

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

اندرکنش گروه شمع-خاک رس در رفتار لرزه‌ای گروه شمع بتنی با در نظر گرفتن آب زیرزمینی

نگارنده: مجید شهنازی مقدم

استاد راهنما:

دکتر امیر بذرافشان مقدم

بهمن ۱۳۹۶

شماره: ۹۶۳۴/ع
تاریخ: ۹۶/۱۲/۲۱

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 مجید شهنازی مقدم چهاربیدی با شماره دانشجویی ۹۲۰۸۶۹۴ رشته مهندسی عمران گرایش خاک و پی تحت عنوان اندرکنش گروه شمع- خاک رس در رفتار لرزه ای گروه شمع بتنی با در نظر گرفتن آب زیرزمینی که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۱۲ 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 ☐

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

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر احمد احمدی

تاریخ: و مهر دانشکده:
دانشکده مهندسی عمران
آموزش تحصیلات تکمیلی
تبصره: در صورتی که کسی در جلسه حاضر نباشد حداکثر یک ماه بعد از تاریخ دفاع می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

خداوندا به ما توفیق تلاش در شکست، صبر در نومیدی، رفتن بی همراه، جهاد بی سلاح، کار بی پاداش،
فداکاری در سکوت، دین بی دنیا، عظمت بی نام، خدمت بی نان و ایمان بی ریا عنایت فرما. آمین...

تشکر و قدردانی

از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر امیر بذرافشان که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛

از استاتید ارجمند، جناب آقایان دکتر نادری و دکتر حسینی، که طی دوران تحصیل از حضورشان بهره جستیم؛

از همه‌ی عزیزانی که اینجانب را در این راه کمک کردند تشکر و قدردانی می‌کنم.

تعهد نامه

اینجانب مجید شهنازی مقدم دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران-ژئوتکنیک دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه اندرکنش گروه شمع-خاک رس در رفتار لرزه‌ای گروه شمع بتنی با در نظر گرفتن آب زیرزمینی تحت راهنمایی دکتر امیر بذرافشان مقدم متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه 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 در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) 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 پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در رابطه با اثر بار زلزله بر رفتار شمع-خاک انجام شده است. با توجه به اهمیت این موضوع، همچنان تحقیقات بسیاری در این زمینه صورت می‌گیرد. از جمله این تحقیقات می‌توان به بررسی حضور آب بر رفتار دینامیکی گروه شمع-خاک رس و بررسی تأثیراتی نظیر نرم شدگی کرنش اشاره نمود. در این پژوهش تأثیر سطح آب زیرزمینی بر کاهش و افزایش نشست در زیر گروه شمع و همچنین لنگر ایجاد شده بر روی گروه شمع با در نظر گرفتن اندرکنش گروه شمع-خاک رس پرداخته شده و مقایسه‌ای بین زلزله‌های مختلف و همچنین خاک‌های متراکم و سست انجام شده است. بررسی در یک گروه شمع 4×4 بتنی که بر روی یک لایه خاک رس قرار گرفته شده، انجام شده است. طبق نتایج به دست آمده تأثیر سطح آب و شدت زلزله تأثیر بسزایی در نشست و ظرفیت خمشی گروه شمع دارد. همچنین تراکم خاک می‌تواند نشست را به مقدار زیادی کاهش دهد.

کلمات کلیدی: اندرکنش گروه شمع-خاک، بار زلزله، آب‌های زیرزمینی، گروه شمع

صفحه	فصل اول: مقدمه
۱-۱ کلیات	۲
۲-۱ تعریف و کاربرد شمع	۲
۳-۱ تأثیر موقعیت سطح آب زیرزمینی بر مقاومت خاک	۳
۴-۱ ضرورت انجام پژوهش	۳
۵-۱ اهداف پروژه	۴
۶-۱ ساختار پایان نامه	۵
فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته	
۱-۲ مقدمه	۸
۲-۲ موارد کاربرد پی‌های عمیق	۸
۳-۲ ظرفیت باربری شالوده شمعی	۸
۱-۳-۲ ظرفیت باربری کلاهک به‌عنوان پی سطحی	۱۰
۲-۳-۲ ظرفیت باربری اتکایی شمع	۱۰
۳-۳-۲ ظرفیت باربری اصطکاکی شمع	۱۱
۴-۲ اندرکنش خاک-شمع	۱۲
۱-۴-۲ سختی نسبی شمع-خاک و فرکانس زلزله	۱۲
۱-۱-۴-۲ تغییر شکل شمع	۱۴
۲-۱-۴-۲ لنگر خمشی ماکزیمم	۱۵
۲-۴-۲ نتیجه‌گیری تأثیر این پارامترها	۱۶
۵-۲ آزمایش‌های تجربی بر رفتار شمع	۱۶

۱۹.....	۶-۲ طراحی شالوده
۱۹.....	۱-۶-۲ روش‌های عددی تقریبی
۱۹.....	۱-۱-۶-۲ روش نوار روی فنر
۲۰.....	۲-۱-۶-۲ روش صفحه روی فنر
۲۳.....	۲-۶-۲ روش‌های عددی دقیق
۲۳.....	۱-۲-۶-۲ روش المان مرزی
۲۴.....	۲-۲-۶-۲ روش تفاضل محدود
۲۵.....	۳-۲-۶-۲ روش المان محدود
۲۶.....	۳-۶-۲ روش‌های هیبریدی
۲۷.....	۷-۲ روش مورد استفاده در این پژوهش
۲۷.....	۸-۲ تاریخچه‌ی نشست‌های مجاز قائم حداکثر در پی‌های صلب

فصل سوم: مدل‌سازی

۳۲.....	۱-۳ مقدمه
۳۲.....	۲-۳ معرفی نرم‌افزار FLAC
۳۴.....	۱-۲-۳ فرمول‌بندی یک مدل تفاضل محدود
۳۶.....	۲-۲-۳ مراحل مدل‌سازی در نرم‌افزار FLAC
۳۶.....	۱-۲-۲-۳ جزئیات مدل‌سازی در نرم‌افزار FLAC
۳۶.....	۲-۲-۲-۳ انتخاب محدوده‌ی مناسب مدل و تشکیل شبکه المانی
۳۷.....	۳-۲-۲-۳ انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن
۳۸.....	۴-۲-۲-۳ تعیین پارامترهای مدل رفتاری
۳۹.....	۳-۳ جزئیات مدل‌سازی
۳۹.....	۱-۳-۳ مدل‌سازی اندرکنش

۴۳	 ۲-۳-۳ اعمال شرایط مرزی
۴۳	 ۱-۲-۳-۳ شرایط مرزی در تحلیل استاتیکی
۴۳	 ۲-۲-۳-۳ شرایط مرزی در تحلیل دینامیکی
۴۴	 ۴-۳ ملاحظات مدل سازی دینامیکی
۴۴	 ۱-۴-۳ بارگذاری دینامیکی و اعمال شرایط مرزی
۴۴	 ۱-۱-۴-۳ اعمال داده های ورودی دینامیکی
۴۵	 ۲-۱-۴-۳ مرزهای ویسکوز
۴۶	 ۳-۱-۴-۳ مرزهای میدان آزاد
۴۸	 ۲-۴-۳ مفهوم میرایی
۴۸	 ۱-۲-۴-۳ میرایی سیستم
۴۹	 ۳-۴-۳ انتقال امواج
۵۰	 ۵-۳ مدل سازی و مسائل اولیه
۵۰	 ۱-۵-۳ انتخاب ابعاد مدل
۵۲	 ۲-۵-۳ اعمال آب زیرزمینی و اشباع کردن خاک
۵۳	 ۶-۳ مدل سازی پی و شمع و سازه
۵۵	 ۷-۳ اصلاح بار زلزله

فصل چهارم: تحلیل و بررسی نتایج

۶۰	 ۱-۴ مقدمه
۶۱	 ۲-۴ محاسبه ظرفیت باربری نهایی گروه شمع
۶۱	 ۳-۴ سربار شمع
۶۲	 ۴-۴ نشست های زیر پی در حضور شمع و آب زیرزمینی
۶۴	 ۵-۴ تحلیل نتایج

۶-۴ تأثیر تراکم بر کاهش خطرات حین زلزله ۶۵

۷-۴ تأثیر گروه شمع و فاصله‌ی آن‌ها بر روی کاهش خطرات ۶۶

۸-۴ تأثیر مدول الاستیسیته بر مدل ۶۹

۹-۴ مقادیر لنگر خمشی و نیروی برشی در گروه شمع ۷۰

۱۰-۴ صحت سنجی ۷۳

فصل پنجم: نتیجه گیری

۱-۵ مقدمه ۷۸

۲-۵ نتایج ۷۸

۳-۵ پیشنهادها ۸۱

منابع ۸۳

فهرست اشکال

- شکل (۱-۲) شمایی از اشتراک گذاری بار بین کلاhek و شمع ۹
- شکل (۲-۲) اثر سختی نسبی شمع-خاک بر روی پاسخ شمع ۱۳
- شکل (۳-۲) تغییرات جابجایی خاک در میدان آزاد و شمع در سطح زمین ۱۴
- شکل (۴-۲) اثر سختی بر روی لنگر خمشی ۱۵
- شکل (۵-۲) پیکربندی پی شمعی در آزمایش سانتریفیوژ توسط Giretti ۱۷
- شکل (۶-۲) شمای نمونه‌های مورد آزمایش در مطالعات سعیدی و همکاران ۱۸
- شکل (۷-۲) مدل کردن پی شمعی توسط پولوس ۲۰
- شکل (۸-۲) مدل تحلیلی پی شمعی کلنسی و همکاران ۲۱
- شکل (۹-۲) مدل عددی روسو ۲۲
- شکل (۱۰-۲) مدل المان محدود پی گسترده شمعی استفاده شده توسط کیم و همکاران ۲۳
- شکل (۱۱-۲) مدل عددی پی گسترده شمعی استفاده شده توسط کیتیدوم ۲۳
- شکل (۱-۳) اساس چرخه محاسبات صریح ۳۴
- شکل (۲-۳) معیار گسیختگی موهر-کولمب در فضای تنش‌های اصلی ۳۸
- شکل (۳-۳) تعیین پارامترهای مدل موهر-کولمب از نتایج سه محوری ۳۹
- شکل (۴-۳) چگونگی توزیع سطح متناظر با هر گره ۴۰
- شکل (۵-۳) مؤلفه‌های مدل ساختاری المان سطح واسط ۴۱
- شکل (۶-۳) مدل تحلیلی دینامیکی سازه به همراه میدان آزاد ۴۷
- شکل (۷-۳) مدل پیشنهادی فلک برای ابعاد مدل ۵۰
- شکل (۸-۳) مدل سازی توده‌ی خاک و گیردار کردن کناره‌ها در مدل سازی ۵۱
- شکل (۹-۳) کانتورهای درجه اشباع با تراز آب زیرزمینی ۸ متر ۵۲

- شکل (۳-۱۰) شمایی از مدل سازی شمع در خاک ۵۵
- شکل (۳-۱۱) جزئیات مدل سازی شمع ۵۵
- شکل (۳-۱۲) سرعت نگاشت زلزله بم ۵۶
- شکل (۳-۱۳) سرعت نگاشت زلزله طیس ۵۷
- شکل (۳-۱۴) سرعت نگاشت زلزله ال سنترو ۵۷
- شکل (۴-۱) شمای اتصال شمع به پی ۶۲
- شکل (۴-۲) روند تغییرات نشست در زلزله بم ۶۳
- شکل (۴-۳) روند تغییرات نشست در زلزله طیس ۶۳
- شکل (۴-۴) روند تغییرات نشست در زلزله لوماپریتا ۶۳
- شکل (۴-۵) روند تغییرات نشست در زلزله نورث ریچ ۶۴
- شکل (۴-۶) روند تغییرات نشست در زلزله السنترو ۶۴
- شکل (۴-۷) نمودار میانگین نشست بر حسب فاصله شمع ها ۶۸
- شکل (۴-۸) تأثیر مدول الاستیسیته بر نشست پی ۷۰
- شکل (۴-۹) مقایسه لنگر ماکزیمم در شمع های کناری و میانی ۷۱
- شکل (۴-۱۰) مقایسه برش ماکزیمم در شمع های کناری و میانی ۷۲
- شکل (۴-۱۱) نمودار بار-جابجایی گروه شمع با تراز آب زیرزمینی ۰,۵ متر ۷۳
- شکل (۴-۱۲) نمودار بار-جابجایی در گروه شمع با تراز آب زیرزمینی ۲,۵ متر ۷۴
- شکل (۴-۱۳) تأثیر فاصله بین شمع ها در کاهش نشست زیر پی ۷۴

فهرست جداول

جدول (۱-۲) حداکثر مقادیر مجاز نشست سازه‌ها به تفکیک نوع سازه و خاک	۲۸
جدول (۲-۲) نشست مجاز در انواع مختلف خاک و پی	۲۹
جدول (۱-۳) مشخصات زلزله‌های اعمالی به مدل	۵۶
جدول (۱-۴) پارامترهای مورد استفاده در مدل سازی	۶۰
جدول (۲-۴) مشخصات شمع و پی مدل سازی	۶۱
جدول (۳-۴) لنگر ماکزیمم در شمع‌های میانی و کناری	۷۱
جدول (۴-۴) برش ماکزیمم در شمع‌های کناری و میانی	۷۲

فصل اول

مقدمه

۱-۱ کلیات

امروزه استفاده از شمع مخصوصاً در ساخت گاه‌هایی با خاکی که تحت فشار آب زیرزمینی قرار دارد بسیار رواج یافته است.

تغییر زیاد مشخصه‌های مکانیکی خاک‌های رسی در اثر تغییر رطوبت، آن‌ها را یکی از مستعدترین خاک‌ها برای استفاده از شمع‌ها کرده است.

موقعیت سطح آب زیرزمینی تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در ظرفیت باربری شمع دارد. به‌طور کلی خاکی که به حالت غرقاب درآید چسبندگی ظاهری خود را از دست می‌دهد و درعین حال وزن مخصوص مؤثر خاک غرقاب شدیداً کم می‌شود.

از آنجایی که اجزای سه‌گانه ظرفیت باربری خاک بستگی به چسبندگی و وزن مخصوص مؤثر خاک دارد. لذا ظرفیت باربری خاک وقتی سطح آب زیرزمینی بالا بیاید در هر سه جزء تشکیل‌دهنده بارپذیری خاک تأثیر داشته و آن‌ها را تقلیل داده و باربری نهایی خاک را کم می‌کند [۱].

۱-۲ تعریف و کاربرد شمع

شمع‌ها یا پی‌های عمیق عناصر ستونی نسبتاً لاغری هستند که به‌صورت قائم یا کمی شیب‌دار به‌عنوان پی سازه‌ها به‌کاررفته به‌طوری که بار سازه‌های فوقانی را به لایه‌های مناسب‌تر خاک در اعماق پایین‌تر منتقل می‌کند. طول یا عمق قرارگیری شمع در خاک، سطح مقطع، جنس، روش استقرار و چگونگی عملکرد شمع‌ها از متغیرهای اصلی بوده که با توجه به شرایط و نیازهای پروژه تعیین می‌گردند.

سیستم شمع زمانی توصیه می‌شود که حداقل یکی از شرایط زیر برقرار باشد:

-لایه‌های سطحی خاک فاقد مقاومت کافی بوده و لایه‌های مقاوم‌تر خاک در اعماق پایین‌تر یافت شوند.

-لایه یا لایه‌های سطحی نشست پذیر، تورم‌زا یا فروریزی باشند یا سازه به نشست غیرمتقارن حساس باشد.

-علی‌رغم مقاوم بودن لایه‌های سطحی خاک، مشکل آب شستگی وجود داشته باشد.

-سطح آب زیرزمینی در منطقه بالا باشد و یا فشار آرتزین در لایه‌های خاک وجود داشته باشد به‌طوری‌که امکان احداث پی کم عمق وجود نداشته باشد.

-مقاومت در برابر نیروهای کششی یا واژگونی برای پی‌های زیر سطح آب و یا جلوگیری از واژگونی سازه‌های بلند.

-کنترل لغزش و رانش زمین و افزایش پایداری شیب‌ها[۱]

۱-۳ تأثیر موقعیت سطح آب زیرزمینی بر مقاومت خاک

موقعیت سطح آب زیرزمینی ممکن است تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در ظرفیت بارپذیری پی‌های کم عمق داشته باشند. به‌طور کلی خاکی که به حالت غرقاب درآید چسبندگی ظاهری خود را از دست می‌دهد و درعین‌حال وزن مخصوص مؤثر خاک غرقاب شدیداً کم شده و تقریباً به حدود نصف همان خاک در ترازهای بالاتر از سطح آب قرار دارد تقلیل می‌یابد.

بالا آمدن آب زیرزمینی در خاک‌های ریزدانه سبب تورم دانه‌های خاک و در خاک‌های درشت‌دانه سبب تقلیل زاویه اصطکاک داخلی دانه‌های خاک می‌شود. به همین جهت در محاسبه ظرفیت نهایی بارپذیری خاک باید تغییرات سطح آب زیرزمینی مورد توجه قرار گیرد و در محاسبات مقاومت مجاز خاک بالاترین سطح آب زیرزمینی که می‌تواند در دوران عمر ساختمان به آن سطح برسد وارد شده و آن سطح در نظر گرفته شود.[۱].

۱-۴ ضرورت انجام پژوهش

در طی زلزله‌های گذشته تعداد زیادی از شمع‌ها و ساختمان‌های دارای پی شمع‌ی آسیب‌دیده است. در زمان زلزله در خاک‌های چسبنده به علت نرم شدگی کرنش به‌خصوص

در نزدیکی سر شمع، ضعف در تکیه‌گاه جانبی خاک رخ داده و بدین ترتیب از ترکیب این نیروها با بارهای بزرگ اینرسی سازه، جابه‌جایی‌ها و کرنش‌های خمشی اضافی به‌خصوص در نزدیکی سر شمع به وجود می‌آید که سبب آسیب به شمع و یا گاهی سر شمع می‌شود.

