مهندسی عمران شریف (زمستان ۱۳۹۵)
دوره‌ی ۲-۳۲، شماره‌ی ۴/۱، ص. ۳۱-۳۸

Original Article

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 کالیفرنیاست. در اندک مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی اندرکنش گسلش نرمال و گروه شمع مشخص شده است که شمع‌ها به دلیل تبعیت از تغییرشکل‌های ناشی از گسلش و انتقال آن به سازه، اعمال تغییرمکان 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.

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

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،[۱و۲] اما عمده‌ی کارهای انجام‌شده 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 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:

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

در سال ۲۰۰۷،[۱۷] با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، یک مدل بزرگ مقیاس سه‌بعدی مورد تحلیل قرار گرفته است. این مدل یک گروه شمع ۳ × ۳ بوده است، که در نزدیکی گسل واقع شده است. در مطالعه‌ی 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 فرادیواره 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 به‌دست‌آمده از پژوهش‌های حاصل از پروژه‌ی QUAKER را به‌صورت توصیه‌هایی برای طراحی‌های مرتبط با گسلش مطرح ساخته‌اند: ۱. متصل‌کردن شمع‌ها به هم به وسیله‌ی سرشمع صلب، ۲. استفاده از ایده‌ی شمع ضعیف ـ سازه‌ی قوی (برخلاف فلسفه‌ی طراحی براساس ظرفیت باربری).

همچنین در سال ۲۰۰۸ پژوهشگران،[۱۹] به بررسی سیستم پل در مقابل گسلش پرداخته و برای مدل‌سازی سه‌بعدی در آباکوس از روش المان محدود استفاده کرده‌اند. در مطالعه‌ی ذکرشده، 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 ایجادشده در اثر اعمال گسلش، ۲. عملکرد شمع‌ها همچون تیر قائم دو سر مفصل.

تاکنون در مطالعات انجام‌شده 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 ساخته‌شده در محدوده‌ی خطر گسلش سطحی وجود دارد. از این میان می‌توان به مطالعات آزمایشگاهی و عددی انجام‌گرفته 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، پخش‌کردن تغییرمکان 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 درنظرگرفتن رفتار کشسان‌خمیری 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 به‌صورت یکنواخت‌تر توزیع می‌شود. در پژوهش دیگری در همان سال نیز نشان داده شده است که درنظرگرفتن انعطاف‌پذیری برای فونداسیون‌های گسترده، عملکرد آنها را در مقابل گسلش تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ به گونه‌یی که تنش‌ها و کرنش‌هایی که در فونداسیون ایجاد خواهد شد، در برخی موارد بیش از مقاومت فونداسیون است.[۲۱]

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 برون‌زد آن بر سطح زمین است. مدل رفتاری استفاده‌شده در مدل‌سازی گسلش، مدل موهر ـ کلمب[۱] با نرم‌شدگی کرنشی[۲] است. مطابق شکل ۱، با افزایش γ_{oct}، نرم‌شدگی کرنش به‌صورت کاهش زاویه‌ی اصطکاک φ_{mob} و زاویه‌ی اتساع ψ_{mob} معرفی شده است. برای $0 \le \gamma^p_{oct} < \gamma^p_f$، پارامترهای مذکور $(\psi_{mob}, \varphi_{mob})$ به‌صورت رابطه‌ی ۱ تعریف شده‌اند:

$$\begin{bmatrix} \varphi_{mob} = \varphi_p - \frac{\varphi_p - \varphi_{res}}{\gamma^p_f}\gamma^p_{oct} \\ \psi_{mob} = \psi_p \left(1 - \frac{\gamma^p_{oct}}{\gamma^p_f}\right) \end{bmatrix} \quad (1)$$

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

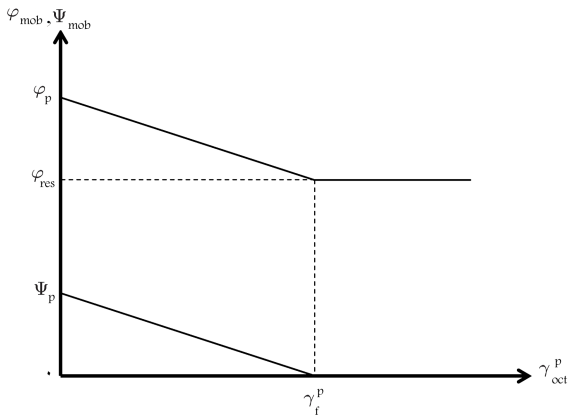
$$\gamma^p_p = \frac{\delta_{X_p} - \delta_{X_y}}{D} \quad (2)$$

