





دانشکده‌ی مهندسی عمران

رشته‌ی مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد

بررسی رفتار ردیف شمع در پایداری زمین لغزش‌های بزرگ تحت اثر بار زلزله

نگارنده: بابک پیراسته

استاد راهنما:

دکتر امیر بذرافشان مقدم

شهریور ۱۳۹۶

شماره: ۶۶۱۳۹
تاریخ: ۹۴/۶/۲۷

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای بابک پیراسته با شماره دانشجویی ۹۳۰۴۶۷۴ رشته مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک تحت عنوان بررسی رفتار ردیف شمع در پایداری زمین لغزش های بزرگ تحت اثر بار زلزله که در تاریخ ۱۳۹۶/۰۶/۱۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز ... درجه ...)

مردود

نوع تحقیق: نظری ■ عملی □

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر امیر بذرافشان مقدم	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی گلی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر رضا نادری	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر محسن کرامتی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: احمدی
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تصبر: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیر و تشکر

سپاس خداوند سبحان را که توفیق تحصیل علم و تغییر نگرش به هستی را به من ارزانی داشت تا گوشه‌ای از عظمت بی‌مثالش را درک نمایم و فرصتی دست داد تا بدانم تمامی تلاش‌های علمی بشر در مقابل علم بی‌کرانش هم‌چون ذره‌ای در مقابل اقیانوسی بی‌انتهاست.

از استاد راهنما و همراه همیشگی‌ام جناب آقای دکتر بذرافشان مقدم که در طول دوران تحصیل و مراحل انجام این پایان نامه مرا یاری نمودند و هم‌چنین از اساتید محترم گروه عمران دانشگاه صنعتی شاهرود، کمال تقدیر و تشکر را دارم.

بر خود لازم می‌دانم از خانواده‌ی عزیزم؛ به ویژه پدر و مادر گران‌قدرم که همواره با دل گرمی-های خویش مرا جانی تازه بخشیده‌اند، سپاس و قدردانی نمایم.

تعهد نامه

این جانب بابک پیراسته دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی عمران-ژئوتکنیک دانشکده‌ی مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده‌ی پایان‌نامه‌ی بررسی رفتار ردیف شمع در پایداری زمین‌لغزش‌های بزرگ تحت تأثیر بار زلزله، با راهنمایی دکتر امیر بذرافشان مقدم متعهد می‌شوم:

- تحقیقات این پایان‌نامه توسط این‌جانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در صورت استفاده از نتایج پژوهش‌های دیگر محققان، به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت مدرک یا امتیاز به هیچ فرد یا مکانی ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که به نحوی در دستاوردهای اصلی پایان‌نامه موثر بوده‌اند، در مقالات حاصل از این اثر رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از حوزه‌ی اطلاعات شخصی افراد استفاده شده باشد، ضوابط و اصول اخلاقی-انسانی رعایت گردیده است.

تاریخ: ۱۳۹۶/۰۶/۱۲

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و نتایج آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

زمین لغزش از بلایای طبیعی است که هر ساله وقوع این پدیده در کشورهای مختلف دنیا؛ به ویژه در کشورهای کوهستانی، خسارات جانی و مالی قابل توجهی به بار می‌آورد. در کشور ما نیز مناطق مستعد زمین لغزش با خطر لرزه‌خیزی بالا و ریزش‌های جوی زیادی مواجه شده‌اند. لذا بررسی وضعیت پایداری زمین لغزش‌ها و پایدارسازی آن‌ها، در این مناطق ضروری به نظر می‌رسد. روش‌های زیادی برای تثبیت شیب‌ها وجود دارد، از جمله کلید برشی، پروفیل‌بندی مجدد سطح زمین، انجام زه-کشی سطحی، زیرسطحی و غیره. تمامی این روش‌ها حداقل یک محدودیت دارند؛ به عنوان مثال کلید برشی فقط در جایی امکان‌پذیر است که سطح گسیختگی خیلی عمیق نباشد. شمع‌های گسسته چندین دهه برای تثبیت زمین لغزش‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. زمانی که این شمع‌ها در طول زمین در معرض زمین لغزش یا گسیختگی شیب قرار می‌گیرند، با عملکرد خود باعث کاهش حرکات زمین می‌شوند. شمع‌های گسسته مزایای قابل توجهی دارند؛ به عنوان مثال در مناطقی که فراوانی ساخت و ساز است، این شمع‌ها می‌توانند هم‌زمان با تثبیت حرکات جانبی به عنوان فونداسیون برای ساختمان‌های جدید عمل کنند. در این پایان‌نامه رفتار ردیف شمع در پایداری زمین لغزش‌های بزرگ تحت تأثیر بار زلزله بررسی شده است. در ابتدا مقایسه‌ای بین حالت پایه (فاقد ردیف شمع) و حالت دارای ردیف شمع انجام می‌شود. در حالت دارای ردیف شمع، جابه‌جایی پنجه‌ی شیروانی به میزان ۹۵ درصد نسبت به حالت پایه کاهش یافت که این امر، مؤثر بودن استفاده از ردیف شمع در پایداری شیروانی‌ها را اثبات می‌کند. سپس رفتار شیب دارای ردیف شمع در برابر تغییر مقاومت سطح لغزش تحت تأثیر بار چهار زلزله متفاوت با در نظر گرفتن سه مقاومت مختلف در سطح لغزش بررسی شده و ملاحظه گردید که با کاهش مقاومت سطح لغزش، نیروی برشی و لنگر خمشی بیشتری بر شمع اعمال می‌شود. همچنین با قرار دادن ردیف شمع در پنجه، میانه و تاج شیروانی، تأثیرات موقعیت ردیف شمع در تغییر مکان‌های شیروانی بررسی گردید. با بررسی نتایج به دست آمده مشاهده گردید که مکان بهینه ردیف شمع برای پایدارسازی شیروانی در میانه‌ی آن است و نیازی به قرار دادن دو ردیف شمع در شیروانی نمی‌باشد.

کلمات کلیدی: زمین لغزش، شمع، زلزله، سطح لغزش

فهرست مطالب

۱- فصل اول ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۲-۱ تاریخچه و آمار زمین لغزش ۴

۱-۲-۱ زمین لغزش‌های اتفاق افتاده در ایران ۴

۲-۲-۱ زمین لغزش‌های اتفاق افتاده در خارج از ایران ۶

۳-۱ اهداف و ضرورت پژوهش ۷

۴-۱ ساختار پژوهش ۸

۲- فصل دوم ۹

۱-۲ مقدمه ۱۰

۲-۲ مکانیزم شکست شمع‌های تحت بارگذاری جانبی ۱۰

۱-۲-۲ شمع‌های تحت بارگذاری محرک ۱۴

۲-۲-۲ شمع‌های تحت بارگذاری مقاوم ۱۶

۳-۲ تأثیرات گروه به سبب اندرکنش خاک-شمع ۲۵

۱-۳-۲ آزمایش میدانی ۲۷

۲-۳-۲ مدل‌سازی سانتریفیوژ ۳۰

۳-۳-۲ تحلیل عددی دو بعدی ۳۲

۴-۳-۲ تحلیل عددی سه بعدی ۳۹

۳- فصل سوم ۴۵

۳-۱	مقدمه	۴۶
۳-۲	معرفی نرم افزار ژئو استودیو	۴۶
۳-۳	فرضیات و روش تحلیل	۴۷
۳-۳-۱	خصوصیات مصالح	۴۷
۳-۳-۲	خصوصیات شمع	۴۸
۳-۳-۳	هندسه مدل	۴۹
۳-۳-۴	مدل رفتاری	۵۱
۳-۳-۵	شرایط مرزی	۵۴
۳-۳-۶	مش بندی	۵۴
۳-۳-۷	بارگذاری لرزه‌ای	۵۶

۴- فصل چهارم ۶۱

۴-۱	مقدمه	۶۲
۴-۲	بررسی رفتار مدل در حالت پایه (فاقد ردیف شمع) و مقایسه با حالت دارای ردیف شمع	۶۲
۴-۳	بررسی رفتار مدل دارای ردیف شمع در برابر تغییر مقاومت سطح لغزش	۶۵
۴-۳-۱	تحت تأثیر بار زلزله‌ی ال سنترو	۶۵
۴-۳-۲	تحت تأثیر بار زلزله‌ی لوما پریتا	۶۸
۴-۳-۳	تحت تأثیر بار زلزله‌ی نورث‌ریچ	۷۰
۴-۳-۴	تحت تأثیر بار زلزله‌ی بم	۷۲
۴-۴	بررسی رفتار مدل دارای ردیف شمع با تغییر مکان شمع	۷۵
۴-۵	بررسی رفتار مدل با استفاده از دو ردیف شمع	۸۲
۴-۶	صحت سنجی	۸۶

۵- فصل پنجم ۸۹

۵-۱ نتایج ۹۰

۵-۲ پیشنهاد برای کارهای آینده ۹۱

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ شمع‌ها در فاصله‌ی زیاد از یکدیگر قرار دارند و توانایی توقف توده‌ی در حال لغزش را نداشته؛ در نتیجه در جای خود باقی مانده و توده‌ی خاک از میان آن‌ها عبور می‌کند ۱۱
- شکل ۲-۲ عمق شمع‌ها به اندازه کافی نیست و همراه با توده‌ی در حال لغزش جابه‌جا می‌شوند و در لایه‌ی زیرین خاک شیار ایجاد می‌کنند ۱۲
- شکل ۳-۲ مقاومت خمشی تسلیم شمع کافی نیست ۱۲
- شکل ۴-۲ تصاویر شماتیک بارگذاری جانبی شمع‌ها (a) بارگذاری محرک (b) بارگذاری مقاوم (c) یک توزیع فشار مثلثی فرضی بالای سطح گسیختگی از طرف توده‌ی خاک در حال لغزش بر شمع وارد می‌شود. (بارگذاری مقاوم) ۱۳
- شکل ۵-۲ حالات گسیختگی برای شمع‌های با سر آزاد، الف) شمع کوتاه ب) شمع بلند ۱۴
- شکل ۶-۲ حالات گسیختگی برای شمع‌های مهار شده الف) شمع بلند ب) شمع با طول متوسط ج) شمع کوتاه ۱۵
- شکل ۷-۲ شکل شماتیک نشان دهنده‌ی روش ویجیانی ۱۶
- شکل ۸-۲ حالات گسیختگی شمع ۱۹
- شکل ۹-۲ مسئله‌ی اساسی یک شمع در شیب ناپایدار ۲۲
- شکل ۱۰-۲ مشخصات رفتاری شمع برای حالات مختلف گسیختگی در حالت نهایی بارگذاری... ۲۴
- شکل ۱۱-۲ جابه‌جایی خاک اعمال شده‌ی مورد استفاده در ALP ۲۵
- شکل ۱۲-۲ نتایج تحلیل‌های ALP و فشارهای محاسبه شده‌ی ترسیم شده همراه با توزیع فشارهای تعیین شده توسط مشتق‌گیری از توزیع‌های لنگر خمشی برای پروفیل‌های جابه‌جایی اعمال شده D1(a) و D2(b) ۲۶
- شکل ۱۳-۲ میانگین بار شمع در برابر منحنی‌های خمش برای هر ردیف از شمع‌ها در مقایسه با شمع منفرد ۲۸

- شکل ۲-۱۴ نسبت میانگین بار تحمل شده توسط شمع در هر ردیف و بار تحمل شده توسط شمع منفرد به عنوان تابعی از خمش جانبی سر شمع ۲۸
- شکل ۲-۱۵ ترسیم شماتیک نشان‌دهنده‌ی کاهش ظرفیت باربری در گروه شمع‌ها به علت هم-پوشانی نواحی گسیختگی و ایجاد شکاف پشت شمع‌ها ۲۹
- شکل ۲-۱۶ منحنی‌های طراحی موقت برای متغیرهای P ($P_M = P_{GP}/P_{SP}$) به عنوان تابعی از فاصله‌ی بین شمع‌ها (a) ردیف‌های جلو (b) ردیف‌های وسط ۲۹
- شکل ۲-۱۷ تصویر گرفته شده در پایان آزمایش هنگامی که شمع‌ها در فاصله‌ی مرکز به مرکز ۳d بودند ۳۱
- شکل ۲-۱۸ نمای بالای بردارهای جابه‌جایی اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های سانتریفیوژ برای شمع‌های با فاصله‌ی (a) ۳d و (b) ۶d ۳۱
- شکل ۲-۱۹ پروفیل لنگرهای خمشی اندازه‌گیری شده شمع‌ها با فاصله‌ی (a) ۳d؛ (b) ۴d و (c) ۶d ۳۲
- شکل ۲-۲۰ شبکه‌ی اجزای محدود و نامحدود برای یک شمع منفرد تحت بارگذاری جانبی در میانه‌ی خاک ۳۳
- شکل ۲-۲۱ چهار تحلیل گروه شمع ۳۴
- شکل ۲-۲۲ روابط p-y برای شمع‌ها در یک ردیف طولانی نامحدود ۳۵
- شکل ۲-۲۳ روابط p-y برای شمع‌های در دو ردیف طولانی نامحدود ۳۶
- شکل ۲.۲۴ روابط p-y برای گروه شمع ۳ تایی و $S_{H}/w=4$ ۳۷
- شکل ۲.۲۵ روابط p-y برای گروه شمع ۶ تایی ۳۷
- شکل ۲-۲۶ اثرات گروهی برای (a) خاک دانه‌ای (زاویه اصطکاک = 30°)؛ و (b) حالت زه‌کشی نشده (مقاومت برشی زه‌کشی نشده = ۲۵kPa، مدول حجمی = $7/5 \times 10^4$ kPa، مدول برشی = $1/26 \times 10^4$ kPa و وزن مخصوص = 21 kN/m^3) ۳۹

- شکل ۲-۲۷ حالت خاک و منحنی‌های جابه‌جایی در جهت y برای دو ردیف شمع در خاک
 ۴۰ دانه‌ای، شرایط زه‌کشی شده در حالت بارگذاری نهایی
- شکل ۲-۲۸ نمای شبکه‌ی سه بعدی با شمع‌های جابه‌جا شده به صورت جانبی
- شکل ۲-۲۹ منحنی‌های $p-y$ برای یک ردیف شمع با فاصله‌بندی مرکز به مرکز $2D$ ، $3D$ ، $5D$
 ۴۲ و $10D$ که D قطر شمع است: (a) رس زه-کشی نشده (b) ماسه زه‌کشی شده
- شکل ۲-۳۰ منحنی‌های $p-y$ برای گروه شمع در رس زه‌کشی نشده با فاصله‌بندی مرکز به
 ۴۲ مرکز $3D$ و $5D$ بین ردیف شمع‌ها که D قطر شمع است: (a) ردیف جلو (b) ردیف عقب
- شکل ۲۰۲۹ مقادیر P_m از آزمایش‌های عددی
- شکل ۳-۱ مقطع شمع مورد استفاده و جزئیات آرماتورها
- شکل ۳-۲ هندسه‌ی مدل پایه‌ی مورد مطالعه و ابعاد اجزای مختلف آن
- شکل ۳-۳ هندسه‌ی مدل دارای یک ردیف شمع
- شکل ۳-۴ رابطه‌ی رفتاری مدل الاستیک-پلاستیک کامل
- شکل ۳-۵ منحنی پایه‌ی رفتار مصالح در شرایط دینامیکی
- شکل ۳-۶ تغییرات مدول برشی و میرایی با کرنش برشی
- شکل ۳-۷ نحوه‌ی مش‌بندی مدل پایه
- شکل ۳-۸ نحوه‌ی مش‌بندی مدل دارای ردیف شمع
- شکل ۳-۹ شتاب‌نگاشت زلزله‌ی ال سنترو
- شکل ۳-۱۰ شتاب‌نگاشت زلزله‌ی لوما پریتا
- شکل ۳-۱۱ شتاب‌نگاشت زلزله‌ی نورث‌ریج
- شکل ۳-۱۲ شتاب‌نگاشت زلزله‌ی بم

- شکل ۱-۴ منحنی میزان و بردار جابه‌جایی‌های شیب بدون شمع پس از تحلیل ۶۳
- شکل ۲-۴ تغییر شکل‌های مش شیب بدون شمع پس از تحلیل ۶۳
- شکل ۳-۴ منحنی میزان و بردار جابه‌جایی‌های شیب دارای یک ردیف شمع در میانه شیب
پس از تحلیل ۶۴
- شکل ۴-۴ تغییر شکل‌های مش شیب دارای یک ردیف شمع در میانه‌ی شیب پس از تحلیل ۶۴
- شکل ۵-۴ تغییر مکان در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت بار زلزله‌ی
ال سنترو ۶۶
- شکل ۶-۴ تغییرات لنگر خمشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت بار
زلزله‌ی ال سنترو ۶۶
- شکل ۷-۴ تغییرات نیروی برشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت بار
زلزله‌ی ال سنترو ۶۷
- شکل ۸-۴ تغییر مکان در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت بار زلزله‌ی
لوما پریتا ۶۸
- شکل ۹-۴ تغییرات لنگر خمشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت بار
زلزله‌ی لوما پریتا ۶۹
- شکل ۱۰-۴ تغییرات نیروی برشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت
بار زلزله‌ی لوما پریتا ۶۹
- شکل ۱۱-۴ تغییر مکان در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت بار زلزله‌ی

- ۷۰ نورث ریج
- شکل ۴-۱۲ تغییرات لنگر خمشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت
- ۷۱ بار زلزله‌ی نورث ریج
- شکل ۴-۱۳ تغییرات نیروی برشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت
- ۷۱ بار زلزله‌ی نورث ریج
- شکل ۴-۱۴ تغییر مکان در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت بار زلزله‌ی
- ۷۲ بم
- شکل ۴-۱۵ تغییرات لنگر خمشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت
- ۷۳ بار زلزله‌ی بم
- شکل ۴-۱۶ تغییرات نیروی برشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت
- ۷۳ بار زلزله‌ی بم
- شکل ۴-۱۷ منحنی میزان و بردارهای جابه‌جایی برای تیپ ۱-شمع در میانه‌ی شیب
- ۷۶ شیب
- شکل ۴-۱۸ تغییر شکل‌های مش برای تیپ ۱-شمع در میانه‌ی شیب
- ۷۷ شیب
- شکل ۴-۱۹ منحنی میزان و بردارهای جابه‌جایی برای تیپ ۲-شمع در بالادست شیب (تاج
- ۷۷ شیب)
- شکل ۴-۲۰ تغییر شکل‌های مش برای تیپ ۲-شمع در بالادست شیب (تاج شیب)
- ۷۸ شیب
- شکل ۴-۲۱ منحنی میزان و بردارهای جابه‌جایی برای تیپ ۳-شمع در پایین دست شیب
- ۷۸ (پنجه شیب)

- شکل ۴-۲۲ تغییر شکل‌های مش برای تیپ ۳-شمع در پایین دست شیب (پنجه شیب) ۷۹
- شکل ۴-۲۳ تغییر مکان در طول شمع برای سه تیپ مختلف مکان شمع ۸۰
- شکل ۴-۲۴ تغییرات لنگر خمشی در طول شمع برای سه تیپ مختلف مکان شمع ۸۰
- شکل ۴-۲۵ تغییرات نیروی برشی در طول شمع برای سه تیپ مختلف مکان شمع ۸۱
- شکل ۴-۲۶ هندسه‌ی مدل دارای دو ردیف شمع ۸۲
- شکل ۴-۲۷ تغییر مکان در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت تأثیر بار زلزله‌ی ال سنترو برای شمع بالادست ۸۳
- شکل ۴-۲۸ تغییر مکان در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت تأثیر بار زلزله‌ی ال سنترو برای شمع پایین دست ۸۳
- شکل ۴-۲۹ تغییرات لنگر خمشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت تأثیر بار زلزله‌ی ال سنترو برای شمع بالادست ۸۴
- شکل ۴-۳۰ تغییرات لنگر خمشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت تأثیر بار زلزله‌ی ال سنترو برای شمع پایین دست ۸۴
- شکل ۴-۳۱ تغییرات نیروی برشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت تأثیر بار زلزله‌ی ال سنترو برای شمع بالا دست ۸۵
- شکل ۴-۳۲ تغییرات نیروی برشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت تأثیر بار زلزله‌ی ال سنترو برای شمع پایین دست ۸۵

شکل ۳۳-۴ منحنی میزان‌های جابه‌جایی در محیط نرم‌افزار ژئواستودیو ۸۶

شکل ۳۴-۴ منحنی میزان‌های جابه‌جایی در محیط نرم‌افزار پلکسیس ۸۷

فهرست جداول

- جدول ۳-۱: ویژگی‌های ژئوتکنیکی مصالح به‌کاررفته در تحلیل مدل پایه ۴۸
- جدول ۳-۲: مقادیر ظرفیت برشی و خمشی شمع مورد استفاده در مدل‌ها ۴۹
- جدول ۳-۳: مشخصات و پارامترهای شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده ۵۶
- جدول ۴-۱: مقایسه مقادیر بیشینه شتاب، نیروی برشی و لنگر خمشی برای چهار زلزله ۷۵

۱- فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

زمین لغزش‌ها به دو صورت مختلف شکل می‌گیرند:

الف) فعال شدن مجدد جنبش‌ها روی یک سطح گسیختگی موجود از قبل

ب) زمانی که سطح گسیختگی از قبل موجود نباشد؛ اما تغییر در تعادل بین نیروهای مقاوم و پایدارکننده باعث گسیختگی شود.

بسیاری از زمین‌لغزش‌ها از یک سطح گسیختگی قبلی آغاز می‌شوند که ممکن است در اثر فرسایش ساحلی یا رودخانه‌ای، یا یخبندان و ذوب سریع یخ شکل گرفته باشد. نوع دوم زمین‌لغزش با تغییرات فشار آب منفذی خاک ناشی از بارندگی شدید، یا تغییرات وزن و تعادل توده‌ی ناپایدار ناشی از فعالیت‌های ساختمانی، حفاری‌ها یا فرسایش ساحلی به وجود می‌آید. اگرچه گسیختگی‌های ناشی از بارندگی متداول‌تر هستند و در هنگام تغییرات آب و هوا، احتمال وقوع آن‌ها افزایش می‌یابد.

زمین ناپایداری که در زیر سازه‌ها قرار دارد؛ شامل ساختمان‌ها، ریل‌های راه‌آهن و پل‌ها، باید برای جلوگیری از تلفات یا آسیب به سازه‌ها پایدار شود. این کار ممکن است هزینه‌ی قابل توجهی داشته باشد، اما تقریباً همیشه از هزینه‌ی بازسازی سازه‌های مذکور کمتر است. پایدار کردن زمین‌لغزش‌ها هزینه بر است و در حال حاضر موضوع بسیاری از پژوهش‌ها، اساس تمرکز بر طراحی‌های مقرون به صرفه می‌باشد. روش‌های زیادی برای تثبیت شیب‌ها وجود دارد؛ از جمله کلید برشی، پروفیل‌بندی مجدد سطح زمین، انجام زه‌کشی سطحی، زیر سطحی و غیره. تمامی این روش‌ها حداقل یک محدودیت دارند؛ به عنوان مثال کلید برشی فقط در جایی امکان‌پذیر است که سطح گسیختگی خیلی عمیق نباشد و پروفیل‌بندی مجدد سطح زمین اغلب به دلیل مسائل زیست محیطی و اقتصادی رد می‌شود.

شمع‌های گسسته چندین دهه برای تثبیت زمین‌لغزش‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. زمانی که

این شمع‌ها در طول زمین و در معرض زمین لغزش یا گسیختگی شیب قرار می‌گیرند، با عملکرد خود باعث کاهش حرکات زمین می‌شوند. شمع‌های گسسته مزایای قابل توجهی دارند؛ به عنوان مثال در مناطقی که ساخت و ساز بسیار رایج است، این شمع‌ها می‌توانند هم‌زمان با تثبیت حرکات جانبی به عنوان فونداسیون برای ساختمان‌های جدید عمل کنند.

روش‌های طراحی رایج برای شمع‌های گسسته، نیروی بازگرداننده مورد نیاز برای ایجاد پایداری در شیب، ظرفیت برشی و خمشی مورد نیاز شمع‌ها و ابعاد و شکل آن‌ها را ارزیابی می‌کنند. برای تعیین نیروهای برشی و لنگرهای خمشی به وجود آمده در شمع‌ها، توزیع فشار جانبی کل که در اثر جابه‌جایی شیب ناپایدار در طول شمع به وجود می‌آید، مورد نیاز است.

یک سری روش‌های تحلیلی و تئوری برای تخمین فشار و نیروی جانبی کل وجود دارد، اما اغلب آن‌ها برای یک شمع تک یا ایزوله راه حل ارائه می‌کنند؛ نه برای گروه شمع. در هر صورت شمع‌ها عملاً، به صورت گروهی استفاده می‌شوند نه به تنهایی. زمانی که شمع‌ها به صورت گروهی نصب می‌شوند، فشار جانبی کل بر روی هر شمع به دلیل اثرات اندرکنشی شمع‌های مجاور کاهش می‌یابد. اگرچه که تا به حال چندین مورد موفق تثبیت شیب با استفاده از شمع‌ها انجام شده است، اما در مجموع در زمینه‌ی رفتار دقیق و مکانیزم گسیختگی این شمع‌ها با کمبود دانش و اطلاعات روبرو هستیم؛ به خصوص زمانی که به صورت ردیفی یا گروهی استفاده می‌شوند. از این رو درک رفتار و مکانیزم گسیختگی شمع‌ها برای طراحی و برنامه‌ریزی تثبیت یک طرح مؤثر، بسیار مهم است.

نحوه‌ی عملکرد شمع‌ها در هنگام وقوع زلزله یکی از عوامل اصلی تأثیرگذار بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های وابسته به آن‌ها می‌باشد. از این رو روش‌هایی به منظور آنالیز و طراحی شمع‌ها تحت بار زلزله ارائه شده است. رفتار لرزه‌ای گروه شمع، سال‌هاست که مورد توجه محققین متعددی در سراسر جهان قرار گرفته است. پیچیدگی‌های گروه شمع در خاک باعث شده است که علی‌رغم انجام تحقیقات گسترده بر روی آن‌ها، هنوز ناشناخته‌ها و ابهامات بسیاری در این عرصه از مهندسی وجود داشته

باشد. این امر به خصوص در شرایطی که گروه شمع در یک شیروانی قرار می‌گیرد، به پیچیدگی رفتاری گروه شمع می‌افزاید. در این گونه موارد روش‌های قابل اتکایی برای بررسی این امر وجود نداشته و نیاز به استفاده از روش‌های عددی برای تحلیل را هرچه بیشتر آشکار می‌سازد. این پایان نامه نیز رفتار ردیف شمع در پایداری زمین‌لغزش‌های بزرگ تحت تأثیر بار زلزله را بررسی می‌کند.

۲-۱ تاریخچه و آمار زمین‌لغزش

موضوع زمین‌لغزش در بعضی از کشورها از اهمیت زیادی برخوردار است. در این جا به چند نمونه از این زمین‌لغزش‌ها اشاره می‌شود:

۱-۲-۱ زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده در ایران

در ایران به دلیل نبودن آمار دقیق، زمین‌لغزش‌ها به طور کامل ثبت نشده‌اند. اما آمار پراکنده، حکایت از بالا بودن خطر زمین‌لغزش در ایران دارند. در طول تاریخ رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس شاهد زمین‌لغزش‌های عظیمی در دامنه‌های خود بوده‌اند. آمارها، خسارات وارده از زمین‌لغزش در ایران را بیشتر از یک‌صد میلیون دلار در سال گزارش می‌دهند (لشکریپور^۱، 1999). در ادامه به تعدادی از مهم ترین زمین‌لغزش‌ها اشاره شده است:

• زمین‌لغزش سیمره

این زمین‌لغزش یکی از بزرگ‌ترین و کمیاب‌ترین زمین‌لغزش‌های جهان است که در زمان ماقبل تاریخ، در کبیر کوه، واقع در رشته‌کوه زاگرس اتفاق افتاده است. عمق متوسط این زمین‌لغزش، چهارصد متر و در سازند آسماری^۲ و پابده^۳ بوده است. به موجب این زمین‌لغزش توده‌ای به حجم تقریبی ۳۰ کیلومتر مکعب به طرف دره‌ی سیمره حرکت کرد و این دره‌ی قدیمی به همراه رودخانه‌ی

Lashkaripour^۱

limestone^۲

marl and marly limestone^۳

کاشکن مسدود شد (لشکریپور ، 1999).

• زمین لغزش‌های ناشی از زلزله‌ی خرداد ماه سال ۱۳۶۹ منجیل در شمال ایران

در اثر این زمین لغزش‌ها که بیشتر از یکصد مورد گزارش شده است، بیشتر از دویست نفر جان خود را از دست دادند. همچنین جاده‌ها و راه‌های روستایی بسیاری تخریب و یا مسدود گردیده و به خطوط انتقال آب و برق خسارات قابل توجهی وارد شد و مساحت زیادی از باغ‌ها و کشتزارها از بین رفت (لشکریپور ، 1999).

• زمین لغزش‌های ناشی از بارندگی سنگین سال ۱۳۷۲ در گیلان

در پی این بارندگی‌ها که در حدود ۲۰۰ میلی‌متر در روز گزارش شدند، بیش از یکصد مورد زمین لغزش در استان گیلان به وقوع پیوست که در نتیجه‌ی آن ۱۶۰۰ منزل مسکونی در ۷۰ روستا تخریب شد و بیش از یکصد هکتار از کشتزارهای چای دچار آسیب کلی گردید (لشکریپور ، 1999).

• زمین لغزش‌های ناشی از بارندگی سال ۱۳۷۲ در چهارمحال و بختیاری

در پی این بارندگی‌ها، چندین زمین لغزش در استان چهارمحال و بختیاری اتفاق افتاد که بزرگ‌ترین آن زمین لغزش چیلو در روستای اردل بود که در نتیجه‌ی این زمین لغزش ۶ نفر جان باختند. سطح تخریبی این زمین لغزش در حدود سی صد هکتار گزارش شده است (لشکریپور ، 1999).

• زمین لغزش روستای عنا واقع در استان فارس

این روستا در زمستان ۱۳۷۱ شاهد زمین لغزش بزرگی بود که طی آن خسارات کلی به ساختمان‌های روستا وارد شد. با توجه به بررسی‌های انجام شده، منشأ این زمین لغزش دو عامل بارندگی و زلزله شناخته شد (حبیب‌الهی، ۱۳۷۶).

• زمین لغزش شهر گرمی واقع در استان اردبیل

در پی بارندگی‌های مه‌رماه ۱۳۷۴ زمین‌لغزشی در این شهر اتفاق افتاد و موجب تخریب بخشی از ساختمان‌های شهر گردید (شریعت‌جعفری، ۱۳۷۶).

از دیگر زمین‌لغزش‌های بزرگ در ایران می‌توان به زمین‌لغزش بزرگ معدن سرب و روی انگوران، زمین‌لغزش جاده‌ی امامزاده علی- آب‌اسک در بهار ۱۳۷۷ و شکست گوه‌ای در روز دهم فروردین ماه سال ۱۳۸۶ در کیلومتر ۱۰۳ جاده‌ی کرج-چالوس اشاره‌کرد (شریعت‌جعفری، ۱۳۷۶).

۱-۲-۲ زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده در خارج از ایران

تعدادی از مهم‌ترین زمین‌لغزش‌ها در ادامه آمده است:

• زمین‌لغزش‌های ایالت کانسو چین در سال ۱۹۲۰

در طی یک سری زمین‌لرزه در این ایالت، زمین‌لغزش‌هایی اتفاق افتاد که نزدیک به یکصد هزار نفر تلفات جانی به دنبال داشت (وفائیان، ۱۳۶۴).

• زمین‌لغزش‌های کناره‌ی کانال پاناما

این زمین‌لغزش‌ها در زمان احداث کانال به وقوع پیوست و باعث شد که در زمان جنگ جهانی اول این کانال بسته شود. مصالح ریزشی حاصل از این زمین‌لغزش‌ها آنقدر زیاد بود که برای بازگشایی موقت کانال، جابه‌جایی حداقل ۴۵ میلیون متر مکعب از این مصالح نیاز گردید (وفائیان، ۱۳۶۴).

• زمین‌لغزش وایونت^۱ (۱۹۶۰ و ۱۹۶۳)

سد بتنی وایونت به ارتفاع ۲۶۵ متر، طول ۱۶۰ متر و حجم مخزن ۱۱۵ میلیون متر مکعب در منطقه‌ی وایونت در یکصد کیلومتری شمال شهر ونیز ایتالیا در سال ۱۹۶۰ پس از اولین آبگیری

^۱ Vaiont

دچار لغزشی در قسمت شیب‌های اطراف مخزن شد و طی آن هفتصد هزار مترمکعب از مصالح شیب در مدت ده دقیقه به طرف دریاچه‌ی سد سرازیر گردید. در سال ۱۹۶۳ زمین لغزش دیگری در دیواره-ی مخزن سد اتفاق افتاد که خسارت زیادی بر جای گذاشت. در این زمین لغزش یک بلوک به حجم ۲۷۰ میلیون مترمکعب و با سرعت ۳۰ متر بر ثانیه به سوی دریاچه‌ی پشت سد لغزش کرد. در نتیجه-ی این لغزش ناگهانی، موجی به ارتفاع ۲۵۰ متر ایجاد شد و به طرف دره‌ی پایین دست جریان پیدا کرد. در اثر این حادثه، بدنه‌ی سد تخریب نشد؛ ولی متأسفانه ۲۵۰۰ نفر از اهالی منطقه، جان خود را از دست دادند (کوشکی، ۱۳۸۱).

• زمین لغزش (۱۹۵۳) ویردالن^۱ در نروژ

این زمین لغزش در شمال نروژ و در توده‌های رسی حساس اتفاق افتاد. طی این زمین لغزش یک لایه‌ی رسی به واسطه‌ی تأثیر جریان آب رودخانه، به حرکت درآمد و حجمی معادل ۵۵ میلیون متر مکعب مواد خاکی را در مدت ۳۰ دقیقه به دره‌ی رودخانه‌ی ویردالن فرو ریخت و منطقه‌ای به وسعت ۸.۵ کیلومتر مربع را پوشاند. سد حاصل از انسداد این دره، باعث ایجاد دریاچه‌ای به وسعت ۳.۲ کیلومتر مربع شد. در این حادثه یکصد و یازده نفر جان خود را از دست دادند (حق شناس، ۱۳۷۶).

۳-۱ اهداف و ضرورت پژوهش

با توجه به خطرات ناشی از زمین لغزش که در بخش قبل به تعدادی از آن‌ها اشاره شد، این پژوهش در پی آن است که با استفاده از نرم افزار GeoStudio پایداری زمین لغزش‌های بزرگ را تحت تأثیر بار زلزله بررسی کرده و با پایدار کردن آن‌ها با ردیف شمع اثر عواملی مانند محل قرارگیری ردیف شمع و تعداد آن‌ها، مقاومت سطح لغزش را بررسی کرده و راه‌کارهایی را جهت طراحی بهینه

^۱ Vaerdalen

ردیف شمع ارائه کند.