در تحقیقات انجام‌شده در زمینه‌ی آنالیز دینامیکی شمع‌ها تأثیرات عواملی چون در نظر گرفتن مدل خاک پلاستیک، تغییر سختی خاک به‌صورت خطی یا تغییر فرکانس بررسی شده است. نتایج حاصل از بررسی هر کدام تأثیرات قابل‌توجهی در زمینه‌ی طراحی بهینه شمع‌ها داشته است.

در خاک‌های مسئله‌داری چون رس همواره حضور آب تأثیرات مهملکی بر سازه داشته است که لزوم انجام آنالیزهای دینامیکی همراه با آب حفره‌ای را به اثبات می‌رساند.

در بررسی رفتار شمع‌ها نیز در صورت امکان انجام چنین تحلیلی توسط نرم‌افزارهای موجود، نتایج به‌دست آمده می‌تواند تا حد قابل‌توجهی در شناخت عملکرد شمع‌ها در محیط‌های اشباع یا دارای تراز آب زیرزمینی تأثیرگذار بوده و آگاهی طراحان را نسبت به چنین محیط‌هایی افزایش دهد و منجر به طراحی ایمن‌تری برای شمع‌های مورد لزوم به‌خصوص عملکرد آن‌ها در زمان وقوع زلزله گردد.

۱-۵ اهداف پژوهش

تحلیل دینامیکی سازه‌های تحت بار زلزله از اهمیت زیادی برخوردار است. در حالت کلی شمع با خاک اطراف خود در حال برهم‌کنش است بنابراین تأثیر متقابل شمع و خاک باید بررسی شود. ضمن اینکه وجود آب زیرزمینی تأثیر زیادی بر این برهم‌کنش دارد.

در این پژوهش به بررسی رفتار گروه شمع و خاک رس اطراف آن تحت بار زلزله در حضور آب زیرزمینی با استفاده از نرم‌افزار فلک پرداخته می‌شود.

مسئله مورد بررسی در این پایان‌نامه این است که تغییر سطح آب زیرزمینی در محیط اطراف گروه شمع چه تأثیری بر رفتار شمع تحت بار زلزله مورد ارزیابی خواهد داشت.

۱-۶ ساختار پایان‌نامه

در فصل اول مقدمه‌ای از آن‌چه که می‌خواهیم در این پژوهش انجام دهیم شامل تعریف شمع، کاربرد آن و تأثیر سطح آب زیرزمینی بر گروه شمع و خاک رس بیان می‌کنیم. در فصل دوم به نحوه‌ی تأثیر بار دینامیکی بر شمع و تحقیقات محققین در گذشته می‌پردازیم. همچنین در این فصل نتایج و تفسیرهای محققین مختلف مورد ارزیابی و بررسی قرار می‌گیرد.

در فصل سوم مراحل انجام پژوهش، روش‌ها و مدل‌سازی و کار با نرم‌افزار شرح داده خواهد شد. تمام مراحل مدل‌سازی به‌صورت مختصر تشریح شده و فرضیات به‌کاررفته در نرم‌افزار توضیح داده شده است.

در فصل چهارم به تحلیل نتایج می‌پردازیم. نمودارهای مربوط به نشست، لنگر خمشی و... گروه شمع رسم و مقایسه بین حالت‌های مختلف (انواع زلزله، حالت‌های مختلف سطح آب زیرزمینی) انجام شده است.

در آخر در فصل پنجم نتایج و پیشنهادها جهت ادامه‌ی تحقیقات در این زمینه ارائه شده است.

فصل دوم

مروری بر تحقیقات گذشته

۲-۱ مقدمه

شمع‌ها اعضای سازه‌ای از جنس چوب، بتن و یا فولاد می‌باشند که کاربرد اصلی آن‌ها به‌عنوان پی در سازه‌های بنا شده بر خاک نرم، انتقال بار از سازه‌ی بالایی به لایه‌های زیرین است. با ظهور ساختمان‌های بلند نیاز به مطالعه برای بهبود شالوده‌ها برای کاهش هزینه‌های ساخت و توسعه این سیستم باربری، با مطالعه بر روی شمع‌های اتکایی، شمع‌های اصطکاکی و پی‌های سطحی سرانجام منجر به ترکیب این دو سیستم و معرفی پی گسترده شمعی گشت. امروزه سیستم پی گسترده شمعی عمدتاً به علت یکی از سه فلسفه زیر برای طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد:

۱. در روش مرسوم شمع‌ها به‌صورت گروهی برای تحمل بارهای زیاد طراحی می‌شدند در صورتی که با ساخت پی شمعی شمع‌ها به‌عنوان عضوی کمک‌کننده در تحمل بارهای وارده به کلاهک مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲. به‌منظور کاهش فشار خالص بین کلاهک و خاک و جلوگیری از وقوع پدیده خزش.

۳. به‌منظور کاهش نشست‌های کلی و تفاضلی در اثر قرار دادن شمع‌ها در زیر کلاهک این اتفاق می‌افتد.

۲-۲ موارد کاربرد پی‌های عمیق

به‌طور خلاصه می‌توان کاربرد شمع‌ها را در زمینه‌های زیر برشمرد:

۱. انتقال بار سازه‌های سنگین

۲. به‌عنوان شالوده در بعضی از سازه‌ها نظیر خطوط انتقال برق، اسکله و ...

۳. پایدار کردن شیب‌ها

۴. کاهش خطرات آب شستگی و فرسایش در محل پایه‌های پل‌ها

۲-۳ ظرفیت باربری شالوده شمعی

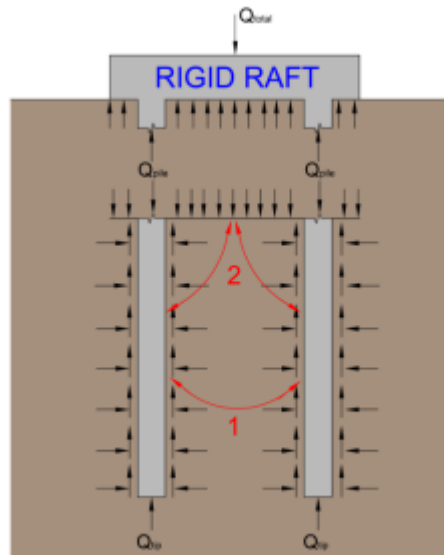
رفتار شالوده‌های شمعی از نوع رفتار اندرکنشی بین خاک، شمع و پی گسترده است. تاکنون روش‌های متعددی در تحلیل ظرفیت باربری و توزیع نیروها بین اجزای این سیستم و تعیین ضرایب اندرکنش

بین اجزای شالوده مطرح شده است. همان طور که در شکل (۱-۲) دیده می شود اشتراک گذاری بار بین

کلاهک و شمع ها تحت اثر اندرکنش بین اجزای پی شمعی به صورت زیر تقسیم بندی می شود:

۱) اندرکنش خاک - شمع - خاک

۲) اندرکنش بین شمع - خاک - کلاهک



شکل (۱-۲) شمایی از اشتراک گذاری بار بین کلاهک و شمع ها [۲]

در حالت کلی ظرفیت باربری پی شمعی تحت بارهای استاتیکی که از رابطه (۱-۲) به دست می آید، از

مجموع ظرفیت باربری کلاهک به عنوان شالوده سطحی و ظرفیت باربری گروه شمع بیشتر است [۲].

$$Q_{PR} = n(\beta_s \delta_s Q_{ss} + \beta_b \delta_b Q_{sb}) + Q_R \quad (1-2)$$

Q_{PR} : ظرفیت باربری پی شمعی

n : تعداد شمع ها

Q_{ss} : ظرفیت باربری جداری شمع

Q_{sb} : ظرفیت باربری اتکایی شمع

Q_R : ظرفیت باربری کلاهک

δ : ضریب اندرکنش شمع - خاک - شمع

β : ضریب اندرکنش کلاهک - خاک - شمع

۲-۳-۱ ظرفیت باربری کلاهک به عنوان پی سطحی

حداکثر تنش که یک شالوده می تواند به خاک اعمال کند را ظرفیت باربری شالوده می نامند. یک شالوده ی سطحی وقتی دارای عملکرد صحیح است که تنش ایجاد شده در زیر آن به نحوی باشد که دو شرط زیر را برآورده نماید:

۱- گسیختگی برشی در خاک زیر شالوده ایجاد نکند

۲- نشست های بیشتر از مقدار مجاز در زیر شالوده رخ ندهد.

۳- لازم به ذکر است که دو معیار فوق مستقل از هم بوده و باید جداگانه برای شالوده کنترل شود.

$$q_{ult} = cN_c s_c d_c i_c g_c b_c + qN_q s_q d_q i_q g_q b_q + 1/2 B N_\gamma S_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma \quad (2-2)$$

s_c, s_q, s_γ : ضرایب شکل

d_c, d_q, d_γ : ضرایب عمق

i_c, i_q, i_γ : ضرایب انحراف بار

b_c, b_q, b_γ : ضرایب ابعاد

g_c, g_q, g_γ : ضرایب شیب

که همه این ضرایب با استفاده از روابط مطرح شده توسط ترزاقی، میرهوف، هسن و... به دست آورده می شوند.

۲-۳-۲ ظرفیت باربری اتکایی شمع

ظرفیت باربری نوک شمع در حالت کلی از رابطه (۲-۳) به دست می آید:

$$Q_p = A_p q_p = A_p (c N_c^* + q' N_q^*) \quad (3-2)$$

A_p : سطح مقطع نوک شمع

c : چسبندگی خاکی که نوک شمع بر آن متکی است.

q_p : ظرفیت باربری نهایی واحد سطح نوک

q' : تنش مؤثر قایم در تراز نوک شمع

N_c^*, N_q^* : ضرایب ظرفیت باربری

ضرایب ظرفیت باربری توسط محققینی همچون مایرهوف، وسیک، جانپو ارائه شده است.

۳-۳-۲ ظرفیت باربری اصطکاکی شمع

مقاومت اصطکاکی یا جلدی شمع به صورت رابطه (۴-۲) تعریف می گردد:

$$Q_s = \sum p \cdot \Delta L \cdot f \quad (4-2)$$

که در آن:

P : محیط مقطع شمع

ΔL : جز طولی از شمع که در آن P و f ثابت فرض شده اند.

f : مقاومت اصطکاکی واحد سطح در عمق Z که برای خاک های رسی و ماسه ای متفاوت هست.

الف. مقاومت اصطکاکی در ماسه :

مقاومت اصطکاکی در هر عمق دلخواه شمع طبق رابطه (5-2) تعریف می گردد:

$$f = K \cdot \sigma_v' \cdot \tan \mu \quad (5-2)$$

که در این رابطه K ضریب فشار جانبی خاک، σ_v' تنش قائم مؤثر در عمق مورد نظر، μ زاویه اصطکاک بین شمع و خاک است.

ب. مقاومت اصطکاکی در رس :

برای تعیین مقاومت اصطکاکی واحد سطح جانبی شمع f در خاک های رسی سه روش آلفا، بتا، گاما (به زبان لاتین) وجود دارد. با تعیین مقاومت جداری و مقاومت نوک شمع، ظرفیت باربری برای تک شمع برابر جمع این دو مؤلفه خواهد بود، که با اعمال یک ضریب اطمینان مناسب ظرفیت باربری مجاز شمع به دست می آید. مقدار ضریب اطمینان بر حسب عدم قطعیت های موجود در محاسبه ظرفیت باربری نهایی بین ۲,۵ تا ۴ است [۲].

۲-۴ اندرکنش خاک-شمع

اندرکنش به دو صورت کلی سینماتیکی^۱ و اینرشیا^۲ رخ می دهد. با توجه به اهمیت بیشتر اندرکنش سینماتیکی (بین شمع و خاک) این اندرکنش را بررسی می کنیم.

اندرکنش سینماتیکی واکنش خاک نسبت به نیروی دینامیکی وارد به شمع ها که موجب تغییر شکل این دو می شود، است.

اندرکنش سینماتیکی بین شمع و خاک بستگی به دو پارامتر اصلی دارد:

- سختی نسبی شمع-خاک

- فرکانس بارگذاری

در ادامه اثر هر یک از این پارامترها را بررسی می کنیم:

۲-۴-۱ سختی نسبی شمع-خاک و فرکانس زلزله

شکل (۲-۲) اثر سختی نسبی شمع-خاک ($K_r = \frac{E_p \cdot I_p}{L^4 \cdot E_s}$) را بر روی رفتار شمع نشان می دهد.

K_r = سختی نسبی

$E_p \cdot I_p$ = سختی خمشی شمع

L = طول شمع

E_s = سختی خاک

در این شکل نسبت $\frac{U_{p0}}{U_{f0}}$ جابجایی سر شمع- U_{f0} : جابجایی سطح خاک بدون وجود

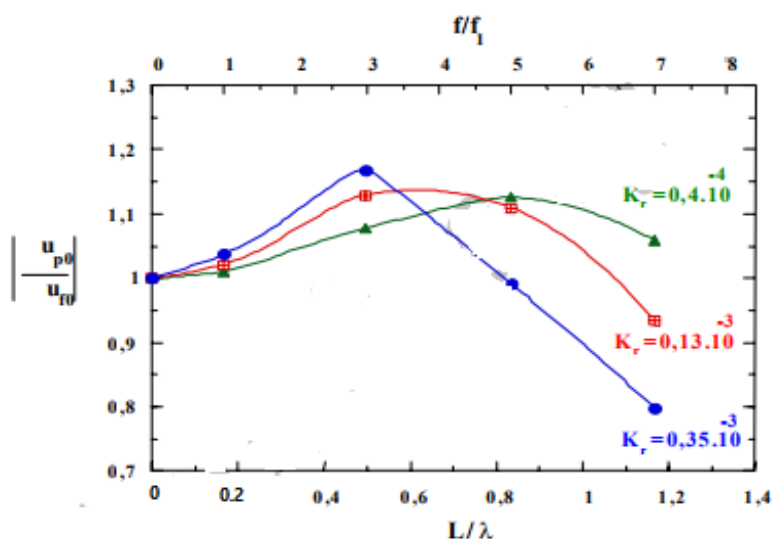
شمع) به صورت تابعی از $\frac{L}{\lambda}$ (L : طول شمع، λ : طول موج زلزله) است. در فرکانس های پایین،

جابجایی شمع نسبت به خاک در میدان آزاد بیشتر است. ولی برای فرکانس های بزرگ،

^۱ cinematic

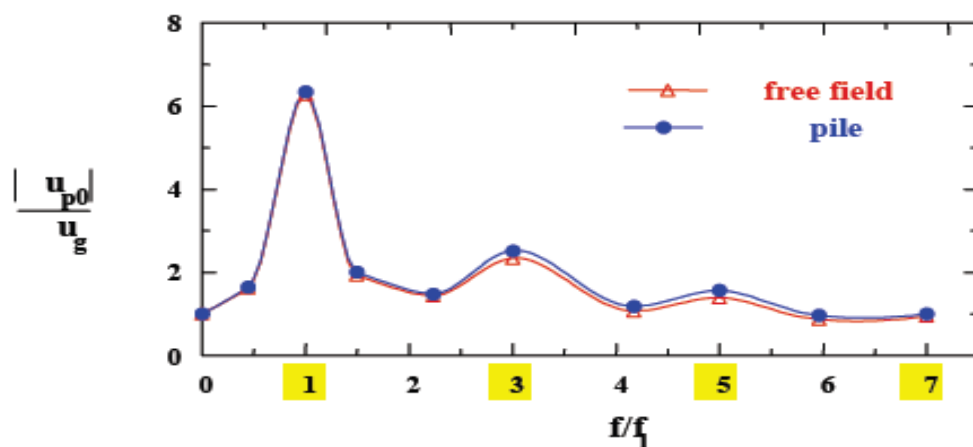
^۲ inertial

پدیده‌ای معکوس مشاهده می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که نتایج آنالیز بسیار به سختی نسبی حساس است. همچنین در این شکل می‌توان منحنی‌ها را به دو قسمت تقسیم نمود، در محدوده‌ی شماره یک جابجایی شمع بیشتر از جابجایی خاک در میدان آزاد است ولی برعکس در محدوده شماره دو کمتر است. می‌توان پی برد که اندازه محدوده‌ی یک و دو بستگی به سختی نسبی دارد و با افزایش سختی نسبی محدوده‌ی یک کاهش می‌یابد. به عنوان مثال برای سختی $0,13 \times 10^{-3}$ محدوده‌ی ۱ (محدوده‌ای که جابجایی سر شمع و سطح خاک بدون شمع برابر می‌شوند) تا $\frac{L}{\lambda} = 1$ است ولی برای سختی نسبی $0,35 \times 10^{-3}$ این محدوده تا $\frac{L}{\lambda} = 0,8$ است. علاوه بر این برای $(\frac{L}{\lambda} < 1,2)$ اختلاف بین جابجایی شمع و جابجایی خاک در میدان آزاد از ۲۰٪ تجاوز نمی‌کند. در این حالت ما می‌توانیم مستقیماً از نتایج آنالیز دینامیکی خاک در میدان آزاد برای تحلیل دینامیکی شمع استفاده کنیم ولی برای $(\frac{L}{\lambda} > 1,2)$ اثر وجود شمع تغییر شکل خاک را بسیار تغییر می‌دهد، در نتیجه مطالعه‌ی اندرکنش سینماتیک شمع و خاک برای تعیین پاسخ شمع و سازه ضروری است.



شکل (۲-۲) اثر سختی نسبی شمع-خاک بر روی پاسخ شمع [۳]

شکل شماره (۲-۳) تغییرات جابجایی خاک در میدان آزاد و شمع در سطح زمین به صورت تابعی از فرکانس آورده شده است. می‌توان دید که حداکثر تشدید به ازای فرکانس‌های طبیعی خاک ایجاد می‌شود و برای اولین فرکانس طبیعی، تشدید بزرگ است (U_{p0}/U_g ۶,۳). برای فرکانس‌های بزرگ‌تر تشدید کاهش می‌یابد که به دلیل وجود مستهلک کننده است. با مقایسه تشدید برای خاک در میدان آزاد و شمع می‌توان دید که اختلاف بین این دو منحنی ناچیز است.