در حالتی که نمونه‌ی خاک در ناحیه‌یی 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 تغییرشکل برشی خمیری در امتداد نوار برشی رخ داده است، در حالی که بخش دیگر خاک به‌صورت کشسان باقی مانده است.[۲۲] با فرض عرض نوار برشی d_B برابر با $16d_{50}$، که در آن d_{50} متوسط اندازه‌ی ذرات ماسه است، کرنش برشی خمیری در حالتی که نرم‌شدگی کامل شده باشد، بااستفاده از رابطه‌ی ۳ ارائه می‌شود:

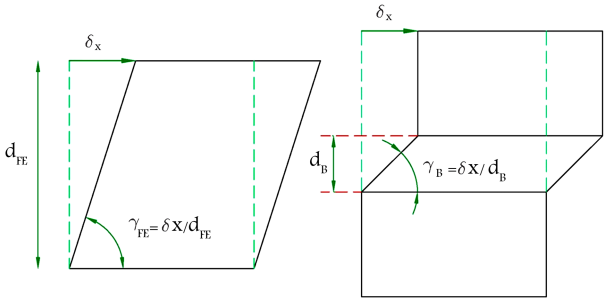
$$\gamma^p_f = \gamma^p_p + \frac{\delta_{X_f} - \delta_{X_p}}{16d_{50}} = \frac{\delta_{X_p} - \delta_{X_y}}{D} + \frac{\delta_{X_f} - \delta_{X_p}}{16d_{50}} \quad (3)$$

در صورتی که برای المان‌های ۴ و ۸ گره‌یی، 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 $(d_E = 16d_{50})$ شود. البته در تعریف مذکور، d_B فقط برای حالتی کاربردی 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 به‌دست 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]



ب) کرنش برشی در امتداد نوار برشی. الف) کرنش برشی المان محدود؛

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):

$$\gamma_B = \frac{\delta_x}{d_B} \qquad (۵)$$

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

$$\lambda = \frac{\gamma_B}{\gamma_{FE}} = \frac{\delta_x/d_B}{\delta_x/d_{FE}} = \frac{d_{FE}}{d_B} \qquad (۶)$$

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

$$\gamma_f^p = \gamma_p^p + \frac{\delta_{X_f} - \delta_{X_p}}{16 d_{50}} \frac{16 d_{50}}{d_{FE}} = \frac{\delta_{X_p} - \delta_{X_y}}{D} + \frac{\delta_{X_f} - \delta_{X_p}}{d_{FE}} \qquad (۷)$$

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 در گام دوم، با ایجاد حرکت در مرزهای بلوک محرک[۴]، حرکت گسل شبیه‌سازی شده است. از مدل رفتاری موهر ـ کولمب و کرنش نرم‌شونده[۵] استفاده شده است.[۲۲]

۱.۳. مقایسه‌ی کرنش برشی خمیری

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

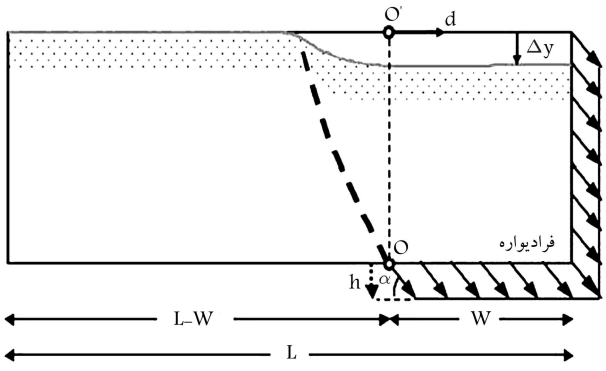
اختلاف کوچک بین تغییرشکل‌های اعمال‌شده (h) در آنالیز المان محدود (۱ = h) و در آزمایش گریز از مرکز (۱٫۰۸ = h) می‌تواند قابل قبول باشد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در مدل آزمایشگاهی، گسل ثانویه‌یی تشکیل شده است، که در مدل عددی وجود این گسل پیش‌بینی نشده است.

جدول ۱. خلاصه‌ی مشخصات مصالح مدل.[۲۲]

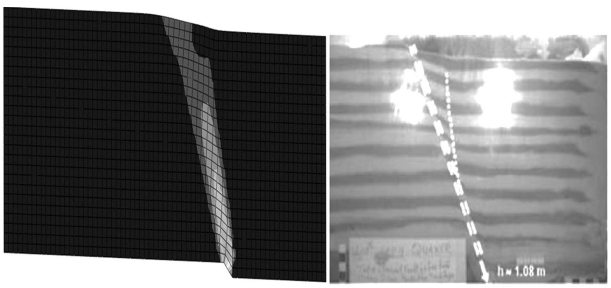
مصالح	مشخصات مدل	واحد
نسبت پواسون (υ)	۰٫۳	--
چسبندگی (c)	۵	KPa
زاویه‌ی اصطکاک نهایی (φ_p)	۳۹	درجه
زاویه‌ی اصطکاک باقیمانده (φ_{res})	۳۰	درجه
زاویه‌ی اتساع نهایی (ψ_p)	۱۱	درجه
کرنش برشی خمیری (γ_f^p)	۰٫۲۱۵	--
وزن مخصوص خشک خاک (γ)	۱۷٫۶۴	(KN/m^3)
ضریب فشار خاک در حالت سکون (k_0)	۰٫۵	--