۴-۱ ساختار پژوهش

در فصل اول ضرورت انجام این پژوهش و اهداف و ساختار مورد نظر آن مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل دوم به مطالعات مختلف صورت گرفته بر روی زمین لغزش‌ها، مکانیزم‌های شکست شمع‌های تحت بار جانبی، تأثیرات گروه شمع و زمین لغزش‌های اتفاق افتاده در ایران پرداخته شده است.

فصل سوم به معرفی نرم افزار و فرضیات و روش تحلیل در مدل‌سازی؛ از قبیل هندسه‌ی مدل، خصوصیات مصالح، مدل رفتاری، شرایط مرزی، مش‌بندی و بارگذاری لرزه‌ای اختصاص یافته است.

در فصل چهارم تشریح مدل‌ها و نتایج مدل‌سازی آن‌ها به همراه تجزیه و تحلیل بر روی این نتایج بیان می‌شود. همچنین ترسیم نمودارها و بحث و مقایسه در مورد آن‌ها، تأثیر عوامل گوناگون از جمله محل قرارگیری ردیف شمع‌ها، تعداد ردیف آن‌ها و مقاومت سطح لغزش مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. به طور کلی، در این فصل محاسبه و استخراج نتایج مدل‌سازی‌های انجام شده بررسی شده است.

در نهایت فصل پنجم، به جمع‌بندی نتایج و پیشنهادات برای تحقیقات آینده اختصاص دارد.

۲- فصل دوم

مروری بر مطالعات گذشته

۱-۲ مقدمه

شمع‌های گسسته در طول چندین دهه برای افزایش پایداری زمین‌لغزش‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند (دی‌بیر و والیز^۱، ۱۹۷۰؛ ایتو و ماتسویی^۲، ۱۹۷۵؛ فکوکا^۳، ۱۹۷۷؛ الیسون و همکاران^۴، ۱۹۹۱؛ هانگ و هان^۵، ۱۹۹۶؛ کاردر و بارکر^۶، ۲۰۰۵). این شمع‌ها جهت جلوگیری از جابه‌جایی جانبی توده‌ی خاک نصب می‌شوند تا بارهای وارده را به لایه‌های پایدار زیرین منتقل کنند. وقتی که خاک به صورت جانبی جابه‌جا می‌شود، باعث به وجود آمدن نیروهای برشی و لنگرهای خمشی در شمع‌ها می‌شود. لذا بدیهی است که شمع‌ها باید به گونه‌ای طراحی شوند که مقاومت لازم را بدون رسیدن به حد گسیختگی داشته باشند که برای محاسبه آن‌ها لازم است مکانیزم عملکرد شمع‌ها برای پایدار کردن شیب را بدانیم.

با این‌که در طراحی و آرایش شمع‌های تحت بارگذاری جانبی عدم قطعیت‌هایی وجود دارد، این پایان‌نامه بر روی به دست آوردن آرایش، طول و سختی بهینه ردیف شمع‌ها متمرکز است.

در بخش‌های پیش رو یک پیشینه‌ی کوتاه در زمینه‌ی مکانیزم‌های گسیختگی یک شمع منفرد و اثرات گروهی به علت اندرکنش شمع‌ها و زمین لغزش‌های اتفاق افتاده در ایران و خارج از ایران ارائه شده است.

۲-۲ مکانیزم شکست شمع‌های تحت بارگذاری جانبی

مقاومت برشی که هر شمع می‌تواند در برابر لغزش توده‌ی خاک تأمین کند به پارامترهای زیادی بستگی دارد، از جمله قطر، طول و سختی شمع، طولی از شمع که در لایه‌ی سخت واقع شده

De Beer and Walllays^۱

Ito and Matsui^۲

Fokouka^۳

Allison et al^۴

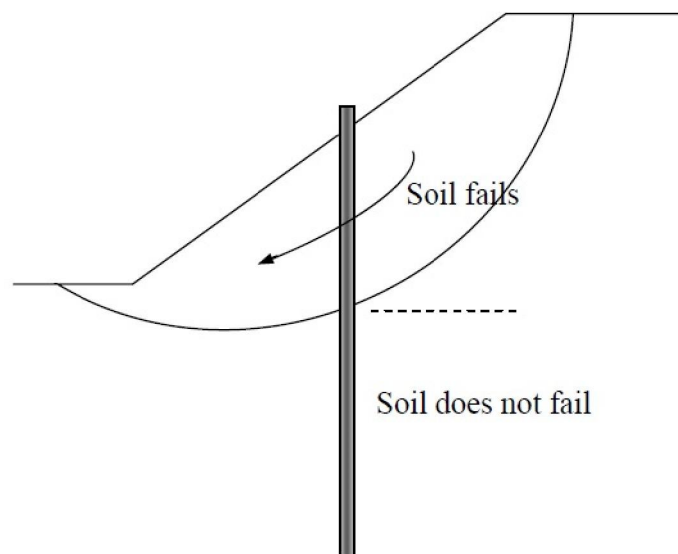
Hong and Han^۵

Carder and Barker^۶

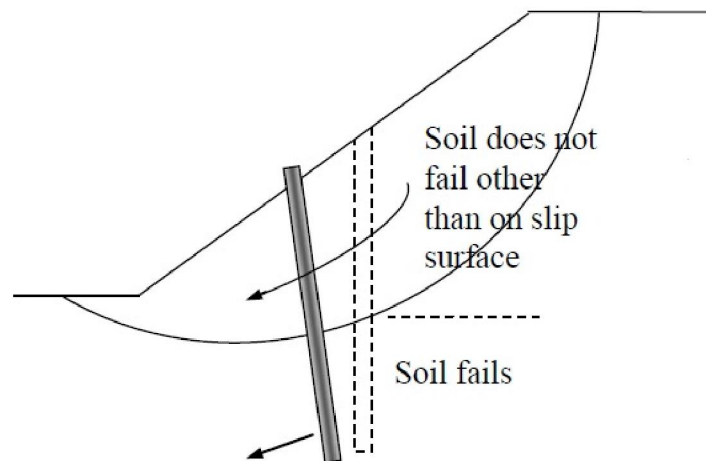
است، اندازه و وسعت توده‌ی در حال لغزش و سختی لایه‌های خاک. در هر صورت بعضی از این موارد (به عنوان مثال سختی) بر روی بار نهایی تأثیری ندارند، اما روی بار توسعه یافته‌ی ناشی از حرکت توده‌ی خاک مؤثر خواهند بود. به واسطه‌ی برهم کنش این پارامترهای متعدد، مکانیزم‌های شکست شمعی‌ها تحت بارگذاری جانبی، پیچیده است.

دو نوع اصلی از مکانیزم شکست شمعی‌ها تحت بارگذاری جانبی وجود دارد. اگر بتوان شمعی‌ها را با ظرفیت خمشی کافی طراحی کرد، گروه اول مکانیزم‌های شکست، شامل یک جریان از خاک اطراف شمعی می‌شود که گسیخته می‌گردد. ممکن است این گسیختگی در داخل توده‌ی در حال لغزش اتفاق بیفتد (شکل ۲-۱)، یا اگر عمق شمعی‌ها خیلی از سطح گسیختگی پایین‌تر نباشد، خاک زیرین گسیخته شود (شکل ۲-۲) (فکوکا، ۱۹۷۷).

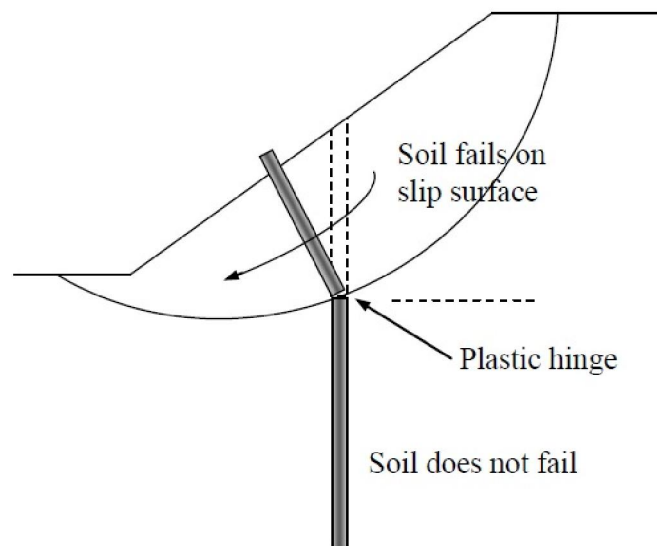
گروه دوم مکانیزم‌های شکست، شامل تشکیل یک یا چند مفصل پلاستیک در شمعی است (شکل ۲-۳). مفصل پلاستیک در محل لنگرهای خمشی بیشینه شکل می‌گیرند (فکوکا، ۱۹۹۷)



شکل ۲-۱ شمعی‌ها در فاصله‌ی زیاد از یکدیگر قرار گرفته و توانایی توقف توده‌ی در حال لغزش را ندارند. شمعی‌ها در جای خود باقی مانده و توده‌ی خاک از میان آن‌ها عبور می‌کند (فکوکا، ۱۹۹۷).



شکل ۲-۲ عمق شمع‌ها به اندازه کافی نیست و همراه با توده‌ی در حال لغزش جابه‌جا می‌شوند و در لایه‌ی زیرین خاک شیار ایجاد می‌کنند (فکوکا، ۱۹۹۷).

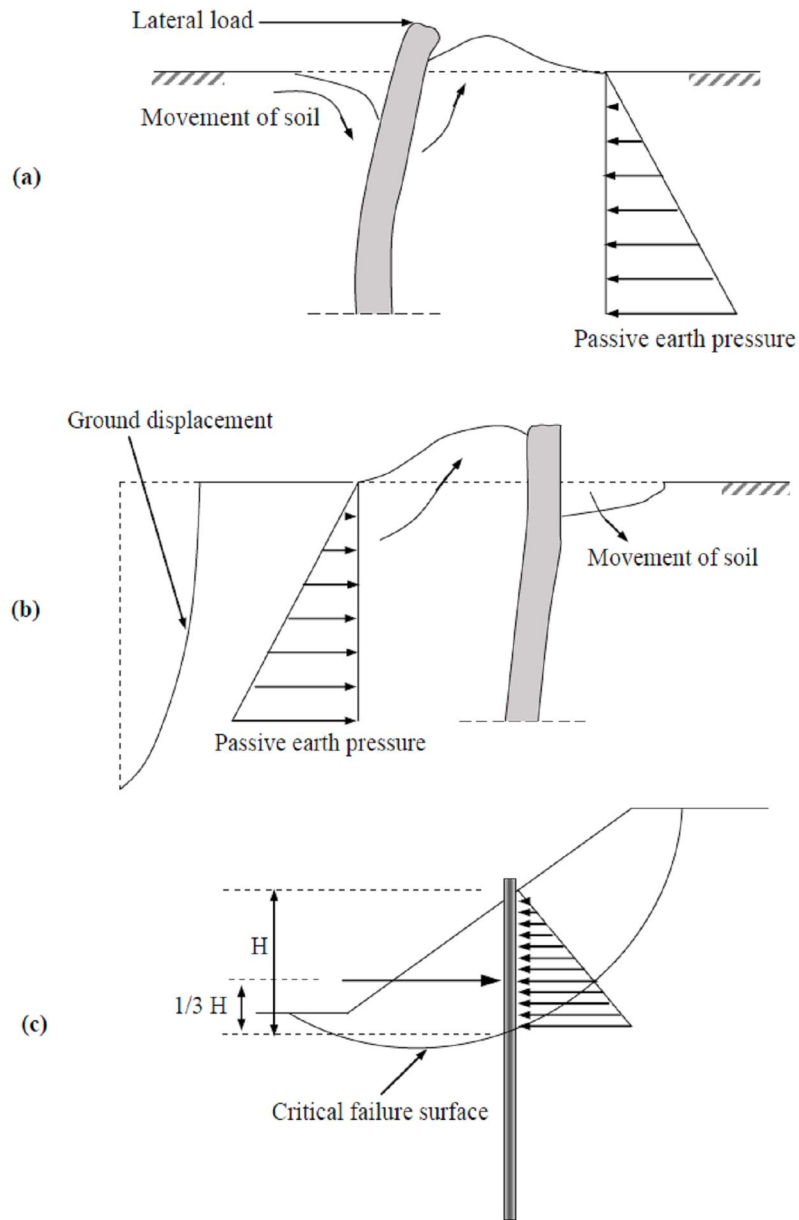


شکل ۳-۲ مقاومت خمشی تسلیم شمع کافی نیست (فکوکا، ۱۹۹۷).

مکانیزم شکست برای شمعی که به صورت محرک بارگذاری می‌شود (در جایی که بار خارجی به سرشمع وارد می‌شود) (برمز^۱، ۱۹۶۴) متفاوت از شمعهایی است که به صورت مقاوم از طریق حرکت زمین بارگذاری می‌شوند (شکل های ۲-۴-b و ۲-۴-c). مکانیزم شکست برای شمع تحت

^۱ Broms

بارگذاری مقاوم اولین بار توسط ویجیانی^۱ در سال ۱۹۸۱ تحلیل شد.



شکل ۲-۴ تصاویر شماتیک بارگذاری جانبی شمع‌ها (a) بارگذاری محرک (b) بارگذاری مقاوم (کوبرینوسکی و همکاران^۲، ۲۰۰۶) (c) یک توزیع فشار مثلثی فرضی بالای سطح گسیختگی از طرف توده‌ی خاک در حال لغزش بر شمع وارد می‌شود. (بارگذاری مقاوم) (ویجیانی، ۱۹۸۱)

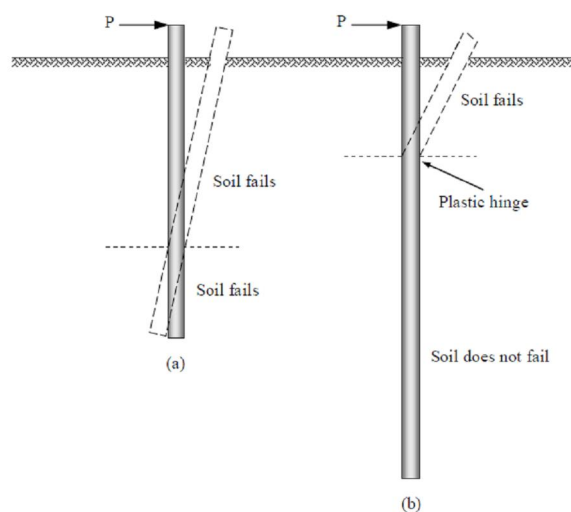
^۱ Viggiani

^۲ Cubrinovski et al.

۱-۲-۲ شمع‌های تحت بارگذاری محرک

برمز (۱۹۶۴) حالات ممکن گسیختگی شمع تک، تحت بارگذاری جانبی که در خاک‌های چسبنده اشباع رانده شده بودند، را تحلیل کرد. وی مکانیزم‌های گسیختگی را با توجه به وضعیت سر شمع (آزاد یا مهار شده) و طول شمع (کوتاه، متوسط و بلند) برای یک شمع تحت بار جانبی نقطه‌ای در سر شمع تفکیک کرد.

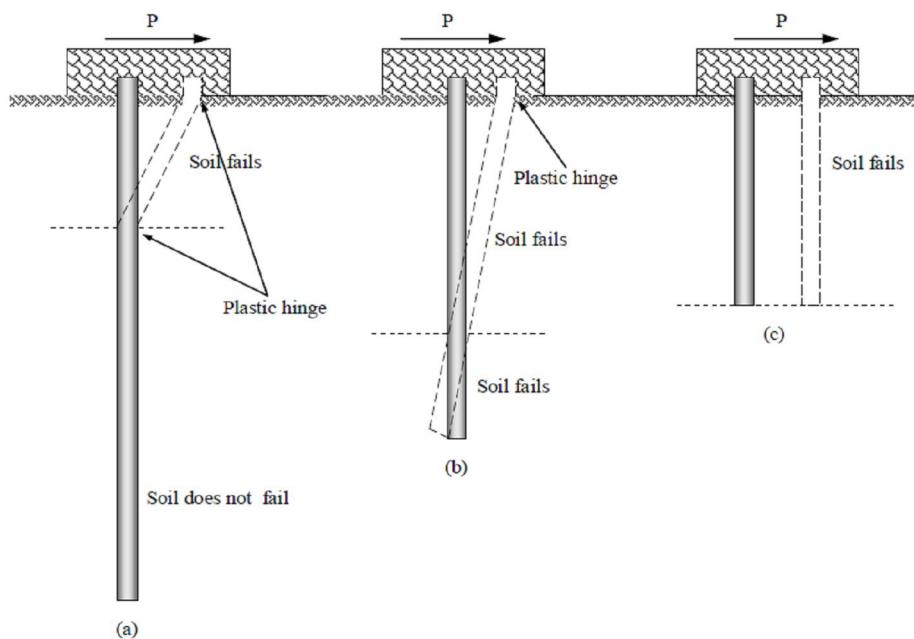
او دریافت که در یک شمع کوتاه مهارنشده، گسیختگی زمانی اتفاق می‌افتد که فشار جانبی زمین به مقاومت جانبی خاک دربرگیرنده شمع در کل طول آن می‌رسد و حول یک نقطه در زیر سطح زمین به صورت یک جسم صلب چرخش می‌کند (شکل ۲-۵-۲a). این نوع از گسیختگی فقط زمانی رخ می‌دهد که طول شمع و عمق نفوذ آن کم باشد. در یک شمع بلند مهارنشده، گسیختگی زمانی رخ می‌دهد که بیشینه‌ی لنگر خمشی در شمع از لنگری که باعث جاری شدن یا گسیختگی مقطع شمع می‌شود، بیشتر باشد (شکل ۲-۵-۲b).



شکل ۲-۵-۲ حالات گسیختگی برای شمع‌های با سر آزاد، الف) شمع کوتاه ب) شمع بلند (برمز، 1964)

برمز (۱۹۶۴) همچنین حالات گسیختگی ممکن برای شمع‌های با سر مهار شده به وسیله‌ی

سرشمع را مشخص کرد. در حالتی که شمع بلند باشد، گسیختگی زمانی رخ می‌دهد که دو مفصل پلاستیک در طول شمع به وجود بیایند. اولین مفصل پلاستیک در مقطع بیشینه‌ی لنگر خمشی منفی قرار دارد (در تراز مهارشدگی، معمولاً در زیر سرشمع) و دومین مفصل پلاستیک در مقطع بیشینه‌ی لنگر خمشی مثبت؛ یعنی در عمقی پایین‌تر از سطح زمین قرار دارد. این نوع از گسیختگی زمانی ممکن است رخ دهد که طول شمع و عمق نفوذ آن زیاد باشد (شکل ۲-۶-۲a). در شمع‌های با طول متوسط و عمق نفوذ متوسط، گسیختگی بعد از تشکیل اولین مفصل پلاستیک در انتهای بالایی شمع رخ می‌دهد و شمع حول نقطه‌ای پایین‌تر از سطح زمین چرخش می‌کند (شکل ۲-۶-۲b). شمع‌های کوتاه مهارشده هنگامی گسیخته می‌شوند که بار جانبی اعمال شده، برابر با مقاومت نهایی جانبی خاک باشد. در این حالت شمع بدون تغییر شکل از بین خاک عبور کرده و جابه‌جا می‌شود (شکل ۲-۶-۲c).



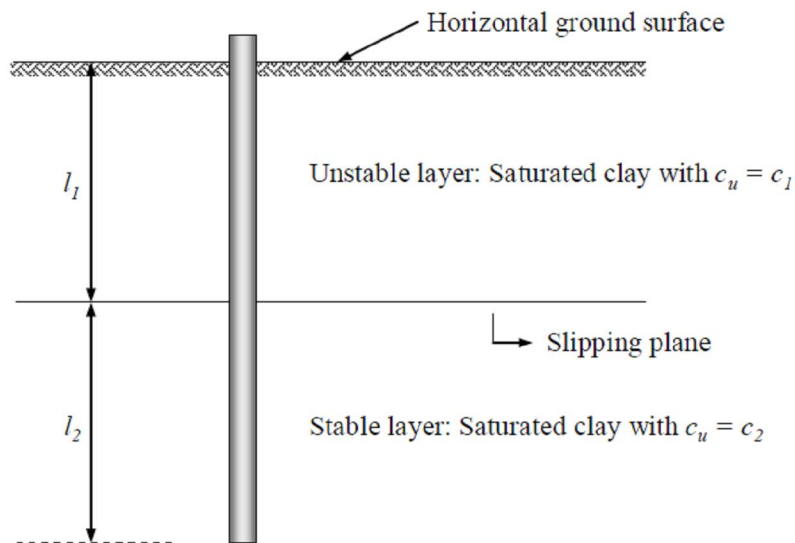
شکل ۲-۶ حالات گسیختگی برای شمع‌های مهار شده (a) شمع بلند (b) شمع با طول متوسط (c) شمع کوتاه (برمز، ۱۹۶۴)

برمز (۱۹۶۴) فقط روی مکانیزم گسیختگی شمع‌های تک موجود در خاک و صرفاً چسبیده

متمرکز بود. هم‌چنین در تحلیل‌های برمز یک بار منفرد در نوک شمع وارد می‌شود؛ در حالی که در پایدارسازی یک شیب، شمع ممکن است تحت یک بار گسترده در طول شمع قرار گیرد (به عنوان مثال بارگذاری مقاوم).

۲-۲-۲ شمع‌های تحت بارگذاری مقاوم

ویجیانی (1981) مکانیزم‌های گسیختگی شمع‌های بارگذاری شده توسط حرکت زمین را با در نظر گرفتن فاکتورهای مختلفی تفکیک کرد. وی شش مکانیزم گسیختگی مختلف برای شمع‌های درون خاک دو لایه‌ی صرفاً چسبنده شناسایی کرد که به لنگر جاری شدن مقطع شمع، پارامترهای مقاومت لایه‌های ثابت و در حال لغزش خاک، ضخامت توده‌ی خاک در حال لغزش و طول و قطر شمع بستگی دارند. روش پیشنهادی او بر اساس فرضیات برمز (1964) برای ارزیابی بار نهایی یک شمع عمودی تحت بار نقطه‌ای، افقی است.



شکل ۷-۲ شماتیک نشان دهنده روش ویجیانی (ویجیانی، 1981)

ویجیانی (1981) مسئله‌ی برهم کنش واقعی شمع-خاک را با در نظر گرفتن فرضیات زیر ساده

سازی کرد:

(۱) زمین شامل دو لایه‌ی خاک است که لایه‌ی بالایی به طور یکنواخت بر روی یک لایه از خاک

زیرین لغزش می‌کند.

(۲) سطح زمین و سطح لغزش افقی هستند.

(۳) هر دو لایه‌ی خاک رس اشباع، در شرایط زه‌کشی نشده هستند.

(۴) مقاومت برشی زه‌کشی نشده (C_u) در هر دو لایه برابر است.

ویجیانی (1981) سه مکانیزم گسیختگی با فرض این‌که فقط خاک می‌تواند گسیخته شود، ارائه کرد که در شکل ۲-۸ به ترتیب با حروف A، B و C نشان داده شده‌اند. مکانیزم A یک شمع کوتاه را نشان می‌دهد که مقدار کمی در زیر سطح لغزش نفوذ کرده است. فرض می‌شود که این شمع همراه با توده‌ی خاک در حال لغزش جابه‌جا شود. با توجه به بخشی از شمع که در زیر سطح لغزش است و در خاک زیرین شیار ایجاد می‌کند، خاک اطراف قسمت زیرین شمع در حالت گسیختگی قرار می‌گیرد. فشار خاک در بالای سطح لغزش به مقدار نهایی نمی‌رسد و مقدارشان هم مشخص نیست؛ همان‌طور که برای این قسمت از شمع، توزیع نیروی برشی و لنگر خمشی مشخص نیست. مکانیزم گسیختگی B یک چرخش شمع به صورت جسم صلب است، همراه با دو نقطه که در هر کدام جهت جابه‌جایی نسبی شمع-خاک تغییر می‌کند. یکی از این نقاط در بالای سطح لغزش و دیگری در زیر آن قرار دارد. در این مکانیزم فرض می‌شود که خاک در تمام طول شمع در حال گسیختگی است و می‌توان توزیع نیروی برشی و لنگر خمشی را کاملاً محاسبه کرد. مکانیزم C مربوط به یک شمع است که مقداری پایین‌تر از سطح لغزش امتداد پیدا می‌کند. در این حالت، خاک در حال لغزش در اطراف شمع در قسمت فوقانی گسیخته، اما خاک زیرین تغییر نمی‌کند. فشار جانبی شمع-خاک، نیروی برشی و لنگر خمشی فقط برای قسمت بالای سطح لغزش قابل محاسبه هستند.

ویجیانی (1981) بر اساس توزیع ایده آل فشار جانبی شمع-خاک (p_u) راه‌حل‌های بدون بعد

برای نیروی برشی و لنگر خمشی برای هر مکانیزم گسیختگی استنتاج کرد. نیروی برشی بیشینه، همیشه در تراز سطح گسیختگی اتفاق می افتد و با مقاومت بیشینه که سیستم برای مقاومت در برابر حرکات زمین قادر به تأمین است، مطابقت دارد (معادلات ۱-۲ تا ۳-۲).

$$\text{حالت A} \quad \frac{T_A}{k_1 c_1 d l_1} = \frac{\lambda}{\chi} \quad (1-2)$$

$$\text{حالت B} \quad \frac{T_B}{k_1 c_1 d l_1} = \sqrt{\left(\frac{1+\lambda}{1+\chi}\right)^2 + \left(\frac{\lambda^2 + \chi}{\chi(1+\chi)}\right)} - \left(\frac{1+\lambda}{1+\chi}\right) \quad (2-2)$$

$$\text{حالت C} \quad \frac{T_c}{k_1 c_1 d l_1} = 1 \quad (3-2)$$

جایی که :

$$\lambda = \frac{l_2}{l_1} \quad \text{و} \quad \chi = \frac{k_1 c_1}{k_2 c_2}$$

$$c_1 = C_u \text{ لایه‌ی خاک ناپایدار}$$

$$c_2 = C_u \text{ لایه‌ی خاک پایدار}$$

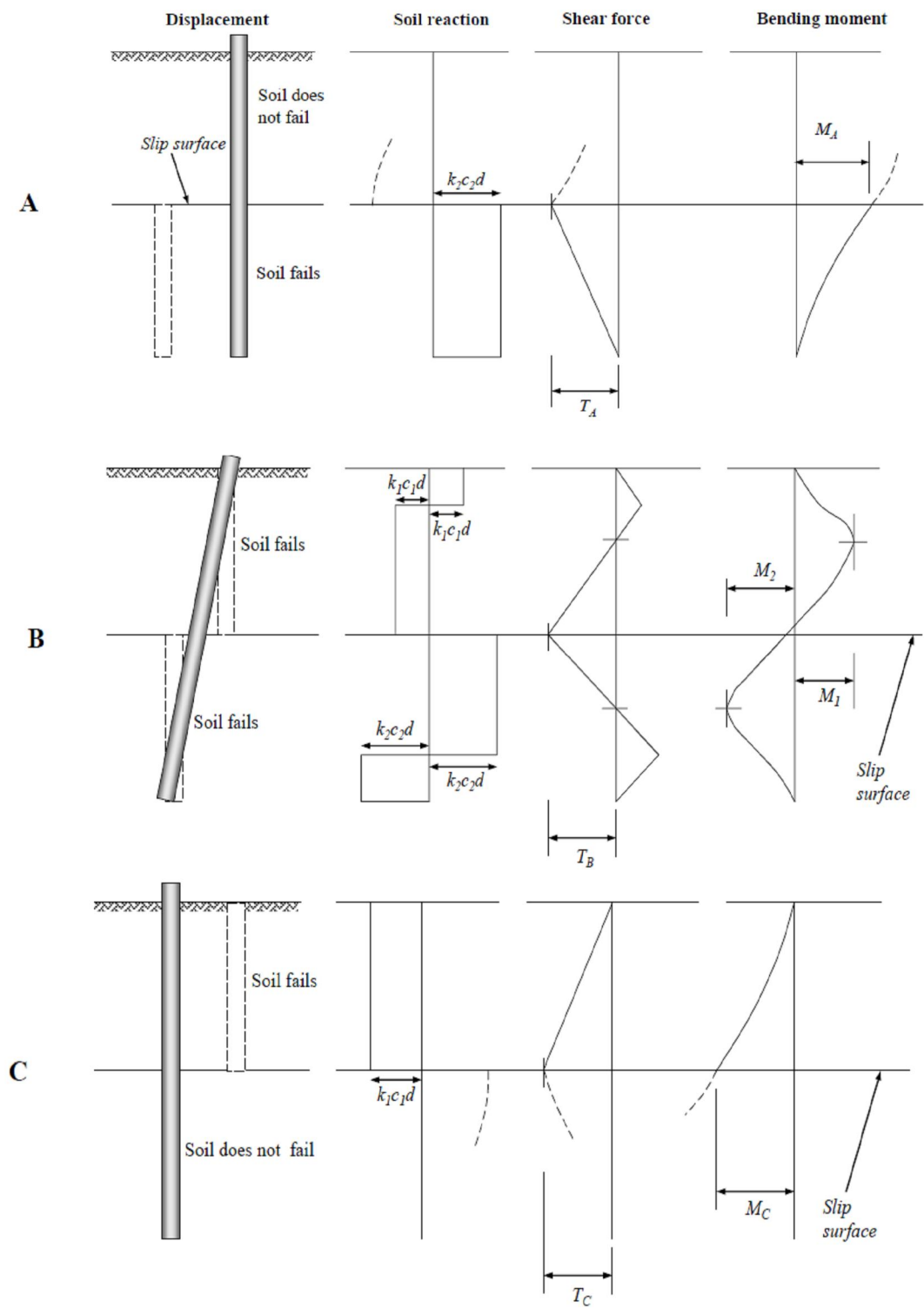
$$k_1 = P_u / c_u d \text{ لایه‌ی خاک ناپایدار}$$

$$k_2 = P_u / c_u d \text{ لایه‌ی خاک پایدار}$$

$$l_1 = \text{طولی از شمع که در لایه‌ی خاک ناپایدار است}$$

$$l_2 = \text{طولی از شمع که در لایه‌ی خاک پایدار است}$$

$$T = \text{نیروی برشی ایجاد شده در یک مقطع خاص از شمع}$$



شکل ۸-۲ حالات گسیختگی شمع (ویجیانی، ۱۹۸۱) (A) شمع همراه با توده‌ی خاک در حال لغزش جابه‌جا می‌شود (B) شمع به صورت جسم صلب چرخش می‌کند (C) خاک در حال لغزش در اطراف شمع در قسمت فوقانی گسیخته می‌شود، اما خاک زیرین گسیخته نمی‌شود.

گسیختگی حالت A در این صورت اتفاق می‌افتد :

$$\lambda < \lambda' = \chi \left(\frac{\sqrt{(2+2\chi)} - 1}{1+2\chi} \right) \quad (4-2)$$

گسیختگی حالت C در این صورت اتفاق می‌افتد :

$$\lambda > \lambda'' = \chi + \sqrt{2\chi^2 + 2\chi} \quad (5-2)$$

گسیختگی حالت B در این صورت اتفاق می‌افتد :

$$\lambda' \leq \lambda \leq \lambda'' \quad (6-2)$$

ویجیانی (1981) ضریب معادل فشار جانبی نهایی شمع-خاک را ($p_u/c_u d$) به عنوان یک پارامتر ظرفیت باربری (k) تعریف کرد و مقادیر ۴ و ۸ را به ترتیب برای خاک‌های ناپایدار و پایدار فرض کرد.

راه‌حل‌های ویجیانی (1981) ایده‌آل هستند، اما تفکیک و درک مکانیزم‌های گسیختگی برای شمع‌های در معرض جابه‌جایی جانبی را ممکن می‌سازند. بسیاری از جوانب زمین لغزش‌های واقعی مانند سطح زمین و صفحه‌ی لغزش شیب‌دار و پارامترهای زه‌کشی شده دراز مدت در نظر گرفته نشده‌اند. روش ویجیانی (1981) فقط برای حالت نهایی مناسب است و هیچ نشانه‌ای از توسعه‌ی مقاومت شمع، یا هرگونه تغییر در مکانیزم جابه‌جایی با جابه‌جایی خاک نمی‌دهد. در طراحی، شمع‌ها باید با استفاده از ضریب اطمینان مناسب، دور از گسیختگی نهایی باشند، همچنین از لحاظ بیشینه جابه‌جایی باید یک حد قابل قبول تعیین شود.

کاناگاسابای^۱ (2010) با انجام تعدادی تحلیل‌های سه بعدی تفاضل محدود با FLAC 3D

¹ Kanagasabai

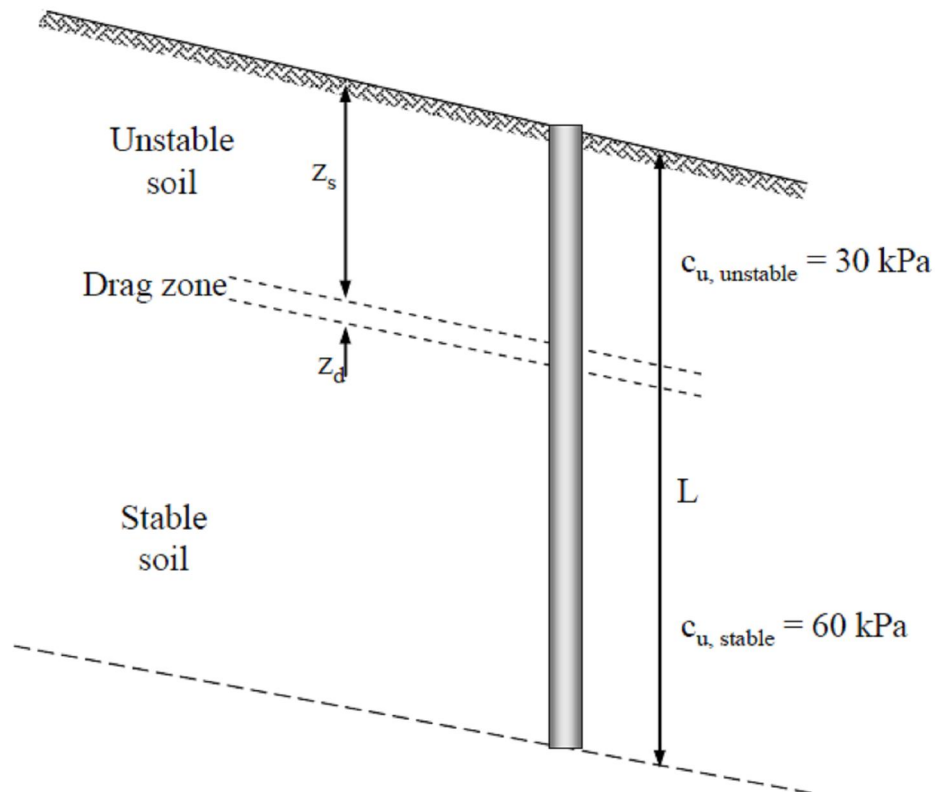
اثرات ردیف شمع بر پایداری زمین لغزش را بررسی کرد. او ابتدا مکانیزم‌های گسیختگی مشخص شده توسط ویجیانی (1981) را در نرم‌افزار FLAC 3D بررسی کرد و صحت آن‌ها را با استفاده از نتایج تحلیل‌ها اثبات و سپس اثرات مقاومت سطح لغزش، شیب سطح لغزش و فاصله‌بندی بین شمع‌ها در پایداری زمین لغزش با استفاده از ردیف شمع را نیز تحلیل کرد. کاناگاسابای (2010) نشان داد که افزایش فاصله‌بندی بین شمع‌ها بیشتر از $\frac{3}{5}$ برابر قطر شمع، باعث جریان پیدا کردن خاک از میان شمع‌ها و در نتیجه کاهش نیروهای برشی و لنگرهای خمشی در شمع‌ها می‌شود. سپس با ثابت در نظر گرفتن فاصله‌ی شمع‌ها نشان داد که اثر کاهش مقاومت سطح لغزش و افزایش شیب آن به صورت افزایش نیروهای برشی و لنگر خمشی در شمع‌ها بروز می‌کند.