شکل (۲-۳) تغییرات جابجایی خاک در میدان آزاد و شمع در سطح زمین [۳]

۲-۴-۱-۱ تغییر شکل شمع

چنان‌که در شکل (۲-۲) مشاهده می‌کنیم تغییر شکل شمع به ازای سختی‌های نسبی مختلف ($K_r = 0,35 \times 10^{-3}$, $0,13 \times 10^{-3}$, $0,4 \times 10^{-4}$) نشان می‌دهد که برای فرکانس اصلی شمع کاملاً از حرکت خاک پیروی می‌کند به جز در ناحیه‌ی نزدیک به سر شمع که مقدار کمی افزایش جابجایی با سختی نسبی داریم.

به ازای فرکانس‌های بزرگ‌تر، اختلاف بین پاسخ شمع و پاسخ خاک در میدان آزاد زیاد می‌شود و این اختلاف با افزایش سختی و فرکانس افزایش می‌یابد. برای فرکانس‌های بزرگ و سختی نسبی بزرگ، شمع سبب سخت‌تر شدن خاک می‌شود و در نتیجه جابجایی افقی کاهش می‌یابد.

۲-۴-۱-۲ لنگر خمشی ماکزیمم

شکل شماره (۲-۴) اثر سختی نسبی بر روی لنگر خمشی شمع را نشان می‌دهد. می‌توان دید که با افزایش سختی نسبی، لنگر خمشی افزایش می‌یابد. این پدیده در فرکانس پایه (Mode 1) جایی که $\frac{f}{f_1} = 1$ واضح‌تر است. به عنوان مثال برای فرکانس اصلی خاک ($f = 0,67 \text{ HZ}$)، افزایش سختی نسبی از $0,4 \times 10^{-4}$ به $0,35 \times 10^{-3}$ سبب افزایش لنگر خمشی نرمالیزه (M^*) از ۳۱۳۰ به ۲۵۳۱۰ (حدود ۸۰۰٪) می‌شود ولی این افزایش برای فرکانس چهارم (Mode 3) کمتر از ۴۰۰٪ است.

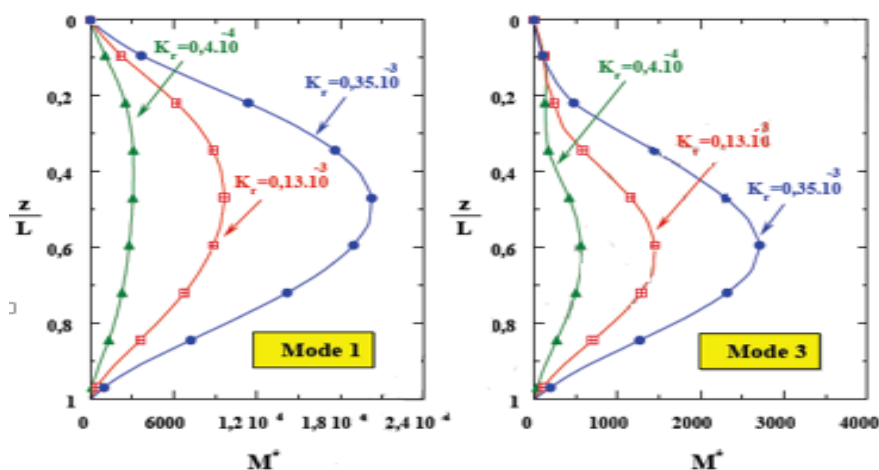
$$M^* = \frac{|M|}{\rho_P \cdot D^4 \cdot \ddot{u}_g} \quad (2-5)$$

M = لنگر خمشی داخل شمع

ρ_P = جرم حجمی شمع

$\ddot{u}_g$ = دامنه شتاب اعمالی به مدل

D = قطر شمع



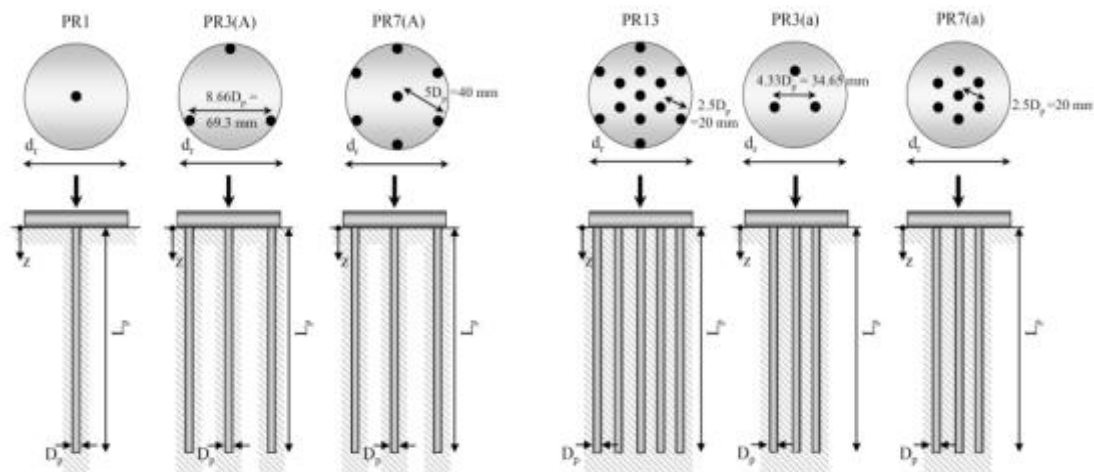
شکل (۲-۴) اثر سختی بر روی لنگر خمشی [۳]

۲-۴-۲ نتیجه‌گیری تأثیر این پارامترها

بررسی‌های انجام شده نشان داد که رفتار لرزه‌ای شمع بستگی به سختی نسبی شمع-خاک و فرکانس زلزله دارد. در حالت شمع با سختی نسبی کوچک و با طول موج زلزله‌ی کوچک یا فرکانس زلزله‌ی بزرگ، مسلح کردن خاک به وسیله‌ی شمع اثر خیلی کمی در پاسخ خاک در میدان آزاد دارد و در این حالت می‌توان از جابجایی خاک در میدان آزاد برای تحلیل دینامیکی شمع استفاده نمود. در حالت شمع با سختی زیاد یا λ بزرگ وجود شمع سبب تغییر محسوس در پاسخ خاک در میدان آزاد می‌شود و تحت این شرایط بایستی اثر اندرکنش سینماتیک شمع-خاک را جهت تحلیل دینامیکی شمع در نظر گرفت.

۲-۵ آزمایش‌های تجربی بر رفتار شمع

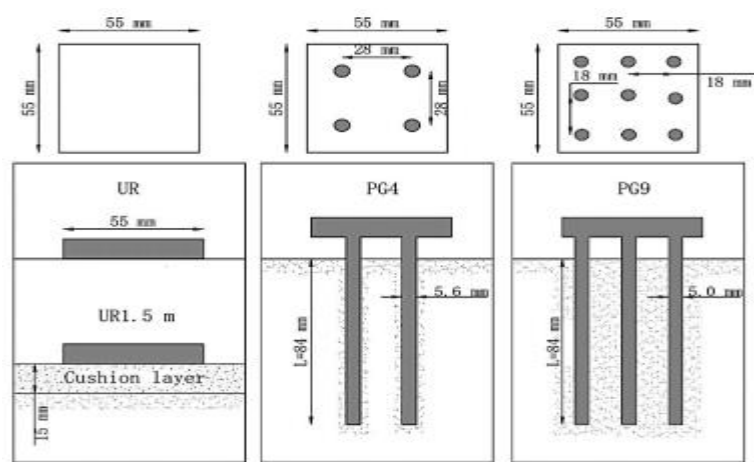
آزمایش‌های تجربی یک روش قابل اعتماد برای ارزیابی رفتار پی‌های شمعی در خاک‌های شنی است. البته این روش نسبت به مدل‌های کوچک مقیاس قابل اعتمادتر و دقیق‌تر است. ولی در دسترس نبودن و هزینه بالا باعث محدودیت این روش در پژوهش‌ها شده است. گیرتی [۴] آزمایش‌های تجربی بر روی رفتار پی شمعی با کلاهک صلب بر روی شمع‌های کاهنده نشست تحت بار محوری انجام داد. این آزمایش‌ها در ۶ حالت به صورت کلاهک تنها، کلاهک بر روی ۱ و ۳ و ۷ و ۱۳ شمع به صورت سر آزاد در دو حالت با جابه‌جایی و بدون جابه‌جایی با قطر ۸ میلی‌متر و طول ۱۶۰ میلی‌متر با کلاهک دایره شکل صلبی به قطر ۸۸ میلی‌متر و ضخامت ۱۵ میلی‌متر همانند شکل (۲-۵) انجام گرفته است.



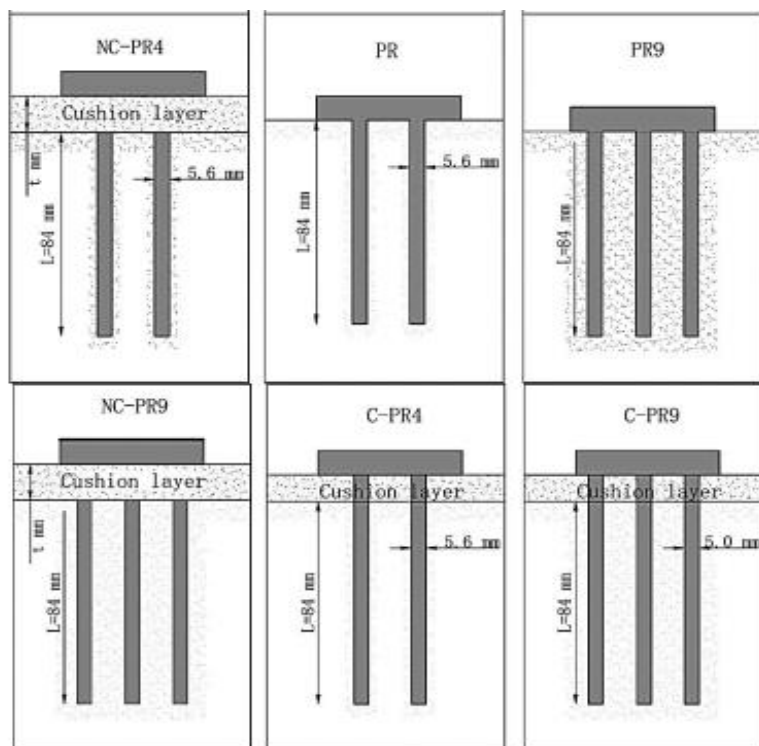
شکل (۲-۵) پیکربندی پی شمعی در آزمایش انجام گرفته توسط Giretti [۴]

همان طور که در شکل (۲-۵) مشاهده می شود با افزایش تعداد شمع ها، سهم باربری شمع ها به صورت غیرخطی افزایش و سهم باربری کلاhek کاهش می یابد. همچنین می توان دید که تعداد شمع های مورد نیاز در حالت با جابه جایی برای کاهش نشست شالوده، نسبت به تعداد شمع های بدون جابه جایی مورد نیاز کمتر است.

سعیدی و همکاران [۵] مطالعات آزمایشگاهی تحت عنوان بررسی اثر تغییر پارامترهایی همچون تعداد شمع ها، فاصله بین شمع ها، منحنی دانه بندی، ضخامت لایه دانه ای زیر کلاhek بر روی منحنی بار-نشست پی های شمعی منفصل و متصل در قالب ۱۷ تست انجام دادند. نمونه های آزمایش در شکل (۲-۶) نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل (۲-۶) شمای نمونه‌های مورد آزمایش در مطالعات سعیدی و همکاران [۵]

تست‌ها بر روی نمونه‌ای با مشخصات معلوم در قالب شکل (۲-۶) انجام گرفت؛ کلاhek مربعی شکل با ضخامت ۱۰ میلی‌متر، بعد ۵۵ میلی‌متر که مستقر بر روی شمع‌هایی لوله‌شکل با طول ۸۴ میلی‌متر و ضخامت‌های ۵ و ۵/۶ میلی‌متر بود، انجام گرفت. همان‌طور که در شکل (۲-۶) (ب) مشاهده می‌شود با وجود لایه درشت‌دانه ۱/۵ متری در دو سیستم متصل و منفصل، شالوده متصل عملکرد بهتری نسبت به

سیستم منفصل دارد. به هر حال نشست در سیستم شالوده متصل با لایه میانی در مقایسه با سیستم شالوده منفصل خیلی تفاوت قابل توجهی ندارد.

۲-۶ طراحی شالوده

طراحی سیستم پی هر سازه را می توان به دو مرحله تقسیم کرد. مرحله ی ابتدایی شامل محاسبات نسبتاً ساده ای است که اغلب می توانند بدون استفاده از کامپیوتر انجام شوند. این مرحله شامل تخمین ظرفیت ژئوتکنیکی نهایی، تخمین رفتار بار-نشست پی گسترده شمعی است.

اما مرحله ی طراحی معمولاً نیازمند استفاده از یک برنامه ی کامپیوتری مناسب است که بتواند اندرکنش - های بین خاک، کلاhek و شمع ها را به طور منطقی محاسبه کند. در طراحی پی گسترده شمعی جزئیات طراحی شامل تعداد، مکان و چینش بهینه ی شمع ها، محاسبه ی توزیع نشست، لنگر خمشی و نیروی برشی است. تاکنون روش های متعددی برای تحلیل و طراحی جزئیات ارائه شده است که می توان آن ها را به این صورت دسته بندی کرد:

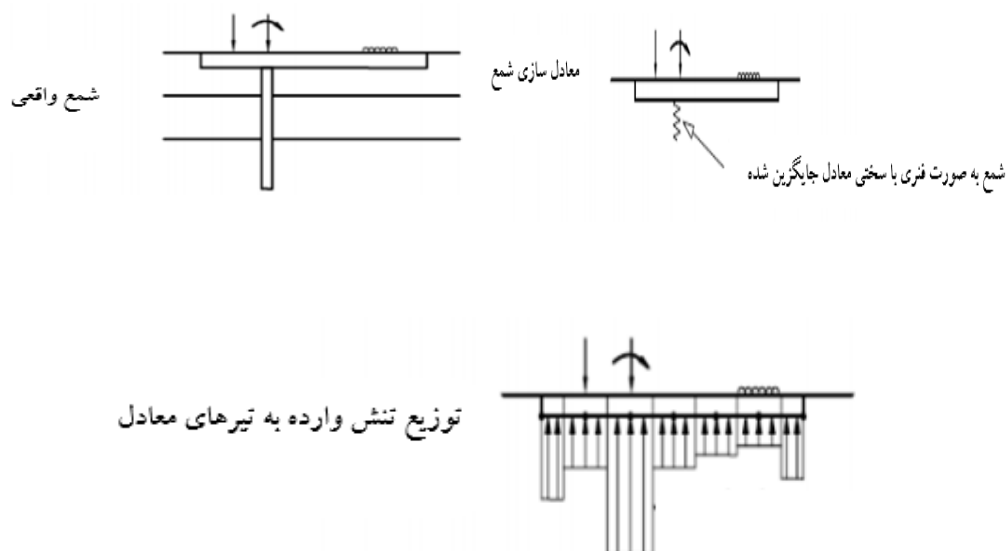
الف) روش های عددی تقریبی

ب) روش های عددی دقیق

۲-۶-۱ روش های عددی تقریبی

۲-۶-۱-۱ روش نوار روی فنر

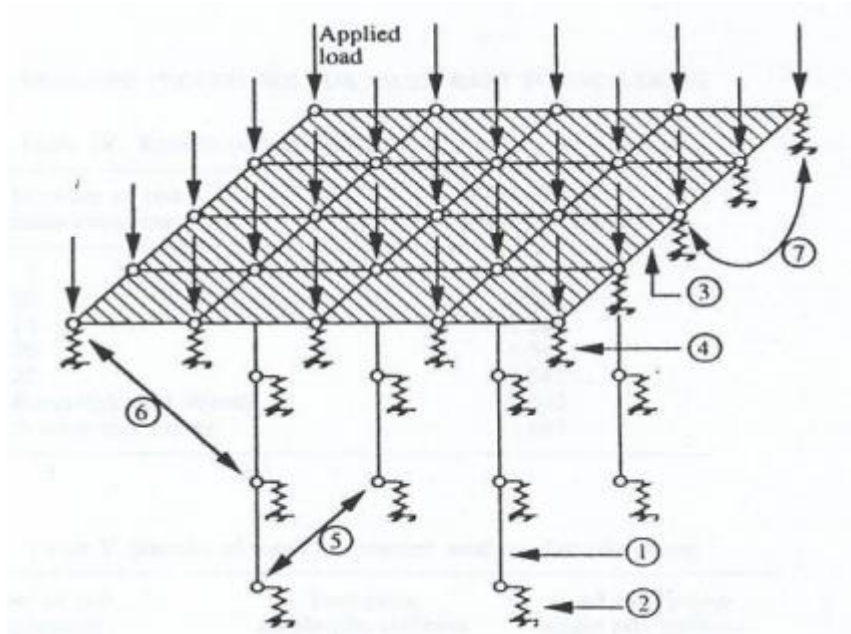
پولوس [۶] به بررسی رفتار پی گسترده شمعی در حالت فرض پی به صورت نواری افقی، متشکل از تیرهایی با طول و سختی برابر و در نظر گرفتن شمع ها به صورت فنرهایی با سختی معادل با محیط الاستیک پرداخت. از جمله معایب این روش می توان به صرفه نظر کردن از لنگر پیچشی ایجاد شده در کلاhek و چشم پوشی از رفتار شالوده در راستای عرض اشاره نمود. با توجه به شکل (۲-۷) که جزئیات این روش در آن نشان داده شده است پی گسترده به صورت تیرهایی با طول برابر فرض شده و قرار گرفتن شمع ها در زیر تیرهایی جدا از هم مسلماً نمی تواند به درستی رفتار گروه شمع زیر پی گسترده را نشان دهد. البته با این روش می توان منحنی بار - نشست تقریبی شالوده را به دست آورد.



شکل (۷-۲) مدل کردن پی شمعی توسط پولوس [۶]

۲-۱-۶-۲ روش صفحه روی فنر

در این روش تحلیلی همان‌طور که در شکل (۸-۲) نشان داده شده، کلاهک همچون یک صفحه نازک با رفتاری در محدوده الاستیک و شمع‌ها هم همچون المان‌های میله‌ای و یا فنرهای اندرکنشی، خاک هم به صورت یک محیط پیوسته و با قرار دادن فنرهایی با سختی مناسب در گره‌ها شبیه‌سازی شده است. از این روش تحلیلی برای حالات مختلف بارگذاری و پروفیل‌های گوناگون خاک زیر شالوده می‌توان استفاده کرد.