جدول ۲. خلاصه‌ی ابعاد مدل.[۲۲]

ابعاد	نرمال	واحد
شتاب گریز از مرکز (g)	۱۰۰	–
Dr	۸۰	(٪)
H	۲۵	(m)
L	۶۸	(m)
W	۲۰	(m)
h_{max}	۲	(m)
α	۶۰	–

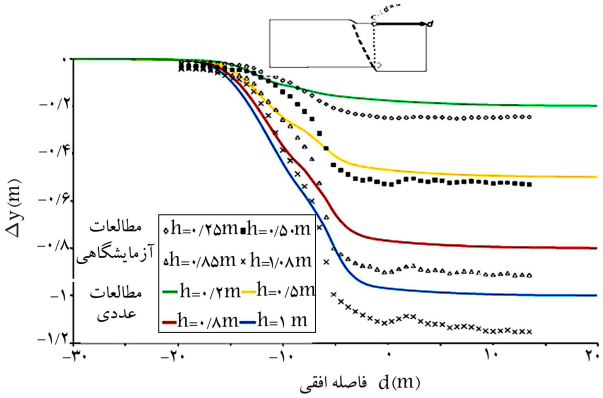


شکل ۳. پارامترها و ابعاد آزمایش گریز از مرکز.[۲۲]



ب) آزمایش گریز از مرکز.[۲۲] الف) مدل عددی؛

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



شکل ۵. مقایسه‌ی جابه‌جایی قائم سطح زمین (Δ_y)، در مدل آزمایشگاهی و آنالیز عددی برای جابه‌جایی گسل $h = ۰/۲\ m$ تا $h = ۱\ m$.

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.

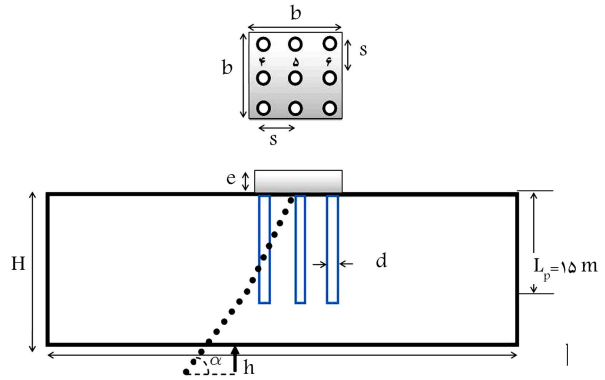
۴. مدل عددی آبرفت ـ شمع ـ گسلش

به منظور انجام مطالعات عددی، مدل‌سازی گسلش معکوس و پی به‌صورت سه‌بعدی صورت گرفته است. مطابق شکل ۶، این پی شامل یک گروه شمع ۳×۳ است، که با شمع‌های بتنی مسلح به قطر $d = ۱\ m$ و طول $L_p = ۱۵\ m$ لحاظ شده است، به‌طوری که فاصله‌ی محور به‌محور شمع‌ها، ۴ برابر قطر شمع شده است. بتن مقطع شمع با مقدار فولاد ثابت $\rho = ٪۲$ مسلح شده است. سرشمع به‌صورت یک قطعه صلب با ابعاد $b = ۱۰\ m$ مدل شده است، که اتصال آن با شمع‌ها به‌صورت صلب در نظرگرفته شده است. عمق لایه‌ی خاک $H = ۲۰\ m$ در نظرگرفته شده است، که فاصله‌ی بین نوک شمع و انتهای لایه‌ی خاک برابر با ۵ متر است.

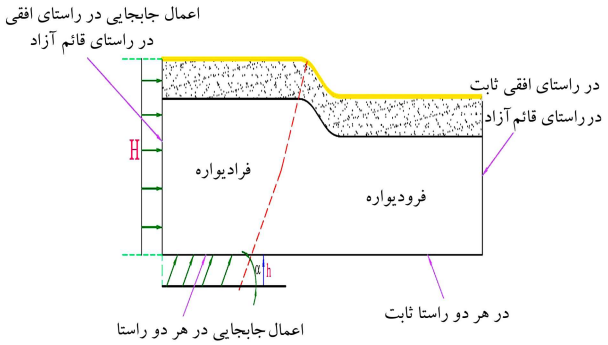
مصالح خاک، ماسه‌ی شل با مدل کشسان‌خمیری، معیار تسلیم موهر ـ کولمب اصلاح‌شده و با نرم‌شدگی کرنشی مدل شده است. برای چسبندگی، مقدار ۵ کیلوپاسکال در نظرگرفته شده است. براساس آزمایش‌های برش مستقیم، زاویه‌ی اصطکاک برابر با ۳۲ درجه و رفتار کشسان خاک با مدول یانگ ثابت در عمق خاک و ضریب پواسون ۰/۳ است. در مدل‌سازی محیط پیوسته‌ی خاک، از المان‌های هشت‌گره‌یی[۶] مکعبی با ابعاد $d_{FE} \leq ۱\ m$ استفاده شده و در مجاورت شمع‌ها، ابعاد المان خاک برابر $d_{FE} = ۰/۵\ m$ بوده است.

