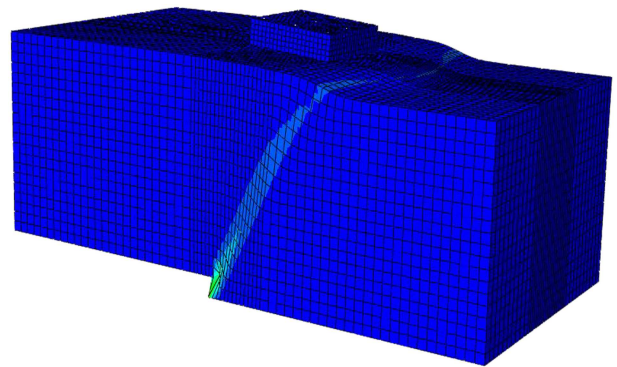
ردیف شمع های سمت فرادیواره به موجب حرکت رو به بالای بلوک محرک (فرادیواره) به طرف بالا کشیده شده اند، در حالی که ردیف شمع های سمت فرادیواره در مقابل این حرکت مقاومت کرده و در بلوک مقاوم (فرادیواره) ثابت قرار گرفته اند. به عنوان یک نتیجه، ردیف شمع های سمت فرادیواره به سمت بالا و شمع های سمت فرادیواره به طرف داخل کشیده شده اند. باید دقت داشت که الگوی توزیع لنگر خمشی با عمق، روند مشخصی را دنبال نکرده اند. بیشینه ی لنگر خمشی برای شمع های ۴ و ۵، در بالا و برای شمع ۶ (ردیف عقب)، در عمقی تقریباً برابر با ۶ متر ایجاد شده است. همان طور که در شکل ۱۲ الف مشاهده می شود، شمع های سمت فرادیواره

در خاک قسمت فرودپواره ایجاد کرده است، همچنین خاک زیر پی به دلیل دوران پی، در معرض کرنش قابل توجهی قرار گرفته و گسیختگی خاک سمت فرودپواره، انحراف مسیر گسلش به سمت راست را تسهیل بخشیده است. در جابه‌جایی گسلش ۴/۰ متر، نوار کرنش برشی تشکیل شده و تقریباً به صورت قائم به طرف سطح زمین انتشار یافته است. در جابه‌جایی ۰/۶ متر، نوار برشی مذکور بسط یافته و به سمت فرودپواره منحرف شده است و در $h = 1 \text{ m}$ ، گسلش به فاصله‌ی از گوشه‌ی راست سرشمع به سطح زمین برخورد کرده است. گسلش به سرشمع نیرو وارد کرده و در نتیجه‌ی آن، گروه شمع به سمت راست (فرودپواره) دوران کرده است. این رفتار گروه شمع با انتشار گسلش ترکیب شده و یک مکانیزم پیچیده را ایجاد کرده است، که از گسیختگی کرنشی برشی تحت گسلش و ظرفیت باربری خاک تشکیل شده است.

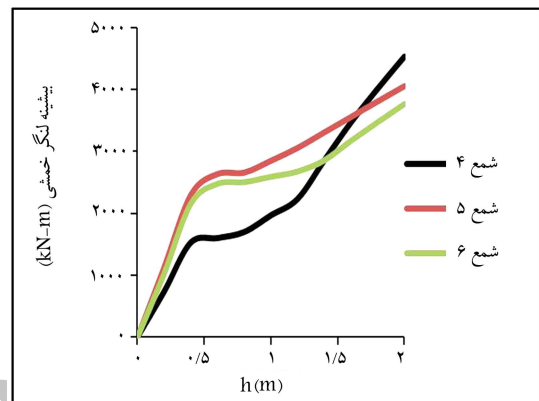
تمامی شمع‌ها در عمقی از شمع تحت فشار قرار گرفته‌اند و بیشینه‌ی لنگر خمشی در آن عمق ایجاد شده است، که این عمق در شمع ۴، برابر ۵ متر و در شمع‌های ۵ و ۶، برابر ۱۰ متر بوده است. در شکل ۱۴ الف مشاهده می‌شود که بیشینه‌ی لنگر خمشی در تمامی شمع‌ها تقریباً برابر و در حدود ۴ مگانیوتن - متر بوده است. در شکل ۱۴ ب ظرفیت مقطع شمع نشان داده شده است، که مطابق آن، شمع‌های ۴ و ۵ با بیشینه‌ی لنگر خمشی مشابه (۴ مگانیوتن - متر) انحنای مشابهی برابر با ۰/۰۰۸ را متحمل شده‌اند. شمع ۶، به ازاء بیشینه‌ی لنگر خمشی برابر با ۴ مگانیوتن - متر، انحنایی برابر با ۰/۰۰۹ را تحمل کرده است.