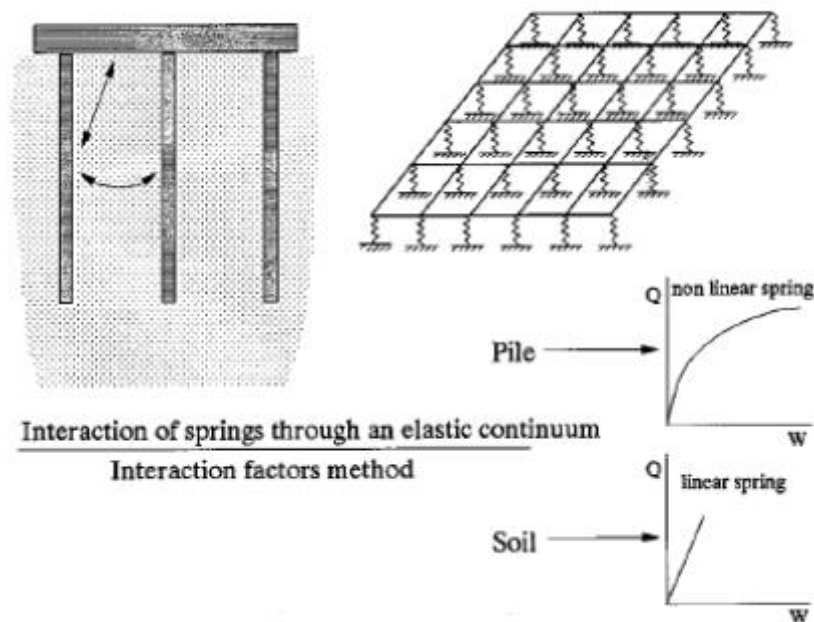


شکل (۸-۲) مدل تحلیلی پی شمعی کلنسی و همکاران [۷]

۱. المان یک بعدی شمع. ۲. پاسخ متمرکز خاک در هر گره شمع (فتر غیر خطی). ۳. مش صفحه ای دوبعدی خمشی المان محدود کلاهک. ۴. پاسخ خاک در هر گره کلاهک به صورت فتر معادل. ۵. اثرات اندرکنش شمع-خاک-شمع محاسبه شده بین هر جفت گره-معادله میندالین. ۶. اندرکنش شمع - خاک - کلاهک. ۷. اندرکنش شمع - خاک - کلاهک.

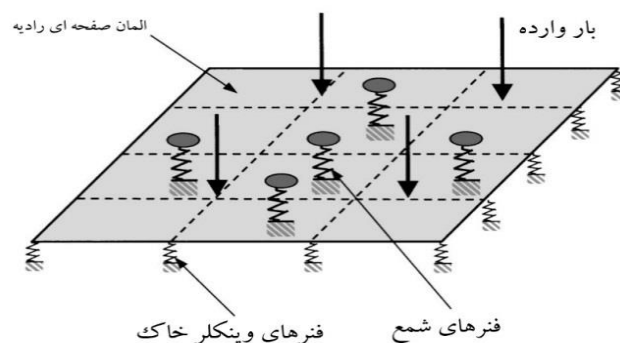
روسو^۱ [۸] راه حل عددی تقریبی مطرح نمود که در آن کلاهک به صورت یک صفحه دوبعدی و نازک با رفتاری در محدوده الاستیک، خاک به صورت یک محیط پیوسته و شمع ها به صورت فنرهای غیر خطی اندرکنشی فرض شده بودند. در این روش می توان جابه جایی نقاط خاک را بر اساس معادلات بوسینسک تحت بارگذاری های گوناگون اعم از عمودی، توزیعی، متمرکز و.... به دست آورد. شکل (۹-۲) شمای مدل عددی مطرح شده توسط روسو را نشان می دهد.

¹.Russo



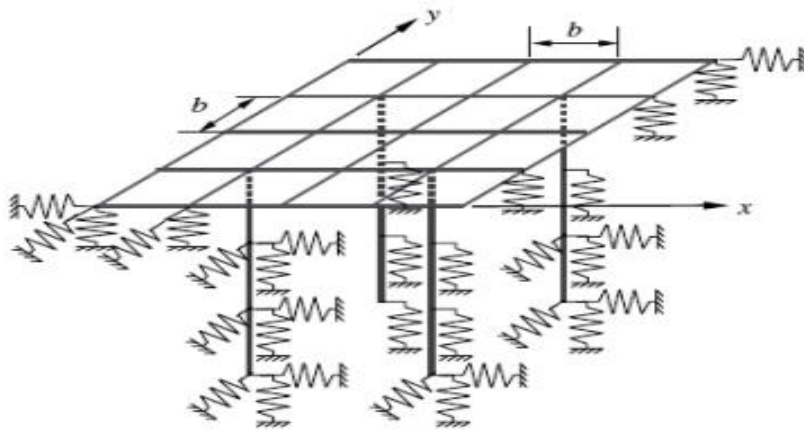
شکل (۹-۲) مدل عددی روسو [۸]

کیم و همکاران [۹] برای بهینه‌سازی چیدمان یک پی شمعی و مینیمم کردن نشست‌های تفاضلی، تئوری صفحه بر فنر را با در نظر گرفتن کلاهک، خاک و شمع را به ترتیب به صورت صفحه میندلین (بر اساس تئوری میندلین)، فنر وینکلر (بر اساس تئوری وینکلر) و فنرهای کوپلی گسترش دادند. در این تحلیل برای توسعه فرمول‌بندی و در نظر گرفتن اندرکنش بین شمع‌ها از فنرهای پیچشی استفاده شد و از اندرکنش بین کلاهک و گروه شمع صرفه نظر شد. در این روش سختی فنرهای وینکلر خاک که از مدول عکس‌العمل بستر به دست می‌آید، ثابت در نظر گرفته شد. می‌توان گفت در این روش دست بالا در نظر گرفتن سختی پی شمعی باعث دقیق نبودن میزان نشست‌های تفاضلی به دست آمده می‌شود.



شکل (۱۰-۲) مدل المان محدود پی گسترده شمعی استفاده شده توسط کیم و همکاران [۹]

کیتیدوم [۱۰] به منظور محاسبه لنگر خمشی و مقاومت جانبی هر شمع و همچنین تعیین مقاومت برشی بین کلاهک و شمع، تحلیل عددی را که در آن کلاهک به صورت یک صفحه نازک و منعطف و شمع‌ها همچون تیرهای الاستیک و خاک هم به صورت فنر مدل‌سازی می‌شد، مطرح کرد. در این مدل با قرار دادن دو فنر افقی در هر گره شمع و کلاهک قابلیت اعمال بارگذاری‌های جانبی و اعمال لنگر به نقاط مختلف مدل بررسی شد. این مدل در برنامه کامپیوتری PRAB^۱ گنجانده شده است



شکل (۲-۱۱) مدل عددی پی گسترده شمعی استفاده شده توسط کیتیدوم [۱۰]

۲-۶-۲ روش‌های عددی دقیق

۲-۶-۲-۱ روش المان مرزی

در روش المان مرزی کلاهک به شکل یک صفحه نازک دوبعدی و خاک به صورت مجموع لایه‌های همگن و الاستیک که شمع‌ها در آن قرار می‌گیرد مدل می‌شود. از جمله مثال‌های استفاده این روش برای طراحی پی شمعی می‌توان اولین کارهای پولوس و دیویس^۲ و باتر و بانرجی^۳ را نام برد که در آن کلاهک به صورت یک صفحه صلب، بر روی خاک همگن الاستیک قرار داده شده است. [۱۱-۱۲]

مندنکا و همکاران^۴ [۱۳] روش تحلیلی بر اساس متد المان مرزی مطرح نمودند که در آن کلاهک به شکل یک صفحه نازک و منعطف، شمع‌ها به صورت المان‌های سه گرهی و خاک به صورت یک فضای

^۱ Piled Raft Analysis for Batter pile

^۲ Davis polous

^۳ BUtter and banerje

^۴ Mendonca at el.

الاستیک خطی همگن به صورت نیمه بی‌نهایت بر اساس معادلات انتگرال در نظر گرفته شد. در این مدل که کلاهک تحت بار قائم قرار گرفت، توزیع تنش در راستای محور شمع را به صورت یکنواخت فرض شد. تحلیل انجام شده توسط مندیکا و همکاران کاملاً بر اساس روش المان مرزی انجام گرفته فقط با این تفاوت که در همه کارهای قبلی کلاهک به صورت صلب در نظر گرفته می‌شد ولی در این کار کلاهک به صورت منعطف بود. از روش المان مرزی برای مدل پی‌های شمعی کوچک می‌توان استفاده کرد است. ولی استفاده از آن برای حل مدل‌های بزرگ به علت نیاز به زمان و حافظه محاسباتی زیاد مقرون به صرفه نیست.

۲-۲-۶-۲ روش تفاضل محدود

پولوس [۱۴] از روش تفاضل محدود برای تحلیل رفتار پی شمعی استفاده کرد. او در مدل مطرح شده شمع‌ها را به صورت عناصری صلب با مقطع مربع با سختی ثابت فرض کرد. در مرحله ابتدایی پولوس مطرح کرد که خطای روش تفاضل محدود در لبه‌ها و گوشه‌های مدل از حد مجاز بیشتر است. به هر حال او تقریب‌هایی را برای غلبه بر این کمبودها و محدودیت‌ها اعمال کرد. در این آنالیز بار لحظه‌ای متمرکز، به عنوان بار با توزیع یکنواخت در نظر گرفته شد. به طوری که منحنی بار-نشست را بر اساس جابه‌جایی محل اتصال کلاهک به شمع به دست آورد و سپس این کار را برای تک‌تک شمع‌ها انجام داد تا در آخر با استفاده از قاعده سوپر پوزیشن منحنی - نشست کلی را به دست آورد. البته این قاعده برای حالت الاستیک در صورتی معتبر است که شمع‌ها در پیرامون محیط دایره شکل کلاهک در معرض همان بار اولیه قرار داده شوند. که این موضوع با توجه محدودیت صفحه نازک دوبعدی و فرضیات و تقریب‌های استفاده شده نیاز به بررسی و تحلیل داشت.

۲-۲-۶-۲ روش المان محدود

الف- دوبعدی

در روش المان محدود دوبعدی نمایش پی شمع به صورت یک مسئله تقارن محوری و یا مسئله کرنش مستوی انجام می گیرد. تعدادی از نرم افزارها همچون فلک و... برای شبیه سازی از همین روش استفاده می کنند.

هاپر [۱۵] اولین کسی بود که از متد المان محدود برای تحلیل رفتار یک پی شمع، واقع بر روی رس لندن استفاده کرد. تحلیل الاستیک با تقارن محوری در روش المان محدود اجازه صلب در نظر گرفتن کلاhek و شمع به کاربر نمی دهد. به هر حال در روش المان محدود دوبعدی با در نظر گرفتن تقارن محوری، بار را به طور یکنواخت و عمودی به مدل وارد می شود و خاک هم همچون محیطی تک فازی در نظر گرفته می شود. البته در سال های اخیر تلاش هایی توسط حسن و همکاران [۱۶] برای دو فازی در نظر گرفتن خاک در این متد تحلیلی انجام گرفت. مشکل اصلی راه حل ساده شده المان محدود یکی استفاده منحصر از طرح بار منظم برای تحلیل و دیگری عدم توانایی اعمال پیچش و یا لنگر به کلاhek است.

ب- سه بعدی

با پیشرفت های محاسباتی راه برای شبیه سازی رفتار پی شمع با متد المان محدود سه بعدی هموار شد. به طوری که امروزه کدهای 3-D-FEM بر روی کامپیوترهای شخصی قابل تحلیل و آنالیز هستند. اتاوین^۱ [۱۷] اولین کسی بود که روش آنالیز محدود سه بعدی را بر روی شمع و پی شمع اعمال کرد. او از این روش برای مطالعه مکانیسم انتقال بار، توزیع تنش ها و تعیین جابه جایی های مدل در دو حالت تک شمع و گروه شمع تحت بارگذاری قایم استفاده نمود. علاوه بر تحقیقات گسترده ای که توسط گروهی از محققان المانی بر روی این متد انجام شد. افراد دیگری از جمله سانسیت [۱۸] مطالعاتی بر روی عملکرد و ظرفیت باربری پی شمع توسط متد المان محدود سه بعدی با نرم افزار اباکوس، با فرض اتصال انعطاف پذیر بین کلاhek صلب و خاک الاستو پلاستیک تحت بار قائم انجام گرفت. نواک با استفاده از تحلیل خطی الاستیک سه بعدی مطالعاتی بر روی رفتار پی شمع انجام داد. منحنی بار _ جابه جایی رسم

1. Ottaviani

شده توسط نواک با مقادیر اندازه‌گیری شده از مطالعات تجربی که بر روی یک ماسه سخت انجام شده بود موافقت خوبی داشت [۱۹]

۲-۶-۳ روش‌های هیبریدی^۱

روش هیبریدی به ترکیب دو یا چند روش، برای شبیه‌سازی مکانیسمی مشخص به منظور کاهش تفسیر ریاضی، کاهش حافظه و زمان موردنیاز برای پردازش نتایج، گفته می‌شود. در اینجا به دو مورد از روش‌های هیبریدی که برای شبیه‌سازی رفتار پی شمعی عنوان شده پرداخته می‌شود.

الف- روش المان محدود و روش المان مرزی

هانی و لی^۲، فرانک و همکاران^۳، راسو و ویگانی^۴ از ترکیب روش المان مرزی و المان محدود به ترتیب برای مدل‌سازی شمع و کلاhek در پی شمعی استفاده کردند. با وجود تقریب‌ها و فرضیات ساده کننده، استفاده شده در این روش همچنان محققین بسیاری از این به عنوان روش مرجع استفاده می‌کنند [۲۰-۲۱-۲۲].

مندنکا^۵ نیز در مطالعاتی که بر روی توزیع لنگر و نشست کلاhek در یک پی شمعی تحت بار قائم انجام داد، شمع را با روش المان مرزی و کلاhek با روش المان محدود همچون یک صفحه نازک خمشی دوبعدی با المان‌های متلت شکل مدل کرد [۲۳].

ب- روش المان محدود و لایه محدود

تا و اسمال^۶ یکی از پیشگامان معرفی روش لایه محدود برای مدل گروه شمع و پی‌های شمعی می‌باشند. آنان برای غلبه بر محدودیت روش المان محدود برای تجزیه و تحلیل مواد تراکم ناپذیر از مفهوم ماتریس انعطاف‌پذیری که مختص روش لایه محدود است، استفاده نمودند. آنان با توسعه و اصلاح ماتریس

¹ hybrid

² Hain and Lee

³ Franke et al,

⁴ Russo and Viggiani

⁵ Mendonca

⁶ Ta and Small

انعطاف‌پذیری روش تحلیلی جدیدی برای تحلیل رفتار گروه شمع و پی شمعی مطرح کردند. در این روش تحلیلی شمع و پی را با روش المان محدود و لایه‌های خاک توسط روش لایه محدود به شکل لایه‌های ایزوتروپ با محدوده حرکت در راستای محورها X, Z با خواص الاستیک مدل شد.

۷-۲ روش مورد استفاده در این پژوهش

با توجه به روش‌های ارائه‌شده در این فصل اکثر تحقیقات اخیر در زمینه‌ی گروه شمع تحت بار زلزله به صورت المان محدود انجام شده است. با توجه به این که نرم افزار FLAC به صورت تفاضل محدود و کد نویسی مدل سازی می کند و نرم افزار دقیق تری نسبت به سایر نرم افزارهای ژئوتکنیک است از این نرم افزار استفاده می کنیم.

۸-۲ تاریخچه‌ی نشست‌های مجاز قائم حداکثر، در پی‌های صلب

افراد مختلفی بر روی حداکثر مقدار نشست قائم مجاز تحقیقاتی کرده‌اند با این حال شاید نتوان در موارد مختلف از یک مقدار خاص پیروی کرد و عواملی چون نوع سازه؛ عمر سازه؛ خاک زیر آن (که لزوماً رس یا ماسه‌ی خالص نبوده و اغلب ترکیبی از خاک‌ها است) و سایر کمیت‌ها، همگی می‌توانند بر روی مقدار نشست تأثیرگذار باشند. در جدول (۱-۲) پیشنهاد‌های ارائه‌شده مرور می‌شود. مصطفی بهبهانی [۲۴] اختلاف نشست دو طرف پی-های منفرد بر روی خاک‌های ماسه‌ای و رس سخت را به ترتیب ۲۰ میلی‌متر برای رس‌های پلاستیک ۲۵ میلی‌متر و در پی‌های گسترده بر روی خاک‌های ماسه‌ای و رس پلاستیک به ترتیب ۳۰ و ۴۰ میلی‌متر اعلام کرد. تجاوز از این مقادیر منجر به دوران خواهد شد.

جدول (۱-۲) حداکثر مقادیر مجاز نشست سازه‌ها به تفکیک نوع سازه و خاک

مرجع	نوع خاک و سازه	حداکثر مقدار مجاز بر حسب میلی‌متر
اسکمپتون و مک‌دونالد (۱۹۵۶) [۲۵]	پی تکی بر روی خاک رس	۶۵
	پی تکی بر روی خاک ماسه‌ای	۴۰
والز (۱۹۸۱) [۲۶]	سازه‌های با دیوارهای آجری $L/H < 1.5$	۷۵
	سازه‌های با دیوارهای آجری $L/H > 2.5$	۱۰۰
	ساختمان‌های بتن آرمه	۱۵۰
	قاب‌های سازه‌ای	۱۰۰
مصطفی بهبهانی (۱۳۸۸) [۲۴]	پی‌های منفرد، ماسه و رس سخت با قاب فولادی	۵۰
	پی‌های منفرد، ماسه و رس سخت با قاب بتنی	۵۰
	پی‌های گسترده، ماسه و رس سخت با قاب	۷۵
	فولادی	۷۵
	پی‌های گسترده، ماسه و رس سخت با قاب بتنی	۶۵
	پی‌های منفرد، رس‌های پلاستیک با قاب بتنی پی‌های گسترده، رس‌های پلاستیک با قاب فولادی	۱۰۰

جدول (۲-۲) حداکثرهای مجاز را برای حالات مختلف خاک نشان می‌دهد. قابل مشاهده است که با شرایط مفروض و با قرار دادن نشست به عنوان یکی از شاخص‌های مهم در شکست پی، مناسب بوده و می‌تواند سربارهای بیشتر را نیز متحمل شود.