شمع‌ها با المان‌های سازه‌یی تیر مدل و با المان‌های پیوسته‌ی هشت‌گره‌یی مکعبی با سختی تقریباً صفر محدود شده‌اند. گره‌های المان‌های تیر، که نمایش‌گر شمع‌ها هستند، به‌طور صلب با گره‌های المان جامد[۷] مجازی در همان ارتفاع به طور نظیر به نظیر متصل شده‌اند. بنابراین هر مقطع شمع به‌صورت یک دیسک صلب عمل می‌کند. این روش مدل‌سازی اجازه می‌دهد نیروی داخلی شمع‌ها مستقیماً از المان‌های تیر به‌دست آید. همچنین درنظرگرفتن 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؛



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، به‌طوری که منحصراً روی انتشارگسلش درون لایه‌ی خاکی به حالت یک باند 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 فرادیواره‌ی 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 به‌طورکلی از لغزش جلوگیری می‌کند، کاملاً واقع‌گرایانه است. در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده از هر تأثیری ناشی از انتشار گسلش در بستر سنگی صرف‌نظر شده است.

۵. نتایج آنالیز

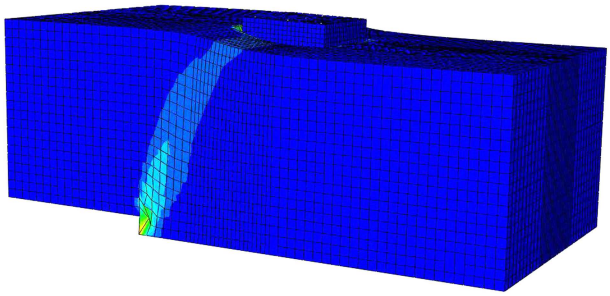
به‌منظور بررسی اثر تغییر موقعیت گسل در این بخش موقعیت‌های $S = ۵, ۱۰, ۱۵\ m$ مورد ارزیابی قرارگرفته‌اند. ذکر این نکته حائز اهمیت است که در هر ۳ موقعیت از ٪۲ فولاد برای شمع‌ها استفاده شده است. همچنین میزان تغییرمکان پایه‌ی اعمالی در هر ۳ موقعیت از $h/H = ٪۱$ تا $h/H = ٪۵$ در نظرگرفته شده است، که در اینجا نتایج برای $S = ۱۰\ m$ با جزئیات بررسی شده است.

۱.۵. حالت $S = 5\ m$

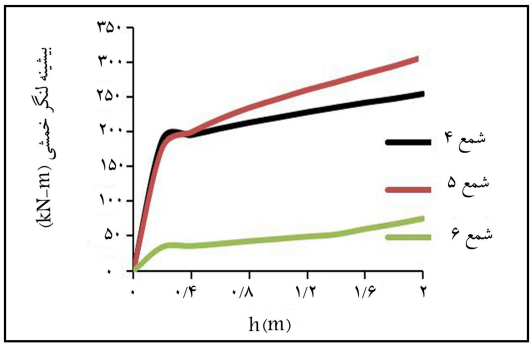
در این حالت گروه شمع در موقعیتی قرار می‌گیرد که خط گسل در میدان آزاد در وسط سرشمع به سطح زمین رسیده و بیشترین گروه شمع در فرودیواره واقع شده است (شکل ۸). مسیر گسلش، نسبت به میدان آزاد کمتر از ۵ متر به سمت چپ سرشمع منحرف شده و بنابراین، پهنای فرادیواره نسبت به میدان آزاد کمتر شده است. در جابه‌جایی گسلش ۰٫۴ متر، تغییرشکل خاک وسیع شده و یک نوار برشی باریک قابل مشاهده است، که به‌صورت قائم به طرف سطح زمین انتشار یافته و با افزایش جابه‌جایی، 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 شمع‌ها، بیشینه‌ی لنگر خمشی در محل اتصال شمع به سرشمع رخ داده است، که مطابق شکل ۹الف، این مقدار بیشینه‌ی لنگر، در شمع ۴، در حدود ۳ مگانیوتن ـ متر؛ در شمع‌های ردیف میانی، کمتر از ۱ مگانیوتن ـ متر؛ و در انتها در شمع ۶، کمتر از ۳ مگانیوتن ـ متر بوده است. همان‌طورکه در شکل ۹الف مشاهده می‌شود، در شمع‌های کناری افزایش جابه‌جایی گسلش همواره باعث افزایش نیروی داخلی شمع‌ها شده و با بالارفتن جابه‌جایی گسلش، از نرخ این افزایش کاسته شده است، که نشان‌دهنده‌ی عدم به‌کارگیری کامل جابه‌جایی گسلش در افزایش نیروی داخلی شمع‌ها بوده است. لیکن در شمع‌های میانی، افزایش جابه‌جایی گسلش تا یک مقدار مشخص باعث افزایش نیروی داخلی شمع‌ها شده و فراتر از آن مقدار، تأثیری مشاهده نشده است. در شکل ۹ب، نمودار ظرفیت مقطع شمع برای بحرانی‌ترین المان شمع‌ها رسم شده است.