پولس^۱ (1995) یک تعداد تحلیل المان مرزی ساده شده با استفاده از برنامه کامپیوتری ERCAP (CPI, 1992) انجام داد تا بر تعدادی از محدودیت‌های ویجیانی (1981) غلبه کند. او با استفاده از ارزیابی پاسخ شمع‌ها به حرکات جانبی زمین، یک روش برای طراحی شمع‌های مورد استفاده در پایدار کردن زمین لغزش ارائه کرد. شمع به شکل یک تیر الاستیک ساده و خاک به شکل یک محیط الاستیک پیوسته مدل‌سازی شد. یک تنش جانبی محدود کننده‌ی شمع-خاک تعیین شد تا اجازه دهد که گسیختگی موضعی خاک به وجود آید و یک پاسخ غیر خطی به دست بیاید. برای تحمیل بار جانبی بر شمع، خاک ناپایدار به صورت یک جسم به طرف پایین شیب، در ناحیه‌ی صفحه‌ی لغزش حرکت می‌کند (شکل ۲-۹).

پولس سه حالت گسیختگی مشابه با ویجیانی (1981) گزارش کرد :

- حالت جریان: وقتی که عمق صفحه‌ی لغزش کم باشد، خاک ناپایدار وارد حالت پلاستیک شده و دور شمع ثابت جریان پیدا می‌کند (شکل ۲-۱۰-a) (معادل حالت C از ویجیانی).

Poulos^۱



شکل ۹-۲ مسئله‌ی اساسی یک شمع در شیب ناپایدار (پولس، ۱۹۹۵)

- حالت شمع کوتاه: هنگامی که صفحه‌ی لغزش نسبتاً عمیق باشد و طول شمع در خاک پایدار نسبتاً کم باشد، خاک ناپایدار در حال لغزش، شمع را از میان لایه‌ی خاک پایدار با خود حرکت می‌دهد (شکل ۲-۱۰-۲ c) (معادل حالت A از ویجیانی).
- حالت متوسط: هنگامی که مقاومت خاک در هر دو خاک ناپایدار و پایدار در طول شمع بسیج می‌شود (شکل ۲-۱۰-۲ b) (معادل حالت B از ویجیانی)

پولس (۱۹۹۵) مشاهده کرد که بالاترین نیروی برشی و لنگر خمشی در حالت گسیختگی متوسط در شمع ایجاد می‌شود. او هم‌چنین مشاهده کرد که بیشترین نیروی برشی در شمع در تراز سطح گسیختگی ایجاد می‌شود. سرانجام پولس نتیجه گرفت که بیش‌ترین نیروی برشی ایجاد شده در شمع به چند پارامتر بستگی دارد؛ در درجه‌ی اول مقاومت برشی خاک بالایی و زیرین سطح لغزش،

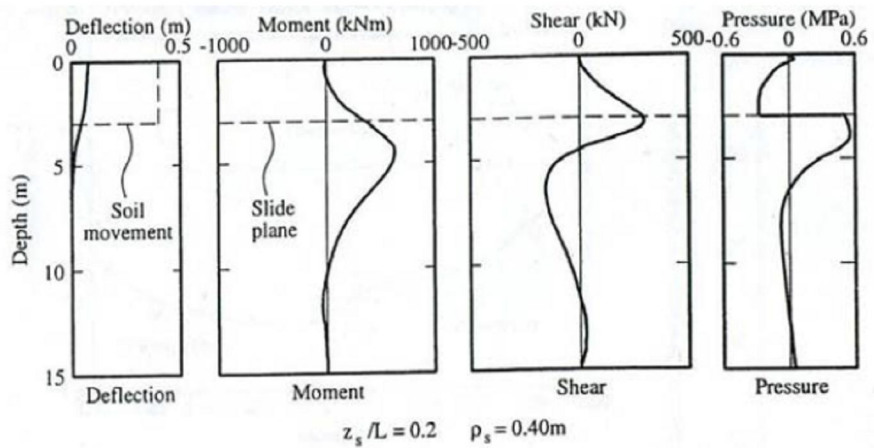
عمق سطح لغزش نسبت به طول شمع و مقاومت ساختار شمع.

تحلیل‌های انجام شده توسط ویجیانی (1981) و پولس (1995) رفتار شمع در حالت بارگذاری نهایی را توضیح می‌دهد، اما به طور کلی شمع‌های پایدارکننده شیب برای تحمل یک بار سرویس طراحی می‌شوند و نه بار نهایی، و در نتیجه درک رفتار شمع‌ها در حالت بارگذاری سرویس مفید است. اسمترست^۱ و پوری^۲ (2007) رفتار شمع‌های واقعی استفاده شده برای پایداری خاک‌ریز ریل راه‌آهن (شمع‌های تحت بارگذاری مقاوم) را تحت بارگذاری سرویس تحلیل کردند. تحلیل‌ها با استفاده از برنامه‌ی ALP (OASYS, 2004) انجام شد که در آن، شمع به شکل یک سری عناصر تیر محدود و خاک به شکل فنرهای الاستیک-پلاستیک مدل‌سازی شد. شمع با جابه‌جایی خاک در بخش بالای شمع مدل که در شکل ۲-۱۱ با پروفیل‌های جابه‌جایی خاک D1 و D2 نشان داده شده است، بارگذاری شد.

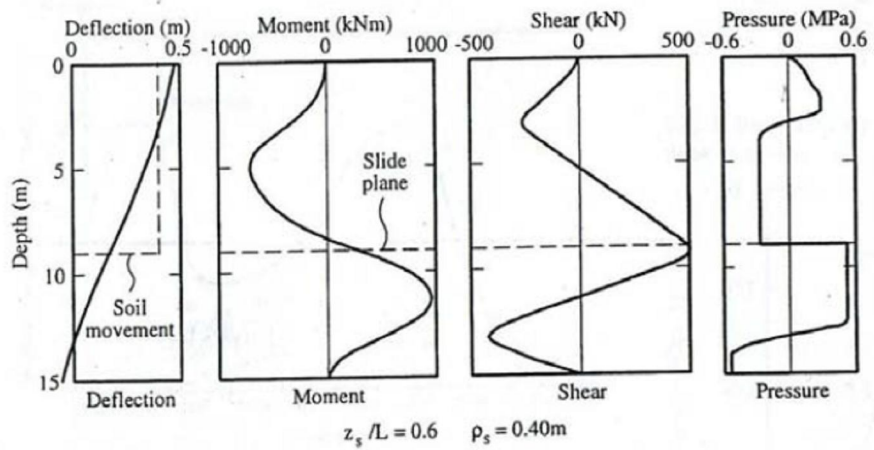
شکل ۲-۱۲-a نتایج فشار خالص ALP را برای تحلیل با جابه‌جایی اعمال شده D1 همراه با توزیع فشار خالص به دست آمده از مشتق‌گیری منحنی‌ها و توزیع لنگر خمشی از داده‌های کرنش سنج‌ها و داده‌های انحراف‌سنج نشان می‌دهد. شکل ۲-۱۲ به وضوح نشان می‌دهد که فشارهای خالص رشد یافته در طول محور شمع برای پروفیل‌های جابه‌جایی اعمال شده D1 و D2 از فشارهای محدود کننده یا نهایی فاصله داشته و با جابه‌جایی اعمال شده به خاک افزایش می‌یابد. نتایج این تحلیل تأیید می‌کنند که خاک‌ریز پایدار شده با شمع، شرایط بارگذاری سرویس را تجربه می‌کند و به جابه‌جایی بیشتری نیاز دارد تا به حالت نهایی برسد.

Smethurst^۱

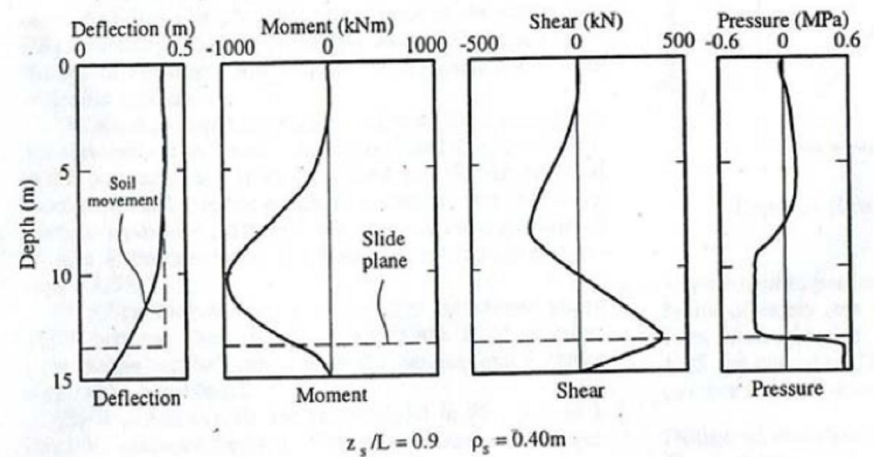
Powrie^۲



(a) Flow Mode

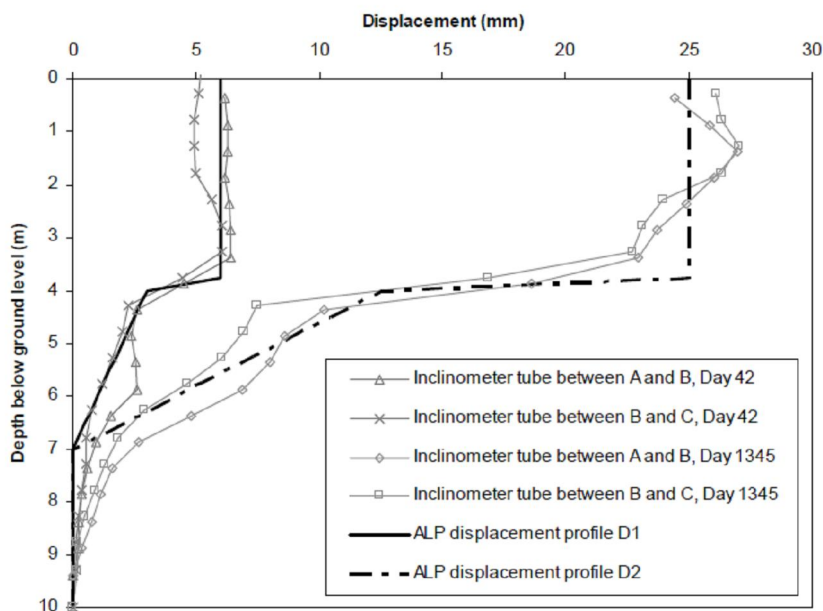


(b) Intermediate Mode



(c) Short Pile Mode

شکل ۲-۱۰ مشخصات رفتاری شمع برای حالات مختلف گسیختگی در حالت نهایی بارگذاری (پولس، ۱۹۹۵)



شکل ۲-۱۱ جابه‌جایی خاک اعمال شده مورد استفاده در ALP (اسمترست و پآوری، ۲۰۰۷)

۲-۳ تأثیرات گروه به سبب اندرکنش خاک-شمع

اغلب اوقات شمع‌ها به صورت گروهی استفاده می‌شوند. هنگامی که شمع‌ها در یک گروه شمع، فاصله‌های نزدیک به هم دارند، حضور شمع‌های بارگذاری شده مجاور بر رفتار هریک از شمع‌ها اثر می‌گذارد (پرانسبی^۱ و اسپرینگمن^۲، ۱۹۹۹). بسیاری از محققان (برمز، ۱۹۶۴؛ رندالف^۳، ۱۹۸۱؛ چن و پولس، ۱۹۹۷) تشخیص داده‌اند که شمع‌های یک گروه در مقایسه با شمع منفرد ممکن است به علت اثرات اندرکنش، مقداری کاهش ظرفیت داشته باشند.

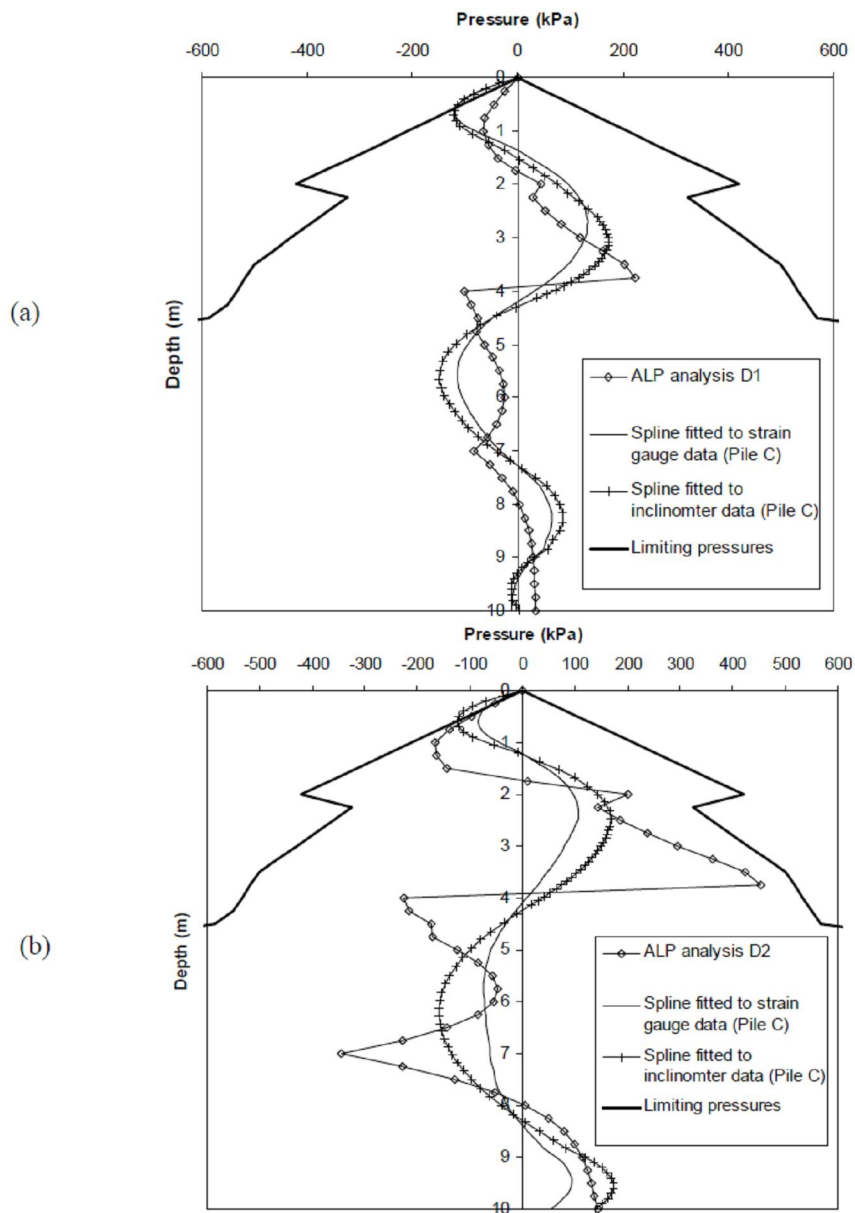
با این وجود به علت کمبود اطلاعات از اثرات اندرکنش گروه شمع، اغلب اوقات حتی برای گروه

^۱ Pronsbey

^۲ Springman

^۳ Randolph

شمع‌ها از روابط شمع منفرد در طراحی استفاده می‌شود (کای^۱ و اوگای^۲، 2003). از این رو به دست آوردن ادراک بهتر از اندرکنش شمع-خاک-شمع در گروه شمع‌ها مهم است.



شکل ۲-۱۲ نتایج تحلیل‌های ALP و فشارهای محاسبه شده‌ی ترسیم شده همراه با توزیع‌های فشار تعیین شده توسط مشتق‌گیری از توزیع‌های لنگر خمشی برای پروفیل‌های جابه‌جایی اعمال شده D2(b) و D1(a) (اسمترست و پآوری، 2007)

Cai^۱
Ugai^۲

۱-۳-۲ آزمایش میدانی

رلینز^۱ و همکاران (1998) برای تعیین اثرات اندرکنش شمع-خاک-شمع آزمایش بار جانبی استاتیکی مقیاس کامل را بر روی گروه شمع انجام دادند. آن‌ها با استفاده از انحراف سنج‌ها و کرنش سنج‌ها یک گروه شمع ۳×۳ با فاصله‌ی سه برابر قطر از یکدیگر را که در یک لایه از رس و سیلت با سختی کم تا متوسط و لایه‌ی زیرین ماسه‌ی رانده شده آزمایش کردند. آن‌ها هم‌چنین یک شمع منفرد را برای مقایسه‌ی اندازه‌گیری آزمایش کردند.

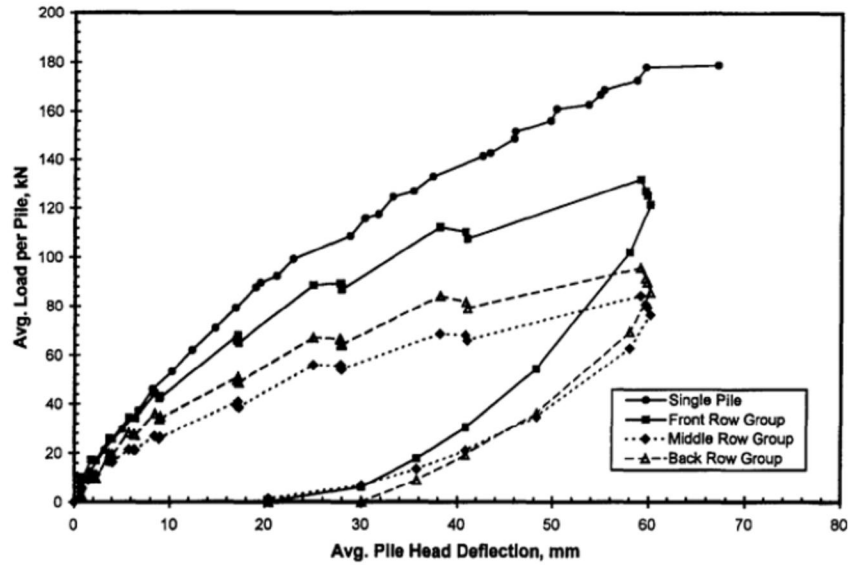
رلینز و همکاران (1998) بار جانبی را به صورت افزایشی به شمع منفرد و گروه شمع در سر شمع (بارگذاری محرک) اعمال کردند و منحنی میانگین بار شمع در برابر میانگین خمش سر شمع را رسم کردند (شکل ۲-۱۳). آن‌ها از این نتایج دریافتند که توزیع بار در گروه شمع یکنواخت نبوده و تابعی از موقعیت ردیف است. شکل ۲-۱۴ نسبت بین میانگین بار افقی تحمل شده توسط شمع در هر ردیف (H_{group})، و بار تحمل شده توسط شمع منفرد (H_{single}) را نشان می‌دهد. رلینز و همکاران مشاهده کردند که برای یک مقدار خمش مشخص، شمع‌های ردیف وسط، بار کمتری از شمع‌های ردیف جلو را تحمل کردند و شمع‌های تمام ردیف‌ها بار کمتری از شمع منفرد تحمل کردند. هنگامی که ردیف شمع‌ها در فاصله نزدیک به یکدیگر هستند، نواحی گسیختگی برای شمع‌های منفرد هم-پوشانی داشته (شکل ۲-۱۵) و از این رو ردیف‌های وسط، بار کمتری را متحمل می‌شوند.

مرحله بعدی کار آن‌ها شامل محاسبه‌ی دوباره‌ی متغیر $P_M = P_{GP}/P_{SP}$ (معادله ۲-۷) با استفاده از برنامه‌ی کامپیوتری GROUP است (ریس^۲ و همکاران، 1996). شکل ۲-۱۶ منحنی‌های طراحی موقت که متغیرهای P را برای ردیف شمع‌های وسط و جلو به عنوان تابعی از فاصله‌ی بین شمع‌ها نشان می‌دهند را برای رس‌ها و سیلت‌های با پلاستیسیته پایین بروز می‌دهند. پس می‌توان

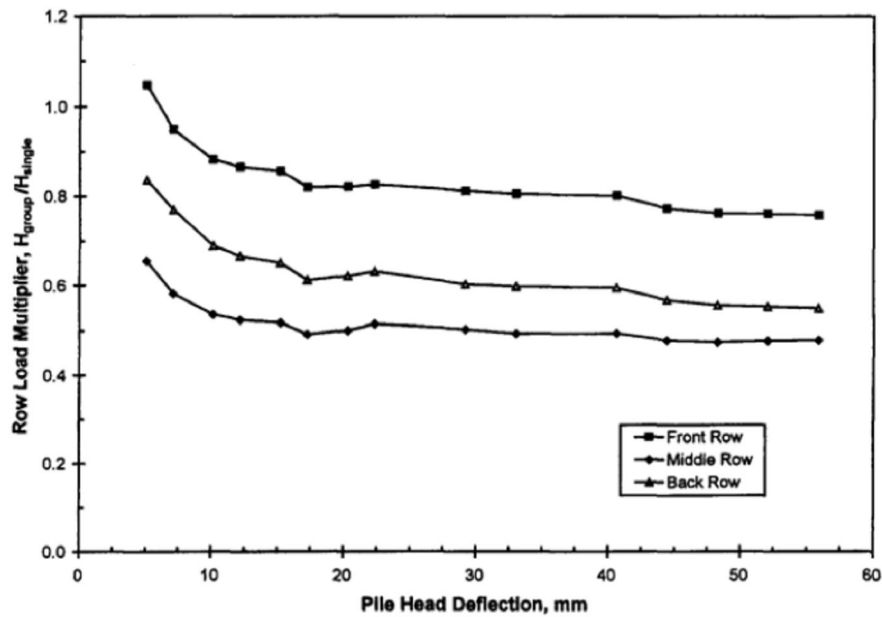
Rollins^۱

Reese^۲

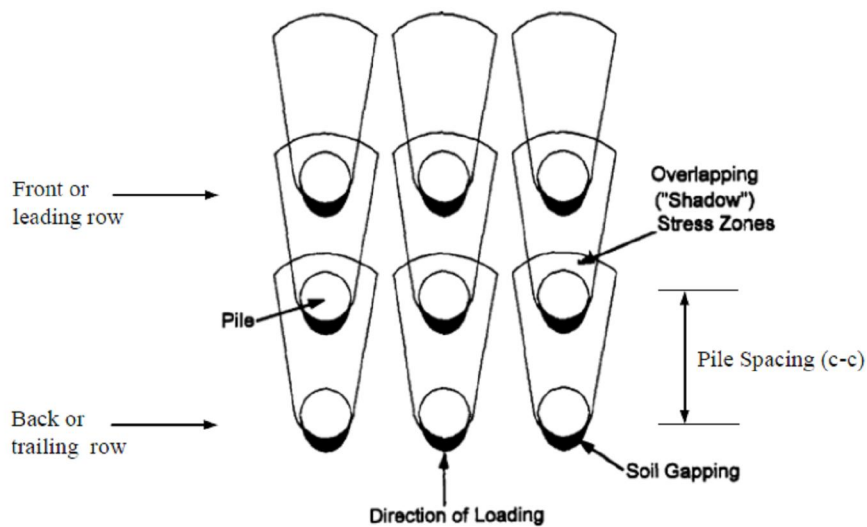
نتیجه گرفت که ردیف شمعی با فاصله‌ی بیشتر از ۶ برابر قطر شمع به صورت دو ردیف متفاوت رفتار می‌کنند.



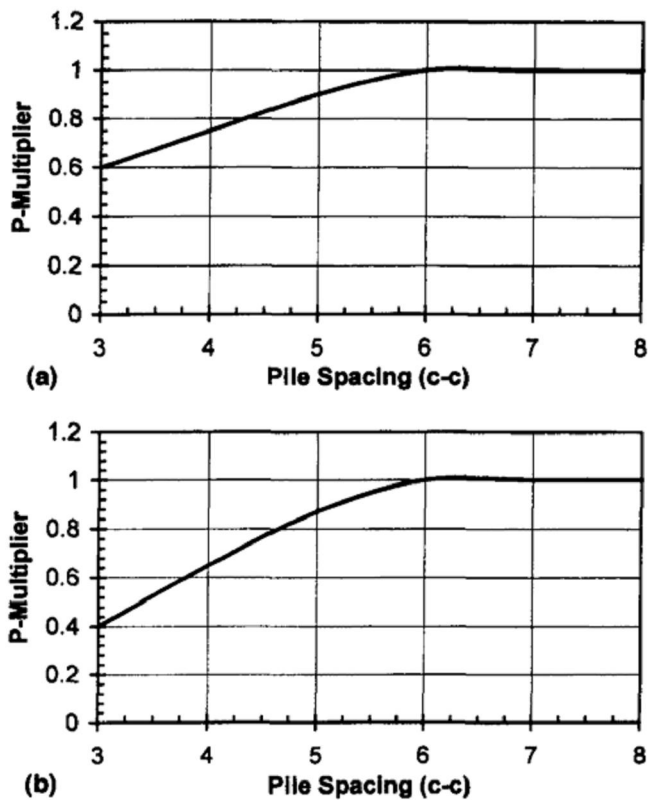
شکل ۲-۱۳ میانگین بار شمع در برابر منحنی‌های خمش برای هر ردیف از شمع‌ها در مقایسه با شمع منفرد (رلینز و همکاران، ۱۹۹۸)



شکل ۲-۱۴ نسبت میانگین بار تحمل شده توسط شمع در هر ردیف و بار تحمل شده توسط شمع منفرد به عنوان تابعی از خمش جانبی سر شمع (رلینز و همکاران، ۱۹۹۸)



شکل ۲-۱۵ ترسیم شماتیک نشان دهنده‌ی کاهش ظرفیت باربری در گروه شمع‌ها به علت هم‌پوشانی نواحی گسیختگی و ایجاد شکاف پشت شمع‌ها (رلینز و همکاران، ۱۹۹۸)



شکل ۲-۱۶ منحنی‌های طراحی موقت برای متغیرهای P ($P_M = P_{GP} / P_{SP}$) به عنوان تابعی از فاصله‌ی بین شمع‌ها (a) ردیف‌های جلو؛ (b) ردیف‌های وسط (رلینز و همکاران، ۱۹۹۸)

$$P_M = \frac{P_{GP}}{P_{SP}} \quad (7-2)$$

که در آن:

P_{GP} = مقاومت افقی خاک در برابر یک شمع از گروه شمع

P_{SP} = مقاومت افقی خاک در برابر یک شمع منفرد

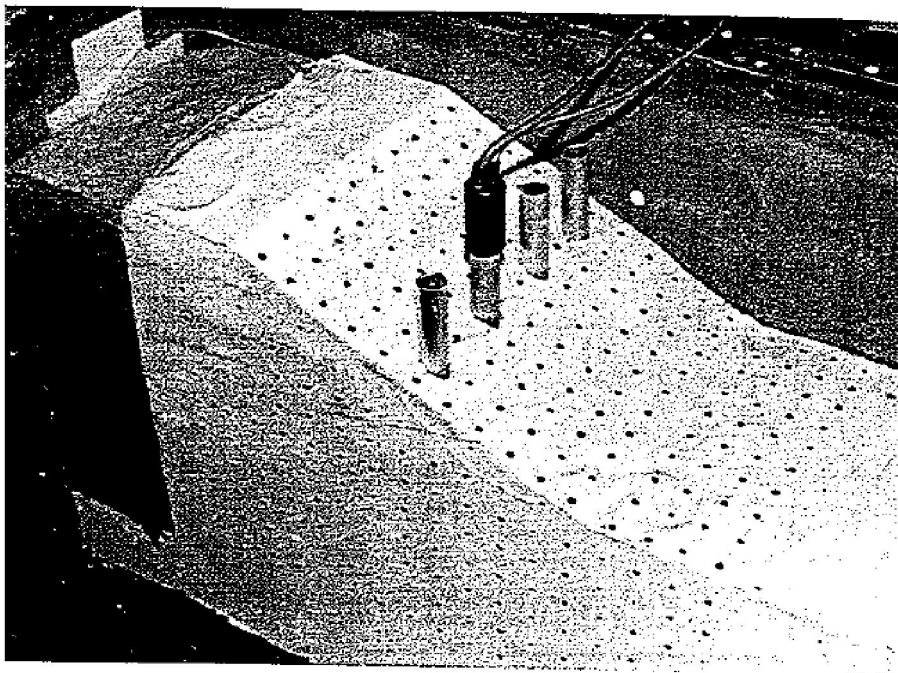
۲-۳-۲ مدل سازی سانتریفیوژ

هایوارد^۱ و همکاران (2001) یک سری آزمایش‌های سانتریفیوژ برای بررسی استفاده از ردیف شمع در پایدارسازی شیب انجام دادند. یک شیب بدون شمع و با شمع (شکل ۲-۱۷) با فاصله‌ی حدود ۳، ۴ و ۶ برابر قطر شمع‌ها (d) مدل‌سازی شده و رفتار بلند مدت بررسی گردید. آزمایش‌ها نشان دادند که شیب بدون شمع و با شمع با فاصله‌ی ۶d گسیخته شدند؛ در حالی که دیگر مدل‌ها تغییری نکردند.

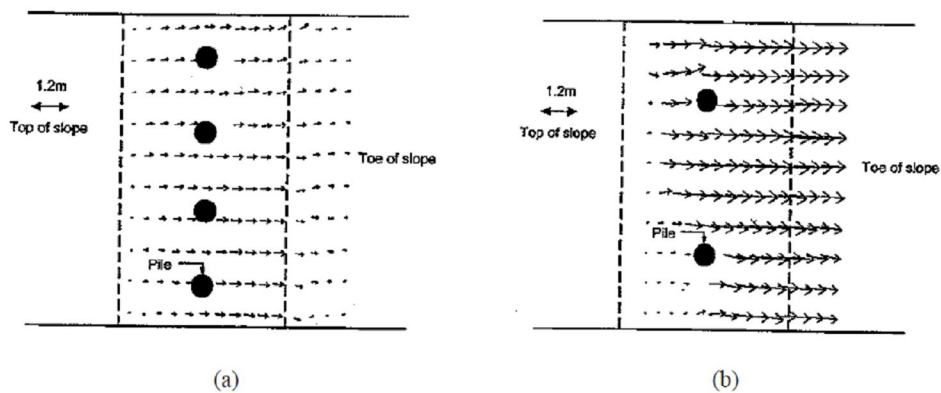
شکل ۲-۱۸ نمای بالای بردارهای جابه‌جایی را نشان می‌دهد که در انتهای آزمایش برای شمع‌های با فاصله‌ی ۳d و ۶d ترسیم شده است. هنگامی که شمع‌ها در فاصله‌ی ۶d بودند، نسبت به فاصله‌ی ۳d جریان خاک بیشتری از میان شمع‌ها مشاهده شد (شکل ۲-۱۸-b). این رفتار توسط هایوارد و همکاران به صورت کاهش در اندرکنش شمع-خاک هنگامی که فاصله‌ی بین شمع‌ها افزایش یابد، توضیح داده شد؛ چنان‌که فراتر از مقدار مشخصی، فاصله‌ی هر شمع مانند یک شمع منفرد رفتار می‌کند. نتایج آزمایش‌های سانتریفیوژ نشان داد که افزایش فاصله‌ی بین شمع‌ها، لنگر خمشی ایجاد شده در آن‌ها را افزایش داده است (شکل ۲-۱۹). هم‌چنین استدلال شد، هنگامی که شمع‌ها در فاصله‌ی زیاد نصب می‌شوند، هر شمع باید در برابر عرض بیشتری از

^۱ Hayward

شیب مقاومت کند، بنابراین لنگر خمشی بیشتری در شمع ایجاد می‌شود. به عبارت دیگر؛ هنگامی که فاصله‌ی بین شمع‌ها افزایش یابد، بار هر شمع نیز به مراتب افزوده می‌شود.



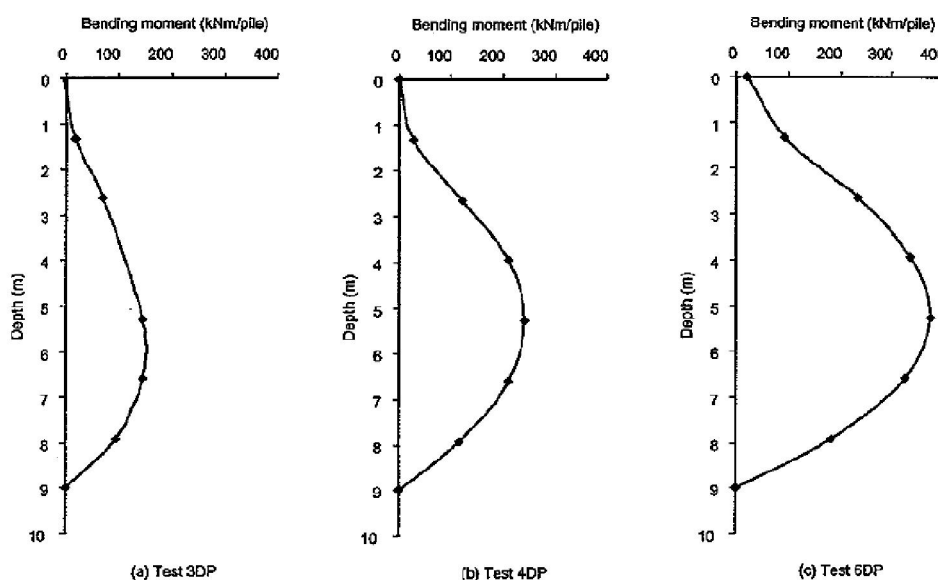
شکل ۲-۱۷ تصویر گرفته شده در پایان آزمایش هنگامی که شمع‌ها در فاصله‌ی مرکز به مرکز $3d$ بودند (هایوارد و همکاران، ۲۰۰۱)



شکل ۲-۱۸ نمای بالای بردارهای جابه‌جایی اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های سانتریفیوژ برای شمع‌های با فاصله‌ی (a) $3d$ و (b) $6d$ (هایوارد و همکاران، ۲۰۰۱)

۳-۳-۲ تحلیل عددی دو بعدی

چن^۱ و پولس (1993) تحلیلی عددی انجام دادند که در آن روش‌های اجزای محدود و را ترکیب کرده تا چگونگی تغییر مقاومت نهایی خاک، (یا فشار جانبی نهایی شمع-خاک، P_{u}) هنگامی که شمع‌ها در گروه شمع هستند را بررسی کند. در این شیوه، اجزای نامحدود برای شبیه سازی رفتار میانه‌ی خاک و اجزای محدود استاندارد برای مدل‌سازی شمع و خاک مجاور آن استفاده شدند.