جدول (۲-۲) نشست مجاز در انواع مختلف خاک و پی [۲]

نشست مجاز (میلی‌متر)		نوع پی	خاک
یکنواخت	غیر یکنواخت		
۲۵	۲۰	منفرد و نواری	ماسه
۵۰	۲۰	شبکه‌ای و گسترده	
۶۵	۲۵	منفرد و نواری	رس
۱۰۰-۶۵	۲۵	شبکه‌ای و گسترده	

فصل سوم

مدل سازی

۳-۱ مقدمه

هدف از این فصل شرح جزئیات و مراحل مدل سازی در نرم افزار FLAC است. در این فصل سعی شده توضیحاتی در مورد روش حل مورد استفاده در تحلیل های ارائه شده و جزئیاتی در ارتباط با المان های مورد استفاده در مدل سازی و نحوه ی در نظر گرفتن رفتار اندرکنشی المان های مختلف بیان شود.

۳-۲ معرفی نرم افزار FLAC

برنامه استاتیکی - دینامیکی^۱ FLAC [۲۷] آنالیز سریع و پیوسته لاگرانژی را به کمک روش تفاضل محدود انجام می دهد. این برنامه اولین بار توسط کندل^۲ در سال ۱۹۸۶ جهت انجام یک سری تحلیل های مهندسی توسعه داده شد. نرم افزار FLAC یک برنامه تفاضل محدود صریح^۳ هست که برای محاسبات مکانیک مهندسی بکار برده می شود. این برنامه قابلیت شبیه سازی رفتار سازه های بنا شده بر خاک، سنگ و یا سایر مصالحی که برای رسیدن به حد تسلیم به شکل خمیری درمی آیند را دارا است. در کدهای محاسباتی این نرم افزار ماتریسی تشکیل نمی شود به همین علت هم می توان محاسبات وسیعی را بدون داشتن حافظه اضافی انجام داد. البته در ساختار برنامه، سختی محیط برای شناسایی و محاسبه گام های زمانی مورد نیاز معرفی می شود ولی دسترسی به مفهومی تحت عنوان ماتریس سختی یا ماتریس جرم امکان پذیر نیست. علاوه بر مدل های تعبیه شده در نرم افزار که امکان شبیه سازی رفتار غیرخطی مصالح را فراهم می کند، کاربر خود می تواند مدل رفتاری جدیدی را تعریف کرده و در محیط نرم افزار از آن استفاده کند.

نرم افزار FLAC شامل قابلیت های ویژه فراوانی است که برخی از آن ها عبارت اند از:

۱- در برداشتن المان های سازه ای برای شبیه سازی بهتر سازه ها

¹ Fast Lagrangian Analysis Continuum

² Dr. Peter Cundall

³ Explicit Finite Difference Program

۲-المان‌های میانه^۱ (سطح مشترک) برای شبیه‌سازی صفحات مجزایی که روی هم می‌لغزند و اعمال اندرکنش بین سازه‌ها و خاک به مدل مربوطه.

۳- دربرداشتن مدل‌های ویسکوالاستیک و ویسکو پلاستیک (برای شبیه‌سازی خزش)

۴- قابلیت اضافه کردن مدل رفتاری توسط کاربر به زبان برنامه‌نویسی فیش و سی پلاس پلاس

مدل‌های شناخته‌شده در برنامه تنها با مشخص کردن نام مدل رفتاری و مشخصات موردنیاز آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای معرفی یک سازه به این نرم‌افزار باید شبکه‌ای از زون‌ها را با توجه به هندسه سازه به برنامه معرفی کرد. سپس مدل رفتاری و مشخصات مربوط به هر قسمت را تعیین نمود و درنهایت شرایط مرزی و بارگذاری اعمال گردد. نرم‌افزار FLAC قادر هست تا حدودی شرایط واقعی از جمله خاک‌برداری و یا خاک‌ریزی (شیوه اجرا) را به مدل اعمال کند. همچنین این نرم‌افزار می‌تواند صفحات لغزشی را معرفی نموده و برای آن‌ها خصوصیات از جمله اصطکاک، چسبندگی و اتساع را لحاظ کند. یکی از قابلیت‌های این نرم‌افزار توانایی برنامه در لحاظ نمودن تغییر شکل‌های کوچک و بزرگ در موارد گوناگون است. نرم‌افزار با بهره‌گیری از روش مختصات متغیر و عوض کردن مختصات اولیه برحسب تغییر مکان هر گره از شبکه برای محاسبات بعدی، قادر به این نوع مدل‌سازی است. همچنین برنامه به صورت خودکار دانسیته هر ناحیه (zone) را برحسب تغییر حجم آن قسمت محاسبه می‌کند. به این ترتیب جرم هر ناحیه مستقل از تغییر حجم آن ثابت بوده (قانون بقای جرم) و درعین حال متراکم (Dense) یا سست (Loose) شدن مصالح در نظر گرفته می‌شود.

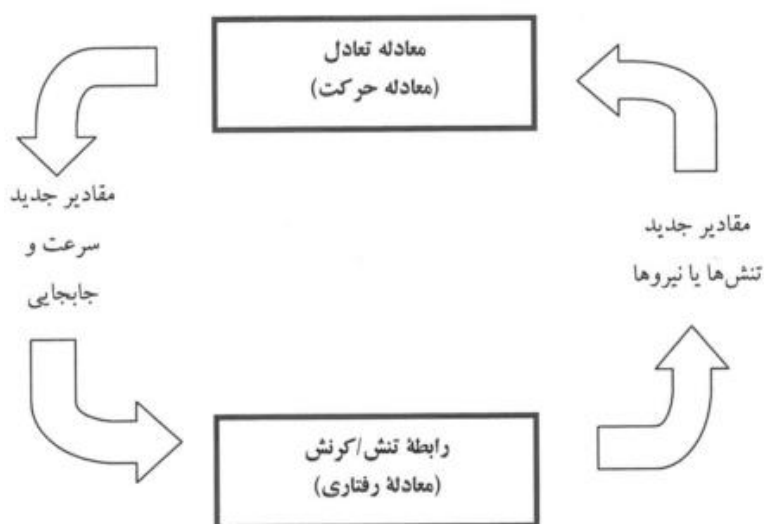
در حال حاضر نرم‌افزار FLAC مسئله استاتیکی را به کمک میراسازی مناسب به روش دینامیکی مشابه آن حل می‌کند. در این حالت فاصله زمانی به معنی فاصله زمانی فیزیکی نیست بلکه اشاره به زمانی دارد که در این فاصله تغییر شکل گره‌های شبکه اندازه‌گیری می‌شوند. بزرگ‌ترین محدودیتی که بعد از این مرحله مشکل‌ساز می‌شود، ایجاد شبکه تفاضل محدود است. این شبکه باید به صورت دستی و با هندسه مشخص تشکیل شود. در این مرحله برای درستی کار نظم خاصی لازم است. مثلاً به راحتی

1. Interface Elements

نمی‌توان در یک قسمت از شبکه ریز و در قسمت دیگر که در تغییر شکل‌ها اثر کمتری دارد از شبکه درشت استفاده کرد. همچنین زمان حل مسئله به‌خصوص در حالت دینامیکی علاوه بر ابعاد و ریزی شبکه به‌سختی مصالح مربوط بوده و وجود مصالح با سختی بالا زمان را به‌شدت افزایش می‌دهد.

۳-۲-۱ فرمول‌بندی یک مدل تفاضل محدود

نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار توسط یک مدل ریاضی و الگوی اجرایی خاص به دست می‌آید. شکل (۳-۱) توالی کلی محاسبات را که در روش تفاضل محدود صریح بکار گرفته‌شده را شرح می‌دهد. این رویه ابتدا روابط حرکت را فرامی‌خواند تا سرعت‌ها و تغییر مکان‌های جدید را از تنش‌ها و نیرو به دست آورد. سپس نرخ کرنش را از سرعت‌ها و تنش‌های جدید به دست می‌آورد. نکته‌ی مهمی که بایستی توجه شود، این است که در هر بخش از شکل (۳-۱) تمامی متغیرهای گرهی از مقادیر معلوم مرحله قبل - که در هر چرخه در حین محاسبات ثابت باقی می‌مانند دوباره محاسبه می‌شوند.



شکل (۳-۱) اساس چرخه محاسبات صریح [۲۷]

در نرم‌افزار FLAC از روابط حرکت و معادلات رفتاری برای تحلیل محیط جامد، قانون داریسی برای جریان سیال و قانون فوریه برای مسائل انتقال حرارت استفاده شده است. حالت تنش در یک نقطه معلوم از محیط با تانسور تنش متقارن σ_{ij} مشخص می‌شود (در این رابطه t_i, n_j به ترتیب تانسورهای مقادیر ویژه تنش بر روی سطح هستند) [۲۷].

$$t_i = n_j \cdot \sigma_{ij} \quad (۱-۳)$$

ذرات محیط با سرعت v حرکت می‌کنند. در یک بازه کوچک زمانی dt ، محیط یک کرنش کوچک را تجربه می‌کند که این کرنش با تبدیل $v \cdot dt$ تعیین می‌شود، مؤلفه‌های متناظر تانسور نرخ کرنش به این صورت نوشته می‌شود:

$$\zeta_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (۲-۳)$$

$$v_{i,j} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad \text{در این رابطه}$$

معادلات حرکت در یک جسم جامد پیوسته به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_i = \rho \frac{dv_i}{dt} \quad (۳-۳)$$

σ_{ij} : مؤلفه تانسور تنش

ρ : جرم واحد حجم

b_i : مؤلفه نیروی حجمی در واحد حجم

$\frac{dv}{dt}$: مشتق مادی سرعت

باید توجه داشت که در حالت تعادل استاتیکی شتاب $\frac{dv}{dt}$ صفر است.

فرضیه‌ها:

خلاصه‌ای از فرضیات مورد استفاده در این پژوهش به صورت زیر است:

۱- خاک رس به عنوان محیط پیوسته با رفتار الاستیک و الاستوپلاستیک موهر کولمب در نظر گرفته شده است.

۲- شمع به صورت گروهی از نوع اتکایی و بتنی درجا ریز برای مدل سازی مورد استفاده قرار می گیرد.

۳- رفتار شمع الاستیک

۴- آنالیز به صورت دوبعدی ۵- تحلیل دینامیکی تحت بار زلزله

۳-۲-۲ مراحل مدل سازی در نرم افزار FLAC

در این قسمت از مدل سازی، اجزای مدل مورد بررسی در پروژه که به صورت یک محوطه خاکی به همراه شمع و کلاهک آن است با توجه به اصول مدل سازی عددی و ترتیب عملیات اجرایی انجام شده در محل سایت به ترتیب زیر تعریف می گردد:

۱) انتخاب محدوده مناسب سایت در مدل سازی و تشکیل المان ها

۲) انتخاب مدل رفتاری و وارد کردن پارامترهای مورد نیاز

۳) اعمال شرایط اولیه و شرایط مرزی

۴) حل مدل تا رسیدن به تعادل

۵) اعمال تغییرات مورد نظر برای در نظر گرفتن حالات مطلوب

۶) حل مجدد و بررسی نتایج

در ادامه در مورد هر گام توضیح مختصری ارائه می شود.

۳-۲-۲-۱ جزئیات مدل سازی در نرم افزار FLAC

در شبیه سازی یک سایت به سه مسئله اساسی زیر باید توجه شود:

۱) شبکه تفاضل محدود: هندسه مسئله را بیان می کند.

۲) رفتار اصلی و خصوصیات مصالح: عکس العمل مدل تحت عوامل ناپایدار ساز نشان می دهد.

۳) شرایط مرزی و اولیه: شرایط واقعی سایت را بیان می کند.

بعد از اعمال سه شرط بالا حالت تعادل اولیه برای مدل باید در نظر گرفته شود. روند حل نرم افزار به زمان وابسته است، که حل پس از یک تعداد گام زمانی که به طور خودکار (زمانی که نسبت مش در تحلیل از ده به توان منفی ۵ کمتر شود) و یا توسط کاربر تحلیل متوقف می شود.

۳-۲-۲-۲ انتخاب محدوده‌ی مناسب مدل و تشکیل شبکه المانی

به طور کلی در روش‌های عددی در مدل سازی باید به دو اصل زیر توجه شود:

(۱) باید ابعاد مدل به اندازه کافی بزرگ باشد تا تأثیر مرزها بر روی رفتار مدل به حداقل برسد. مرزهای مدل بایستی از محدوده تحت تنش یا تغییر مکان به اندازه کافی دور باشند، به طوری که وضعیت تنش‌ها و تغییر شکل‌ها قبل و بعد از اعمال تغییرات در نقاط مرزی تفاوت چندانی نداشته باشد.

(۲) در مرزها، در مناطق حساس مدل باید المان‌های کافی جهت رسیدن به جواب با دقت مطلوب، وجود داشته باشد.

همچنین تغییر المان‌ها نباید به طور ناگهانی در مدل اتفاق بیفتد، چون انتقال داده را با مشکل روبرو می کند. بعد از تعیین ابعاد مدل اقدام به ایجاد شبکه المان‌ها می نماییم. در این مرحله در جاهایی که تغییر تنش یا تغییر شکل قابل توجهی رخ می دهد از المان‌هایی با ابعاد کوچک تر و در مناطق با تأثیر کمتر از المان‌هایی با ابعاد بزرگ تر استفاده می شود. اگرچه افزایش تعداد المان‌ها به دقت جواب می افزاید ولی اثر مستقیمی بر کاهش سرعت انجام تحلیل‌ها در نرم افزار دارد. به بیان دیگر افزایش تعداد المان‌ها تاوایی لازم است که دقت مورد نظر از نتایج به دست آمده از نرم افزار قابل قبول باشد. یکی از مزایای نرم افزار FLAC قابلیت معرفی شبکه المان‌ها توسط کاربر است. کاربر می تواند تراکم مش بندی در قسمت‌های مختلف را برای حصول دقت مورد نظر به نرم افزار اعمال کند.

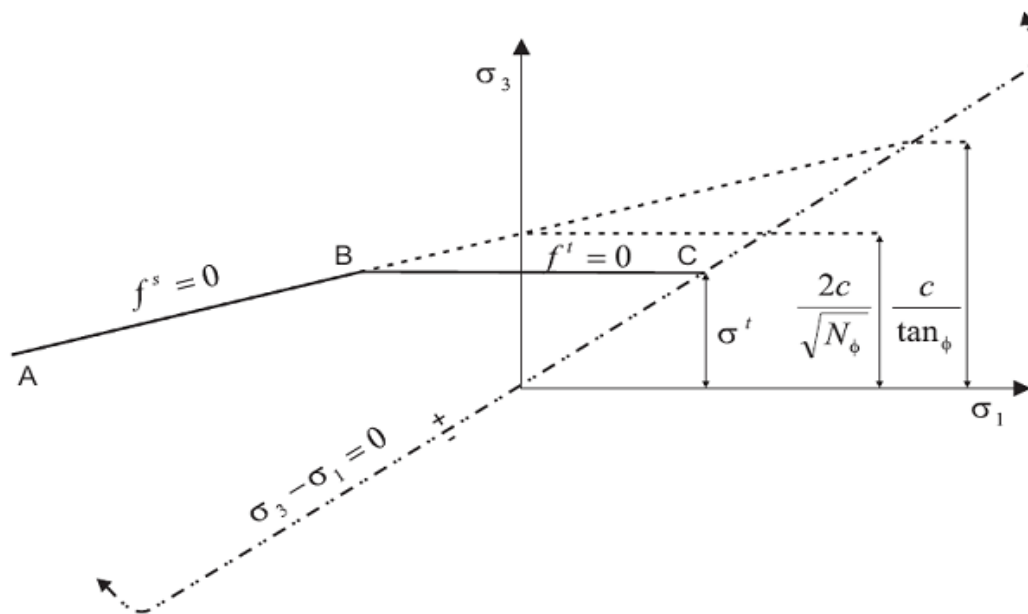
۳-۲-۲-۳ انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن

مدل‌های رفتاری مختلفی برای بیان ویژگی‌های مواد در نرم افزار FLAC تاکنون ارائه شده است. این مدل‌ها بستگی به میزان اهمیتی که برای هر یکی از جنبه‌های رفتاری قائل می شوند، متفاوت می باشند. به طور کلی مدلی که ویژگی‌های بیشتری از رفتار خاک را بیان نماید پیچیده تر هست. برای بیان رفتار

مواد متفاوت و گاهی یک نوع ماده خمیری، معادلات رفتاری مختلفی ارائه شده است. برخی از این قوانین رفتاری مناسب و برخی و دیگر نامناسب بوده‌اند. یکی از مدل‌های رفتاری پرکاربرد در نرم‌افزار FLAC، مدل موهر-کولمب است. مدل موهر-کولمب یک مدل الاستوپلاستیک کامل است. معیار اصلی در این مدل رفتاری به صورت ارتباط خطی بین تنش برشی و تنش عمودی که بر روی یک صفحه بر اساس قانون شکست اصطکاکی است، که به صورت رابطه (۳-۴) ارائه می‌گردد [۲۷]:

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \varphi \quad (۳-۴)$$

در این رابطه τ تنش برشی، c چسبندگی، φ زاویه اصطکاک داخلی خاک است. شکل معیار گسیختگی موهر-کولمب در فضای تنش‌های اصلی در شکل (۳-۲) مشاهده می‌شود.