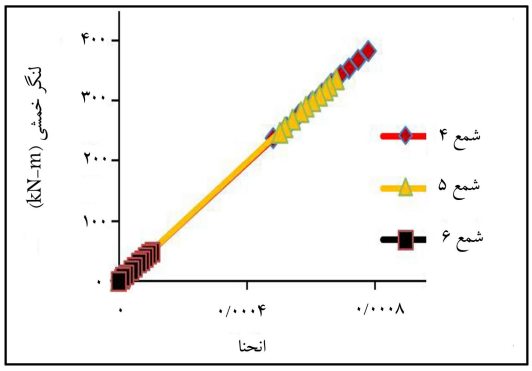
بررسی‌ها نشان داده است که شمع‌های کناری، ظرفیت مشابهی داشته و به ازاء بیشینه‌ی لنگر خمشی فراتر از ۲ مگانیوتن متر، انحنایی درحدود ۰٫۰۱ را متحمل شده‌اند. شمع‌های ردیف میانی به نسبت دو ردیف دیگر، ظرفیت بسیارکمی داشته‌اند (به ازاء بیشینه‌ی لنگر خمشی فراتر از ۷۰۰ کیلونیوتن ـ متر، انحنایی در حدود ۰٫۰۰۱ را تحمل کرده است).



شکل ۸. تغییرشکل مدل المان محدود در موقعیت $S = 5\ m$، با جابه‌جایی گسلش کل $h = 2\ m$.



الف) بیشینه ی لنگر خمشی در شمع ها؛

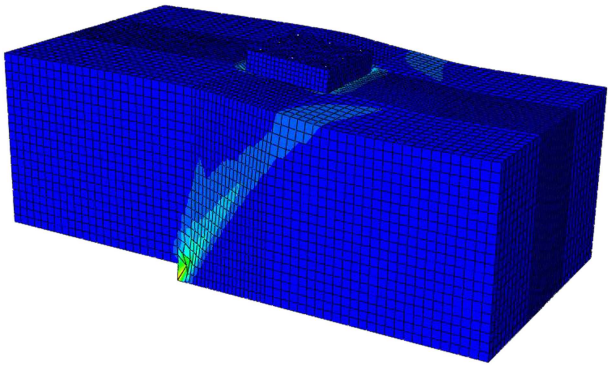


ب) ظرفیت خمش مقطع شمع ها (S=۵ m).

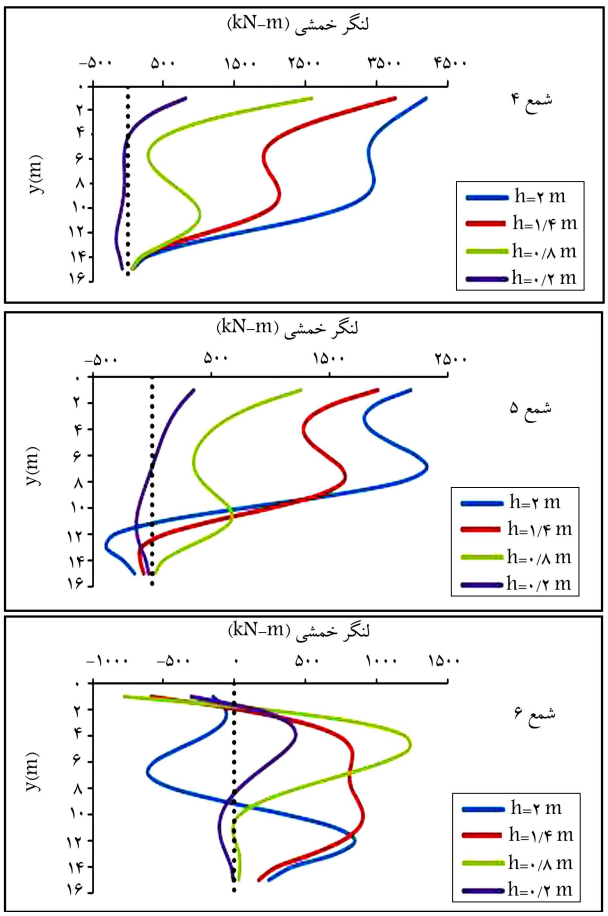
شکل ۹. لنگر داخلی شمع‌هادر موقعیت $S = 5\ m$.