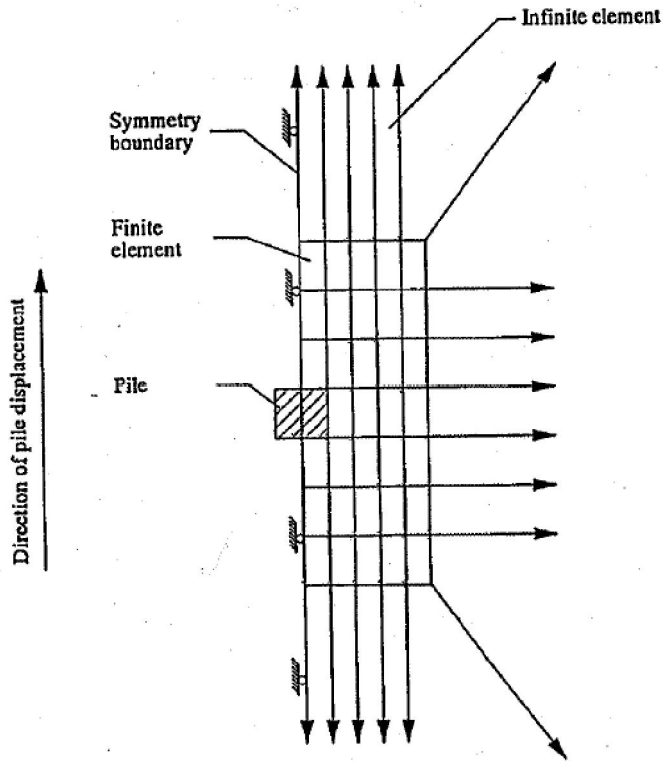


شکل ۲-۱۹ پروفیل لنگرهای خمشی اندازه گیری شده شمع‌ها با فاصله‌ی (a) ۳d، (b) ۴d و (c) ۶d (Hayward و همکاران، 2001)

چن و پولس (1993) به دو دلیل اصلی از یک تحلیل دو بعدی کرنش مسطح استفاده کردند. دلیل اول مربوط به زمانی است که جابه‌جایی قائم در مقایسه با جابه‌جایی افقی هنگام بارگذاری جانبی شمع کوچک است و می‌توان آن را به یک صفحه‌ی افقی درون توده‌ی خاک اعمال کرد. دلیل دوم این‌که آن‌ها احساس کردند که تحلیل دو بعدی کرنش مسطح راه‌حل مناسبی فراهم می‌کند؛ زیرا فشار جانبی نهایی شمع-خاک، مهم‌ترین مسئله در تحلیل آن‌ها بود. هم‌چنین این روش نیاز به

^۱Chen

محاسبات کمتری نسبت به یک تحلیل سه بعدی کامل دارد.



شکل ۲-۲۰ شبکه‌ی اجزای محدود و نامحدود برای یک شمع منفرد تحت بارگذاری جانبی در میانه‌ی خاک (چن و پولس، ۱۹۹۳)

چن و پولس چهار آرایش مختلف گروه شمع را تحلیل کردند (شکل ۲-۲۱) که عبارتند از:

مدل A: یک ردیف طولانی نامحدود از شمع‌ها

مدل B: دو ردیف طولانی نامحدود از شمع‌ها

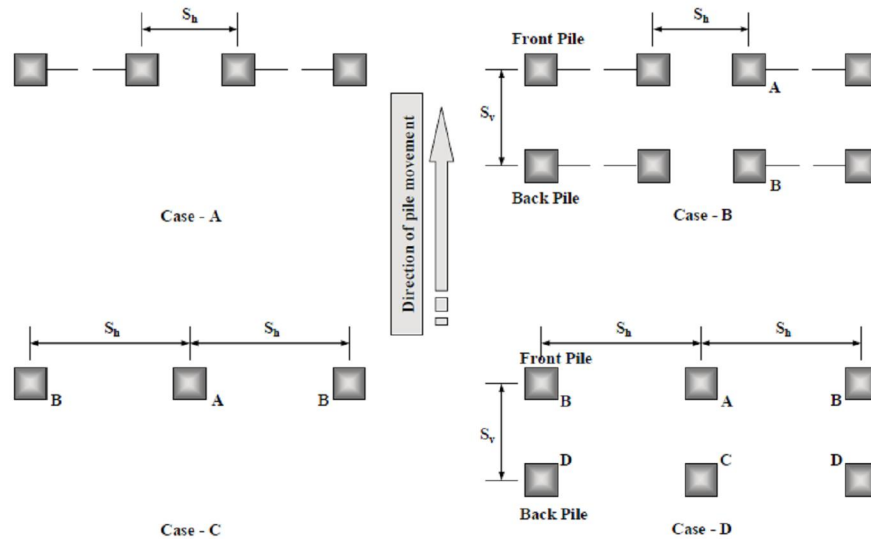
مدل C: یک گروه شمع سه تایی

مدل D: یک گروه شمع شش تایی

چن و پولس (۱۹۹۳) فرض کردند که شمع‌ها توسط یک سر شمع صلب به هم متصل شده‌اند

و به اندازه‌ی کافی نیز صلب هستند تا در تمامی ترازها به نسبت مساوی جابه‌جا شوند. خاک نیز با

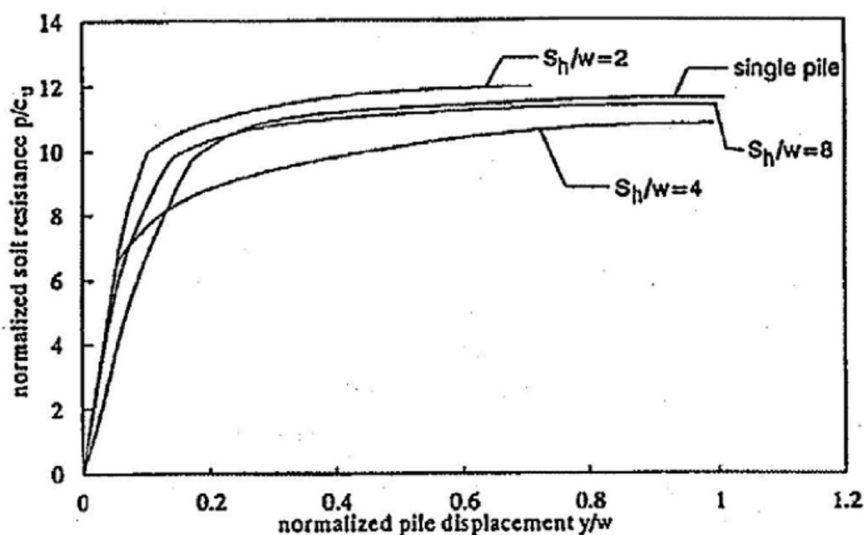
مقاومت برشی زه‌کشی نشده (C_u) یک‌نواخت در نظر گرفته شد. سپس به صورت افزایشی جابه‌جایی یک‌نواختی را به شمع در جهت جابه‌جایی شمع (بارگذاری محرک) وارد کردند.



شکل ۲-۲۱ چهار تحلیل گروه شمع (بر اساس چن و پولس، ۱۹۹۳)

توجه کنید که چن و پولس (۱۹۹۳) ردیف شمعی را که در خاک دست نخورده وارد کردند به نام "ردیف جلو" و ردیفی را که در خاک بالاتر وارد کردند به نام "ردیف عقب" نام‌گذاری کردند.

آن‌ها از این تحلیل‌ها نتایج بسیار مهمی از اثرات گروه شمع را دریافتند. برای یک ردیف طولانی نامحدود از شمع‌ها (مدل A) هنگامی که S_h بزرگتر از $2W$ باشد که W عرض شمع است، فاصله‌ی بین شمع‌ها کاهش می‌یابد و p_u تمایل به کاهش دارد، اما این کاهش کم است. هنگامی که فاصله‌ی بین شمع‌ها کم است (به عنوان مثال $S_h=2W$) مقدار p_u اندکی بیشتر از مقدار آن برای شمع منفرد می‌شود (شکل ۲-۲۲). اگرچه این رفتار غیر طبیعی و تعریف نشده است، اما چن و پولس (۱۹۹۳) پیشنهاد دادند که در عمل فاصله‌ی بین شمع‌ها به ندرت کمتر از $2/5W$ باشد، و از دید کاربردی نتیجه گرفتند که برای یک ردیف شمع، اندرکنش گروهی تأثیر نسبی کوچکی بر p_u دارد.

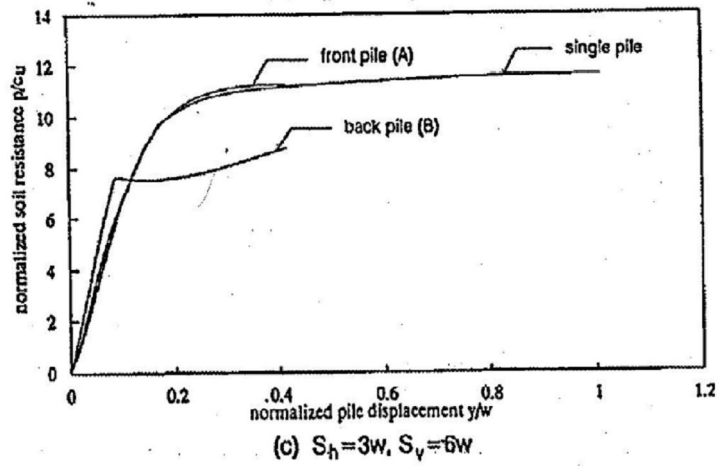
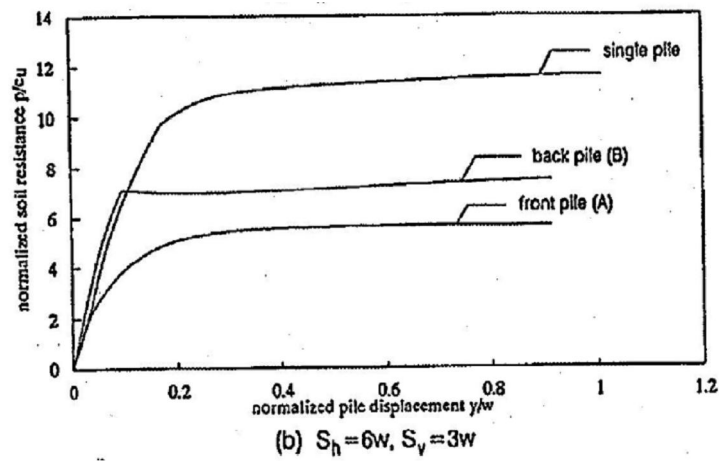
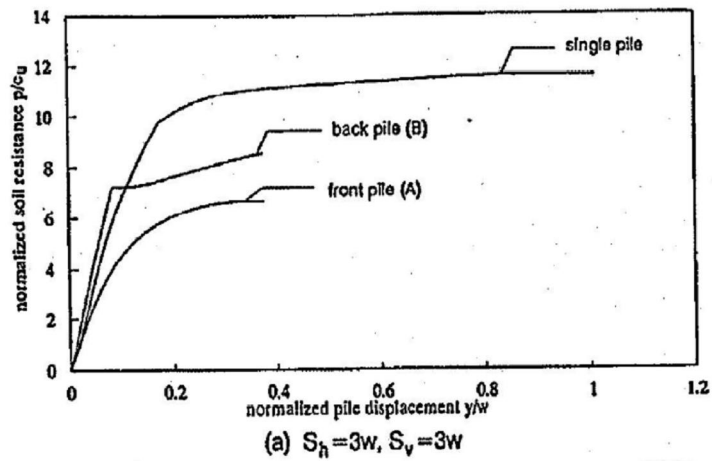


شکل ۲-۲۲ روابط $p-y$ برای شمع‌ها در یک ردیف طولانی نامحدود (چن و پولس، ۱۹۹۳)

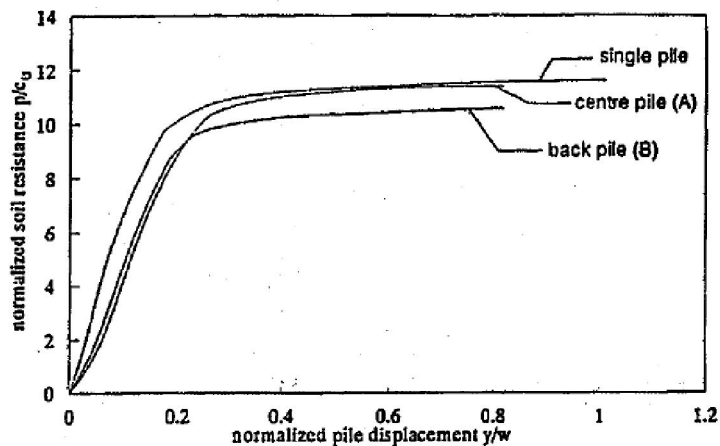
برای شمع‌های در دو ردیف طولانی نامحدود (مدل B) فاصله در جهت عمود بر جهت بارگذاری S_h در محدوده‌ی $3w$ تا $6w$ تأثیر کوچکی بر p_u دارد (شکل ۲-۲۳-a و b)، در حالی که فاصله در جهت موازی جهت بارگذاری S_v تأثیر قابل توجهی برای محدوده‌ی فاصله‌ی مشابه؛ به خصوص برای شمع‌های ردیف جلو دارد (شکل ۲-۲۳-a و c).

برای آرایش گروه شمع ۳ تایی (مدل c) فقط زمانی که فاصله‌ی بین شمع‌ها کوچک‌تر از $2/5W$ بود، تأثیر قابل توجهی دیده شد. چن و پولس (۱۹۹۳) اشاره کردند که فاصله‌ی بین شمع‌ها در عمل به ندرت کمتر از $2/5W$ است؛ به طوری که در این مورد- از نقطه نظر کاربردی -نیاز به تأثیر قابل توجهی نیست.

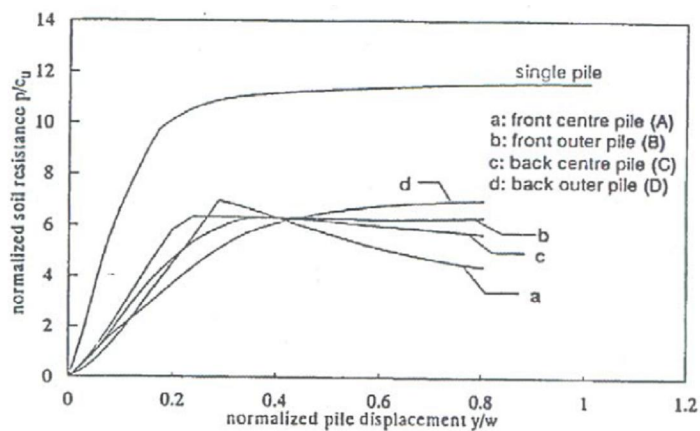
آن‌ها برای آرایش گروه شمع ۶ تایی (مدل D) دریافتند که به علت اثرات دیگر شمع‌ها، ظرفیت همه‌ی شمع‌ها نسبت به یک شمع منفرد، کاهش چشمگیری داشته است (شکل ۲-۲۵). آن‌ها هم- چنین به این نتیجه رسیدند که شمع‌های عقب نسبت به شمع‌های جلو مقادیر p_u بیشتری ایجاد می- کنند.



شکل ۲-۲۳ روابط p-y برای شمع‌های در دو ردیف طولانی نامحدود (چن و پولس، ۱۹۹۳)



شکل ۲.۲۴ روابط p-y برای گروه شمع ۳ تایی و $S_h/w=4$ (چن و پولس، ۱۹۹۳)



شکل ۲.۲۵ روابط p-y برای گروه شمع ۶ تایی (چن و پولس، ۱۹۹۳)

چن و پولس (۱۹۹۳) طبق تحقیقاتشان در موارد مختلف نتیجه گرفتند:

عموماً مقاومت نهایی خاک برای یک شمع در یک گروه از مقاومت نهایی خاک برای یک شمع منفرد کمتر است. مقدار کاهش به نحوه‌ی آرایش شمع‌ها بستگی دارد. برای شمع‌های در یک ردیف (به عنوان مثال در یک خط عمود بر جهت جابه‌جایی شمع‌ها) میزان کاهش قابل توجه نیست؛ در حالی که برای شمع‌های در دو ردیف اگر ردیف شمع‌ها به اندازه‌ی کافی نزدیک به یکدیگر باشند،

کاهش قابل توجهی دیده می‌شود (شکل‌های ۲-۲۲ و ۲-۲۳).

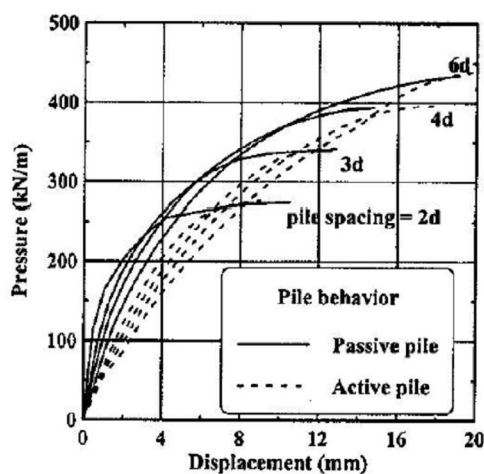
چن و مارتین^۱ (2002) تأثیر استفاده از یک یا دو ردیف از شمع‌های تحت بارگذاری مقاوم بر مکانیزم انتقال بار در شرایط زه‌کشی شده را بررسی کردند. آن‌ها یک مدل کرنش مسطح با استفاده از برنامه‌ی تفاضل محدود فلک دو بعدی^۲ (Itasca, 1998) برای بررسی مکانیزم انتقال بار و سپس برای فهمیدن جریان پلاستیک خاک پیرامون شمع‌ها ایجاد کردند.

آن‌ها هم‌چنین اثرات گروهی شمع‌ها تحت بارگذاری محرک و مقاوم را برای یک ردیف از شمع‌های پایدارکننده در شرایط خاک زه‌کشی شده مقایسه کردند. شکل ۲-۲۶-a فشار وارد بر شمع‌ها را برای فاصله‌ی بین شمع از $2d$ تا $6d$ که d مقدار قطر شمع است، نشان می‌دهد. آن‌ها دریافتند زمانی که فاصله‌ی بین شمع‌ها کاهش یابد، فشار جانبی نهایی هم کاهش می‌یابد.

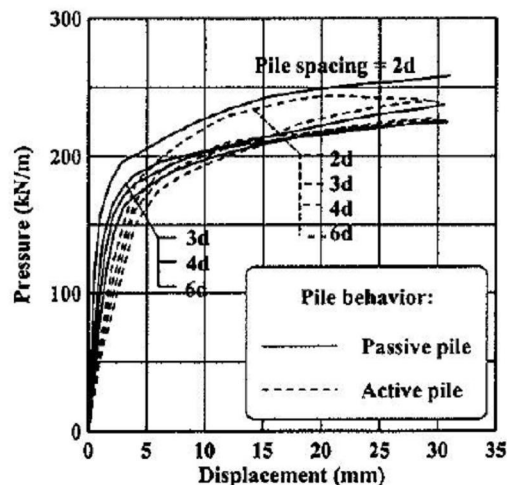
چن و مارتین (2002) چگونگی تغییر فشار نهایی با فاصله‌بندی شمع‌ها در رس را در شرایط زه‌کشی نشده کرنش مسطح آزمایش کردند. آن‌ها دریافتند که فشار نهایی وارد بر یک ردیف شمع‌های تحت بارگذاری مقاوم با افزایش فاصله‌بندی شمع‌ها کاهش می‌یابد (شکل ۲-۲۴-b). این رفتار متناقض به نظر می‌رسد؛ چون هنگامی که فاصله‌بندی شمع‌ها بزرگتر باشد، فشار نهایی بالاتری هم انتظار می‌رود.

آن‌ها تحلیل‌های بعدی را بر یک گروه شمع تحت بارگذاری مقاوم در مقایسه با دو ردیف شمع در شرایط زه‌کشی شده انجام دادند. آرایش‌های موازی و زیگزاگ شمع‌ها در تحلیل‌ها بررسی شد. جهت y منحنی‌های جابه‌جایی (شکل ۲-۲۷) به وضوح نشان می‌دهد که آرایش موازی ناحیه‌ی جابه‌جایی خاک را بسیار مؤثرتر از شمع‌های قرار گرفته در آرایش زیگزاگ به ردیف عقب شمع‌ها توسعه می‌دهد.

Martin^۱
FLAC^{2D}^۲



(a)



(b)

شکل ۲-۲۶ اثرات گروهی برای (a) خاک دانه‌ای (زاویه‌ی اصطکاک = 30°)؛ و (b) حالت زه‌کشی نشده (مقاومت برشی زه‌کشی نشده = 25 kPa)، مدول حجمی = $7.5 \times 10^4 \text{ kPa}$ ، مدول برشی = $1.0 \times 10^4 \text{ kPa}$ و وزن مخصوص = 21 kN/m^3 (چن و مارتین، 2002)

به طور خلاصه؛ چن و مارتین (2002) نتیجه گرفتند که فشار جانبی نهایی در یک ردیف شمع تحت بارگذاری مقاوم هنگامی که فاصله بندی شمع‌ها بزرگتر می‌شود، در شرایط زه‌کشی شده افزایش می‌یابد و هنگامی که فاصله بندی شمع‌ها افزایش می‌یابد، در شرایط زه‌کشی نشده کاهش می‌یابد، اما اگر فاصله بندی شمع‌ها بیشتر از $4d$ باشد، هیچ اندرکنش قابل توجهی یا اثرات گروهی اتفاق نمی‌افتد. چن و مارتین (2002) هم‌چنین نشان دادند که اثرات گروهی برای شرایط زه‌کشی شده نسبت به شرایط زه‌کشی نشده بیشتر هستند.

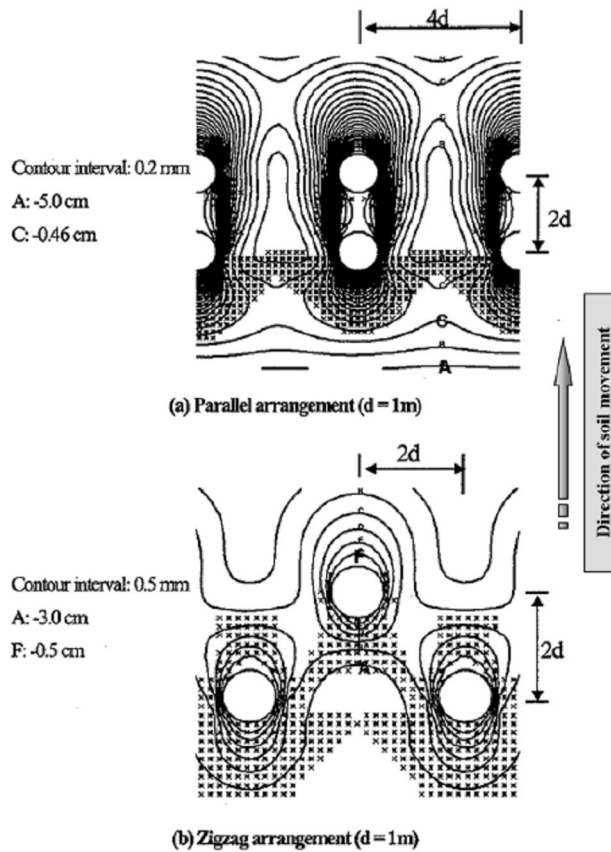
۴-۳-۲ تحلیل عددی سه بعدی

براون^۱ و شای^۲ (1990) پاسخ یک یا دو ردیف شمع‌های نزدیک به یکدیگر که تحت بار جانبی در سر شمع (بارگذاری محرک) بودند را با استفاده از مدل اجزای محدود سه بعدی تحلیل کردند.

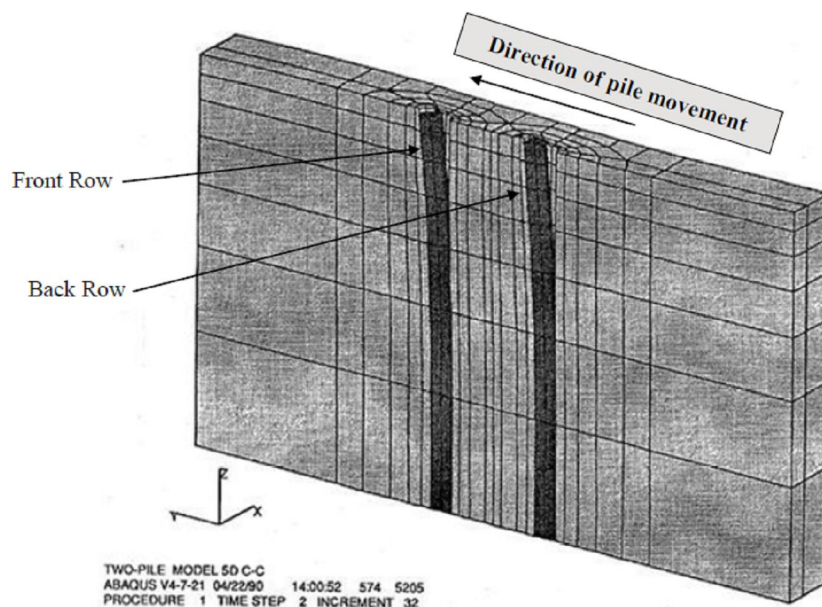
^۱ Brown

^۲ Shie

هدف اصلی تحلیل اجزای محدود آن‌ها، ارزیابی اثر فاصله‌بندی شمع‌ها در یک ردیف و بین ردیف شمع‌ها برای طراحی راهنما برای گروه آن‌ها می‌باشد. شکل ۲-۲۸ مدل اجزای محدود سه بعدی را نشان می‌دهد که از دو ردیف شمع نامحدود در یک لایه‌ی خاک یکنواخت با شمع‌های ثابت در کف تشکیل شده است.



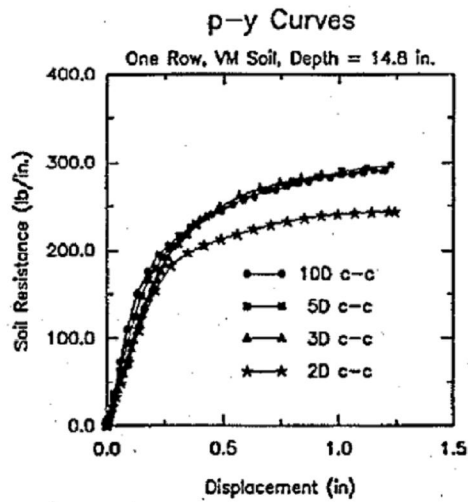
شکل ۲-۲۷ حالت خاک و منحنی‌های جابه‌جایی در جهت Y برای دو ردیف شمع در خاک دانه‌ای، شرایط زه-کشی شده در حالت بارگذاری نهایی (چن و مارتین، ۲۰۰۲)



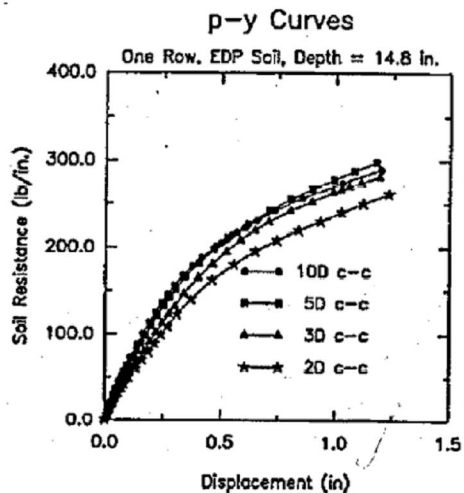
شکل ۲-۲۸ نمای شبکه‌ی سه بعدی با شمعی‌های جابه‌جا شده به صورت جانبی (براون و شای، ۱۹۹۰)

براون و شای (۱۹۹۰) یک سری آزمایش‌های عددی برای رس زه‌کشی نشده و ماسه‌ی زه‌کشی شده، با تغییر دادن فاصله‌بندی مرکز به مرکز شمعی‌ها در ردیف‌ها و بین آن‌ها انجام دادند. آن‌ها دریافتند که اثر فاصله‌بندی شمعی‌ها در یک ردیف شمعی (یا ردیف جلو از یک گروه شمعی) برای شمعی‌های با فاصله‌ی مرکز به مرکز، سه برابر قطر شمعی یا بیشتر در خاک رسی زه‌کشی نشده، نسبتاً کوچک بود (شکل ۲-۲۹a). اثر فاصله‌بندی شمعی‌ها در یک ردیف شمعی در ماسه، کمی بیشتر بود، اما هنوز هم در فاصله‌بندی مشابه نسبتاً کوچک بود (شکل ۲-۲۹b).

شکل ۲-۳۰ منحنی‌های $p-y$ را برای دو ردیف گروه شمعی در خاک رس زه‌کشی نشده نشان می‌دهد. از شکل‌ها می‌توان دریافت که بیش‌ترین مقاومت خاک کمی تحت تأثیر فاصله‌بندی شمعی در ردیف جلو است؛ در حالی که برای شمعی‌ها در ردیف عقب کاهش قابل توجهی مشاهده می‌شود.

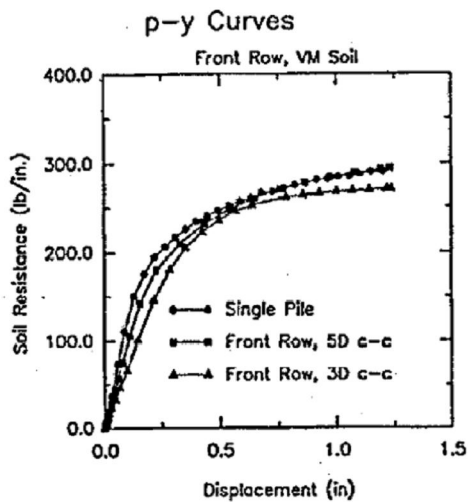


(a)

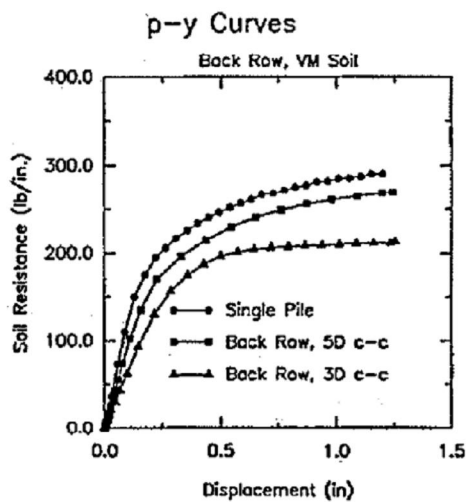


(b)

شکل ۲۹-۲ منحنی‌های $p-y$ برای یک ردیف شمع با فاصله‌بندی مرکز به مرکز $2D$ ، $3D$ ، $5D$ و $10D$ که D قطر شمع است: (a) رس زه‌کشی نشده (b) ماسه‌ی زه‌کشی شده (براون و شای، ۱۹۹۰)



(a)



(b)

شکل ۳۰-۲ منحنی‌های $p-y$ برای گروه شمع در رس زه‌کشی نشده با فاصله‌بندی مرکز به مرکز $3D$ و $5D$ بین ردیف شمع‌ها که D قطر شمع است: (a) ردیف جلو (b) ردیف عقب (براون و شای، ۱۹۹۰)

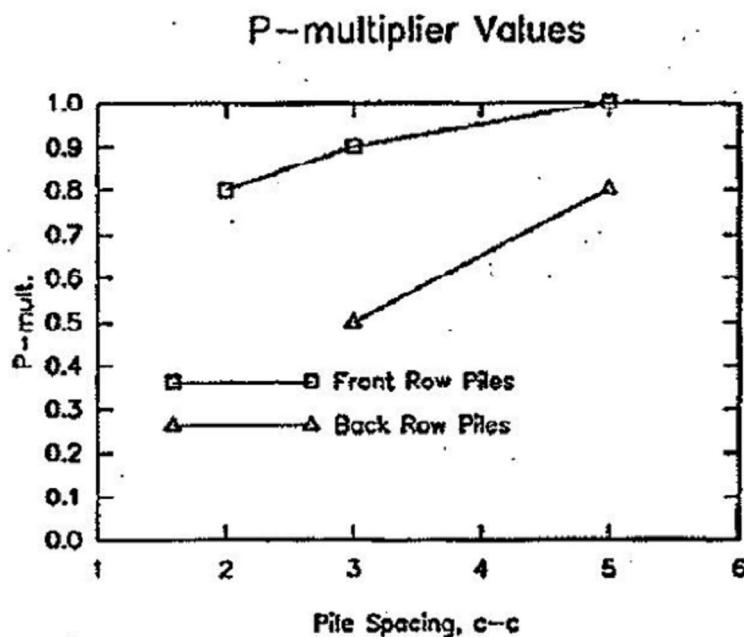
نتایج براون و شای از بررسی‌هایشان به شرح ذیل می‌باشد :

(۱) در شمع‌های ردیف‌های وسط که در معرض کاهش قابل توجه مقاومت خاک است، در مقایسه با یک شمع منفرد یا یک ردیف شمع، موقعیت ردیف، بیشترین تأثیر را بر اثرات گروهی داشت.

(۲) اثرات گروهی در فاصله‌بندی مرکز به مرکز، معادل سه برابر قطر شمع قابل توجه و در فاصله‌بندی معادل پنج برابر قطر شمع، بسیار کمتر بودند.

براون و شای (۱۹۹۰) سرانجام با استفاده از این نتایج عددی یک راهنمای طراحی ارائه کردند. مقدار P_m (معادله ۸-۲) نشانه‌ی اثر اندرکنش گروهی در یک عمق خاص در طول شمع است. با توجه به شکل ۲-۲۹ می‌توان گفت هنگامی که فاصله‌بندی بین شمع‌ها افزایش پیدا کند، فشار جانبی محدود کننده‌ی شمع-خاک در هر دو ردیف شمع (جلو و عقب) افزایش پیدا می‌کند.

$$P_{group-pile} = P_M \times P_{single-pile} \quad (۸-۲)$$



شکل ۲-۲۹ مقادیر P_m از آزمایش‌های عددی (براون و شای، ۱۹۹۰)

که در آن:

$P_{\text{group pile}}$ = مقاومت خاک بر یک شمع در گروه شمع

$P_{\text{single pile}}$ = مقاومت خاک بر یک شمع منفرد

P_m = ضریب مقاومت خاک

۳- فصل سوم

مدل سازی

۳-۱ مقدمه

در بررسی پایداری شیب‌های طبیعی، مهم‌ترین و پیچیده‌ترین مرحله، تعیین دقیق صورت مسئله است که شامل هندسه‌ی شیب، لایه‌بندی توده‌ی خاک، موقعیت سطح آب زیرزمینی، پارامترهای مقاومتی لایه‌های خاک و در صورت وجود، موقعیت سطح لغزش است. پس از طرح دقیق صورت مسئله مشخص شد که آنالیز پایداری شیب از اهمیت خاصی برخوردار است. در این فصل ابتدا به معرفی نرم افزار ژئواستودیو که برای تحلیل پایداری شیب از آن استفاده شده، پرداخته شده و سپس اجزای مختلف هندسه‌ی طرح، خصوصیات مصالح، مدل رفتاری و تکنیک‌های مورد استفاده در ساخت مرحله‌ای و شرایط مرزی تعریف شده و نتایج تحلیل‌ها نیز در فصل چهارم آمده است.