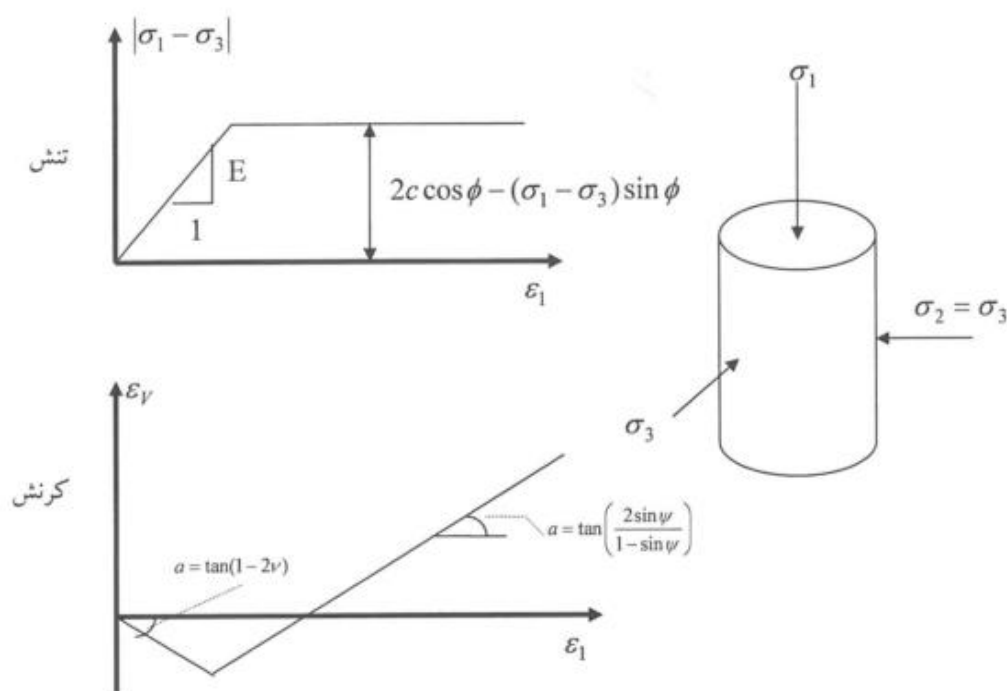


شکل (۳-۲) معیار گسیختگی موهر-کولمب در فضای تنش‌های اصلی [۲۷]

۳-۲-۲-۴ تعیین پارامترهای مدل رفتاری مورد استفاده

تعیین پارامترهای مصالح در آنالیزهای عددی به‌ویژه در ژئوتکنیک جز بخش‌های مهم در مدل‌سازی به شمار می‌رود. مشخصات مصالح در هر مدل رفتاری عموماً از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و یا صحرایی به دست می‌آیند. در این بخش توضیح مختصری راجع به نحوه تعیین پارامترهای مدل‌های مورد استفاده

در تحقیق حاضر ارائه می‌شود. مدل موهر-کولمب شامل پنج پارامتر E, ψ, c, ϕ, ν است که می‌توان با استفاده از نتایج آزمایش سه محوری آن‌ها را تعیین کرد. همان‌طور که در شکل (۳-۳) نشان داده شده، مدول الاستیسیته E شیب بخش الاستیک منحنی تنش انحرافی $(\sigma_1 - \sigma_3)$ و کرنش ε_1 بوده و نسبت پواسون ν را می‌توان از شیب بخش الاستیک منحنی کرنش ε_ν و کرنش ε_1 به دست آورد.



شکل (۳-۳) تعیین پارامترهای مدل موهر-کولمب از نتایج سه محوری [۲۷]

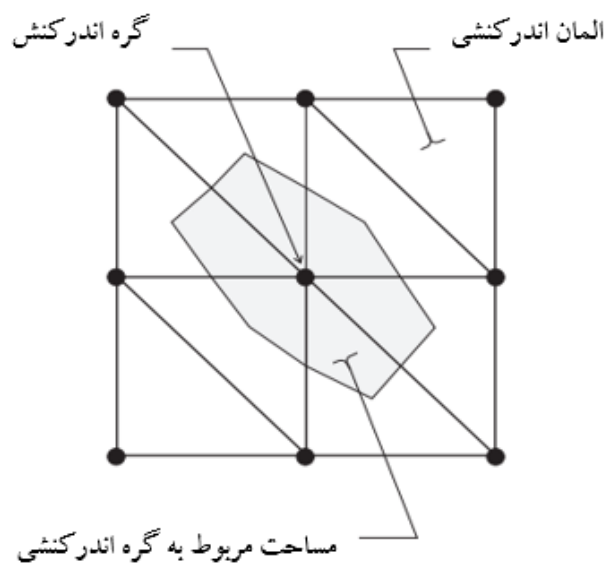
پارامترهای c, ϕ نیز از روش‌های مرسوم با استفاده از آزمایش سه محوری قابل تشخیص است (با استفاده از ترسیم دوایر موهر).

۳-۳ جزئیات مدل سازی تحقیق

همان‌طور که بیشتر بدان اشاره شد مدل مورد بررسی در این تحقیق یک سیستم پی شمعی است. به‌طور عمده مراحل ساخت یک پی شمعی عبارت است از حفاری، نصب شمع و کلاhek، که هر یک از این مراحل در نرم‌افزار شبیه‌سازی خواهند شد.

۳-۳-۱ مدل سازی اندرکنش در فصل مشترک المان‌های شمع و کلاhek و المان‌های خاک

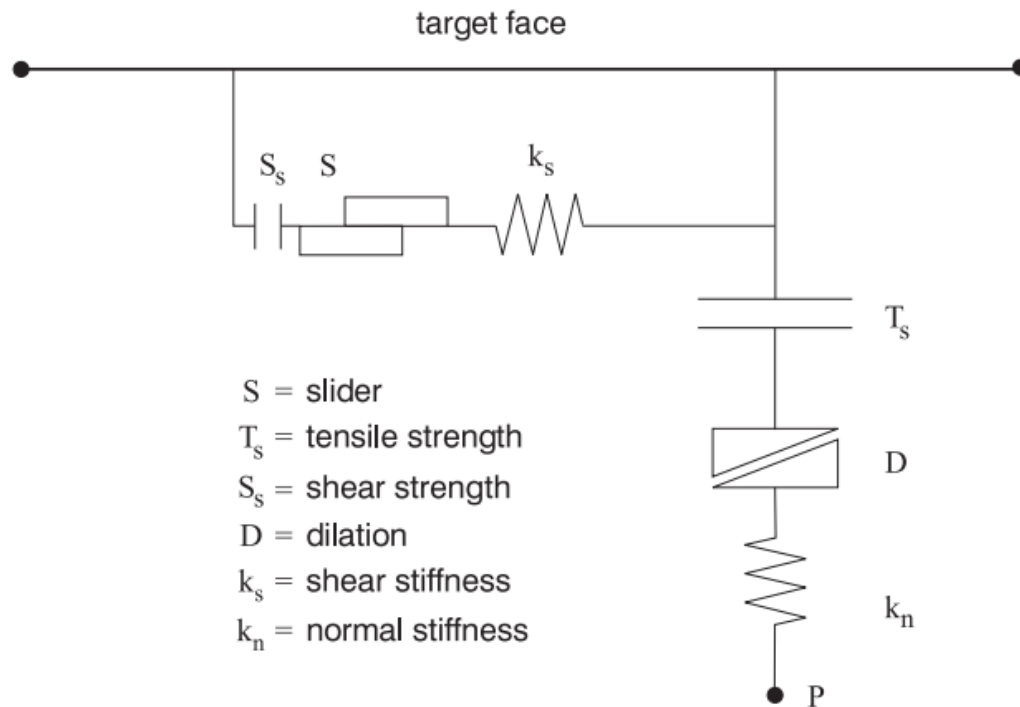
جهت شبیه‌سازی اثر متقابل خاک و شمع از یک سری المان‌های خاص موسوم به المان‌های سطح واسط استفاده می‌شود. برای این المان‌ها می‌توان هریک از خواص اصطکاک، چسبندگی، اتساع، سختی عمودی و برشی و حد نهایی برش و کشش را تعریف نمود. هرچند محدودیتی برای تعداد و پیچیدگی این المان‌ها وجود ندارد اما معمولاً توصیه می‌شود که در نرم‌افزار بیش از چند المان سطح واسط شبیه‌سازی نشود چون نرم‌افزار قادر به تحلیل حالت‌های پیچیده‌ی کاربرد المان‌های سطح واسط نیست. همان‌طور که در شکل (۳-۴) دیده می‌شود المان‌های سطح واسط به‌صورت المان‌های مثلثی سه گره‌ای می‌باشند؛ بنابراین برای پوشاندن سطح مربعی یک ناحیه باید دو عدد از این المان‌ها در کنار یکدیگر قرار بگیرند. در هر رأس از این المان‌ها به‌صورت خودکار یک گره تشکیل می‌شود. تماس این المان‌ها با شبکه‌های دیگر از المان‌ها، در محل همین گره صورت می‌گیرد.



شکل (۳-۴) چگونگی توزیع سطح متناظر با هر گره [۲۷]

شکل (۳-۵) چگونگی ارتباط بین المان‌های واسط، گره‌ها و سطح متناظر با آن‌ها را نشان می‌دهد. رفتار این المان‌ها توسط پارامترهای چون سختی عمودی، برشی و پارامترهای رفتار لغزشی، تنظیم می‌شود. در هر گام زمانی ابتدا مقادیر تغییر مکان نسبی عمودی و مماسی بین گره‌های المان‌های واسط و سطح هدف آن‌ها محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از این مقادیر و یا به‌کارگیری مدل ساختاری سطح واسط، بردار نیروهای عمودی و برشی به دست می‌آیند. مدل ساختاری این المان‌ها با استفاده از معیار برش -

مقاومت خطی کولمب توسعه داده شده است. این معیار مقادیر نیروی برشی گره المان واسط، سختی های برشی و عمودی، حدود مقاومت برشی و کششی و زاویه اتساع را محدود می کند. مؤلفه های مدل ساختاری که روی گره P المان واسط عمل می کند، در شکل (۵-۳) نمایش داده شده است.



شکل (۵-۳) مؤلفه های مدل ساختاری المان سطح واسط [۲۷]

نیروی عمودی و برشی در زمان $t + \Delta t$ که تعیین کننده پاسخ الاستیک سطح واسط هستند با استفاده از روابط (۵-۳) و (۶-۳) به دست می آیند:

$$F_n^{(t+\Delta t)} = k_n u_n A + \sigma_n A \quad (۵-۳)$$

$$F_{si}^{(t+\Delta t)} = F_{si}^t + k_s \Delta u_{si}^{(t+\frac{1}{2}\Delta t)} A + \sigma_{si} A \quad (۶-۳)$$

که در آن:

$F_n^{(t+\Delta t)}$: نیروی عمودی در زمان $t + \Delta t$ (از بعد نیرو)

$F_{si}^{(t+\Delta t)}$: بردار نیروی برشی در زمان $t + \Delta t$ (از بعد نیرو)

u_n : نفوذ مطلق گره واسط در سطح هدف (از بعد جابه جایی)

Δu_{si} : بردار نمو جابه جایی نسبی برشی (از بعد جابه جایی)

σ_n : تنش عمودی اضافه شده در اثر مقداردهی اولیه‌ی تنش سطح واسط (از بعد نیرو بر جابه‌جایی)

k_n : سختی عمودی (از بعد تنش بر جابه‌جایی)

k_s : سختی برشی (از بعد تنش بر جابه‌جایی)

A : سطح متناظر با گره سطح واسط (از بعد طول به توان ۲)

المان‌های سطح واسط، تماس را فقط در نقاط گره‌ی خود تشخیص داده و نیروهای تماسی تنها به این گره‌ها منتقل می‌شود.

این المان‌ها، سه گونه رفتار غیرخطی را می‌توانند از خود نشان دهند:

۱. سطح واسط مقید^۱: در این حالت تا زمانی که مقادیر تنش‌های برشی و کششی، کمتر از مقاومت برشی و کششی المان سطح واسط باشد، رفتار المان به‌صورت الاستیک باقی می‌ماند. در این حالت در سطح تماس اجازه‌ی هیچ لغزشی، جدایی و شکستگی به اتصال داده نمی‌شود.

۲. لغزش در عین اتصال^۲: در این حالت اجازه‌ی جداسازی به اتصال داده نمی‌شود، اما در محل اتصال می‌تواند لغزش رخ دهد. در اینجا برخلاف حالت قبل که اجازه‌ی هیچ‌گونه تسلیم‌شدگی داده نمی‌شد، تسلیم برشی می‌تواند رخ دهد.

۳. لغزش کولمب^۳: در حالت لغزش کولمب، یک اتصال می‌تواند دست‌نخورده یا شکسته باشد. در صورتی که اتصال شکسته باشد، رفتار اتصال توسط اصطکاک، چسبندگی و سختی‌های تخصیص داده‌شده، در هر جهت کنترل می‌شود. در صورتی که مقاومت نهایی برای اتصال در نظر گرفته نشود، این حالت به‌صورت پیش‌فرض در نرم‌افزار لحاظ خواهد شد.

معیار مقاومت برشی کولمب، نیروی برشی را طبق رابطه (۷-۳) محدود می‌کند:

$$F_{s \max} = c.A + \tan \phi (F_n - p.A) \quad (7-3)$$

¹. Bonded interface

². Slip While bonded

³. Columb sliding

که در آن c چسبندگی در امتداد سطح واسط (از جنس تنش)، ϕ زاویه اصطکاک سطح واسط (برحسب درجه) و p فشار آب حفره‌ای (درون‌یابی شده از سطح هدف) است.

اگر $|F_s| \geq F_{s \max}$ شود، فرض می‌شود که لغزش رخ داده و $|F_s| = F_{s \max}$ قرار داده می‌شود.

در مدل‌سازی‌های صورت گرفته در این پایان‌نامه از مدل رفتاری لغزش کولمب برای شبیه‌سازی اندرکنش خاک و جداره‌ی شمع استفاده شد. پرواضح است که به‌کارگیری پارامترهای رفتاری دقیق المان‌های سطح واسط نیازمند انجام آزمایش روی خاک مورداستفاده در مدل‌سازی است. در تحقیق حاضر به دلیل عدم دسترسی به نتایج حاصل از آزمایش روی خاکه‌ای استفاده‌شده، مقادیر سختی برشی و عمودی فصل مشترک با بهره‌گیری از روابط (۳-۸ و ۳-۹) را ده برابر سخت‌تر از سخت‌ترین زون مجاور در نظر گرفته‌شده تعیین گردید.

$$k_s, k_n = 10E \quad (۳-۸)$$

$$E = \max\left(\frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{\min}}\right) \quad (۳-۹)$$

E : سختی ظاهری یک زون در جهت قائم

K : مدول حجمی زون‌های مجاور فصل مشترک

G : مدول برشی زون‌های مجاور فصل مشترک

$\Delta z_{\min}$: کمترین عرض زون در جهت عمود بر فصل مشترک است.

۳-۳-۲ اعمال شرایط مرزی

۳-۳-۲-۱ شرایط مرزی در تحلیل استاتیکی

نوع تکیه‌گاه باید با مسئله توافق داشته باشد، بدین‌صورت که در آنالیزهای استاتیکی در طرفین مدل از تکیه‌گاه‌های غلتکی و در ضلع پایینی از تکیه‌گاه‌های گیردار استفاده می‌شود. همچنین در حالت استاتیکی بارگذاری تنها شامل بار وزن شالوده به اضافه بار سازه بالایی است.

۳-۳-۲-۲ شرایط مرزی در تحلیل دینامیکی

در مطالعات دینامیکی علاوه بر آنچه در مورد شرایط مرزی در حالت استاتیکی گفته شد بازتاب امواج در اثر برخورد با مرزهای مدل نیز مطرح می‌گردد. برای رفع این مشکل باید از مرزهای دیگری به جز مرز گیردار یا الاستیک استفاده کرد که نحوه اعمال و عملکرد شرایط مرزی به مدل در حالت تحلیل دینامیکی در ادامه فصل توضیح داده شده است.

۳-۴ ملاحظات مدل سازی دینامیکی

به هنگام استفاده از تحلیل دینامیکی نرم افزار FLAC می‌بایست سه اصل را در مدنظر داشت.

۱. بارگذاری دینامیکی و شرایط مرزی

۲. میرایی مکانیکی

۳. انتقال امواج درون مدل

۳-۴-۱ بارگذاری دینامیکی و اعمال شرایط مرزی

نرم افزار FLAC قادر است فضاهایی را مدل سازی کند که تحت تأثیر بارگذاری دینامیکی داخلی و یا خارجی قرار گرفته است.

برای بارگذاری دینامیکی داده‌های ورودی دینامیکی را می‌توان در هر مرز مدل و یا حتی در نقطه شبکه‌های داخلی اعمال نمود. همچنین بازتاب‌های ناشی از امواج منتشر شده در مرزهای مدل را با اختصاص مرزهای میدان آزاد و یا مرزهای ویسکوز می‌توان کاهش داد.

۳-۴-۱-۱ اعمال داده‌های ورودی دینامیکی

برای اعمال داده‌های ورودی دینامیکی به مدل در نرم افزار FLAC می‌توان از چندین روش استفاده کرد؛

۱. استفاده از تاریخچه شتاب

۲. استفاده از تاریخچه سرعت

۳. استفاده از تاریخچه تنش یا فشار

۴. استفاده از تاریخچه نیرو

محدودیت استفاده از ورودی دینامیکی، در محل اعمال آن‌ها است. به‌طوری‌که داده‌های دینامیکی به‌صورت سرعت و شتاب را نباید به مرزهای ویسکوز (جاذب) اعمال نمود زیرا در این صورت اثر مرزهای ویسکوز خنثی خواهد شد.

برای همین به‌منظور اعمال رکورد لرزه‌ای در یک مرز ویسکوز می‌توان از شرایط مرزی تنش استفاده کرد، در بارگذاری دینامیکی مدل می‌توان یک رکورد سرعت را تبدیل به یک رکورد تنش کرد و به مرز ویسکوز اعمال می‌گردد.

۳-۴-۱-۲ مرزهای ویسکوز

در مسائل ژئوتکنیکی مدل‌سازی بایستی به‌گونه‌ای باشد که در مقایسه با واقعیت بتواند رفتار محیط بیکران را به‌خوبی نشان دهد. این در حالی است که در سازه‌های سطحی یا نزدیک به سطح، محیط اطراف به‌صورت نیم فضا فرض می‌شوند. در تحلیل‌های استاتیکی، مرزهای گیردار (ثابت) یا الاستیک می‌توانند به‌طور واقع‌بینانه در فاصله‌ای نه‌چندان دور از منطقه موردنظر قرار بگیرند.