۲.۵. حالت $S = 10\ m$

در این حالت نیز مانند حالت قبل، مطابق شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که گسل در میدان آزاد با گروه شمع برخورد کرده است، با این تفاوت که در این حالت گسلش در نقطه‌یی به سطح زمین رسیده است که برخوردی با سرشمع نداشته و در فاصله‌یی دورتر از گوشه‌ی راست سرشمع به سطح زمین رسیده است. وجود شمع‌هایی که به‌صورت محوری بارگذاری شده‌اند، این نتایج را به دنبال داشته است: ۱. مسیرگسل را مقداری به سمت راست منحرف ساخته است، ۲. گسلش را در ناحیه‌یی بین شمع‌ها پراکنده ساخته است. جابه‌جایی افقی و دوران قابل توجهی در سرشمع رخ داده و دوران گروه شمع به سمت راست فرودیواره، موجب ایجاد فشارهای جانبی از نوع مقاوم در خاک قسمت فرودیواره شده است. خاک زیر پی به دلیل دوران پی، در معرض کرنش قابل توجهی قرارگرفته و گسیختگی خاک سمت فرودیواره، انحراف مسیرگسلش به سمت راست را تسهیل بخشیده است. در جابه‌جایی گسلش ۰٫۴ متر، نوارکرنش برشی تشکیل شده و تقریباً به‌صورت قائم به طرف سطح زمین انتشار یافته است، در جابه‌جایی ۰٫۸ متر، این نوار برشی بسط یافته و به سمت فرودیواره منحرف شده است. گسلش به فاصله‌یی ازگوشه‌ی راست سرشمع به سطح زمین برخورد کرده و به آن نیرو وارد کرده است و در نتیجه‌ی این نیرو، گروه شمع به سمت راست (فرودیواره) دوران کرده است. این رفتارگروه شمع با انتشارگسلش ترکیب شده و یک مکانیسم پیچیده را ایجاد کرده است، که ازگسیختگی کرنشی



شکل ۱۰. تغییرشکل مدل المان محدود در موقعیت $S = 10\ m$ با جابه‌جایی گسلش کل $h = 2\ m$.



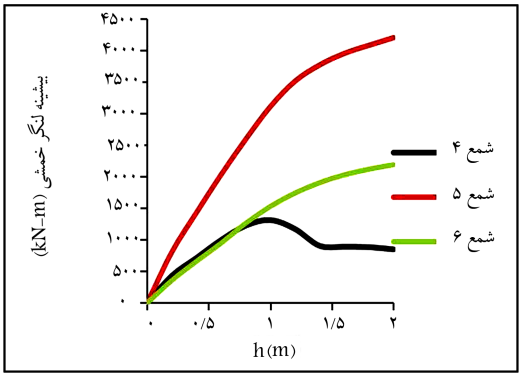
شکل ۱۱. توزیع لنگر خمشی در شمع‌ها با رفتار کشسان در گروه شمع ۳ × ۳، S = ۱۰ m.

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

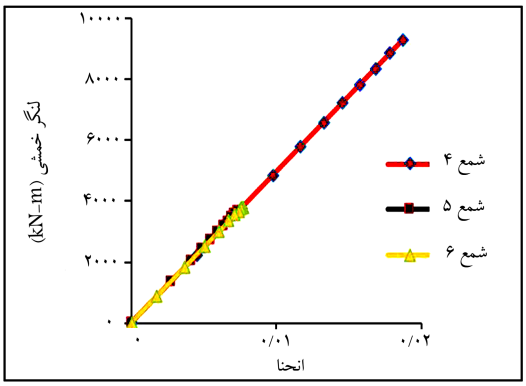
توزیع لنگر خمشی شمع‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. شمع‌های سمت فرادیواره با حرکت فرادیواره به سمت داخل و بالاکشیده شده و به‌عنوان یک نتیجه‌ی بسیار مهم، بیشترین لنگر خمشی در محل اتصال شمع به سرشمع ایجاد و این ردیف شمع بیشترین لنگر خمشی را متحمل شده‌اند. شمع‌های دو ردیف دیگر، که فقط بخشی از آنها در فرادیواره واقع شده‌اند، نسبت به شمع‌های سمت فرادیواره، لنگر خمشی کمتری را متحمل شده‌اند. شمع‌های سمت فرودیواره (شماره‌ی ۶) در نزدیکی وسط طول شمع تحت فشار قرارگرفته است. دوران ساعت‌گرد قابل توجهی در گروه شمع اتفاق افتاده است، که تنش‌هایی را در شمع‌ها، به همراه تسلیم خاک اطراف شمع‌ها در بخش وسیعی از طول آنها ایجاد کرده است.