۶. نتیجه‌گیری

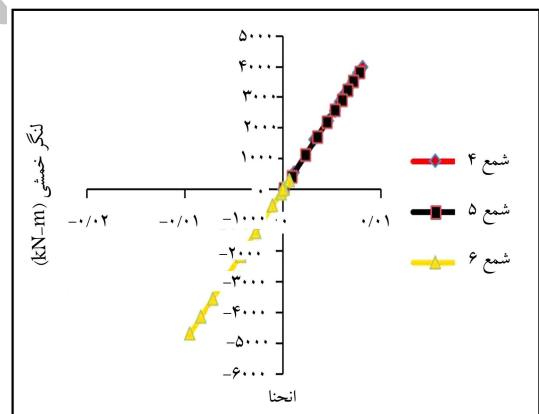
همان‌طور که بیان شده است، شمع‌ها در حالت کشسان با حضورشان و بارهای منتقل شده، مسیر گسل را به دلیل نشست‌های نابرابر و جابه‌جایی‌های بزرگ غیریکنواخت پراکنده می‌سازند و اندکی انحراف در مسیر گسل به وجود می‌آورند. بدترین موقعیت برای گروه شمع زمانی است که خط گسل در میدان آزاد در گوشه‌ی راست سرشمع برخورد می‌کند ($S = 10 \text{ m}$). در این حالت، جابه‌جایی افقی و دوران سرشمع بزرگی متناسب با لنگر خمشی بزرگ شمع‌ها ایجاد می‌شود. در حالتی که برون‌زد گسلش در فاصله‌ی دورتر از سمت راست سرشمع اتفاق افتد ($S = 15 \text{ m}$)، نیز شمع‌ها لنگر خمشی قابل توجهی متحمل می‌شوند. در حالت دیگر، زمانی که خط انتشار گسل به شمع‌های سمت فرادپواره برخورد می‌کند ($S = 5 \text{ m}$)، مسیر گسلش توسط شمع‌ها و در امتداد آن‌ها به سمت بالا منحرف می‌شود و به این ترتیب گروه شمع را در بلوک مقاوم (فرودپواره) بدون آسیب ترک می‌کند. در واقع، در این موقعیت سرشمع جابه‌جایی افقی و قائم بسیار کمی و همچنین شمع‌ها نیز تنش خمشی کوچکی را متحمل می‌شوند.



شکل ۱۳. تغییر شکل مدل المان محدود در موقعیت $S = 15 \text{ m}$ ، با جابه‌جایی گسلش کل $h = 2 \text{ m}$.



الف) بیشینه‌ی لنگر خمشی در شمع‌ها؛



ب) ظرفیت خمشی مقطع شمع‌ها ($S = 15 \text{ m}$)؛

شکل ۱۴. لنگر داخلی شمع‌ها در موقعیت $S = 15 \text{ m}$.

پانویس‌ها

1. Mohr-Coulomb
2. strain softening
3. step

4. hanging wall
5. strain softening
6. eight-noded elements
7. solid

منابع (References)