در مسائل دینامیکی استفاده از چنین شرایط مرزی (گیردار یا الاستیک) باعث بازتاب امواج به داخل مدل شده و اجازه تشعشع انرژی به خارج از محدوده مدل را نمی‌دهد. در نرم‌افزار FLAC برای رفع این مشکل از مرزهای آزاد استفاده می‌شود. برای این منظور روابط زیادی پیشنهاد گردیده است. یکی از روش‌هایی که برای این منظور وجود دارد، روش مرز ویسکوز نام دارد که در نرم‌افزار FLAC نیز موجود است.

روش مرز جاذب پیشنهادشده توسط لیسمر و کوهلمیر^۱ [۲۸] شامل میراگرهایی است که به‌طور مستقل در جهت نرمال و برشی در مرز قرارداده می‌شوند. این میراگرها نیروهایی روی سطوح نرمال و برشی با فرمول‌های (۳-۱۰) و (۳-۱۱) ایجاد می‌کنند (یعنی نیروی اعمالی از طرف میراگر روی مرز):

$$t_n = -\rho C_p V_n \quad (3-10)$$

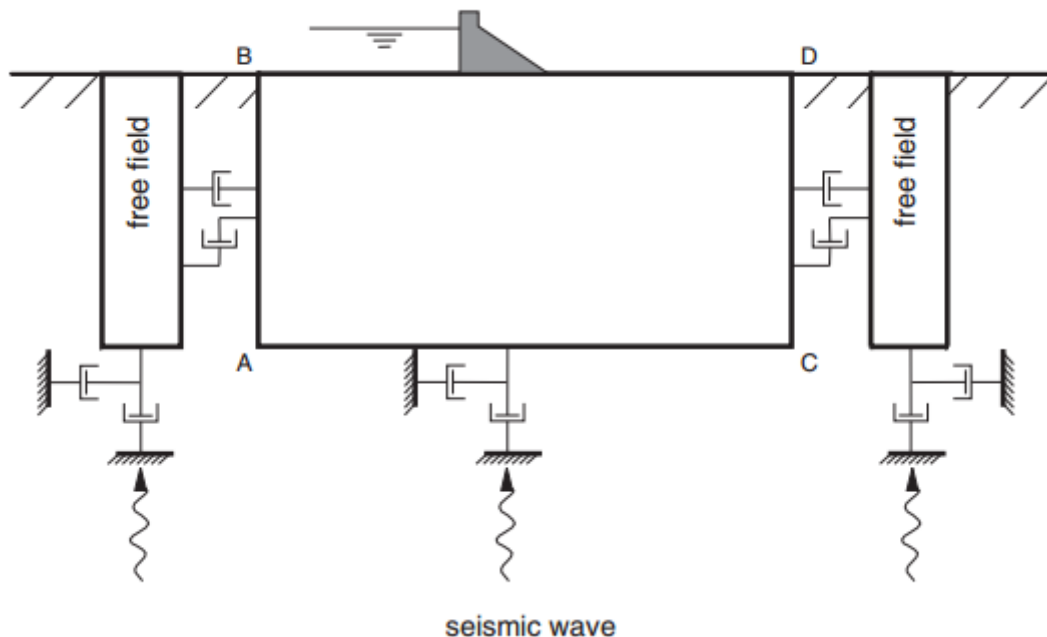
¹ Lysmer and Kuhlemeyer

$$t_s = -\rho C_s V_s \quad (۱۱-۳)$$

V_n, V_s مؤلفه برشی و نرمال سرعت در مرز، ρ چگالی محیط خاکی، C_p, C_s سرعت موج برشی و موج فشاری هستند. این مرزهای جاذب می‌توانند به‌طور مستقیم به معادلات حرکت نقاط شبکه واقع در شرایط مرزی معرفی گردند.

۳-۴-۱-۳ مرزهای میدان آزاد

تحلیل عددی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های روی سطح نظیر سدها، نیازمند مش بندی ناحیه‌ای از مصالح اطراف شالوده است. امواج ورودی به‌صورت انتشار امواج سطحی از میان لایه‌ها عبور می‌کند. شرایط مرزی در اطراف مدل بایستی برای حرکت میدان آزاد موجود، در غیاب سازه، محاسبه شوند. یعنی درواقع باید محیط اطراف شالوده به نحوی مدل‌سازی شود که فضا برای حرکت موج آزاد فراهم باشد و این فضا عیناً معادل فضایی باشد که موج صورت آزاد در آن حرکت می‌کند و مانند محیط واقعی خاک حرکت موج آزاد در آن انجام شود. در بعضی موارد ممکن است مرزهای جانبی اولیه کافی باشند. به‌عنوان مثال اگر تنها یک موج برشی به مرز افقی شکل (۳-۶) یعنی AC اعمال شود، می‌توان مرزهای در طول جهات CD, AB را تنها گیردار کرد. این مرزها بایستی به‌اندازه کافی دور باشند تا کمترین بازگشت امواج را داشته باشند و به شرایط میدان آزاد نزدیک شوند. برای خاک‌های با میرایی مادی زیاد می‌توان با یک فاصله نسبتاً کم هم به این شرط رسید. اگر میرایی خاک زیاد باشد دیگر نیازی به اینکه فاصله مرزها را تا محل موردنظر خیلی دور بگیریم نیست چون وقتی میرایی زیاد است اجازه رسیدن امواج بازتابی از مرزها تا محل موردنظر را نمی‌دهد [۲۹].



شکل (۳-۶) مدل تحلیل دینامیکی سازه سطحی به همراه میدان آزاد [۲۹]

مرزهای جانبی شبکه زون‌های اصلی، به وسیله‌ی مجموعه‌ای از المان‌های میراگر به مرزهای میدان آزاد متصل می‌شوند تا بدین وسیله مرز جاذب انرژی را مدل‌سازی کنند و نیروهای نامتعادل کننده از شبکه میدان آزاد به مرز شبکه اصلی اعمال گردد.

در صورتی که شبکه اصلی یکنواخت بوده و هیچ سازه سطحی نیز موجود نباشد، در این حالت میراگر جانبی به کار گرفته نمی‌شود چراکه شبکه میدان آزاد حرکت مشابهی مانند شبکه اصلی را نمایش خواهد داد. با این حال، اگر حرکت شبکه اصلی متفاوت از میدان آزاد باشد (مثلاً به علت وجود سازه‌های سطحی که امواج ثانویه را بازتاب خواهند کرد) در این حالت میراگرها به صورت جذب‌کننده‌های انرژی مشابه عملکرد مرزهای ویسکوز عمل خواهند کرد.

مدل میدان آزاد متشکل از چهار صفحه شبکه میدان آزاد در مرزهای اطراف مدل و چهار ستون شبکه میدان آزاد در گوشه‌ها است. صفحه شبکه میدان آزاد دارای محاسبات دوبرعده‌ای هستند که انبساط بی نهایت در راستای قائم بر صفحه را در نظر می‌گیرند. ستون‌های شبکه میدان آزاد نیز دارای محاسبات

یک بعدی هستند که در واقع انبساط بی نهایت در هردو راستا را ممکن خواهند ساخت. هردو شبکه ستون و صفحه متشکل از زون های استاندارد از نرم افزار FLAC خود دربردارنده نقطه شبکه هایی می باشند بطوریکه اتصال آن ها به نحوی صورت می گیرد که فرض تغییر شکل بی نهایت محقق خواهد شد.

۳-۴-۲ مفهوم میرایی

پدیده ای که باعث می شود ارتعاش آزاد یک سیستم به تدریج مستهلک شود، میرایی نامیده می شود. در اثر میرایی، انرژی جنبشی ارتعاشی سیستم با مکانیسم های مختلفی مستهلک می شود. میرایی در تمام سیستم های واقعی وجود دارد. در اثر نوسان های متوالی مدل، مقداری انرژی وارده به سیستم به صورت انرژی تابشی یا گرمایی از سیستم خارج می شود. مدل تحلیلی متداولی که برای میرایی در تحلیل های دینامیکی در نظر گرفته می شود، نوع فنر ویسکوز است. منظور از میرایی ویسکوز، میرایی است که مشابه حرکت یک جسم در یک مایع لزج است.

۳-۴-۱ میرایی سیستم

سیستم های طبیعی تحت بارهای دینامیکی، دارای درجاتی از میرایی هستند که موجب کاهش انرژی ارتعاشی داخلی می گردد. اگر این میرایی وجود نداشته باشد، سیستم در رویارویی با یک بار دینامیکی تا ابد ارتعاش می نماید و هیچ گاه آثار لرزشی از سیستم محو نمی شود. میرایی شامل دو قسمت است.

قسمت اول میرایی هندسی نام دارد که وابسته به ابعاد و شکل ناحیه ی تحت بار است.

قسمت دوم که وابسته به خصوصیات ذاتی مواد است، میرایی مادی نام دارد. این قسمت از میرایی وابسته به سختی مواد، لزجت آن ها، سطوح کرنش و تنش القایی، چگالی مواد، اصطکاک داخلی بین ذرات، نوع رفتار اندرکرنش لایه های مستعد لغزش و بسیاری عوامل دیگر است.

در برنامه های تاریخچه زمانی استفاده از میرایی رایلی برای فراهم آوردن شرایط میرایی بسیار معمول است. در واقع میرایی رایلی دربردارنده دو نوع المان ویسکوز است که در واقع انرژی جذب شده را تابعی از فرکانس خواهد ساخت. میرایی رایلی در ابتدا در تحلیل سازه ها و محیط های پیوسته مورد استفاده قرار گرفت تا خودهای نوسان طبیعی سیستم را میرا سازد. معادلات این نوع میرایی بعدها در قالب

ماتریسی بیان شد که در آن ماتریس میرایی C متشکل از دو جز است. یک جز ماتریس جرم و جز دیگر ماتریس سختی سیستم خواهد بود:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (۱۲-۳)$$

در رابطه فوق α ضریب میرایی متناسب با جرم و β ضریب میرایی متناسب با سختی سیستم است. برای یک سیستم چند درجه آزادی، نسبت میرایی بحرانی در هر فرکانس زاویه‌ای را می‌توان با استفاده از رابطه پیشنهادی، باته و ویلسان^۱ به دست آورد:

$$\alpha + \beta \omega_i^2 = 2\omega_i \zeta_i \quad (۱۳-۳)$$

$$\zeta_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_i} + \beta \omega_i \right) \quad (۱۴-۳)$$

نسبت میرایی بحرانی ζ_i همچنین به عنوان جزئی از میرایی بحرانی برای مد n ام در فرکانس زاویه‌ای ω_i شناخته می‌شود.

۳-۴-۳ انتقال امواج

در طول انجام یک تحلیل دینامیکی، ممکن است بسته به شرایط مدل‌سازی، اغتشاش عددی درانتشار امواج صورت گیرد. به‌طوری‌که دقت عددی انتقال موج روی محتوی فرکانسی موج وارده، سرعت مشخصه سیستم تأثیر می‌گذارد.

کوهلمیر و لیسمر^۲ نشان دادند که برای حصول از دقت انتقال موج از مدل، بایستی طول بزرگ‌ترین المان در هر دو راستای Δl ، کوچک‌تر از تقریباً $\frac{1}{10}$ تا $\frac{1}{8}$ طول موج مربوط به بیشترین مؤلفه فرکانس موج ورودی باشد. طول موج مربوط به بیشترین فرکانس که شامل انرژی قابل‌توجهی است. بنابراین ممکن است برای یک تحریک دینامیکی با پیک سرعت بالا و زمان اوج کوتاه ناگزیر به استفاده از یک مش خیلی ریز و متناظر آن گام زمانی کوچک باشیم.

¹ Bathe and Wilson

² Kuhlemeyer and Lysmer

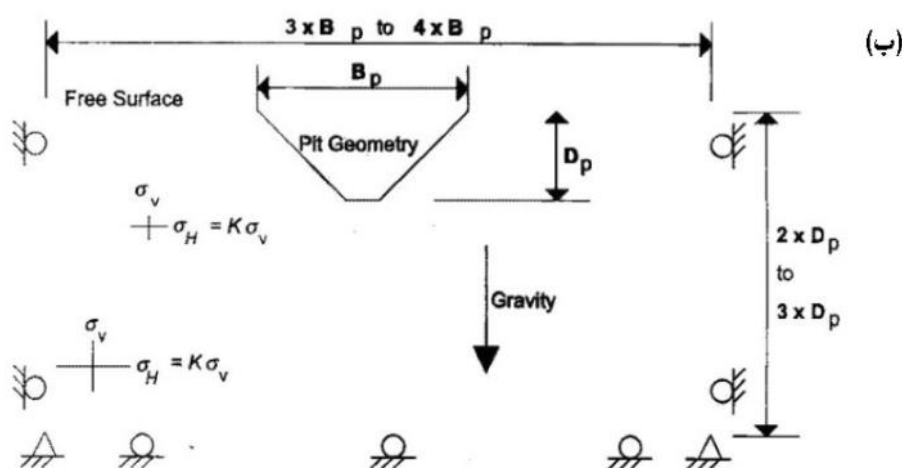
۳-۵ مدل سازی و مسائل اولیه

در ادامه جزئیات مدل سازی بیان شده و نحوه ی اعمال نیروها؛ شرایط مرزی؛ پارامترهای زلزله و خاک و اصلاحات لازم جهت افزایش دقت در پاسخ ها، معرفی می شود.

برای انتقال کامل تنش ها و ایجاد یک مدل سازی کامل می بایست ۵ الی ۷ برابر طول پی را از جوانب پی مدل سازی کرد؛ بنابراین به دلیل استفاده از پی های تا حداکثر طول ۸ متر (با در نظر گرفتن ۲ متر از طرفین برای جداره های آزاد)، عدد ۱۰۰ متر، برای عرض کل مدل سازی در نظر گرفته شده است. بنابراین یک شبکه ی ۱۰۰ در ۸۰ تشکیل داده و ابعاد آن ۱۰۰ متر در طول و ۸۰ متر در عمق معرفی می شود.

۳-۵-۱ انتخاب ابعاد مدل

افراد مختلفی در مورد ابعاد بهینه برای مدل سازی در نرم افزار فلک تحقیق و مواردی را بیان کرده اند. در این بین پیشنهاد ارائه شده در شکل (۳-۷) مرسوم است.

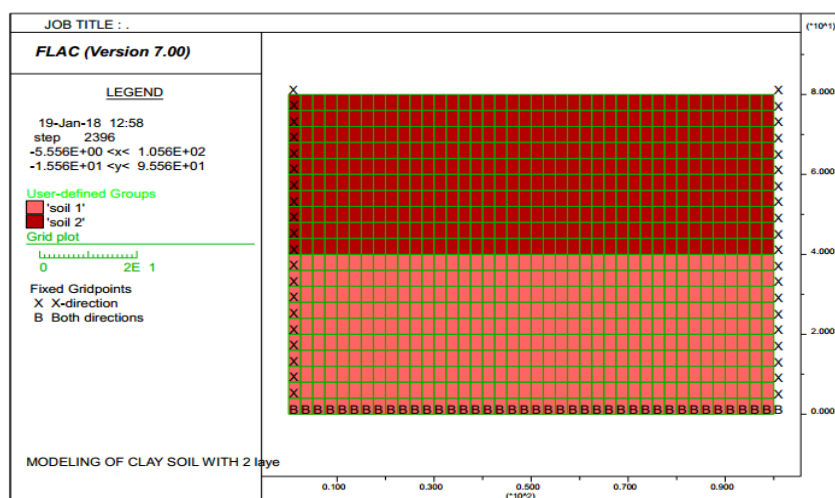


شکل (۳-۷) مدل پیشنهادی فلک برای ابعاد مدل [۲۷]

شکل (۳-۷) پیشنهاد رایج نرم افزار فلک برای پی ها و گودبرداری های سطحی را نشان می دهد.

نکته‌ی قابل‌ملاحظه این است که برای انتقال صحیح امواج می‌بایست طول هر مش از یک دهم سرعت موج در دل خاک کمتر باشد که این موضوع نیز مورد بررسی قرار گرفته است. به بیان دیگر برای انتقال صحیح امواج در یک مدل، اندازه‌ی المان‌ها بایستی کوچک‌تر از یک هشتم تا یک دهم طول موج بیشترین فرکانس باشد. لذا اندازه‌ی المان‌ها را یک متر در نظر می‌گیریم.

نکته قابل‌توجه دیگر این است که با توجه به زلزله‌ی اعمالی و فرکانس حداکثر موجود در ۵ زلزله مورد بررسی، این مقدار مورد استفاده قرار گرفته است و در صورت ایجاد تغییر در داده‌های ورودی، امکان نامعتبر شدن این مش بندی و نیاز به ایجاد تغییرات وجود دارد. سپس حل غیرخطی به توده‌ی خاک اختصاص داده می‌شود و پیش فرض مدل رفتاری، مدل الاستیک قرار می‌گیرد تا به وسیله آن از پایداری کلی سازه قبل از اعمال زلزله اطمینان حاصل شود. در ادامه گیرداری مرزها نیز اعمال می‌شود. خاک در مدل‌سازی اولیه از دو لایه با مشخصات یکسان به ضخامت ۸۰ متر و عرض ۱۰۰ متر تشکیل شده است. مدل‌سازی در دولایه این امکان را فراهم می‌کند تا در تحقیقات آتی تأثیر تغییر در لایه‌ها را بتوان بررسی کرد. در شکل (۸-۳) شرایط اولیه‌ی مدل‌سازی را مشاهده می‌کنیم:



شکل (۸-۳) مدل‌سازی توده‌ی خاک و گیردار کردن کناره‌ها در مدل‌سازی

۳-۵-۲ اعمال آب‌های زیرزمینی و اشباع کردن خاک

در این بخش از مدل‌سازی جریان مایع به توده‌ی خاک اعمال می‌شود.

نرم‌افزار فلک در بخش منوآل سیالاتی بیان می‌کند که ((جهت مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی زیر سطح آب را با اشباع‌شدگی آغازین کامل در نظر گرفته شود و برای بالای سطح آب خاک خشک فرض شود؛ در ادامه نرم‌افزار به صورت خودکار بالای سطح آب‌های زیرزمینی را به چند لایه تقسیم کرده و درجه اشباع‌های مختلف، تا رسیدن به صفر درصد را به صورت تدریجی اعمال خواهد کرد.))