ردیف شمع‌های سمت فرادیواره به موجب حرکت رو به بالای بلوک محرک (فرادیواره) به طرف بالاکشیده شده‌اند، در حالی که ردیف شمع‌های سمت فرودیواره در مقابل این حرکت مقاومت کرده و در بلوک مقاوم (فرودیواره) ثابت قرار گرفته‌اند. به‌عنوان یک نتیجه، ردیف شمع‌های سمت فرودیواره به سمت بالا و شمع‌های سمت فرادیواره به طرف داخل کشیده شده‌اند. باید دقت داشت که الگوی توزیع لنگر خمشی با عمق، روند مشخصی را دنبال نکرده‌اند. بیشینه‌ی لنگر خمشی برای شمع‌های ۴ و ۵، در بالا و برای شمع ۶ (ردیف عقب)، در عمقی تقریباً برابر با ۶ متر ایجاد شده است.

همان‌طورکه در شکل ۱۲الف مشاهده می‌شود، شمع‌های سمت فرادیواره



الف) بیشینه ی لنگر خمشی در شمع ها؛



ب) ظرفیت خمش مقطع شمع ها (S=۱۰ m)؛

شکل ۱۲. لنگر داخلی شمع‌ها در موقعیت S = ۱۰ m.

(شماره‌ی ۴) در جابه‌جایی گسل ۲ متر، بیشینه‌ی لنگری در حدود ۵ مگانیوتن ـ متر را متحمل شده‌اند. بیشینه‌ی لنگر در ردیف میانی (شماره‌ی ۵)، فراتر از ۲ مگانیوتن ـ متر و در شمع‌های سمت فرادیواره فراتر از ۱ مگانیوتن ـ متر بوده است. در شمع ۶ مشاهده می‌شود که در جابه‌جایی گسلش بیشتر از ۱ متر، بیشینه‌ی لنگر خمشی با افزایش جابه‌جایی گسلش کاهش یافته است. این کاهش می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش جابه‌جایی و بسط نوار کرنش برشی خمیری، محدوده‌ی وسیع‌تری از شمع در محدوده‌ی این نوار قرارگرفته و با تغییر جهت لنگر خمشی از میزان لنگر در جابه‌جایی گسلش، بیشتر کاسته شده است.

در شکل ۱۲ب، ظرفیت مقطع المان‌های شمع مورد بررسی قرارگرفته است. نمودار لنگر انحنا به‌صورت خطی است که شیب ثابت نمودار نشان‌دهنده‌ی سختی مقطع شمع است. بیشترین لنگر خمشی در شمع سمت فرادیواره، به ازاء انحنایی در حدود ۰/۰۹، در شمع ۵ (ردیف میانی) به ازاء انحنایی فراتر از ۰/۰۰۴، و در آخر در شمع‌های سمت فرودیواره، در انحنایی کمتر از ۰/۰۰۲ ایجاد شده است.

۳.۵. حالت S = ۱۵ m

در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که گسل در میدان آزاد در فاصله‌ی ۵ متری از سمت راست سرشمع به سطح زمین رسیده است. شمع‌ها با حضورشان و بارهای منتقل‌شده، مسیر گسل را به دلیل نشست‌های نابرابر و جابه‌جایی‌های بزرگ غیریکنواخت، پراکنده و اندکی به سمت راست منحرف ساخته‌اند. ناحیه‌ی تحت کرنش برشی در سمت راست پی، با توسعه‌ی گوه‌ی فعال در نتیجه‌ی دوران ساعت‌گرد پی، افزایش یافته است. دوران گروه شمع به سمت راست فرودیواره، فشارهای جانبی از نوع مقاوم را

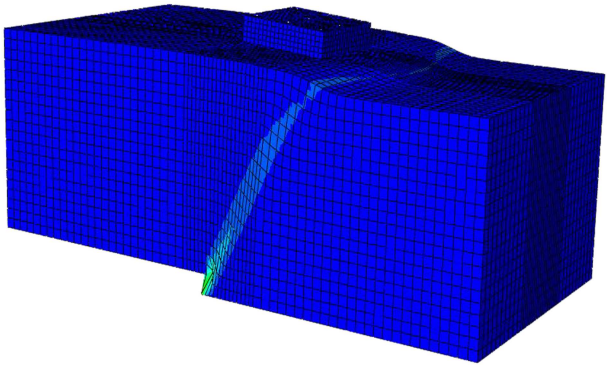
در خاک قسمت فرودیواره ایجاد کرده است، همچنین خاک زیر پی به دلیل دوران پی، در معرض کرنش قابل توجهی قرار گرفته و گسیختگی خاک سمت فرودیواره، انحراف مسیر گسلش به سمت راست را تسهیل بخشیده است.