1. Bray, J.D., Ashmawy, A., Mukhopadhyay, G. and Gath, E.M. "Use of geosynthetics to mitigate earthquake fault rupture propagation through compacted fill", *Proceedings of Geosynthetics' 93 Conference*, **1**, pp. 379-392 (30 March - 1 April 1993).
2. Lazarte C.A., Bray, J.D., Johnson, A.M. and Lemmer, R.E. "Surface breakage of the 1992 landers earthquake and its effects on structures", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**(3), pp. 547-561 (June 1994).
3. Dong, J.J., Wang, C.D., Lee, C.T., Liao, J.J. and Pan, Y.W. "The influence of surface ruptures on building damage in the 1999 Chi-chi earthquake: A case study in fengyuan city", *Engineering Geology*, **71**(1-2), pp. 157-179 (2004).
4. Kelson, K. I.; Kang, K.H.; Page, W.D.; Lee, C.T. and Cluff, L.S. "Representative styles of deformation along the chelungpu fault from the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake: Geomorphic characteristics and responses of man-made structures", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **91**(5), pp. 930-952 (October 2004).
5. Zeng, Y. and Chen, Ch.-H. "Fault rupture process of the 20 September 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake", *Bull. Seism. Soc. Am.*, **91**(5), pp. 1088-1098 (2001).
6. Akyuz, H.S., Hartleb, R.D., Barka, A.A., Altunel, E., Sunal, G., Meyer, B. and Armijo, R. "Surface ruptures and slip distribution of the 12 November 1999 Duzce earthquake (M 7.1), North Anatolian fault, Bolu, Turkey", *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**(1), pp. 61-66 (2002).
7. Hartleb, R.D., Dawson, T.J., Tucker, A.Z., Dolan, J.F., Rockwell, T.K., Yerli, B., Dikbas, A., Akir, Z.C., Güner, T., Uslu, O. and Barka, A.A. "Surface rupture and slip distribution along the Düzce strand of the 17 August 1999 Izmit, Turkey, earthquake", *EOS*, **33**, F-675 (1999).
8. Lettis, W., Bachhuber, J., Witter, R., Brankman, C., Randolph, C.E., Barka, A., Page, W.D. and Kaya, A. "Influence of releasing step-overs on surface fault rupture and fault segmentation: Examples from the 17 August 1999 Izmit earthquake on the North Anatolian Fault, Turkey", *Bulletin of The Seismological Society of America*, **92**(1), pp. 19-42 (2002).
9. Aydin, A. and Kalafat, D. "Surface ruptures of the August 17 and November 12, 1999, Izmit, and Duzce Earthquakes in NW Anatolia, Turkey: Their tectonic and kinematic significance and the associated damage", *Seismological Society America Bulletin*, **92**(1), pp. 95-106 (2002).
10. Anastasopoulos, I. and Gazetas, G. "Foundation-structure systems over a rupturing normal fault: Part I. Observations after the Kocaeli 1999 earthquake", *Bulletin of Earthquake Engineering*, **5**(3), pp. 253-257 (August 2007).
11. Col, D.A. and Lade, P.V. "Influence zones in alluvium over dip-slip faults", *Journal of Geotechnical Engineering*, **110**(5), pp. 559-615 (1984).
12. Lade, P.V. and Col, D.A. "Multiple failure surfaces over dip-slip faults", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **110**(5), pp. 616-627 (1984).
13. Bray, J.D. "The effects of tectonic movements on stresses and deformations in earth embankments", Ph.D. Dissertation, Univ. of California at Berkeley, Berkeley, Calif. (1990).
14. Lin, M.L., Chung, C.F. and Jeng, F.S. "Deformation of overburden soil induced by thrust fault slip", *Engineering Geology*, **88**(1-2), pp. 70-89 (2006a).
15. Moosavi, S.M. "Foundation facilities for constructions on active strike slip faults", Ph.D. Thesis, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran (2010).
16. Fadaei, M. "Experimental and numerical investigation on geotechnical facilities for reducing reverse fault induced displacements", Ph.D. Thesis, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran (2013).
17. Anastasopoulos, I., Gazetas, G. and Apostolou, M. "Shallow and deep foundations under fault rupture or strong seismic shaking", *The Series Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, **6**, pp. 185-215 (2007).
18. Gazetas, G., Pecker, A., Faccioli, E., Paolucci, R. and Anastasopoulos, I. "Preliminary design recommendations for dip-slip fault-foundation interaction", *Bull. Earthquake Eng.*, **6**(4), pp. 677-678 (2008).
19. Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Drosos, V., Georgarakos, T. and Kourkoulis, R. "Design of bridges against large tectonic deformation", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **7**(4), pp. 345-368 (2008).
20. Ahmadi, F. "Effect of surface fault rupture on piles group", MSc Thesis, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran (2014).
21. Hashemi, M. "Effect of surface fault rupture on mat foundation", MSc Thesis, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran (2014).
22. Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Bransby, M.F., Davies, M.C.R. and El Nahas, A. "Fault rupture propagation through sand: Finite element analysis and validation through centrifuge experiments", *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133**(8), pp. 943-958 (2007a).