۳-۲ معرفی نرم‌افزار ژئواستودیو^۱

نسخه‌ی اول این نرم‌افزار در سال ۱۹۷۷ ارائه شد. این نرم‌افزار جزء اولین نرم‌افزارهای ژئوتکنیک بود که جهت آنالیز شیب‌ها به کار می‌رفت. این نرم‌افزار توسط هزاران کاربر حرفه‌ای جهت انجام طراحی ژئوتکنیکی، در عمل استفاده می‌گردد. اساس کار این نرم‌افزار بر پایه روش تعادل حدی و قطعه‌بندی است و مهم‌ترین کاربردش، تحلیل استاتیکی و شبه استاتیکی شیروانی‌های خاکی می‌باشد. از مهم‌ترین روش‌های تحلیل حدی که در این نرم‌افزار برای تحلیل پایداری شیروانی‌ها استفاده می‌شود، می‌توان به روش مرگنسترن پرایس، بیشاپ، جانبو و روش معمولی اشاره کرد. این نرم‌افزار دارای پتانسیل بالایی در مدل کردن خاک با پارامترهای متفاوت و مدل کردن مسلح‌کننده‌های مختلف مانند میکروپایل، انکر، میل مهار خاکی و ... می‌باشد. این نرم‌افزار به گونه‌ای طراحی شده است که بر اساس مشخصات خاک، سطح آب زیرزمینی، شیب شیروانی، تعداد و مشخصات مسلح‌کننده‌ها و زلزله‌ی مبنای طرح تحلیل پایداری شیب مربوطه را انجام می‌دهد.

^۱ Gee Studio

در این تحلیل‌ها مدل‌سازی زمین لغزش و اعمال زلزله در SIGMA/W و QUAKE/W از مجموعه‌ی نرم‌افزاری ژئو استودیو انجام شده است.

۳-۳ فرضیات و روش تحلیل

پیش از بررسی نتایج، نیاز به معرفی ارکان اصلی روش تحلیل به همراه فرضیات صورت گرفته در آن است. در این بخش اطلاعات اولیه‌ی مورد استفاده در تحلیل‌ها ارائه شده است. در ابتدا مشخصات هندسه‌ی مدل و سپس توضیح مختصری درباره‌ی تحلیل تنش‌های برجا در SIGMA/W و تحلیل دینامیکی خطی معادل در نرم‌افزار QUAKE/W و خصوصیات مصالح ارائه شده است. در ادامه به توضیح نحوه‌ی مش‌بندی، شرایط مرزی و مهم‌ترین پارامترهای مؤثر ورودی مانند بارهای لرزه‌ای وارده، نحوه‌ی مدل‌سازی و تحلیل پرداخته شده است.

۱-۳-۳ خصوصیات مصالح

در جدول ۱-۳ به‌طور خلاصه ویژگی‌های ژئوتکنیکی مصالح به‌کاررفته در تحلیل مدل پایه ارائه شده است. لازم به ذکر است که خصوصیات مصالح مدل مورد مطالعه مشابه خصوصیات مصالح مدل محدود کانگاسابای (2010) در نظر گرفته شده است.

مقاومت سطح لغزش (چسبندگی، C_{int}) به صورت پایه برابر ۳۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شد، که در مدل‌ها بسته به شرایط در سه حالت مقاومت برابر ۳۰ کیلو پاسکال، ۱۵ کیلو پاسکال و صفر در نظر گرفته شده است.

لازم به ذکر است شمع مورد استفاده در تمامی مدل‌ها از نوع بتنی درجا بوده که خصوصیات آن در جدول ۱-۳ و به تفصیل در بخش ۲-۳-۳ ارائه شده است.

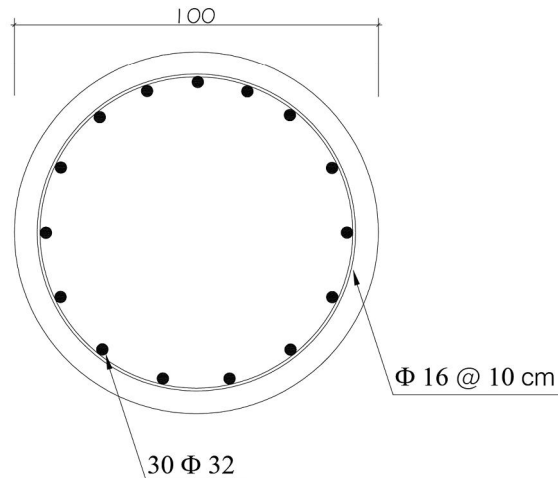
جدول ۱-۳: ویژگی‌های ژئوتکنیکی مصالح به کاررفته در تحلیل مدل پایه

ویژگی مصالح	خاک پایدار	خاک ناپایدار	شمع
مدول الاستیک (MPa)	12	6	122.2×10^3
ضریب پواسون	0.495	0.495	0.3
ϕ	0	0	N/A
c (kPa)	60	30	N/A
چگالی (kg/m^3)	1800	1800	2500

۲-۳-۳ خصوصیات شمع

طول شمع ۱۰ متر و مقطع آن، دایره‌ای به شعاع ۱ متر است. جزئیات مقطع در شکل ۱-۳

نشان داده شده است.



شکل ۱-۳ مقطع شمع مورد استفاده و جزئیات آرماتورها

مقادیر ظرفیت برشی و خمشی شمع با استفاده از روابط و نمودارهای ارائه شده توسط مستوفی

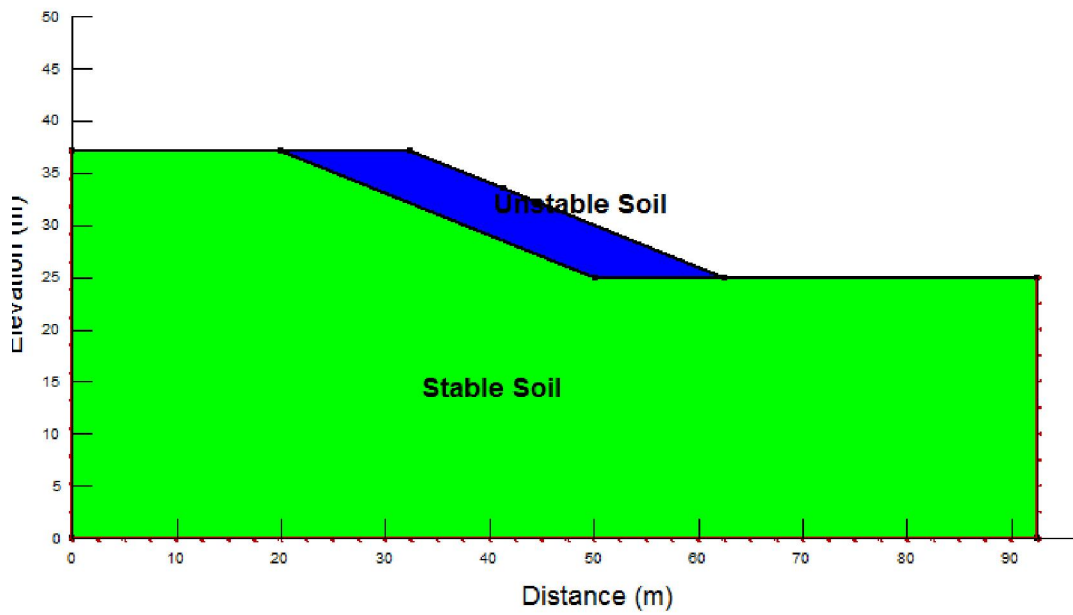
نژاد (۱۳۸۹) محاسبه شد که در جدول ۳-۲ ارائه شده است.

جدول ۳-۲: مقادیر ظرفیت برشی و خمشی شمع مورد استفاده در مدل‌ها

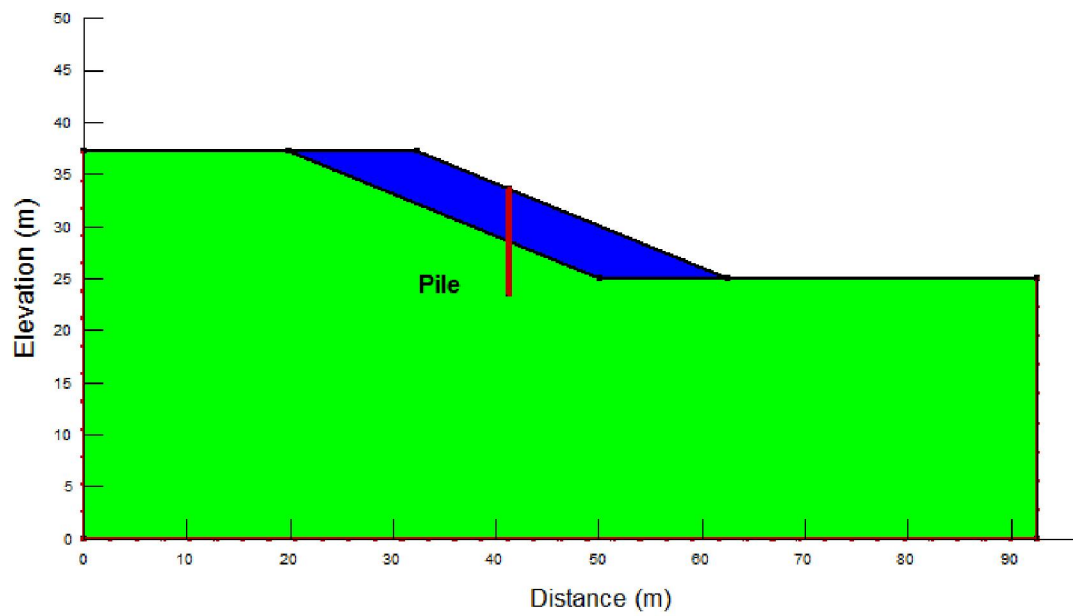
ظرفیت خمشی (kNm)	ظرفیت برشی (kN)
11216	3217

۳-۳-۳ هندسه‌ی مدل

در این نگارش عملکرد یک زمین‌لغزش تحت تأثیر بار زلزله و پایداری آن با استفاده از یک ردیف شمع مورد ارزیابی قرار گرفته است. در شکل ۳-۲ مقطع هندسه‌ی مدل پایه به همراه ابعاد بخش‌های مختلف و در شکل ۳-۳ هندسه‌ی مقطع مدل دارای یک ردیف شمع ارائه شده است. اجزای اصلی این مدل شامل دو لایه خاک پایدار و ناپایدار بوده و موقعیت سطح لغزش نیز صفحه‌ی جداکننده‌ی این دو لایه‌ی خاک موازی با سطح شیب است. طول کل مدل ۹۲/۵ متر، ارتفاع قسمت بالادست شیب ۳۷ متر، ارتفاع قسمت پایین دست شیب ۲۵ متر، عمق سطح لغزش ۵ متر از سطح زمین و شیب آن به صورت 2.5H:1V است. شمع‌های به کار رفته در پایداری زمین لغزش دارای طول ۱۰ متر و قطر ۱ متر هستند. فاصله‌بندی بین شمع‌ها در ردیف شمع برابر ۳/۵ برابر قطر شمع در نظر گرفته شده است (Kanagasabai, 2010). در این تحقیق مدل اشاره شده به‌عنوان مدل پایه شناخته شده و خصوصیات مصالح و شرایط مرزی آن در بخش‌های بعدی شرح داده می‌شود. لازم به ذکر است هندسه‌ی مدل مورد مطالعه مشابه هندسه‌ی مدل محدود کاناگاسابای (2010) است.



شکل ۲-۳ هندسه‌ی مدل پایه‌ی مورد مطالعه و ابعاد اجزای مختلف آن

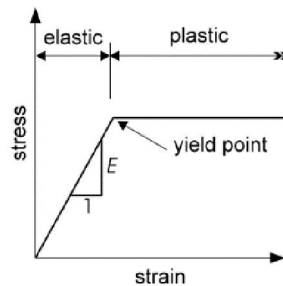


شکل ۳-۳ هندسه‌ی مدل دارای یک ردیف شمع

۴-۳-۳ مدل رفتاری

۱-۴-۳-۳ تحلیل تنش‌های برجا

مدل رفتاری به کار رفته در تحلیل تنش‌های برجا برای تمامی مصالح الاستیک-کاملاً پلاستیک است. منحنی تنش-کرنش این مدل در شکل ۴-۳ نشان داده شده است. تا رسیدن به نقطه‌ی گسیختگی کرنش مصالح، نسبتی از تنش وارده است و بعد از این نقطه‌ی منحنی تنش-کرنش کاملاً افقی می‌شود. برای استفاده از این مدل در نرم‌افزار نیاز به تعریف مدول الاستیک، نسبت پواسون، چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک است. برای تمامی مصالح، مدول الاستیک به صورت ثابت تعریف شده است.



شکل ۴-۳ رابطه‌ی رفتاری مدل الاستیک-پلاستیک کامل (Krahn, 2012)

از SIGMA/W معیار موهر-کولمب برای تابع گسیختگی مدل الاستیک-پلاستیک استفاده می‌کند که در معادله‌ی (۱-۳) به صورت تابعی از تنش‌های اصلی ارائه شده است. لازم به ذکر است که تابع پتانسیل پلاستیک (G)، در نرم‌افزار SIGMA/W مشابه تابع گسیختگی است با این تفاوت که در معادله‌ی (۱-۳) زاویه‌ی اتساع ψ ، جایگزین زاویه‌ی اصطکاک مصالح، ϕ' می‌شود.

$$F = \sqrt{J_2} \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) - \sqrt{\frac{J_2}{3}} \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \sin \phi - \frac{I_1}{3} \sin \phi - c (\cos \phi) \quad (1-3)$$

۲-۴-۳-۳ تحلیل دینامیکی خطی معادل

به‌طور کلی معادله‌ی حرکت مطابق رابطه‌ی (۲-۳) نوشته می‌شود:

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = \{F^a\} \quad (۲-۳)$$

که در آن $[M]$ ماتریس جرم، $[C]$ ماتریس میرایی، $[K]$ ماتریس سختی، $\{\ddot{u}\}$ ، $\{\dot{u}\}$ ، $\{u\}$ به ترتیب بردار شتاب، سرعت و تغییر مکان در نقاط مختلف و $\{F^a\}$ بردار نیروی وارده در زلزله که برابر با حاصل ضرب شتاب زلزله در جرم است.

روش‌های مختلفی برای حل معادله (۲-۳) وجود دارد که یکی از شناخته‌شده‌ترین آن‌ها تحلیل خطی معادل است. رفتار تنش-کرنش برشی مصالح ژئوتکنیکی یک رفتار غیرخطی و به شکل منحنی پایه^۱ (شکل ۳-۵) است. بنابراین با توجه به این رفتار غیرخطی، مقدار مدول برشی و میرایی در طول یک زلزله ثابت نبوده و بسته به مقدار کرنش‌های برشی ایجادشده در خاک تغییر می‌کنند. بدین ترتیب به‌منظور افزایش دقت تحلیل دینامیکی خطی لازم است اثر کلیه پارامترهای مؤثر بر مدول برشی و میرایی، از جمله تاریخچه کرنش برشی در تخمین این پارامترها لحاظ گردد؛ به‌نحوی که بتوان مقادیر مدول برشی و میرایی منتخب برای هریک از مصالح را با تقریب مناسبی، معادل متوسط مدول برشی و میرایی مصالح در طول زلزله دانست.

مراحل تحلیل دینامیکی به روش خطی معادل به‌طور خلاصه به شرح زیر است:

۱- انجام تحلیل دینامیکی به روش الاستیک خطی با استفاده از مدول برشی و میرایی اولیه

۲- استخراج تاریخچه کرنش برشی در نقاط مختلف و محاسبه کرنش برشی مؤثر بر اساس ۰/۵

تا ۰/۷۵ کرنش برشی حداکثر.

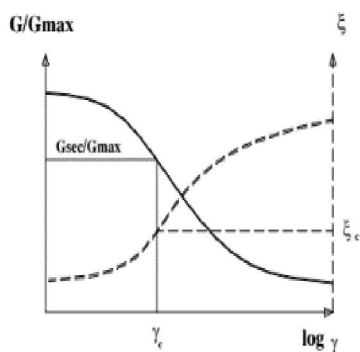
^۱ Backbone Curve

۳- اصلاح پارامترهای مدول برشی و میرایی مصالح در هر نقطه متناسب با مقدار کرنش برشی مؤثر در آن نقطه. همان‌طور که در شکل ۳-۶ نشان داده شده است، با افزایش کرنش برشی مدول برشی کاهش و میرایی افزایش می‌یابد.

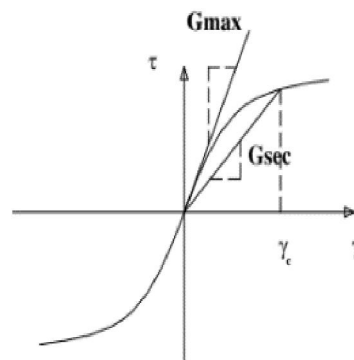
۴- تکرار مراحل سه‌گانه فوق تا هم‌گرایی نتایج و رسیدن به دقت موردنظر

بدین ترتیب ویژگی‌های روش خطی معادل بدین شرح است:

۱- در طول تحلیل دینامیکی، تمام خصوصیات مکانیکی مصالح ثابت است. در واقع این روش قادر به مدل‌سازی تغییر سختی مصالح در طول زلزله نیست.



شکل ۳-۶ تغییرات مدول برشی و میرایی با کرنش برشی
(2012, Krahn)



شکل ۳-۵ منحنی پایه رفتار مصالح در شرایط دینامیکی
(2012, Krahn)

۲- برای هم‌گرایی نهایی باید چندین تحلیل دینامیکی انجام شود.

۳- در تحلیل خطی معادل، اضافه فشار آب حفره‌ای بر مبنای تنش برشی حداکثر محاسبه می‌شود، اما باید توجه داشت که این مقادیر حداکثر تا پایان تحلیل دینامیکی مشخص نیست و بنابراین تنش‌های مؤثر در طول ارتعاش تغییر نمی‌کند. در واقع پس از پایان بخش دینامیکی تحلیل، نرم‌افزار اضافه فشار آب منفذی را محاسبه کرده و بر اساس آن تنش مؤثر به دست می‌آید. این مسئله،

تفاوت اساسی مدل خطی معادل و غیرخطی است.

۴- این روش به صورت مستقیم اطلاعات مربوط به جابه‌جایی‌های ماندگار، تولید فشار آب حفره ای اضافی و اثرات روانگرایی و هر نوع گسیختگی احتمالی را نشان نمی‌دهد. این اثرات باید به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرد.

۳-۳-۵ شرایط مرزی

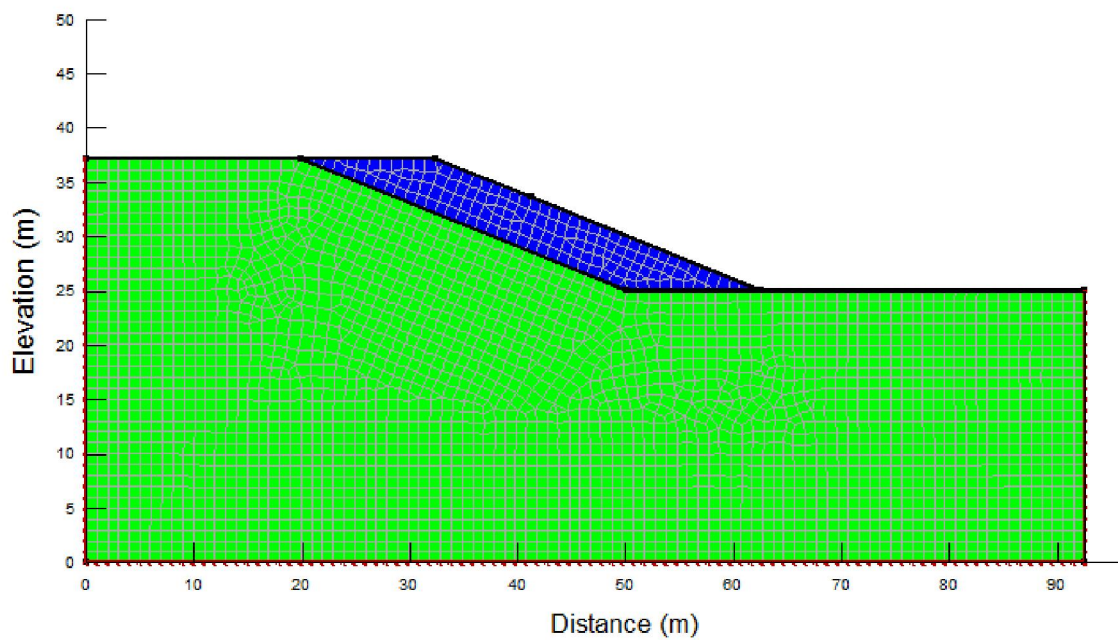
در تمامی مدل‌ها و مراحل تحلیل‌ها در گره‌های کف، مدل جابه‌جایی در هر دو جهت افقی و قائم صفر است. در گره‌های سمت چپ و راست مدل امکان جابه‌جایی قائم وجود داشته، اما جابه‌جایی‌ها در جهت افقی صفر هستند. در بقیه نقاط مدل، شرایط مرزی خاصی تعریف نشده است.

۳-۳-۶ مش‌بندی

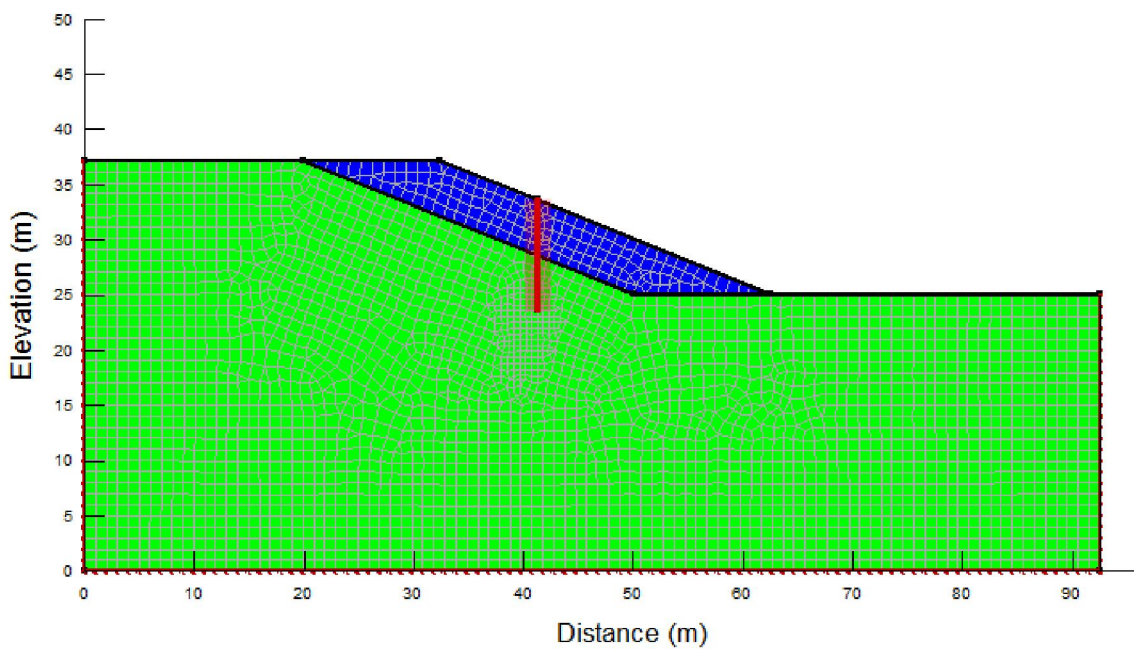
شکل ۳-۷ نحوه مش‌بندی مدل پایه‌ی تحلیل‌شده و شکل ۳-۸ نحوه مش‌بندی مدل با ردیف شمع را نمایش می‌دهد. برای تمامی نواحی مدل از الگوی مش‌بندی نامنظم چهار وجهی و مثلثی استفاده شده است. در بسیاری از مدل‌ها، استفاده از این نوع مش بیشترین کارایی و دقت را دارد (Krahn, 2012). هم‌چنین برای افزایش دقت نتایج از ۹ نقطه گوس در المان‌های چهاروجهی و ۳ نقطه گوس در المان‌های مثلثی استفاده شده است.

در مدل پایه ابعاد کلی المان‌ها برای تمام نواحی برابر ۱ متر است؛ بنابراین در مجموع تعداد ۲۸۵۷ المان و ۲۹۶۲ گره در مدل پایه وجود دارد.

در مدل دارای ردیف شمع، ابعاد کلی المان‌ها برای تمام نواحی به جز المان‌های اطراف شمع برابر ۱ متر است، ابعاد المان‌های اطراف شمع برابر ۰/۵ متر است؛ بنابراین در مجموع تعداد ۳۰۶۴ المان و ۳۱۵۰ گره در مدل دارای ردیف شمع وجود دارد.



شکل ۳-۷ نحوه‌ی مش‌بندی مدل پایه



شکل ۳-۸ نحوه‌ی مش‌بندی مدل دارای ردیف شمع

۷-۳-۳ بارگذاری لرزه‌ای

گسلش در توده‌ی سنگ‌ها باعث بروز لرزش‌هایی می‌شود که به‌صورت امواجی در پوسته‌ی زمین منتشر می‌گردد. این لرزش‌ها حرکاتی را در سطح زمین ایجاد می‌کنند که سبب ایجاد تغییر شکل و اعمال تنش به سازه‌های زیرزمینی و سطحی می‌شود. از اعمال این تنش‌ها بر روی سازه‌ها، تحت عنوان بارگذاری دینامیکی یا لرزه‌ای یاد می‌شود. با توجه به ماهیت زلزله، مقدار و جهت این بارگذاری در طول زمان زلزله تغییر می‌کند که روند این تغییرات در طول زمان را تاریخچه‌ی زمانی آن زلزله می‌نامند. بارگذاری لرزه‌ای در قالب تاریخچه‌ی زمانی شتاب زلزله (شتاب‌نگاشت) در مدل عددی اعمال می‌گردد. دامنه‌ی امواج زلزله توسط لرزه‌نگارها عموماً در سه راستای مختلف، شامل دو راستای افقی عمود بر هم و یک راستای قائم بر سطح، ثبت می‌شوند.

جدول ۳-۳: مشخصات و پارامترهای شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده

نام زلزله	شتاب حداکثر (g)	پریود غالب (s)	مدت زمان زلزله (s)
ال سنترو ^۱	0.362	0.26	27
لوما پریتا ^۲	0.740	0.58	34
نورثریج ^۳	0.629	0.26	7
بم	0.572	0.08	10

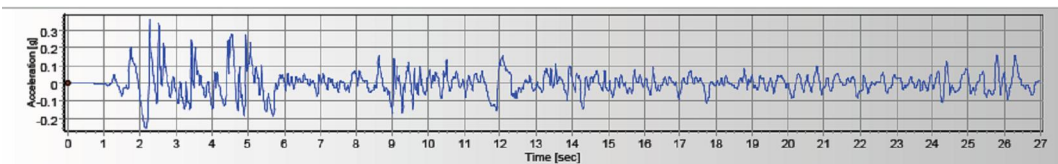
^۱ El Centro

^۲ Loma Prieta

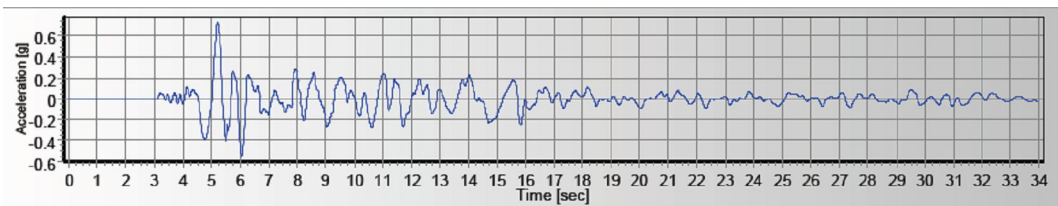
^۳ Northridge

در این مطالعه از چهار شتاب‌نگاشت اصلاح‌شده مطابق جدول ۳-۳ استفاده شده است تا رفتار دینامیکی مدل‌ها با اثر شتاب، پی‌ریود و مدت زمان‌های مختلف زلزله بررسی شود. همچنین روش اصلاح شتاب‌نگاشت‌ها در بخش ۳-۷-۱ به تفصیل توضیح داده شده است.

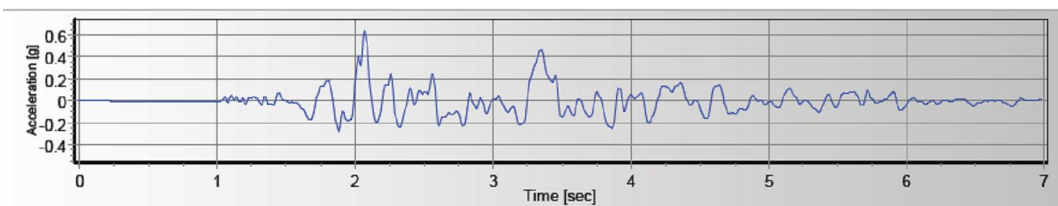
شکل‌های ۳-۹ تا ۳-۱۲ شتاب‌نگاشت‌های اصلاح‌شده‌ی مورد استفاده در تحلیل دینامیکی را نمایش می‌دهند.



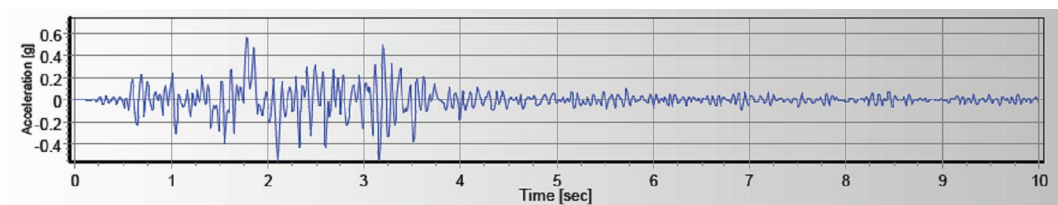
شکل ۳-۹ شتاب‌نگاشت زلزله‌ی ال سنترو



شکل ۳-۱۰ شتاب‌نگاشت زلزله‌ی لوما پریتا



شکل ۳-۱۱ شتاب‌نگاشت زلزله‌ی نورث‌ریج



شکل ۳-۱۲ شتاب‌نگاشت زلزله‌ی بم

در ادامه، توضیح مختصری درباره‌ی روند اصلاح شتاب نگاشت‌های مورد استفاده ارائه شده است.

۳-۷-۱ اصلاح شتاب‌نگاشت‌ها

جهت استفاده از تاریخچه زلزله در تحلیل‌های دینامیکی لازم است اصلاحاتی بر روی آن انجام شود تا از یک‌سو تحلیل‌ها با مشکلات عددی مواجه نشوند و از سوی دیگر نتایج حاصله تا حد امکان دقیق بوده و گمراه‌کننده نباشند. به‌طور کلی فیلتر کردن و اصلاح خط مبنا^۱ دو نوع اصلاحی است که معمولاً در مورد تاریخچه‌ی زلزله انجام می‌شود. کلیه این اصلاحات با استفاده از نرم‌افزار سایسموسیگنال^۲ (2016) انجام شده است (L. Seismosoft, 2016).

الف- فیلتر کردن تاریخچه‌ی زلزله

عملاً زلزله‌ها به ندرت دارای مؤلفه‌هایی با فرکانس بالا هستند. هرچند در صورت وجود هم این مؤلفه‌ها نقش چندانی در میزان انرژی وارده بر سازه ندارند، اما از سوی دیگر جهت انجام تحلیل دینامیکی مناسب مطابق رابطه (۳-۳)، هر چه فرکانس‌های زلزله بیشتر باشد، شبکه‌ی المان‌های ریزتری موردنیاز خواهد بود که در عمل منجر به افزایش حجم و زمان محاسبات می‌گردد.

$$I_{\max} = \frac{C_s}{10f_{\max}} \quad (3-3)$$

که در آن:

I_{\max} : ماکزیمم ابعاد المان

^۱ Base Line Correction
^۲ SeismoSignal

بزرگترین فرکانسی که موج در آن دارای توان می باشد: f_{max}

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (۴-۳)$$

مدول برشی خاک: G

چگالی خاک: ρ

یک روش برای رفع این معضل، حذف فرکانس‌های بالا و به اصطلاح فیلتر کردن آن‌ها است. در این تحقیق، انتخاب فرکانس حداکثر برای تمامی شتاب‌نگاشت‌ها با سعی و خطا به گونه‌ای بوده که اولاً شتاب، حداکثر کمتر از ۵ تا ۷ درصد دچار تغییر شود و دوماً شدت آریاس زلزله کمتر از ۵ درصد کاهش یابد.

ب- اصلاح خط مبنا

در صورتی که در یک تحلیل دینامیکی از تاریخچه‌ی شتاب یا سرعت که به‌طور مستقیم از شتاب‌نگار به‌دست‌آمده استفاده شود؛ لازم است جابه‌جایی و سرعت آن در انتهای زمان زلزله کنترل گردد تا احیاناً سیستم اندازه‌گیری به دلیل بروز خطا دچار جابه‌جایی یا سرعت مجازی نشده باشد. اصلاح خط مبنا در واقع انجام اصلاحاتی بر روی طیف ورودی است؛ به نحوی که در طی آن تاریخچه‌ی سرعت و یا جابه‌جایی به‌دست‌آمده در انتهای زلزله به صفر رسانده شود. بدین منظور با افزودن یک موج سرعت (مثلاً چندجمله‌ای) با فرکانس خیلی پائین به تاریخچه‌ی سرعت اولیه، اصلاح انجام و جابه‌جایی نهایی، صفر حاصل می‌شود.

در این بخش، برای اصلاح خط مبنای اکثر شتاب‌نگاشت‌ها از چندجمله‌ای درجه‌ی سوم استفاده شده تا علاوه بر صفر شدن سرعت و تغییر مکان در لحظه‌ی نهایی، کمترین تغییرات در جابه‌جایی‌های شتاب‌نگاشت به وجود آید.