در جابه‌جایی گسلش ۰٫۴ متر، نوار کرنش برشی تشکیل شده و تقریباً به‌صورت قائم به طرف سطح زمین انتشار یافته است. در جابه‌جایی ۰٫۶ متر، نوار برشی مذکور بسط یافته و به سمت فرودیواره منحرف شده است و در $h = 1\ m$، گسلش به فاصله‌یی 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 (فرودیواره) 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.

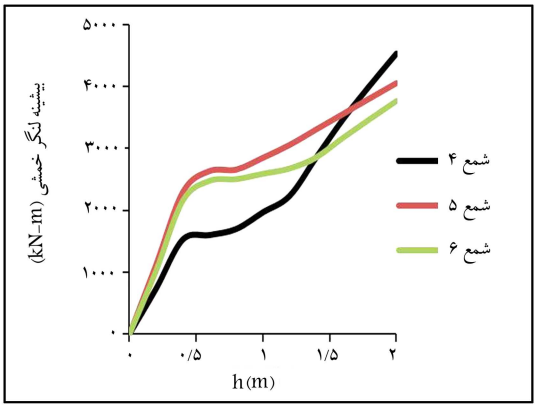
تمامی شمع‌ها در عمقی از شمع تحت فشار قرار گرفته‌اند و بیشینه‌ی لنگر خمشی در آن عمق ایجاد شده است، که این عمق در شمع ۴، برابر ۵ متر و در شمع‌های ۵ و ۶، برابر ۱۰ متر بوده است. در شکل ۱۴الف مشاهده می‌شود که بیشینه‌ی لنگر خمشی در تمامی شمع‌ها تقریباً برابر و در حدود ۴ مگانیوتن ـ متر بوده است. در شکل ۱۴ب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

۶. نتیجه‌گیری

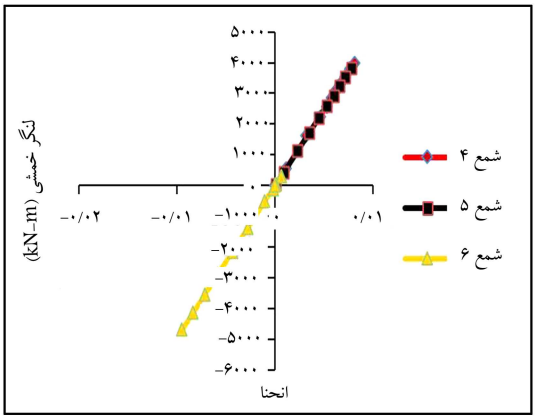
همان‌طور که بیان شده است، شمع‌ها در حالت کشسان با حضورشان و بارهای منتقل‌شده، مسیر گسل را به دلیل نشست‌های نابرابر و جابه‌جایی‌های بزرگ غیریکنواخت پراکنده می‌سازند و اندکی انحراف در مسیر گسل به‌وجود می‌آورند. بدترین موقعیت برای گروه شمع زمانی است که خط گسل در میدان آزاد در گوشه‌ی راست سرشمع برخورد می‌کند $(S = 10\ m)$. در این حالت، جابه‌جایی افقی و دوران سرشمع بزرگی متناسب با لنگر خمشی بزرگ شمع‌ها ایجاد می‌شود. در حالتی که برون‌زد گسلش در فاصله‌یی دورتر از سمت راست سرشمع اتفاق افتد $(S = 15\ m)$، نیز شمع‌ها لنگر خمشی قابل توجهی متحمل می‌شوند. در حالت دیگر، زمانی که خط انتشار گسل به شمع‌های سمت فرادیواره برخورد می‌کند $(S = 5\ m)$، مسیر گسلش توسط شمع‌ها و در امتداد آن‌ها به سمت بالا منحرف می‌شود و به این ترتیب گروه شمع را در بلوک مقاوم (فرودیواره) 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. تغییرشکل مدل المان محدود در موقعیت $S = 15\ m$، با جابه‌جایی گسلش کل $h = 2\ m$.



الف) بیشینه ی لنگر خمشی در شمع ها؛



ب) ظرفیت خمش مقطع شمع ها ($S=15\ m$)؛

شکل ۱۴. لنگر داخلی شمع‌ها در موقعیت $S = 15m$.

پانوشت‌ها

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 ofman-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., Gürer, T., Uslu, O. and Barka, A.A. "Surface rupture and slip distribution along the Düzce strand of the l7 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).