۴- فصل چهارم

تحلیل و بررسی نتایج مدل سازی

۴-۱ مقدمه

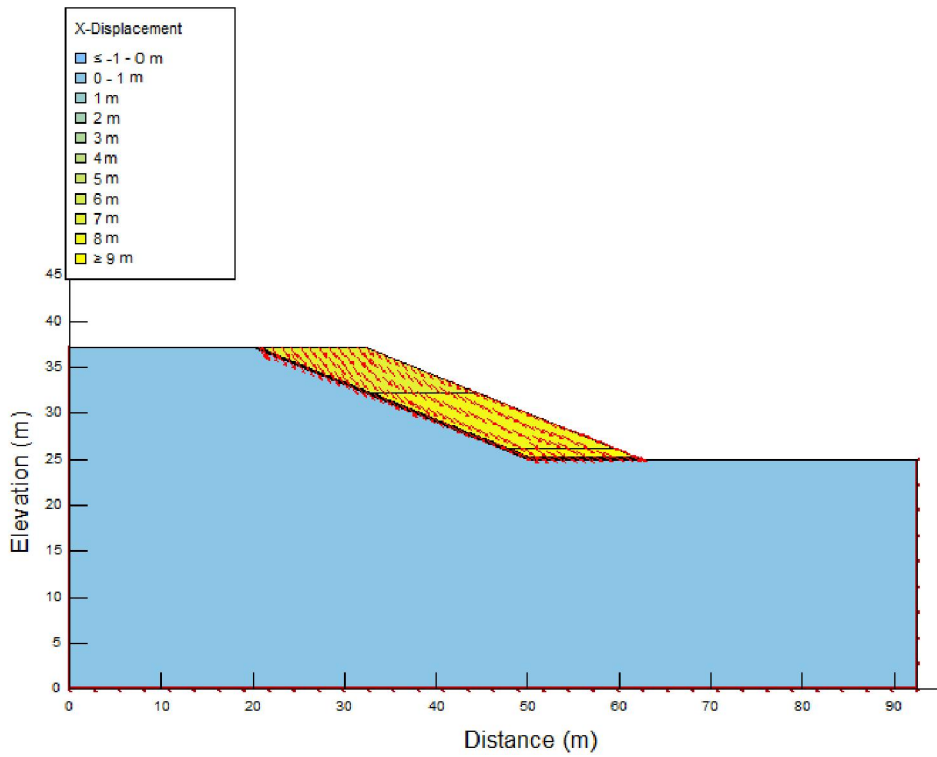
در این فصل به تشریح مدل‌ها و نتایج تحلیل پایداری آن‌ها تحت تأثیر بار زلزله پرداخته شده است. ابتدا مقایسه‌ای بین حالت پایه (فاقد ردیف شمع) و حالت دارای ردیف شمع انجام می‌شود. سپس رفتار شیب دارای ردیف شمع در برابر تغییر مقاومت سطح لغزش و با تغییر مکان شمع، رفتار آن بررسی می‌شود. در حالت دیگر مدل دو ردیف شمع در شیب را تحلیل کرده و در نهایت صحت سنجی پروژه انجام می‌شود.

۴-۲ بررسی رفتار مدل در حالت پایه (فاقد ردیف شمع) و

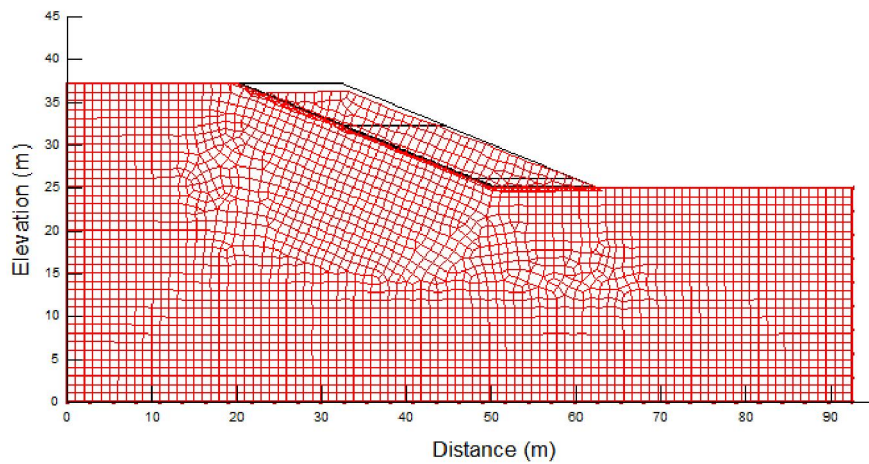
مقایسه با حالت دارای ردیف شمع

در این بخش به بررسی و مقایسه‌ی رفتار شیب فاقد ردیف شمع با شیب دارای یک ردیف شمع در میانه‌ی شیب تحت تأثیر بار زلزله پرداخته شده است. مشخصات خاک، شمع، شرایط مرزی و مش‌بندی، مشابه توضیحات فصل گذشته است. تحلیل‌ها با مقاومت سطح لغزش برابر ۱۵ کیلوپاسکال و تحت تأثیر بار زلزله‌ی ال سنترو انجام شده است.

شکل‌های ۴-۱ و ۴-۳ به ترتیب منحنی میزان‌های جابه‌جایی‌های شیب برای حالت فاقد ردیف شمع و حالت دارای یک ردیف شمع در میانه‌ی شیب را ۱ ثانیه پس از اتمام زلزله نمایش می‌دهند.



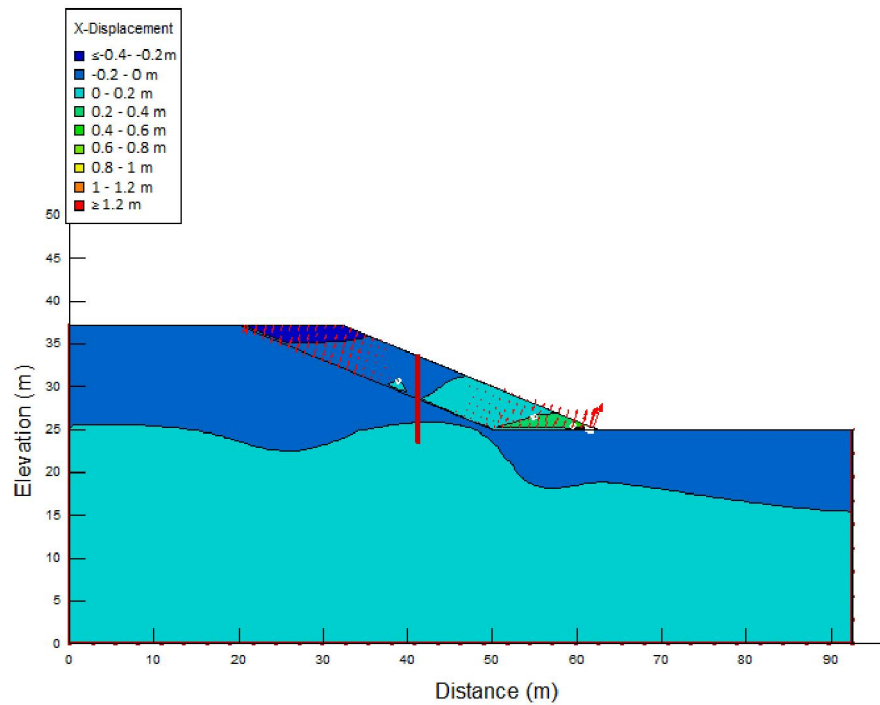
شکل ۱-۴ منحنی میزان و بردارهای جابه‌جایی شیب بدون شمع پس از تحلیل



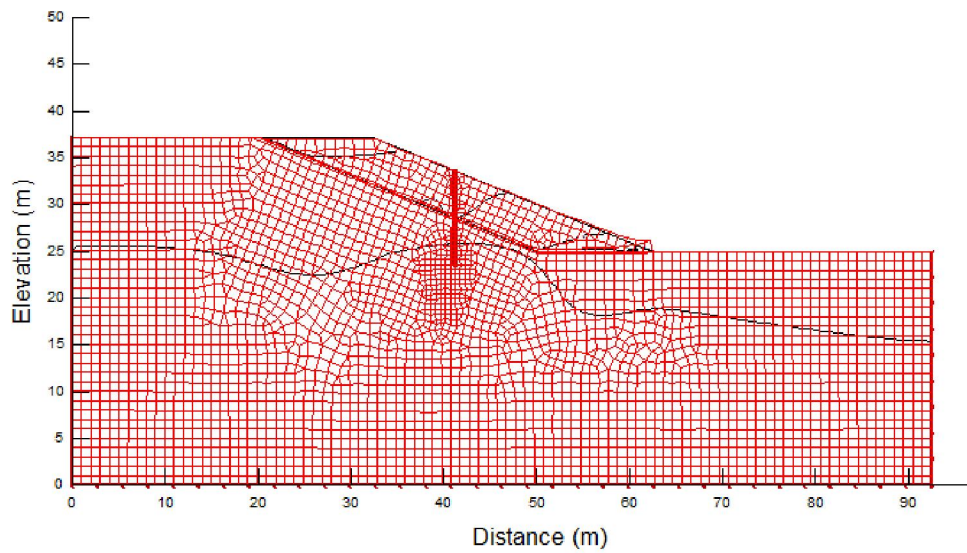
شکل ۲-۴ تغییر شکل‌های مش شیب بدون شمع پس از تحلیل

همان‌گونه که در شکل ۱-۴ ملاحظه می‌گردد، به دلیل مقاومت پایین سطح لغزش پس از

اعمال بار زلزله، شیب گسیخته شده و جابه‌جایی بسیار زیادی در حد ۹ متر در لایه‌ی خاک ناپایدار حاصل می‌شود.



شکل ۳-۴ منحنی میزان و بردارهای جابه‌جایی شیب دارای یک ردیف شمع در میانه‌ی شیب پس از تحلیل



شکل ۴-۴ تغییر شکل‌های مش شیب دارای یک ردیف شمع در میانه‌ی شیب پس از تحلیل

همان‌طور که در شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود با استقرار ردیف شمع در میانه‌ی شیب، پس از اعمال بار زلزله با وجود این‌که میزان جابه‌جایی‌ها در بالا دست شیب کوچک است، اما در پایین دست شیب این مقدار کمی زیاد بوده و به‌طور میانگین ۰/۵ متر است. در نتیجه در این نحوه‌ی جانمایی ردیف شمع برای جلوگیری از لغزش خاک در پایین دست شیب به‌صورت هم‌زمان باید از روش‌های دیگر پایدارسازی و تثبیت استفاده شود. لازم به توضیح است که در بخش ۴-۴ به بررسی تأثیر محل قرارگیری ردیف شمع پرداخته شده است.

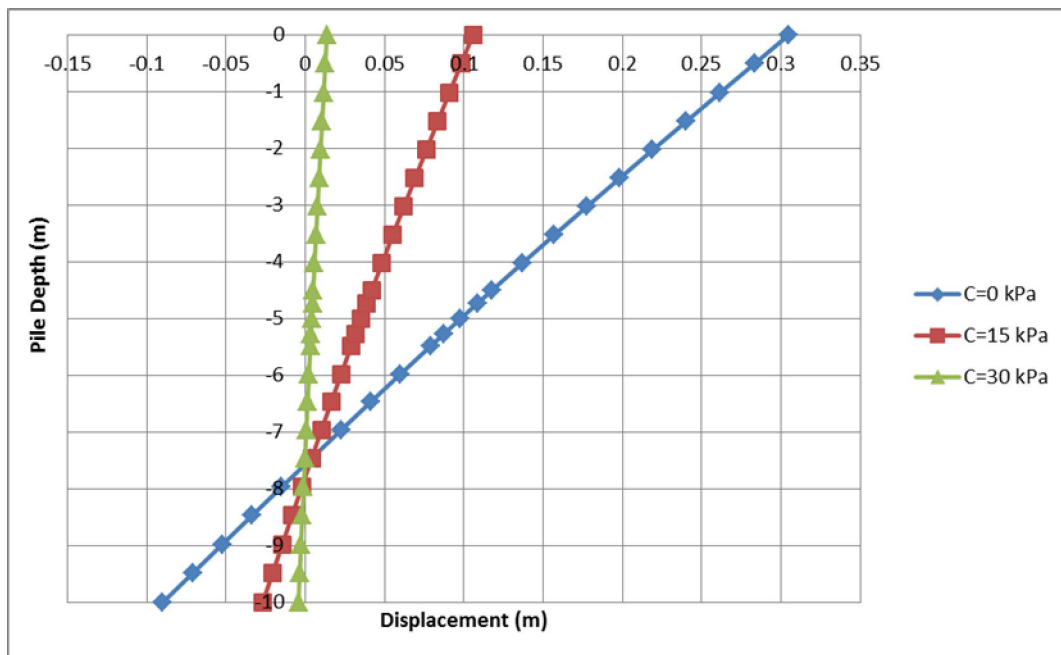
۳-۴ بررسی رفتار مدل دارای ردیف شمع در برابر تغییر

مقاومت سطح لغزش

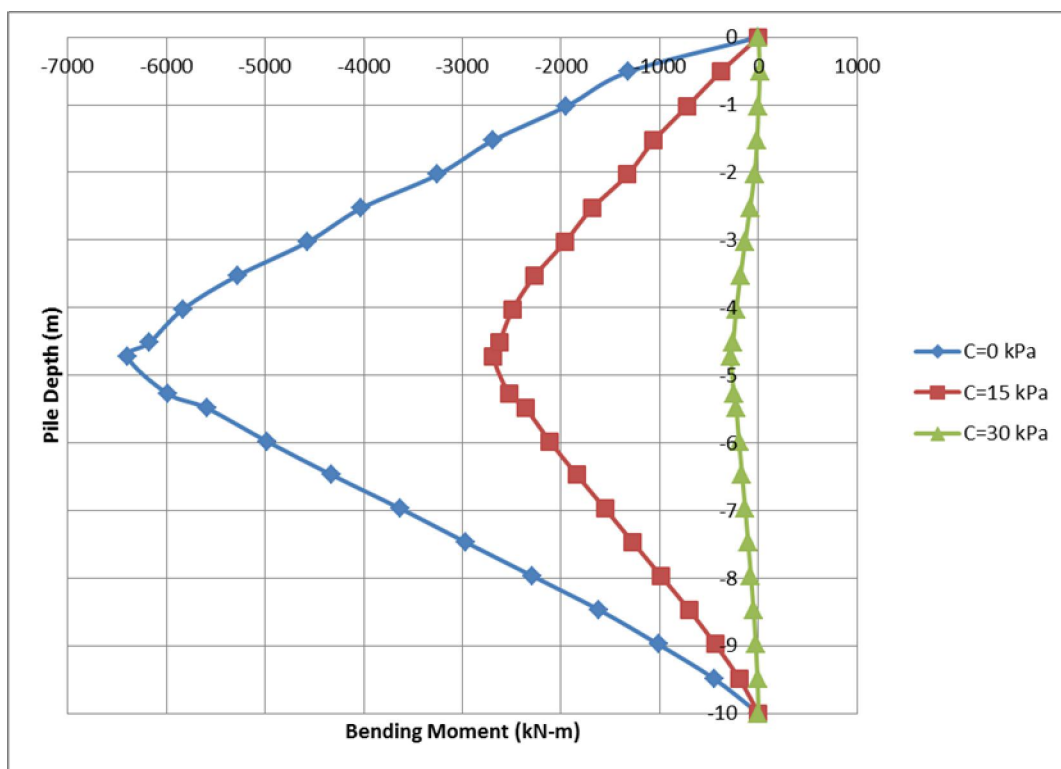
در این قسمت رفتار شیب تقویت شده با یک ردیف شمع در میانه‌ی شیب تحت تأثیر بار زلزله در برابر تغییر مقاومت سطح لغزش بررسی می‌شود. مشخصات خاک، شمع، شرایط مرزی و مش‌بندی در فصل ۳ به تفصیل توضیح داده شده است. تحلیل‌ها برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش، یعنی ۳۰ کیلو پاسکال، ۱۵ کیلو پاسکال و صفر و تحت تأثیر بار ۴ زلزله متفاوت که مشخصات آن‌ها در جدول ۳-۳ آمده، انجام شده است. این ۴ زلزله دارای مقادیر متفاوت شتاب حداکثر، پیروود غالب و مدت زمان زلزله هستند.

۱-۳-۴ تحت تأثیر بار زلزله‌ی ال سنترال

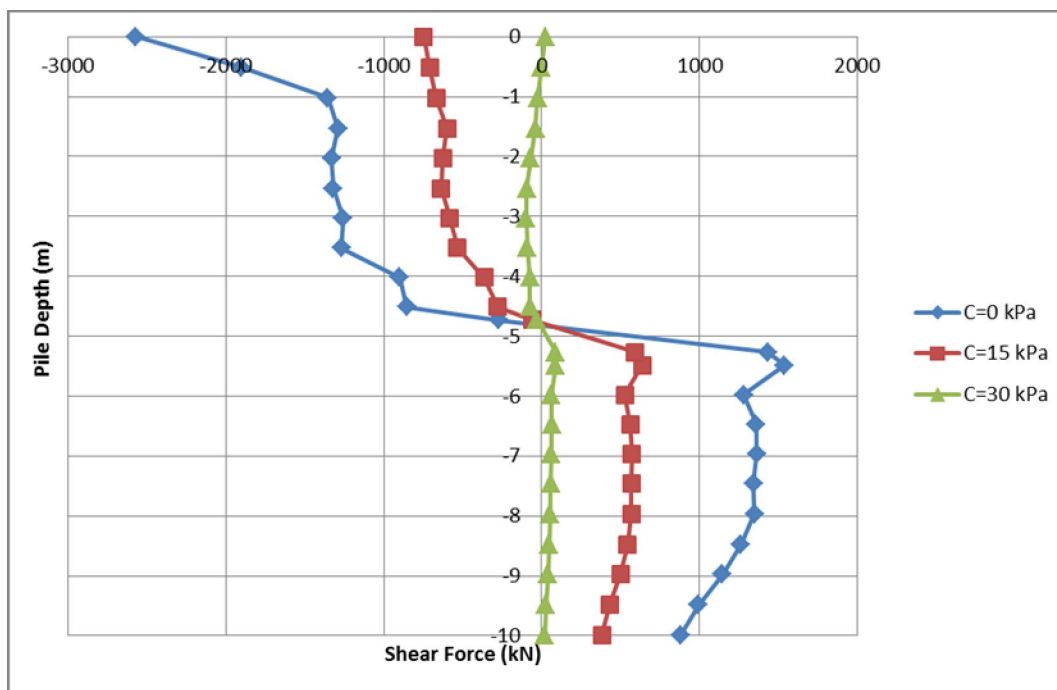
در این بخش نتایج تحلیل مدل تحت تأثیر بار زلزله‌ی ال سنترال با بیشینه‌ی شتاب $0.362g$ بیان می‌شود. شکل‌های ۴-۵ تا ۴-۷ به ترتیب نشان دهنده‌ی تغییر مکان، تغییرات لنگر خمشی و تغییرات نیروی برشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش در زمان ۱ ثانیه پس از اتمام زلزله هستند.



شکل ۴-۵ تغییر شکل جانبی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت بار زلزله‌ی ال سنترو



شکل ۴-۶ تغییرات لنگر خمشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت بار زلزله‌ی ال سنترو



شکل ۴-۷ تغییرات نیروی برشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت بار زلزله‌ی ال سنترو

تحلیل‌های انجام شده در این بخش نشان دهنده‌ی اثر مقاومت سطح لغزش بر رفتار شمع

تثبیت‌کننده‌ی شیب هستند.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود با کاهش مقاومت سطح لغزش، تغییر مکان در شمع نیز افزایش

می‌یابد. به صورتی که در حالت مقاومت سطح لغزش برابر صفر، خاک ناپایدار به راحتی جریان پیدا

کرده و بیشترین فشار را بر روی شمع‌ها اعمال می‌کند.

با توجه به نمودارها می‌توان دریافت که در حالت مقاومت سطح لغزش برابر ۳۰ کیلوپاسکال

مقادیر تغییر مکان، لنگر خمشی و نیروی برشی بسیار ناچیز هستند که ناشی از پایدار بودن شیب با

این مقاومت سطح لغزش است.

همان‌طور که عنوان شد با کاهش مقاومت سطح لغزش خاک جریان پیدا کرده و فشار بیشتری را بر

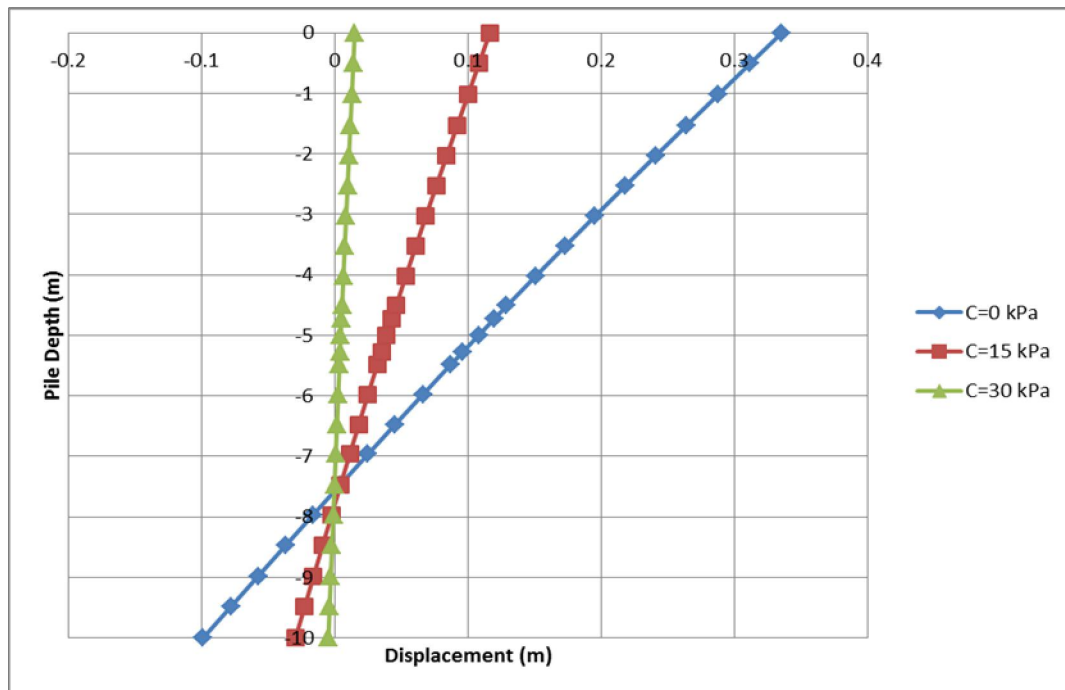
شمع اعمال می‌کند؛ در نتیجه با کاهش مقاومت سطح لغزش، لنگر خمشی و نیروی برشی در شمع

افزایش می‌یابد. علاوه بر این به دلیل جابه‌جایی خاک ناپایدار، بیشینه‌ی نیروی برشی در شمع در لایه‌ی ناپایدار مشاهده می‌شود.

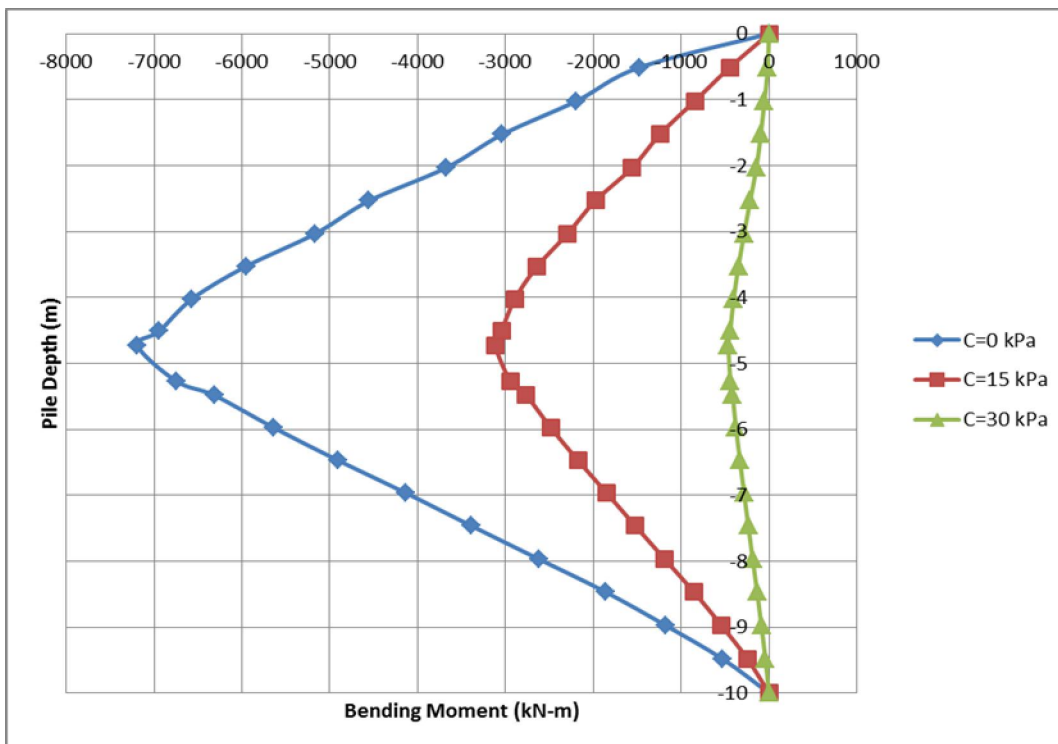
هم‌چنین با بررسی نمودار تغییرات لنگر خمشی و نیروی برشی و مقایسه‌ی مقادیر آن با ظرفیت خمشی و برشی شمع که در بخش ۳-۳-۲ محاسبه شده است، مشاهده می‌شود که شمع توانایی تحمل نیروی برشی و لنگر خمشی ایجاد شده در اثر زلزله را دارد.

۲-۳-۴ تحت تأثیر بار زلزله‌ی لوما پریتا

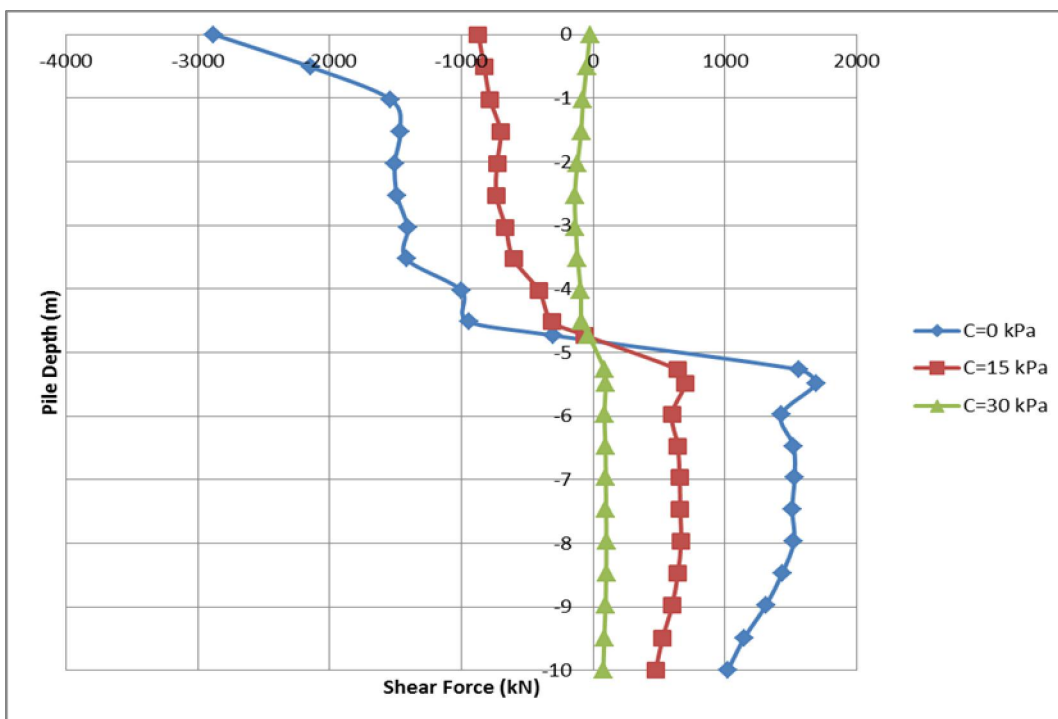
در این بخش نتایج تحلیل مدل تحت تأثیر بار زلزله‌ی لوما پریتا با بیشینه‌ی شتاب $0.174g$ بررسی شده است. شکل‌های ۴-۸ تا ۴-۱۰ به ترتیب نشان دهنده‌ی تغییر مکان، تغییرات لنگر خمشی و تغییرات نیروی برشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش در زمان ۱ ثانیه پس از اتمام زلزله هستند.



شکل ۴-۸: تغییر شکل جانبی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت بار زلزله‌ی لوما پریتا



شکل ۴-۹: تغییرات لنگر خمشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت بار زلزله‌ی لوما پربتا



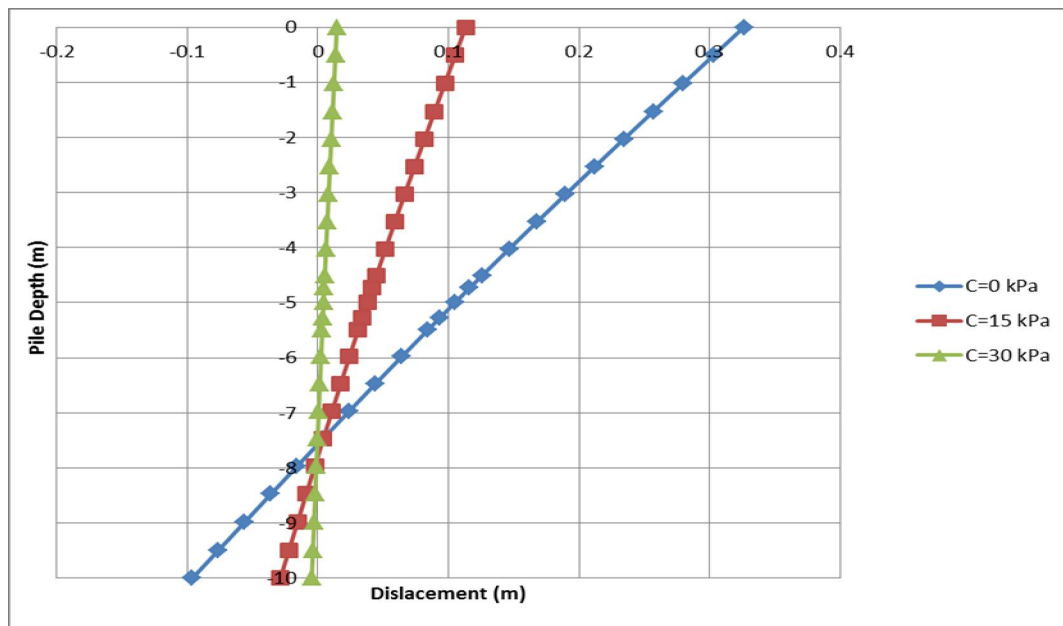
شکل ۴-۱۰: تغییرات نیروی برشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت بار زلزله‌ی لوما پربتا

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود نمودارهای نتایج این بخش مشابه نتایج بخش قبل؛ یعنی ۳-۴-۱ تحت تأثیر بار زلزله‌ی ال سنترو بوده و تنها مقادیر نیروهای برشی و لنگرهای خمشی متفاوت هستند؛ در نتیجه تفاوتی در رفتار شمع ایجاد نشده است.

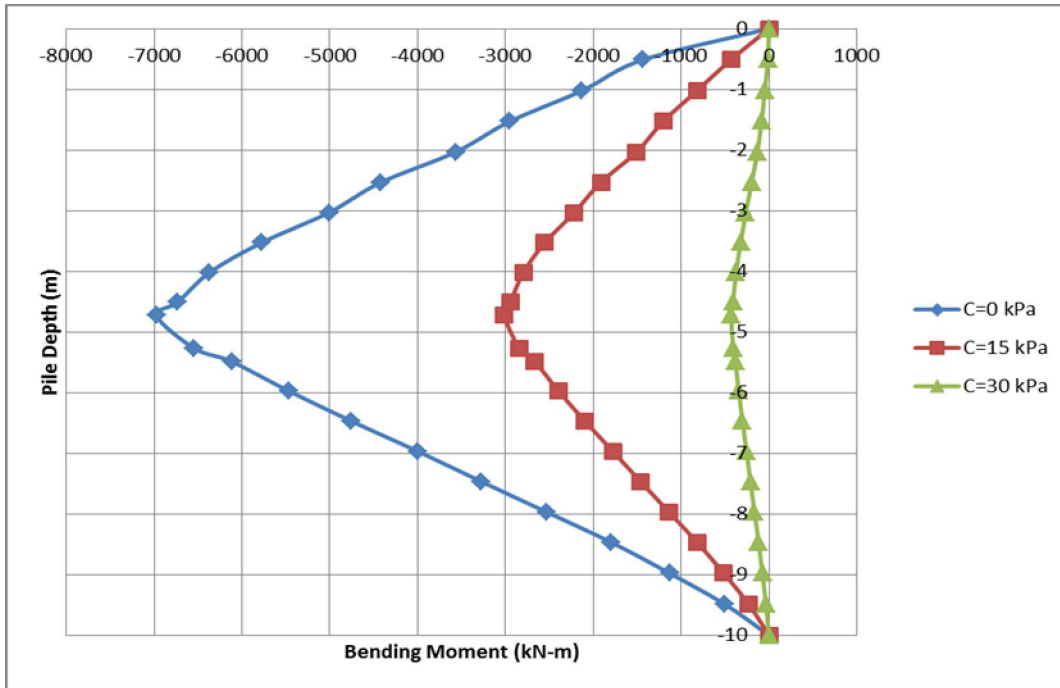
هم‌چنین با بررسی نمودار تغییرات لنگر خمشی و نیروی برشی و مقایسه‌ی مقادیر آن با ظرفیت خمشی و برشی شمع مشاهده می‌شود که شمع توانایی تحمل نیروی برشی و لنگر خمشی ایجاد شده در اثر این زلزله را دارد.

۳-۳-۴ تحت تأثیر بار زلزله‌ی نورث‌ریج

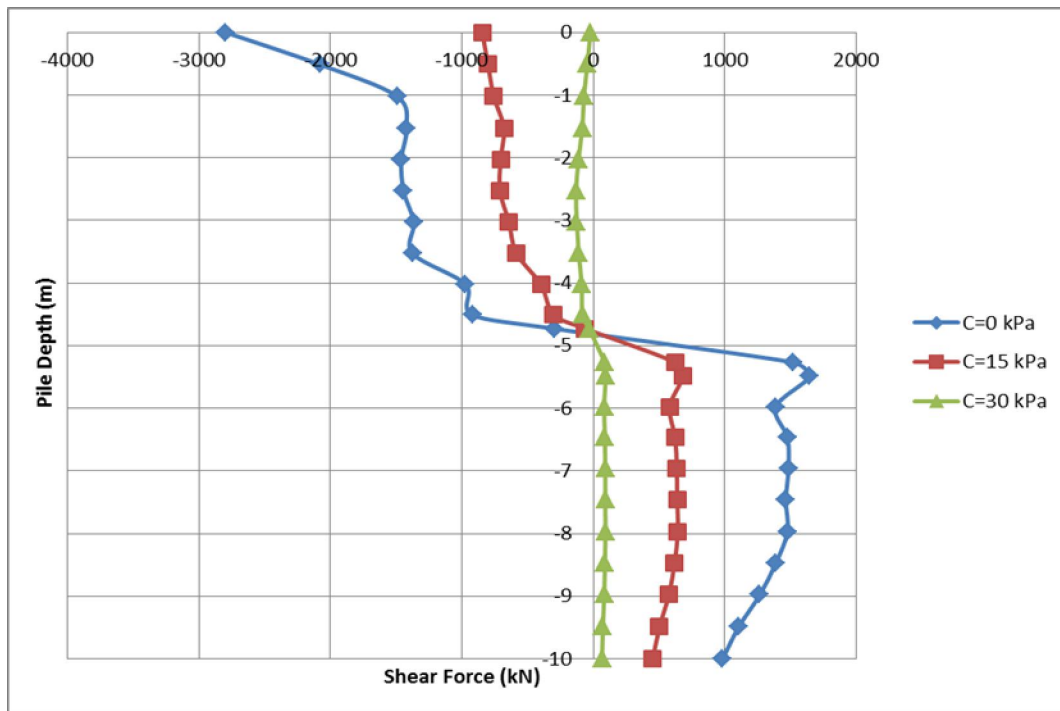
این بخش به بررسی نتایج تحلیل مدل تحت تأثیر بار زلزله‌ی نورث‌ریج با بیشینه‌ی شتاب $0.629g$ اختصاص دارد. شکل‌های ۴-۱۱ تا ۴-۱۳ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تغییر مکان، تغییرات لنگر خمشی و تغییرات نیروی برشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش در زمان ۱ ثانیه پس از اتمام زلزله هستند.



شکل ۴-۱۱ تغییر شکل جانبی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت بار زلزله‌ی نورث‌ریج



شکل ۴-۱۲ تغییرات لنگر خمشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت بار زلزله‌ی نورث‌ریچ



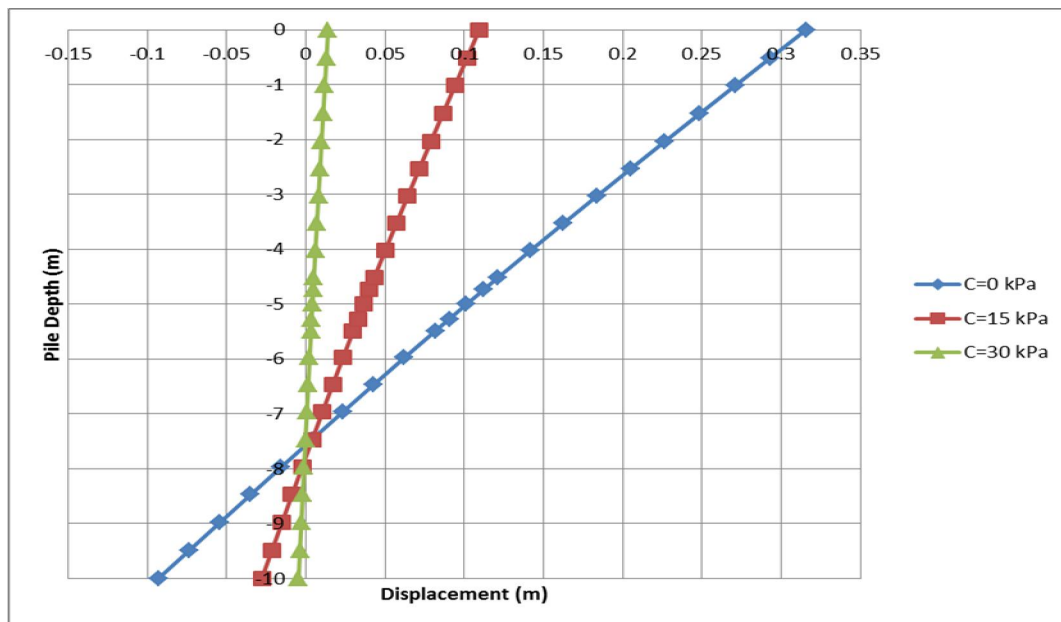
شکل ۴-۱۳ تغییرات نیروی برشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت بار زلزله‌ی نورث‌ریچ

همان طور که ملاحظه می‌گردد نمودارهای نتایج این بخش مشابه نتایج دو بخش قبل؛ یعنی ۴-۱ و ۴-۳ بوده و تنها مقادیر نیروهای برشی و لنگرهای خمشی متفاوت هستند. پس تفاوتی در رفتار شمع دیده نمی‌شود.

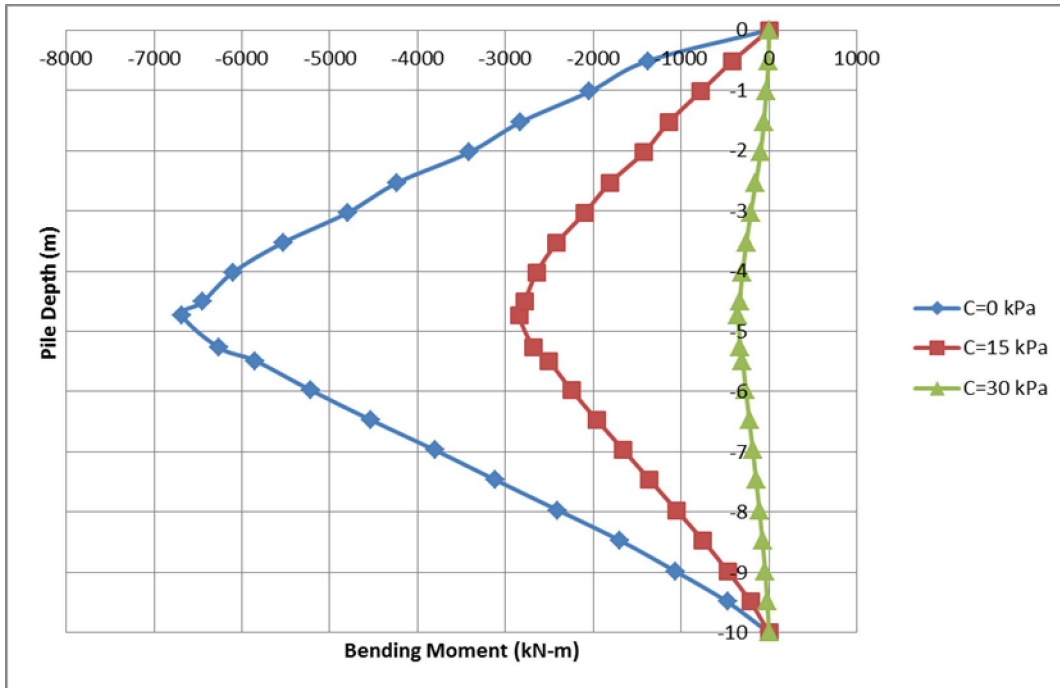
همچنین با بررسی نمودار تغییرات لنگر خمشی و نیروی برشی و مقایسه‌ی مقادیر آن با ظرفیت خمشی و برشی شمع مشاهده می‌شود که شمع توانایی تحمل نیروی برشی و لنگر خمشی ایجاد شده در اثر این زلزله را دارد.

۴-۳-۴ تحت تأثیر بار زلزله‌ی بم

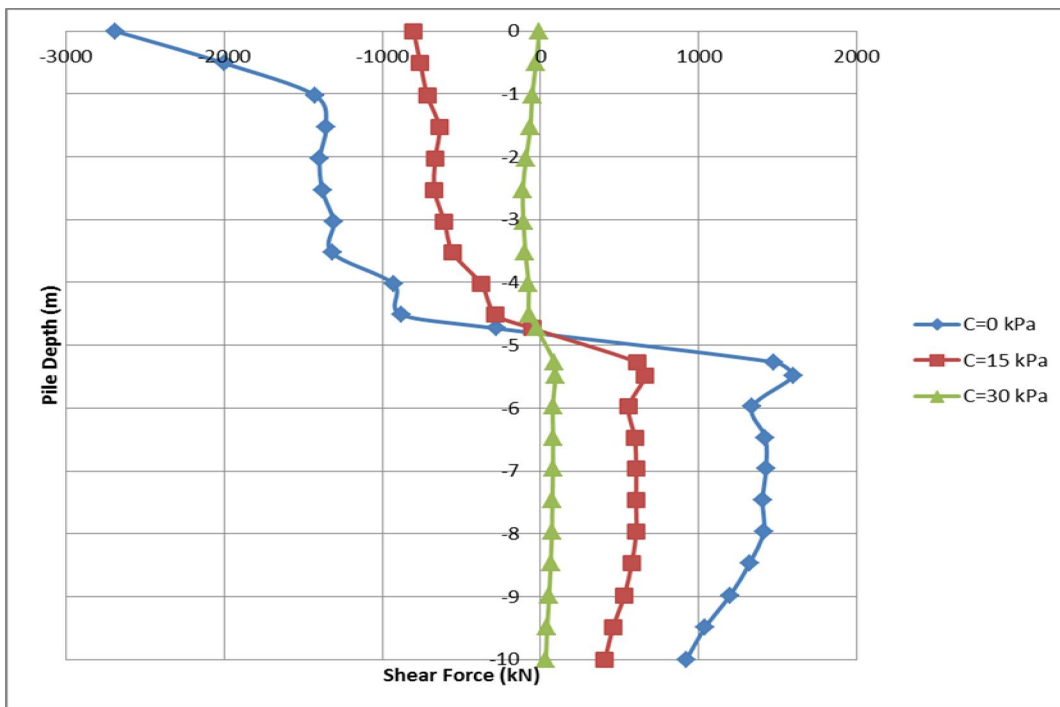
نتایج تحلیل مدل تحت تأثیر بار زلزله‌ی بم با بیشینه‌ی شتاب $0.572g$ نیز در این بخش بررسی می‌شود. شکل‌های ۴-۱۴ تا ۴-۱۶ به ترتیب نشان دهنده‌ی تغییر مکان، تغییرات لنگر خمشی و تغییرات نیروی برشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش در زمان ۱ ثانیه پس از اتمام زلزله هستند.



شکل ۴-۱۴ تغییر شکل جانبی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت بار زلزله‌ی بم



شکل ۴-۱۵ تغییرات لنگر خمشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت بار زلزله‌ی بم



شکل ۴-۱۶ تغییرات نیروی برشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت بار زلزله‌ی بم

طبق نمودارها، نتایج این بخش نیز مشابه سه بخش قبل بوده و تفاوتی در رفتار شمع دیده نمی‌شود.

بنابراین با کاهش مقاومت سطح لغزش، تغییر مکان در شمع افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان دریافت که در حالت مقاومت سطح لغزش برابر ۳۰ کیلوپاسکال مقادیر تغییر مکان، لنگر خمشی و نیروی برشی بسیار ناچیز هستند که ناشی از پایدار بودن شیب با این مقاومت سطح لغزش است. هم-چنین می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش مقاومت سطح لغزش، لنگر خمشی و نیروی برشی در شمع افزایش می‌یابد.

همچنین با بررسی نمودار تغییرات لنگر خمشی و نیروی برشی و مقایسه‌ی مقادیر آن با ظرفیت خمشی و برشی شمع مشاهده می‌شود که شمع توانایی تحمل نیروی برشی و لنگر خمشی ایجاد شده در اثر زلزله را دارد.

در جدول ۴-۱ مقادیر بیشینه‌ی شتاب، نیروی برشی و لنگر خمشی برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت تاثیر بار چهار زلزله‌ی مختلف ارائه شده است. با بررسی مقادیر ارائه شده در جدول ۴-۱ و نمودارهای نیروهای برشی و لنگر خمشی ایجاد شده در شمع‌ها تحت بار چهار زلزله‌ی مختلف می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش بیشینه‌ی شتاب زلزله، نیروی برشی و لنگر خمشی ایجاد شده در شمع افزایش می‌یابد. هم‌چنین تغییر شکل جانبی در طول شمع نیز با افزایش بیشینه‌ی شتاب افزایش می‌یابد.

جدول ۴-۱: مقایسه‌ی مقادیر بیشینه‌ی شتاب، نیروی برشی و لنگر خمشی برای سه مقاومت مختلف سطح

لغزش تحت تاثیر بار چهار زلزله

نام زلزله	بیشینه‌ی شتاب (g)	بیشینه‌ی نیروی برشی (kN)			بیشینه‌ی لنگر خمشی (kN.m)		
		C=0 kPa	C=15 kPa	C=30 kPa	C=0 kPa	C=15 kPa	C=30 kPa
		ال سنترو	0.362	2570	747	98	6390
بم	0.572	2690	803	111	6678	2846	350
نورثریج	0.629	2796	845	131	6972	3010	430
لوما پریتا	0.740	2878	872	140	7187	3114	462

۴-۴ بررسی رفتار مدل دارای ردیف شمع با تغییر مکان شمع

این بخش به بررسی رفتار شیب تقویت شده با یک ردیف شمع تحت تأثیر بار زلزله در برابر تغییر مکان شمع اختصاص دارد. برای این کار، سه مکان مختلف تحت شرایط یکسان بررسی می‌گردد. این ۳ تیپ مکان شمع عبارتند از:

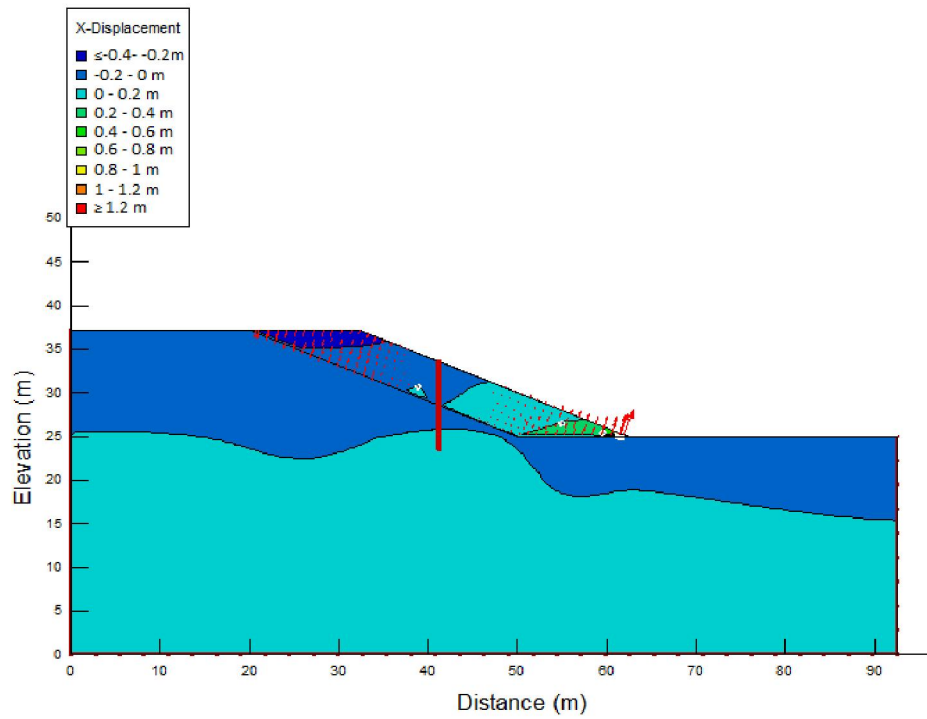
۱. تیپ ۱: شمع در میانه‌ی شیب

۲. تیپ ۲: شمع در بالادست شیب (تاج شیب)

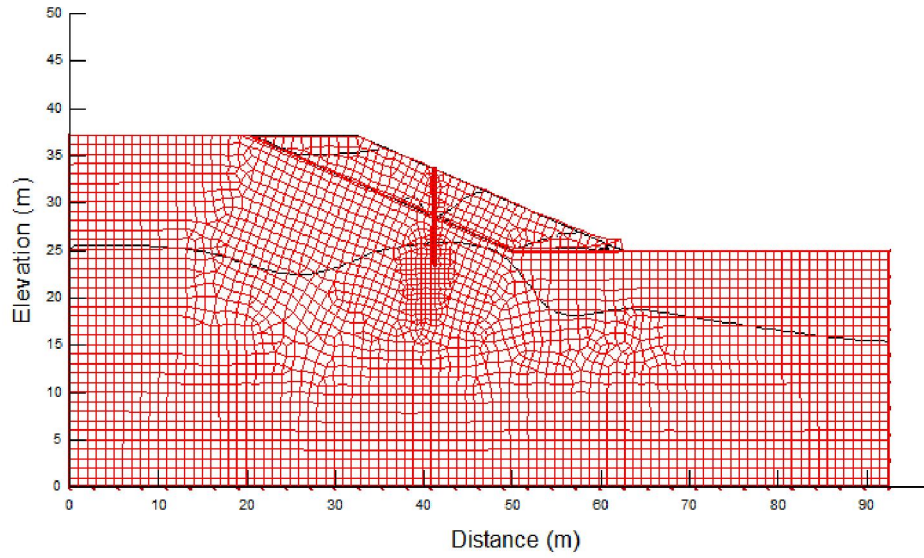
۳. تیپ ۳: شمع در پایین دست شیب (پنجه شیب)

شکل‌های ۱۷-۴ تا ۲۲-۴ نشان دهنده‌ی این ۳ تیپ هستند.

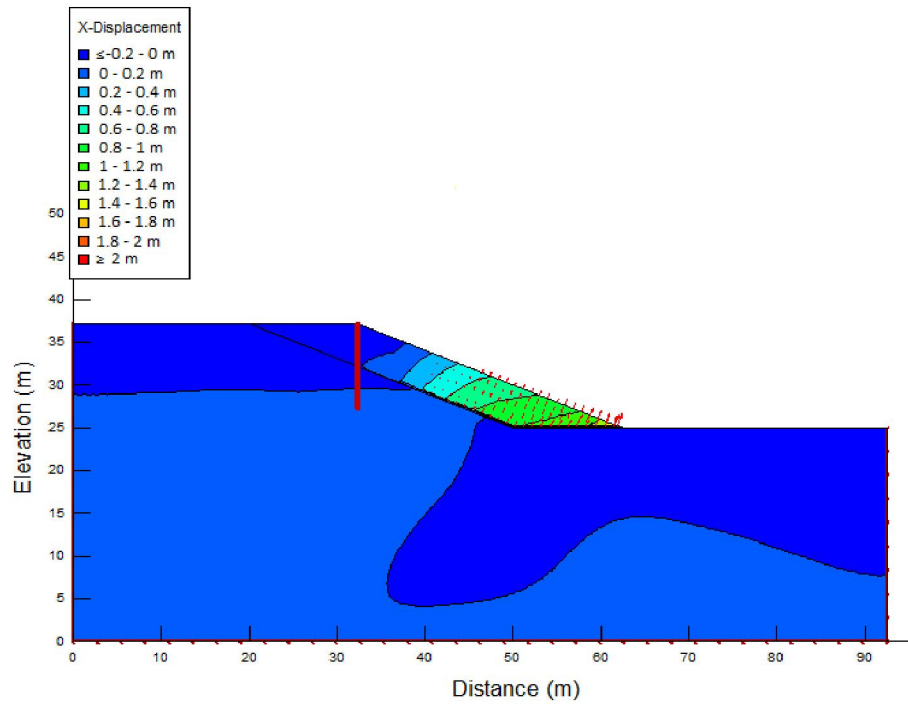
مشخصات خاک، شمع، شرایط مرزی و مش بندی مطابق توضیحات فصل ۳ در نظر گرفته شده است. تحلیل‌ها برای مقاومت سطح لغزش برابر ۱۵ کیلوپاسکال و تحت اثر بار زلزله‌ی ال سنترو انجام شده است.



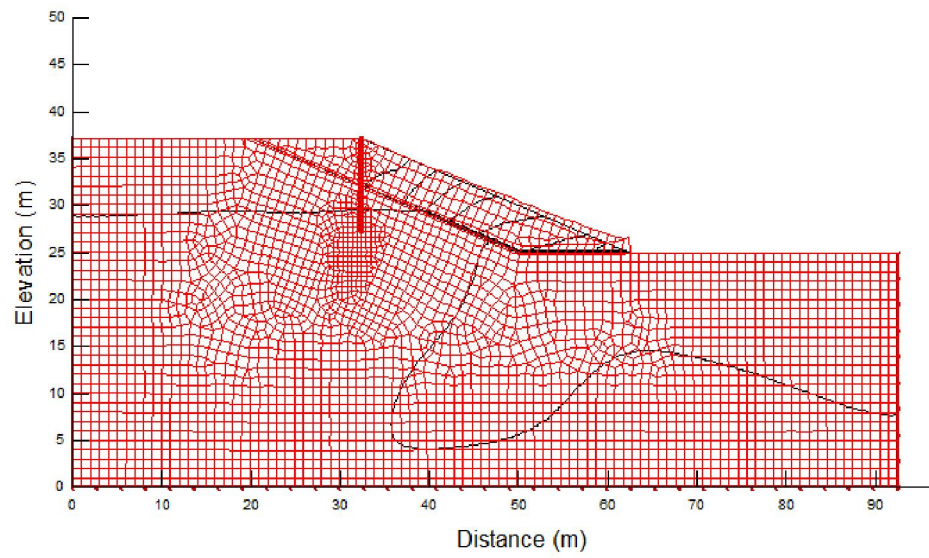
شکل ۱۷-۴ منحنی میزان و بردارهای جابه‌جایی برای تیپ ۱-شمع در میانه‌ی شیب



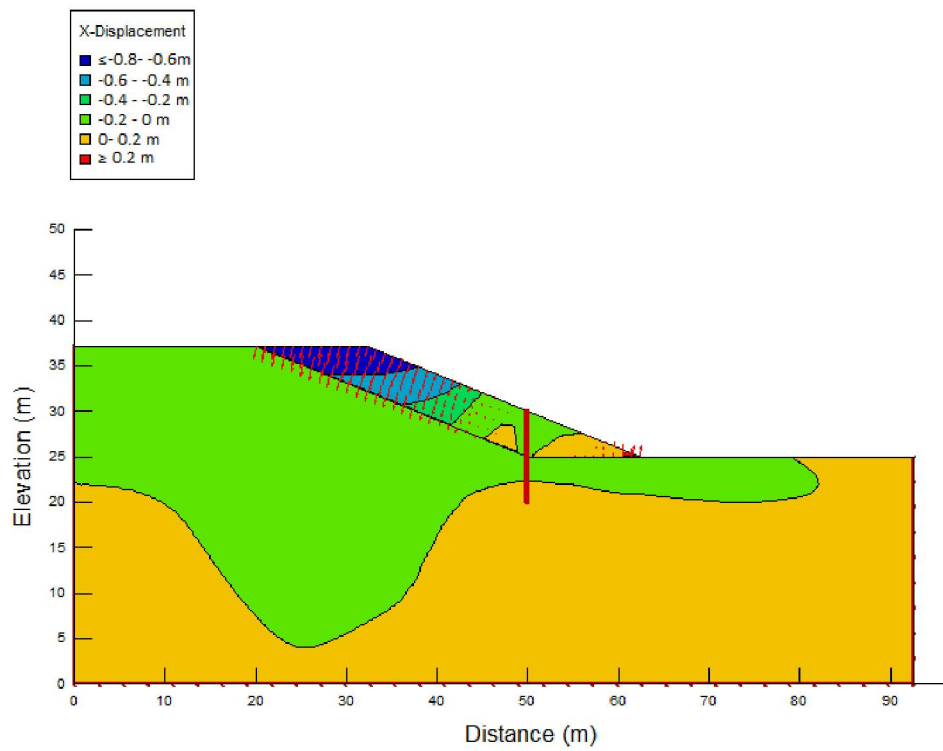
شکل ۱۸-۴ تغییر شکل‌های مش برای تیپ ۱-شمع در میانه‌ی شیب



شکل ۱۹-۴ منحنی میزان و بردارهای جابه‌جایی برای تیپ ۲-شمع در بالادست شیب (تاج شیب)



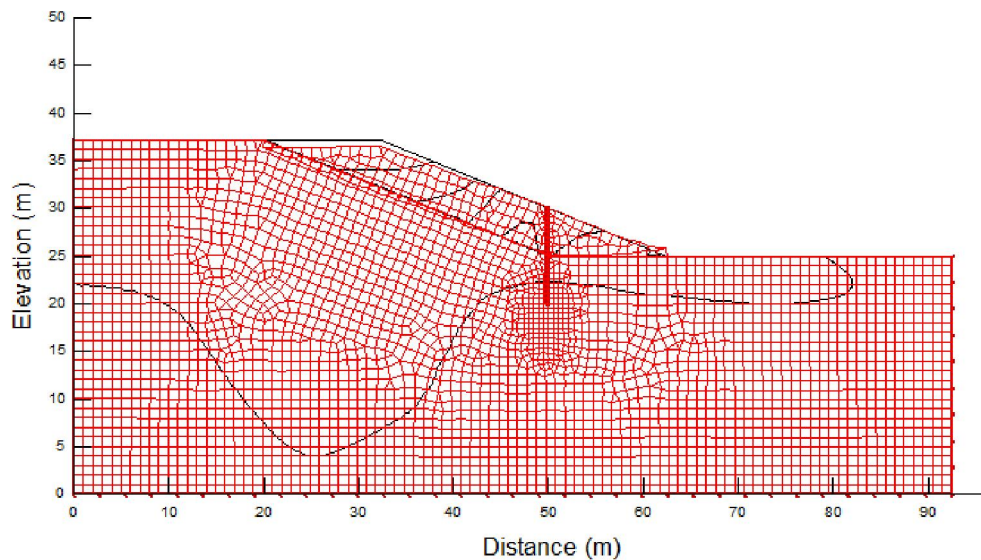
شکل ۲۰-۴ تغییر شکل‌های مش برای تیپ ۲-شمع در بالادست شیب (تاج شیب)



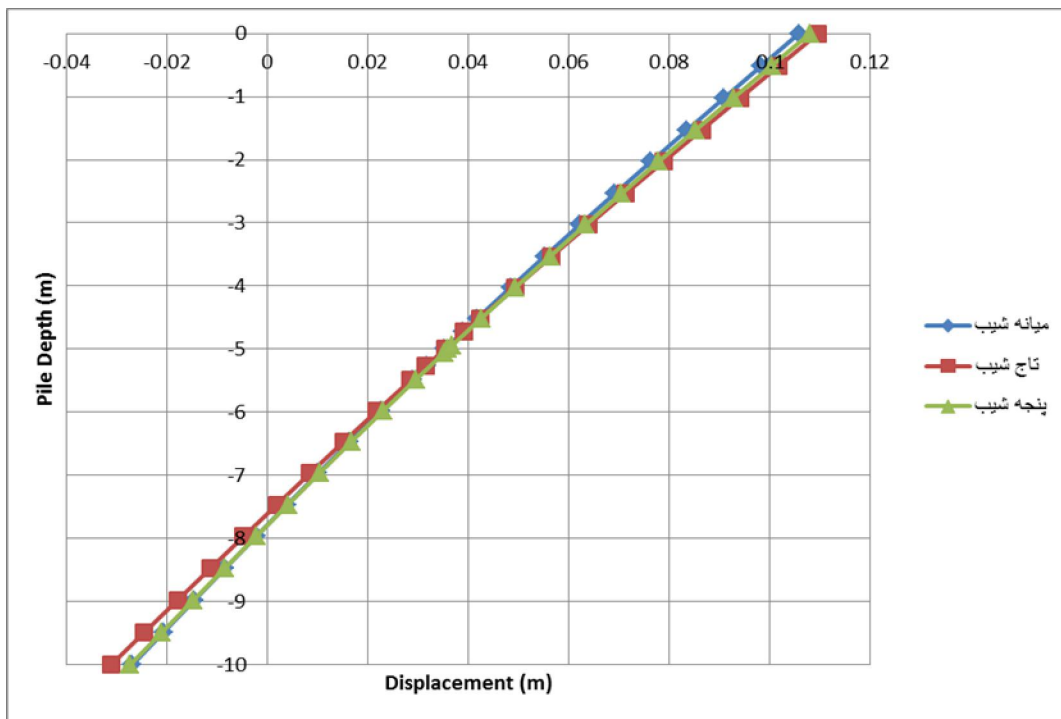
شکل ۲۱-۴ منحنی میزان و بردارهای جابه‌جایی برای تیپ ۳-شمع در پایین دست شیب (پنجه شیب)

شکل‌های ۱۷-۴ تا ۲۲-۴ نشان‌دهنده‌ی منحنی میزان جابه‌جایی‌های شیب و تغییر شکل‌های مش برای این ۳ تیپ در زمان ۱ ثانیه پس از اتمام زلزله هستند. همچنین شکل‌های ۲۳-۴ تا ۲۵-۴ به ترتیب مقادیر تغییر مکان، لنگر برشی و نیروی برشی را در طول شمع برای این ۳ تیپ مختلف در زمان ۱ ثانیه پس از اتمام زلزله نشان می‌دهند.

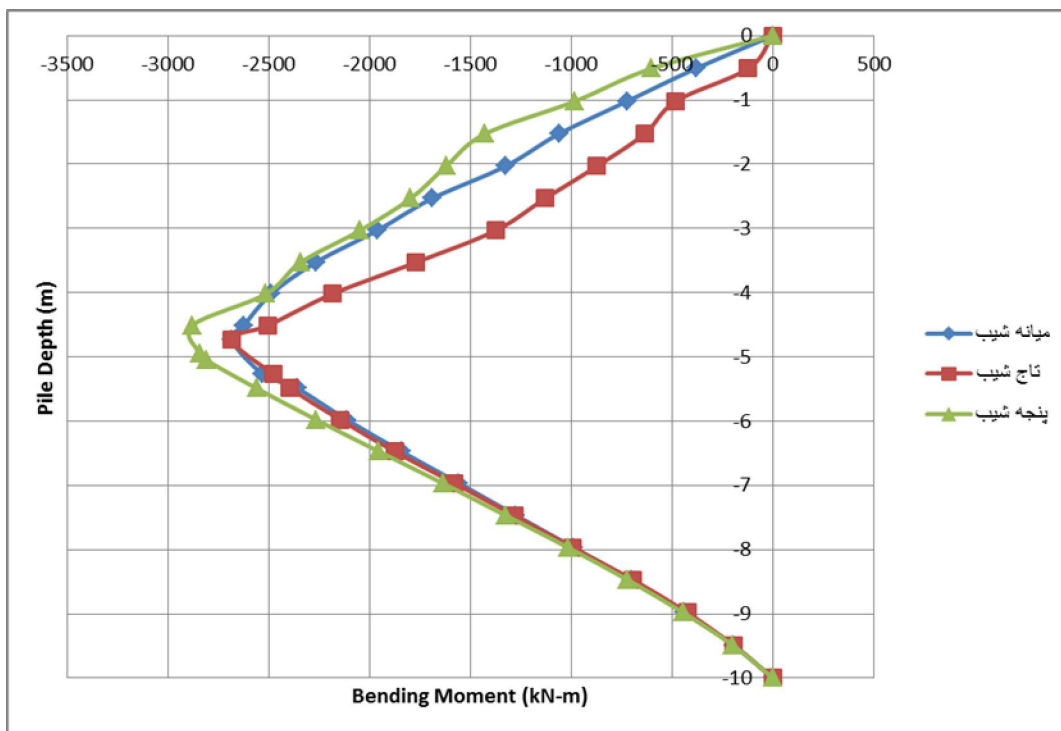
با بررسی منحنی میزان جابه‌جایی‌ها دریافت می‌شود که در تیپ ۲ مقادیر تغییر مکان‌های پنجه‌ی شیب و در تیپ ۳ مقادیر تغییر مکان‌های تاج شیب زیاد است. اما در تیپ ۱ مقادیر تغییر مکان در تاج شیب ناچیز بوده و مقادیر تغییر مکان در پنجه‌ی شیب نیز از مقادیر مشابه تیپ ۲ کمتر است.



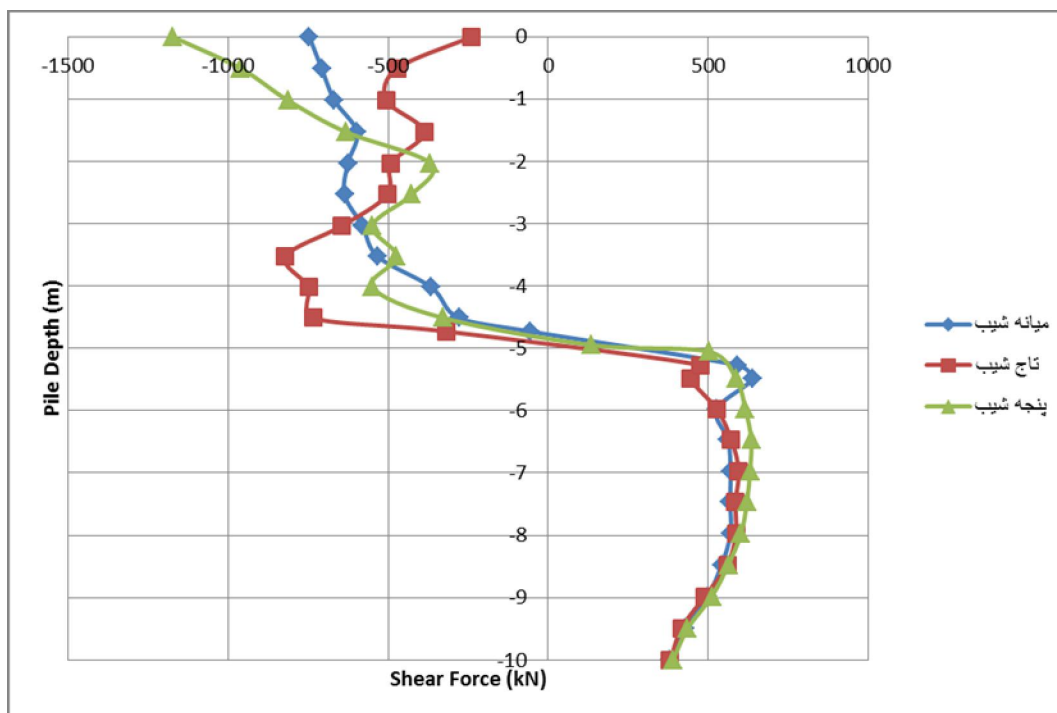
شکل ۲۲-۴ تغییر شکل‌های مش برای تیپ ۳-شمع در پایین دست شیب (پنجه شیب)



شکل ۴-۲۳ تغییر شکل جانبی در طول شمع برای سه تپ مختلف مکان شمع



شکل ۴-۲۴ تغییرات لنگر خمشی در طول شمع برای سه تپ مختلف مکان شمع



شکل ۴-۲۵ تغییرات نیروی برشی در طول شمع برای سه تیپ مختلف مکان شمع

نمودارهای تغییر مکان، لنگر خمشی و نیروی برشی شمع برای هر سه تیپ مکان شمع با درصد کمی اختلاف نزدیک به یکدیگر هستند.

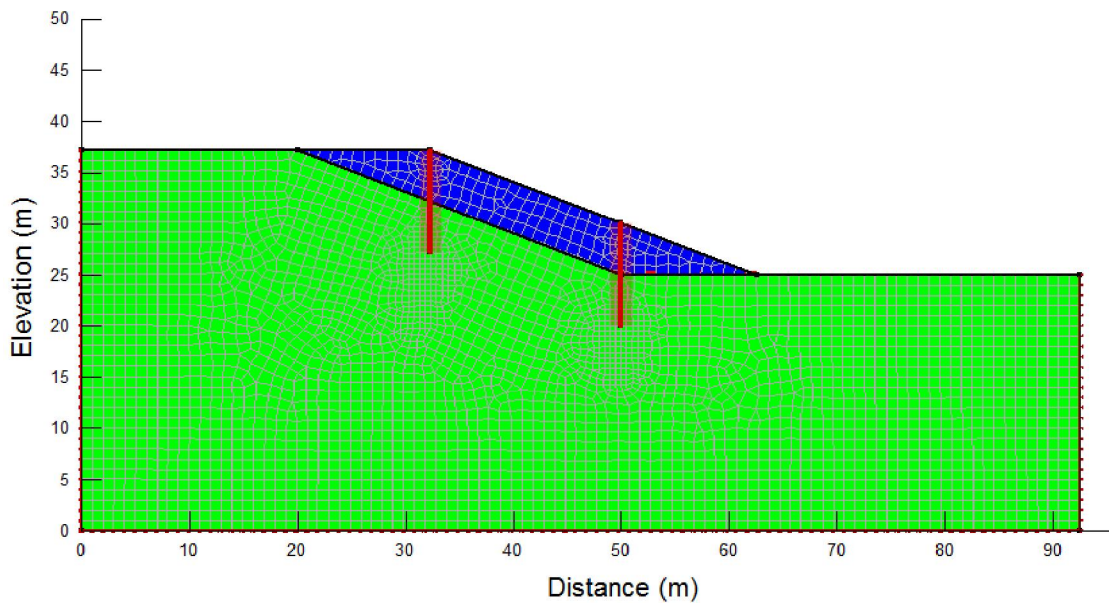
با بررسی نمودار تغییرات لنگر خمشی و نیروی برشی برای سه تیپ مختلف مکان شمع و مقایسه‌ی مقادیر آن با ظرفیت خمشی و برشی شمع مشاهده می‌شود که شمع توانایی تحمل نیروی برشی و لنگر خمشی ایجاد شده در سه تیپ مختلف مکان شمع را دارد.

می‌توان نتیجه گرفت که برای پایدارسازی این شیب بهتر است از شمع در میانه‌ی شیب (تیپ ۱) استفاده شود و در صورت وجود جابه‌جایی در پنجه‌ی شیب برای مهار آن از دیگر روش‌های تثبیت شیب به همراه ردیف شمع استفاده گردد.

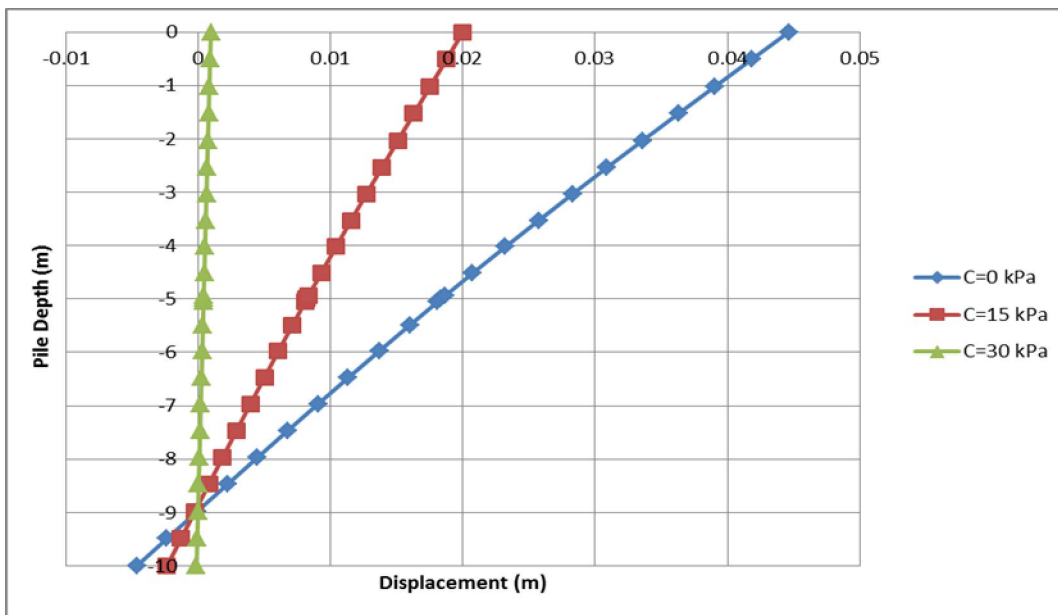
۴-۵ بررسی رفتار مدل با استفاده از دو ردیف شمع

در این قسمت از تحقیق، رفتار شیب و شمع‌ها با استفاده از دو ردیف شمع بررسی می‌شود. هندسه‌ی مدل، مشابه قسمت‌های گذشته است و تفاوت، در محل قرارگیری شمع‌هاست. شمع اول در بالادست شیب (تاج شیب) و شمع دوم در پایین دست شیب (پنجه شیب) قرار داده شده است (شکل ۴-۲۶). در هر دو شمع، نیمی از طول شمع یعنی ۵ متر در خاک ناپایدار و نیم دیگر در خاک پایدار قرار گرفته است. تحلیل‌ها برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش، یعنی صفر، ۱۵ کیلوپاسکال و ۳۰ کیلوپاسکال و تحت تأثیر بار زلزله‌ی ال سنترو انجام شده است.

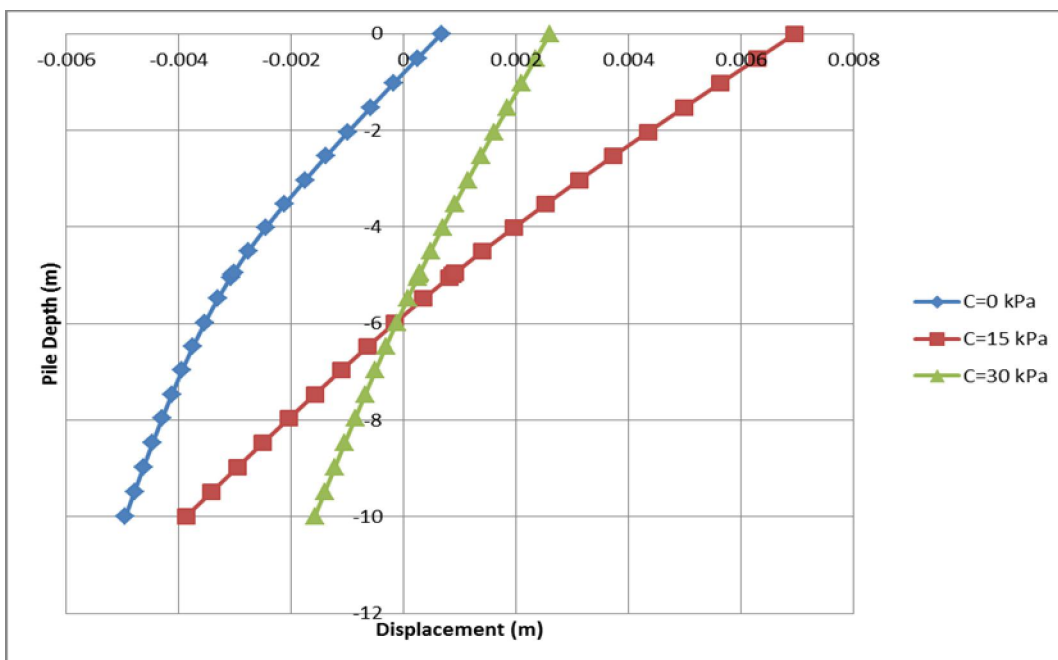
شکل‌های ۴-۲۷ تا ۴-۳۲ نشان‌دهنده‌ی تغییر مکان، تغییرات لنگر خمشی و تغییرات نیروی برشی در طول شمع‌های بالا دست و پایین دست برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش در زمان ۱ ثانیه پس از اتمام زلزله هستند.



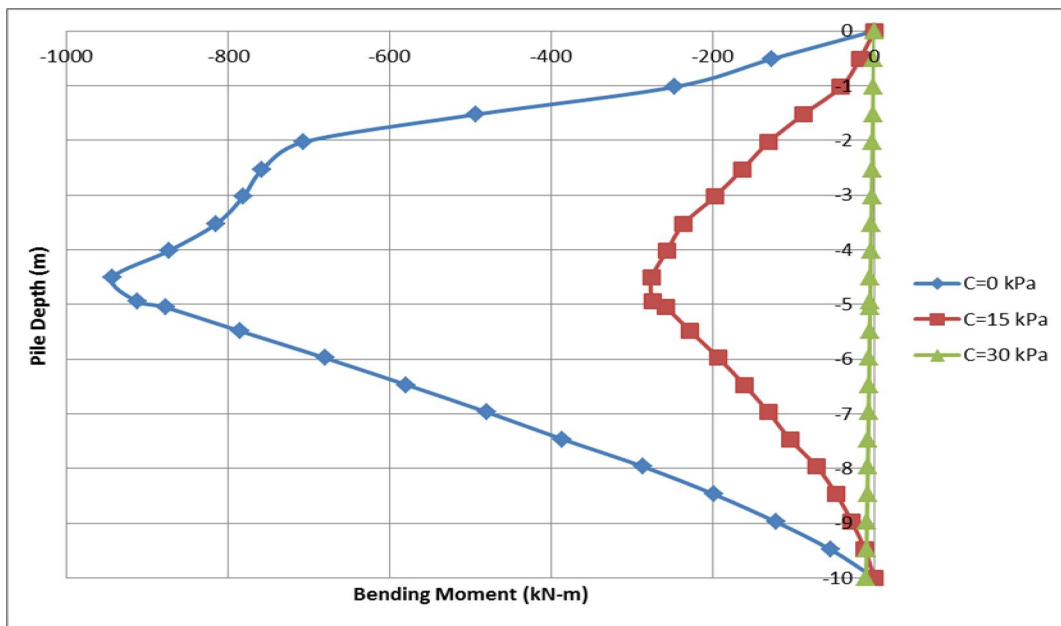
شکل ۴-۲۶ هندسه‌ی مدل دارای دو ردیف شمع



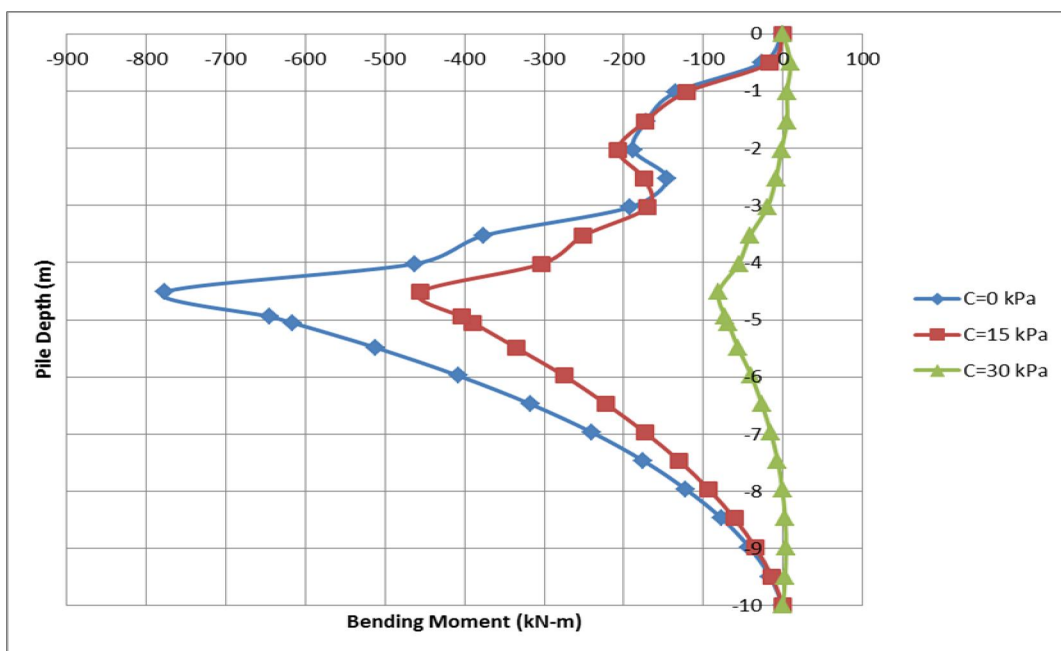
شکل ۲۷-۴ تغییر شکل جانبی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت تأثیر بار زلزله‌ی ال سنترو برای شمع بالادست



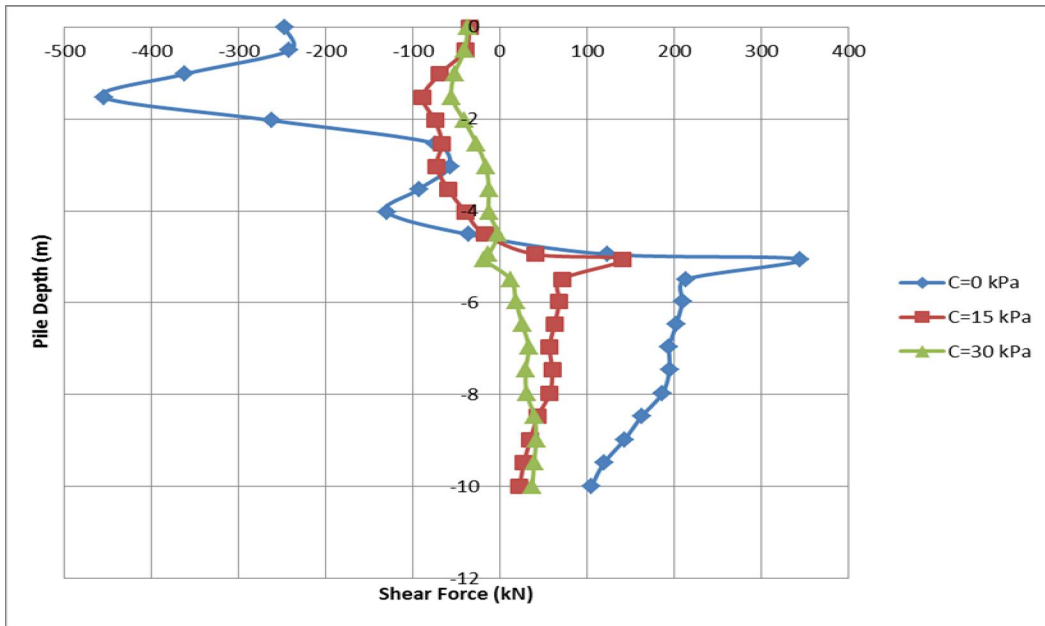
شکل ۲۸-۴ تغییر شکل جانبی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت تأثیر بار زلزله‌ی ال سنترو برای شمع پایین دست



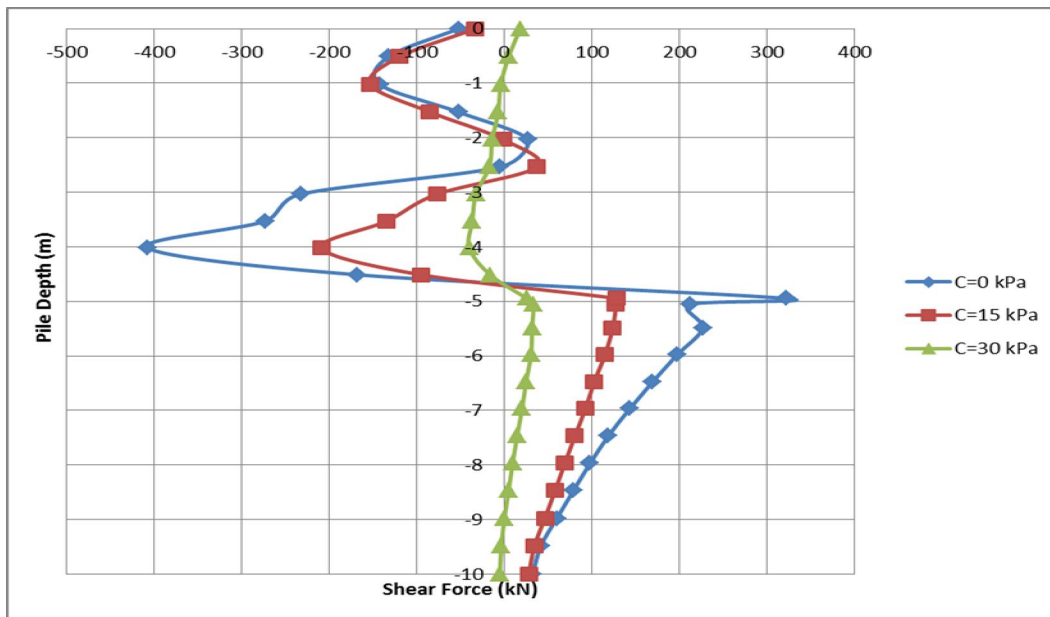
شکل ۴-۲۹ تغییرات لنگر خمشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت تأثیر بار زلزله‌ی ال سنتر و برای شمع بالادست



شکل ۴-۳۰ تغییرات لنگر خمشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت تأثیر بار زلزله‌ی ال سنتر و برای شمع پایین دست



شکل ۴-۳۱ تغییرات نیروی برشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت تأثیر بار زلزله‌ای ال سنترال برای شمع بالا دست



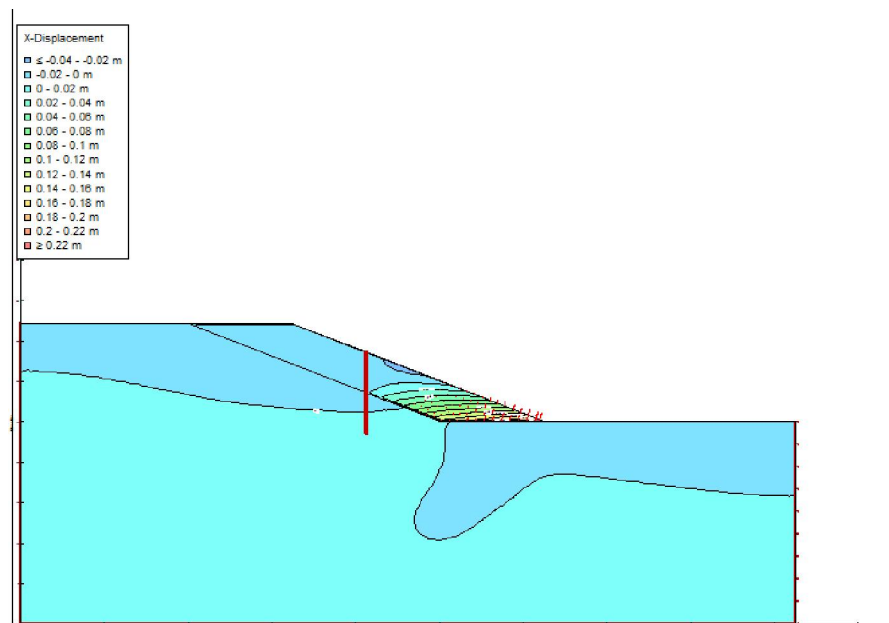
شکل ۴-۳۲ تغییرات نیروی برشی در طول شمع برای سه مقاومت مختلف سطح لغزش تحت تأثیر بار زلزله‌ای ال سنترال برای شمع پایین دست

از مقایسه‌ی مقادیر لنگر خمشی و نیروی برشی ایجاد شده در شمع‌ها با مقادیر لنگر خمشی و نیروی برشی ایجاد شده در شمع در بخش ۴-۳-۱ که شیب دارای یک ردیف شمع در آن بررسی شده و با توجه به پایین بودن این مقادیر، می‌توان نتیجه گرفت که نیاز به استفاده از دو ردیف شمع در چنین شیبی وجود ندارد.

در صورت عدم کفایت یک ردیف شمع برای پایدارسازی شیب، بهتر است در جهت بهینه‌سازی، از ترکیب یک ردیف شمع همراه با یکی دیگر از روش‌های پایدارسازی استفاده شود.

۴-۶ صحت‌سنجی

برای صحت‌سنجی پروژه از نرم افزار پلکسیس دو بعدی استفاده شد. پلکسیس نرم افزار المان محدود پیشرفته‌ای است که برای تحلیل تغییر شکل‌ها و پایداری در پروژه‌های مهندسی ژئوتکنیک کاربرد دارد.

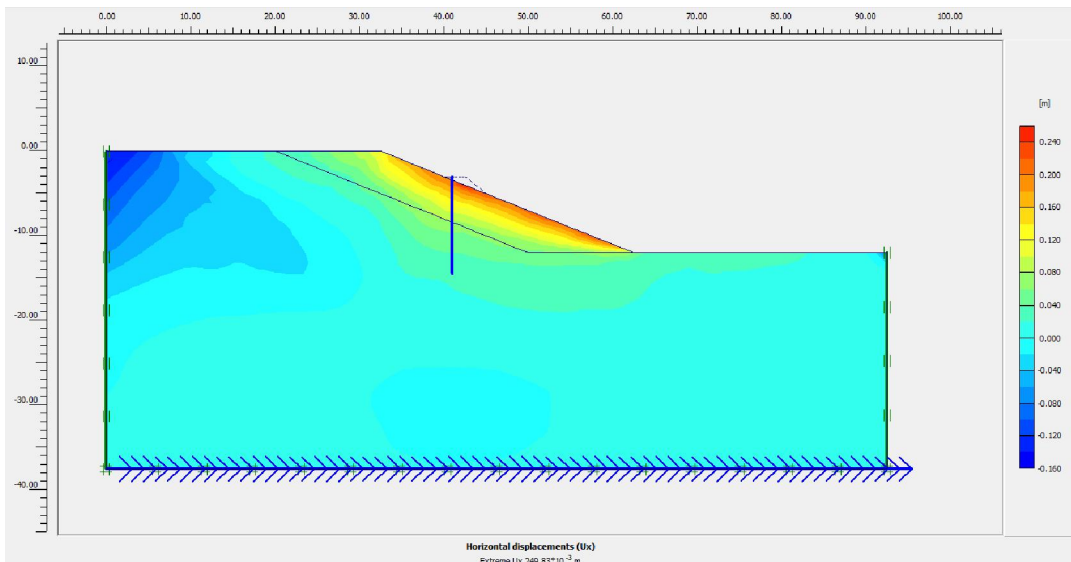


شکل ۴-۳۳ منحنی میزان‌های جابه‌جایی در محیط نرم افزار ژئواستودیو

برای انجام صحت‌سنجی از مدل دارای یک ردیف شمع در میانه‌ی شیب (تیپ ۱) نیز استفاده شد. مشخصات خاک، شمع، شرایط مرزی و مش‌بندی، مشابه بخش‌های قبل در هر دو نرم افزار اعمال شد. تحلیل برای مقاومت سطح لغزش برابر ۳۰ کیلوپاسکال و تحت تأثیر بار زلزله‌ی ال سنترو انجام شده است.

شکل ۴-۳۳ نتیجه‌ی تحلیل (منحنی میزان‌های جابه‌جایی) را در محیط نرم افزار ژئواستودیو نشان می‌دهد.

هم‌چنین در شکل ۴-۳۴ منحنی میزان‌های جابه‌جایی در نتیجه‌ی تحلیل در محیط نرم افزار پلکسیس ارائه شده است.



شکل ۴-۳۴ منحنی میزان‌های جابه‌جایی در محیط نرم افزار پلکسیس

با بررسی و مقایسه‌ی دو شکل ۴-۳۳ و ۴-۳۴ و میزان جابه‌جایی، نیرو و لنگرهای به وجود

آمده، مشاهده می‌شود که نتایج با تقریب خوبی منطبق بوده و اعتبار و صحت مدل اثبات می‌شود.

هم‌چنین با بررسی نتایج قسمت ۳-۴ ملاحظه می‌شود که با کاهش مقاومت سطح لغزش شاهد افزایش تغییر مکان، نیروی برشی و لنگر خمشی در شمع بوده که منطبق بر نتایج کاناگاسابای (2010) است.

۵- فصل پنجم

نتایج و پیشنهادها

۵-۱ نتایج

- پس از بررسی نمودارهای نیروی برشی و لنگر خمشی و منحنی میزان‌های جابه‌جایی برای دو حالت شیب بدون شمع و شیب با ردیف شمع نتیجه چنین شد که این شیب با مقاومت سطح لغزش برابر ۱۵ کیلوپاسکال، تحت تأثیر بار زلزله‌ی ناپایدار بوده و نیاز به تثبیت دارد که اثربخش بودن ردیف شمع در این امر اثبات شد.
- نتایج بررسی مکان بهینه‌ی شمع بر روی شیب نشان داد که برای پایدارسازی این شیب بهتر است از شمع در میانه‌ی شیب استفاده شده و در صورت وجود جابه‌جایی در پنجه‌ی شیب، برای مهار آن از دیگر روش‌های تثبیت شیب به همراه ردیف شمع استفاده شود.
- در تحلیل‌های انجام شده بر روی اثر مقاومت سطح لغزش بر رفتار شمع تثبیت‌کننده‌ی شیب مشاهده شد که با کاهش مقاومت سطح لغزش، افزایش تغییر مکان در شمع رخ می‌دهد؛ به صورتی که در حالت مقاومت سطح لغزش برابر صفر، خاک ناپایدار به راحتی جریان پیدا کرده و بیشترین فشار را بر روی شمع‌ها اعمال می‌کند. هم‌چنین با بررسی نمودارهای نیروی برشی و لنگر خمشی در حالت مقاومت سطح لغزش برابر ۳۰ کیلوپاسکال، اثبات شد که در این حالت شیب پایدار است. پس با کاهش مقاومت سطح لغزش خاک جریان پیدا کرده و فشار بیشتری را بر شمع اعمال می‌کند، در نتیجه لنگر خمشی و نیروی برشی در شمع افزایش می‌یابد.
- نتیجه‌ی بررسی نمودارهای نیروهای برشی و لنگر خمشی ایجاد شده در شمع‌ها تحت بار چهار زلزله‌ی مختلف می‌توان نشان داد که با افزایش بیشینه‌ی شتاب زلزله، نیروی برشی و لنگر خمشی ایجاد شده در شمع افزایش می‌یابد. هم‌چنین تغییر شکل جانبی

در طول شمع نیز با افزایش بیشینه‌ی شتاب افزایش می‌یابد.

- پس از بررسی مقادیر لنگر خمشی و نیروی برشی ایجاد شده در شمع‌ها در حالت پایدارسازی با دو ردیف شمع نتیجه گرفته شد که نیاز به استفاده از دو ردیف شمع در چنین شیبی وجود ندارد و در صورت عدم کفایت یک ردیف شمع برای پایدارسازی شیب، بهتر است در جهت بهینه‌سازی از ترکیب یک ردیف شمع همراه با یکی دیگر از روش‌های پایدارسازی شیب استفاده شود.

۵-۲ پیشنهاد برای کارهای آینده

- بررسی رفتار ردیف شمع‌های نامتقارن در پایداری زمین‌لغزش‌های بزرگ تحت تأثیر بار زلزله
- بررسی اثر بلند مدت ردیف شمع در پایداری زمین لغزش
- بررسی اثر سختی و طول شمع‌های یک ردیف شمع در پایداری زمین لغزش
- بررسی اثر طول شمع‌های ردیف شمع در پایداری زمین لغزش
- بررسی اثر سختی خمشی شمع‌های ردیف شمع در پایداری زمین لغزش

منابع

- Allison J A, Mawditt J M and Williams G T (1991) The use of bored piles and counterfort drains to stabilize a major landslide - a comparison of theoretical and field performance, *In: Slope Stability Engineering*, Thomas Telford, London, pp. 369-376.
- Broms B B (1964) Lateral resistance of piles in cohesive soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 90, No. SM2, pp. 27-63.
- Brown D A and Shie C F (1990a) Three dimensional finite element model of laterally loaded piles, *Computers and Geotechnics*, Vol. 10, pp. 59-79.
- Brown D A and Shie C F (1990b) Numerical experiments into group effects on the response of piles to lateral loading, *Computers and Geotechnics*, Vol. 10, pp. 211-230.
- Cai F and Ugai K (2003) Response of flexible piles under laterally linear movement of the sliding layer in landslides, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 40, pp. 46-53.
- Carder D R and Barker K J (2005) Performance of a single row of spaced bored piles to stabilize a Gault Clay slope on the M25, *TRL Report-627*, Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, UK
- Chen C Y and Martin G R (2002) Soil-structure interaction for landslide stabilizing piles, *Computers and Geotechnics*, Vol. 29, pp. 363-386.
- Chen L and Poulos H G (1993) Analysis of pile-soil interaction under lateral loading using infinite and finite elements, *Computers and Geotechnics*, Vol. 15, pp. 189-220.
- Cubrinovski M, Kokusho T and Ishihara K (2006) Interpretation from

- large-scale shake table tests on piles undergoing lateral spreading in liquefied soils, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 26, pp. 275-286.
- De Beer E E and Wallays M (1970) Stabilization of a slope in schist by means of bored piles reinforced with steel beams, *Proceeding of the 2nd International Congress on Rock Mechanics*, Beograd, pp. 361-369.
- Fukuoka M (1977) The effects of horizontal loads on piles due to landslides, *Proceeding of the Specialty Session 10, 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, pp. 27-42.
- Hayward T, Lees A, Powrie W, Richards D J and Smethurst J A (2000) Centrifuge modelling of a cutting slope stabilised by discrete piles, *TRL Report-471*, Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, UK.
- Hong W P and Han J G (1996) The behavior of stabilizing piles installed in slopes, *Proceeding of the 7th International Symposium on Landslides*, Rotterdam, pp. 1709-1714.
- Ito T and Matsui T (1975) Methods to estimate lateral forces acting on stabilising piles, *Soils and Foundations*, Vol. 15, No. 4, pp. 43-59.
- Kanagasabai S (2010) PhD. Thesis, Three Dimensional Numerical Modelling of Rows of Discrete Piles used to Stabilise Large Landslides, faculty of engineering, science and mathematics school of civil engineering and the environment, University of Southampton
- Krahn J (2012) "Stress and deformation modeling with SIGMA/W, an engineering methodology," GEO-SLOPE International Ltd., Calgary,

Alberta

- Krahn J (2012) "Dynamic modeling with QUAKE/W, an engineering methodology," GEO-SLOPE International Ltd., Calgary, Alberta
- Lashkaripour, G. R (1999). "Hazard evaluation of landslide in iran." *Slope Stability Engineering. Proc. Int. Symp, 8-11 November 1999 Japan.*, pp. 1259-1262.
- Poulos H G (1995) Design of reinforcing piles to increase slope stability, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, No. 5, pp. 808-818. Pronsby, Springman, 1999
- Randolph M F (1981) The response of flexible piles to lateral loading, *Geotechnique*, Vol. 31, No. 2, pp. 247-259.
- Reese L C, Wang S T, Arrellaga J A and Hendrix J (1996) Computer Program GROUP for Windows, Version 4.0: Users Manual, Ensoft Inc, Austin, Tex.
- Rollins K M, Peterson K T and Weaver T J (1998) Lateral load behavior of full-scale pile group in clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, No. 6, pp. 468-478. L. Seismosoft 2016.
- Smethurst J A and Powrie W (2007) Monitoring and analysis of the bending behaviour of discrete piles used to stabilise a railway embankment, *Geotechnique*, Vol. 57, No. 8, pp. 663-677.
- Viggiani C (1981) Ultimate lateral load on piles used to stabilize landslides, *Proceeding of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Vol. 3, pp. 555-560.

حبیب‌الهی، قاسم. (۱۳۷۶). "خسارات حاصل از زمین‌لغزش در روستای عنا بر روی منازل و ساختمان آموزشی"، مجموعه مقالات همایش زلزله و عملکرد فضاهاى آموزشی، شیراز: دانشگاه شیراز.

حق‌شناس، ابراهیم. (۱۳۷۶). "زمین‌لغزه و کاهش خسارت‌های آن جلد ۱ و ۲"، انتشارات مؤسسه‌ی بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران.

شریعت‌جعفری، محسن. (۱۳۷۵). "زمین‌لغزش (مبانی و اصول پایداری شیب‌های طبیعی)"، انتشارات سازه، تهران: دانشگاه تهران.

کوشکی، محمدکاظم. (۱۳۸۱). "بررسی زمین‌لغزش در محور راه روستایی توکل‌آباد ممسنی و ارائه‌ی راه‌کارهای مناسب جهت کنترل آن"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی راه و ساختمان، شیراز: دانشگاه شیراز.

مستوفی نژاد، داود. (۱۳۸۹). "سازه‌های بتن آرمه جلد اول"، چاپ بیستم، انتشارات ارکان دانش

وفائیان، محمود. (۱۳۶۴). "مقاومت و گسیختگی خاک"، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان.

Abstract

Landslide is a natural disaster that occurs in many countries of the world, especially in mountainous countries causing significant financial harms and losses. In our country, there are plenty of areas prone to landslides with high seismicity and rain fall. Therefore, it is necessary to study the stability of landslides and stabilize them if necessary in these areas. There are many methods for stabilizing the slopes, including the shear key, re-profiling of the ground surface, surface and sub surface drainage, and etc. All these methods have at least one limit. Discrete pile rows have been used for decades to stabilize landslides. When these piles are exposed to landslide or failure along the slope, they reduce the movement of the soil by their function. Discrete piles have significant advantages. For example, in areas where construction is so common, these piles can act as a foundation for new buildings, while reducing the lateral movements. In this thesis, the behavior of the pile row in the stability of large landslides under earthquake load is investigated. First, a comparison was made between the base model (without a pile row) and the model stabilized by a pile row. In the model stabilized by a pile row, the displacement of the toe of the slope was reduced by 95% compared to the base model, which proves the effectiveness of using the pile row in the stability of the slopes. Then, the behavior of the model stabilized by a pile row against the change in the resistance of the slip surface under four different earthquake loading considering three different strengths of the slip surface was investigated, and it was observed that by decreasing the slip surface resistance, the shear force and bending moment applied to the pile increased. Also, by placing the pile row in the toe, middle and crest of the slope, the effects of the position of the pile row on the displacements of the slope were examined. By studying the results, it was observed that the optimum location of the pile row to stabilize the slope is in the middle of the slope and there is no need to place two pile rows on the slope.

Keywords: landslide, pile, earthquake, slip surface



Shahrood University of Technology
Faculty of Civil Engineering
M.Sc.Thesis Geotechnical Engineering

**Investigation of behavior of rows of discrete piles used to stabilize large
landslides under earthquake loading**

By: Babak Pirasteh

Supervisor(s):
Dr. A. Bazrafshan Moghaddam

September 2017