شکل (۳-۹) درجه اشباع را در عمق‌های مختلف و با توجه به سطح آب زیرزمینی به عمق ۸ متر در مدل‌سازی اولیه را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۹) کانتورهای درجه‌ی اشباع با تراز آب زیرزمینی عمق ۸ متر.

در مدل‌سازی‌های مختلف سطح آب چهار مرتبه و در سطح زمین، وسط شمع، نوک شمع و مرز پایینی مدل اعمال می‌شود. بعد از اعمال درجه اشباع، فشار منفذی نیز اعمال خواهد شد. شایان ذکر است که فواصل تعیین‌شده تأثیری بر مقادیر نداشته و فقط جهت نشان دادن ترازها (کانتورها) است و در صورت ایجاد تنظیمات می‌توان فشارها را با دقت بیشتر نیز مشاهده کرد.

علاوه بر سطح اولیه آب، دو پارامتر k_x و k_z را معرفی می‌کنیم. به علاوه می‌دانیم که:

$$\sigma_{xx} = k_x (\sigma_{yy} + pp) - pp \quad (3-15)$$

$$\sigma_{zz} = k_z (\sigma_{yy} + pp) - pp \quad (3-16)$$

لازم به ذکر است که در نرم افزار فلک قرارداد بدین صورت است که تنش های فشاری به صورت منفی و فشار منفذی به صورت مثبت اعمال می شود.

k_x و k_z نیز برابر ۰,۶۵ قرارداد شده است.

k_x = ضریب تبدیل تنش در راستای X

k_z = ضریب تبدیل تنش در راستای Z

مقدار این ضرائب با توجه به پیشنهاد نرم افزار FLAC و رایج در اکثر پژوهش های مشابه انتخاب شده است.

نکته مهم در این رابطه این است که قبل استفاده از این تابع فیش، برنامه به حالت حل سیال درآمده باشد. در انتها برنامه، به صورت حل سریع سیالاتی اقدام به تحلیل مدل می کند.

۳-۶ مدل سازی پی و شمع و سازه

یکی از المان های کاربرد در نرم افزار فلک المان تیر است که به دلیل رفتار مشابه با رفتار پی های سطحی گاها در مدل سازی ها برای مدل کردن پی، از آن استفاده می شود. از مزایای این کار علاوه بر تسریع در مدل سازی می توان به اندرکنش بهتر بین پی و شمع و پی و خاک اشاره کرد.

در روش دیگر می توان چند گرهی موردنظر از خاک را تحت عنوان پی معرفی کرد و ویژگی های خاک را به آن اعمال کرد روش دوم در مورد پی های عمیق مناسب تر است.

مدل سازی در پی به ابعاد ۸×۸ متر از ۱۶ شمع و در ردیف ۴×۴ استفاده شده است. عمق شمع در مدل اولیه ۸ متر و قطر آن برابر ۰,۷ متر قرارداد می شود. با توجه به اعداد پیشنهادی در نرم افزار و مدل سازی های مشابه در سایر تحقیقات برای پی های منفرد و گروه شمع از سربارهایی بین صفر تا ۴۰ تن استفاده می شود.

در این حال در حین مدل سازی بایستی به موارد زیر نیز توجه شود:

نکته اول: برنامه‌ی فلک شمع را به‌عنوان یک المان اصلی شناخته و به‌طور خودکار اندرکنش بین خاک و شمع را رعایت کرده و لنگرهای وارد بر شمع را نیز محاسبه می‌کند. لذا نیازی به معرفی سطح مشترک نیست درعین‌حال برای بالاتر بردن دقت در مدل‌سازی بنابر آنچه در فصل سوم نیز بیان شد این مقدار را ده برابر سختی زون‌های مجاور در نظر گرفته و در برنامه لحاظ به صورت دستی لحاظ شده است.

نکته دوم: برای داشتن پاسخ‌های دقیق فلک توصیه می‌کند به تعداد ردیف‌هایی افقی که شمع از آن عبور می‌کند قطعه تعریف شود تا پاسخ‌ها دقیق‌تر شده و با تغییرات پارامترهای هر ناحیه (زون) تغییرات لازم لحاظ شود.

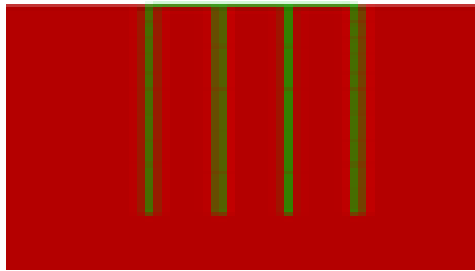
نکته سوم: برای مدل‌سازی صحیح بایستی بارها بر روی گره‌ها اعمال شوند و اعمال بار بر روی مش‌ها ایجاد خطا در پاسخ را به همراه دارد. در واقع بار به‌جای آنکه بر روی پی قرار بگیرد بر روی خاک قرار داده‌شده و اتصال نادرست خواهد بود.

نکته چهارم: بار اعمالی در چند مدل‌سازی مستقیماً بر روی تیرهای پی و در بیشتر مدل‌سازی‌ها بر روی تیرهای سازه قرار گرفته‌اند که تفاوت پاسخ‌ها اندک بوده و اعمال بار مستقیم بر روی پی باعث کاهش زمان تحلیل می‌شود. دلیل این تغییر اندک به جذب مقداری از نیرو توسط تیرهای سازه است.

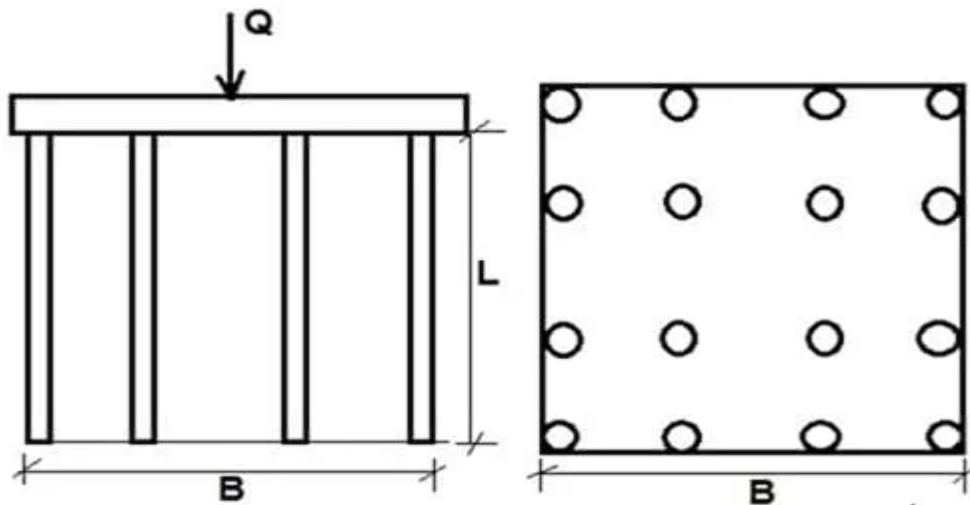
نکته پنجم: از امکان چرخش در تیر پایینی که در نقش پی سطحی است، جلوگیری شده که این عمل با واقعیت سازگاری دارد و در صورت تغییر شکل زیاد خاک؛ در واقع چرخش توده‌ی خاک می‌تواند باعث چرخش سازه شود اما خود پی در خاک گیردار فرض می‌شود.

نکته ششم: از یک سطح اشتراک بین خاک و پی استفاده‌شده است که موجب فراهم آمدن امکان بررسی بهتر کف پی می‌شود.

جزئیات مدل‌سازی شمع در شکل (۳-۱۰) و (۳-۱۱) قابل مشاهده است:



شکل (۳-۱۰) شمایی از مدل سازی شمع در خاک



شکل (۳-۱۱) جزییات مدل سازی شمع

۳-۷ اصلاح بار زلزله

در این جا می بایست زلزله ی مورد نظر را انتخاب کرده و اصلاحات لازم انجام شود؛ با توجه به این که تأثیر وجود آب به صورت تنش در مدل اعمال می شود برای همسان سازی در داده های ورودی به مدل بایستی زلزله هم به صورت تنش در نرم افزار مدل شود. برای این کار با توجه به سرعت نگاشت هر زلزله تنش نگاشت آن ها را به مدل اعمال می کنیم. با توجه به این که در انتهای زلزله های اعمالی سرعت صفر نیست و این باعث خطا در مدل می شود باید اصلاحاتی صورت گیر تا این مقدار در انتهای زلزله برابر صفر شود تا نیرویی به سازه اعمال نشود. همان طور که اشاره شد در صورت مش بندی درشت و یا حضور فرکانس های با مقادیر بالا دو راه حل فیلترینگ فرکانس ها و ریز کردن مش ها وجود داشت که با توجه به ریز بودن

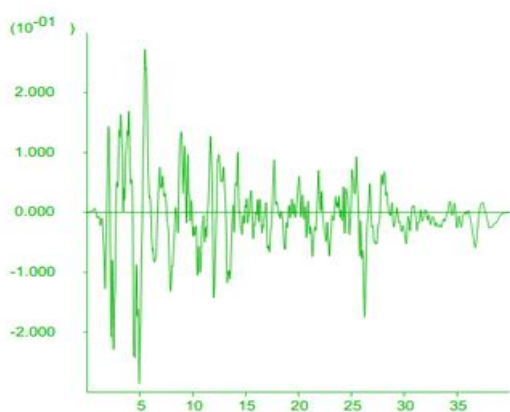
مش‌ها، مدل‌سازی از این موضوع بی‌نیاز است. برای طولانی نشدن زمان تحلیل فقط زمانی که زلزله تأثیر بالایی دارد را در نظر گرفته می‌شود (یعنی جاهایی که شتاب نزدیک صفر است را صرف‌نظر می‌کنیم). لذا اوایل و انتهای هر زلزله را که شتاب نزدیک صفر است را صرف‌نظر می‌کنیم.

در جدول (۱-۳) مشخصات زلزله و زمان آن‌ها در مدل‌سازی را مشاهده می‌کنیم:

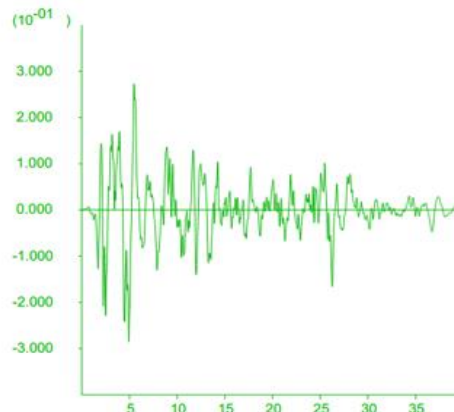
جدول (۱-۳) مشخصات زلزله‌های اعمالی به مدل

نام زلزله	بزرگا (ریشتر)	مدت زمان مدل‌سازی (ثانیه)	PGA (m/s^2)
بم	۶٫۶	۴۰	۵٫۷۹
طبس	۷٫۷	۱۶	۶٫۶۷
لوماپریتا	۷٫۴	۴۰	۴٫۳۶
ال سن‌ترو	۷٫۱	۴۰	۳٫۴۲
نورث‌ریج	۶٫۷	۴۰	۵٫۴۲

از شتاب‌نگاشت انتگرال گرفته‌شده تا به سرعت‌نگاشت معادل تبدیل شود.



(ب)



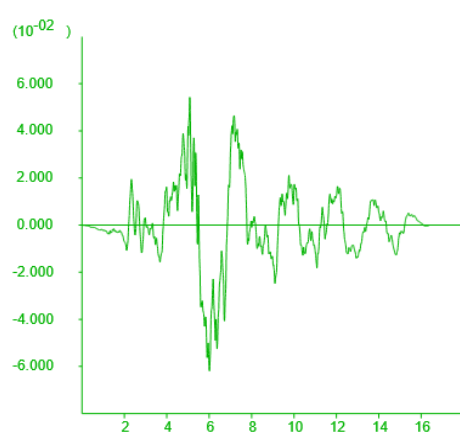
(الف)

شکل (۱۲-۳) سرعت‌نگاشت زلزله‌ی بم (الف) اصلاح نشده (ب) اصلاح شده

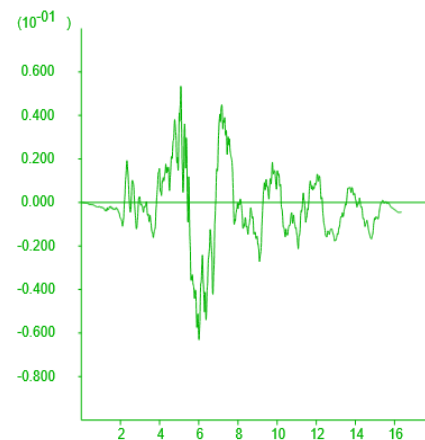
همان طور که در شکل (۳-۱۲) (الف) مشخص است تابع حاصل، در انتهای ۴۰ ثانیه مقداری بیش از صفر را اختیار کرده است که برای اصلاح این موضوع مقدار فوق را باید برابر صفر قرارداد تا در پایان ۴۰ ثانیه نیرویی به سازه وارد نشود. این مقدار در شکل فوق برابر با ۰,۱۴۴۹ متر بر ثانیه است. لذا با اضافه کردن یک موج سینوسی با بسامدهای پایین اقدام به اصلاح خط مبنا می شود.

شکل (۳-۱۵) (ب) سرعت نگاشت اصلاح شده را نشان می دهد.

به همین روش سایر زلزله های اعمالی به مدل را اصلاح می کنیم:

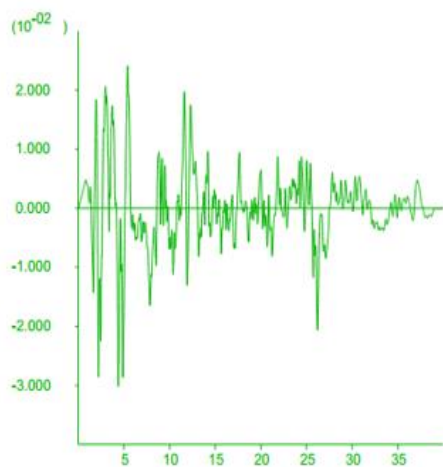


(ب)

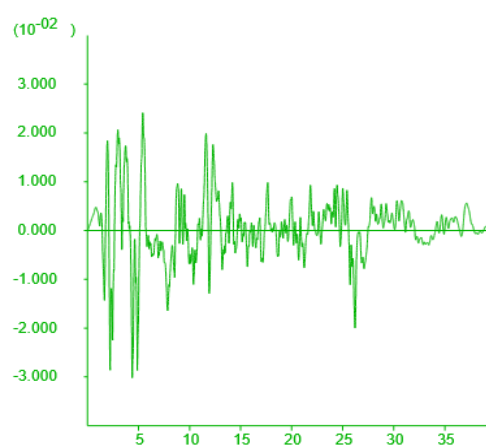


(الف)

شکل (۳-۱۳) سرعت نگاشت زلزله طبس (الف) اصلاح نشده (ب) اصلاح شده



(ب)



(الف)

شکل (۳-۱۴) سرعت نگاشت زلزله السنترو (الف) اصلاح نشده (ب) اصلاح شده

پس از انجام مرحله‌ی فوق دو مرحله‌ی بعدی اختصاص به حل نامیرای مدل به کمک مدل رفتاری الاستیک و حل نامیرای مدل به کمک مدل رفتاری موهر-کولمب دارد. در حل نامیرای الاستیک کرنش برشی و سرعت محاسبه‌شده و در حل نامیرای موهر-کولمب تقریبی از زمان گسیختگی مصالح به دست خواهد آمد.

فصل چهارم

تحلیل و بررسی نتایج

۱-۴ مقدمه

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد از عوامل مهم در افزایش نشست‌ها، سطح آب زیرزمینی است. به‌طوری‌که یکی از روش‌های رایج برای کاهش خطر، پایین آوردن سطح آب زیرزمینی به‌وسیله‌ی زهکش‌های افقی و قائم هست. در این فصل بنا داریم ضمن مدل‌سازی سیستم پی-شمع تحت بارگذاری‌های مختلف در سطوح آب زیرزمینی متفاوت، به تأثیر آب در افزایش مخاطرات پردازیم. برای مدل‌سازی از یک لایه خاک رس استفاده شده است که شمع و پی در این لایه قرار داشته و طول شمع‌ها نیز در تمامی مدل‌سازی‌ها ثابت و برابر ۸ متر خواهد بود جدول (۱-۴) و (۲-۴) ویژگی‌های رس و شمع مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول (۱-۴) پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی [۳۰]

پارامتر	لایه‌ی رس
عمق (متر)	۸۰
دانسیته (kg/m^3)	۱۹۰۰-۱۶۵۰
نسبت پواسون	۰٫۳
مدول بالک (مگا پاسکال)	۸۰۹
مدول برشی (مگا پاسکال)	۵۳
زاویه‌ی اصطکاک (درجه)	۱۹
چسبندگی (کیلو پاسکال)	۹۰

جدول (۴-۲) مشخصات شمع و پی مدل سازی

شمع	شالوده	پارامتر
۲۵۰۰	۲۵۰۰	$\gamma(\text{kg/m}^3)$
$۲,۵ \times ۱۰^۷$	۲×۱۰^۷	$E(\text{kpa})$
-----	۰,۵	$A(\text{m}^2)$

۴-۲ محاسبه ظرفیت باربری نهایی گروه شمع

با توجه به قطر و فاصله مرکز به مرکز گروه شمع مدل سازی شده ظرفیت باربری گروه شمع را محاسبه می کنیم.

محاسبه ظرفیت باربری گروه شمع:

$$Q_{ug} = Q_{Pg} + Q_{Sg} \quad (۴-۱)$$

$$Q_{ug} = \text{ظرفیت باربری نهایی گروه شمع}$$

$$Q_{Pg} = \text{ظرفیت باربری نوک گروه شمع}$$

$$Q_{Sg} = \text{ظرفیت باربری اصطکاکی گروه شمع}$$

$$Q_u = \alpha C_u P_g L + \gamma A_g C_u$$

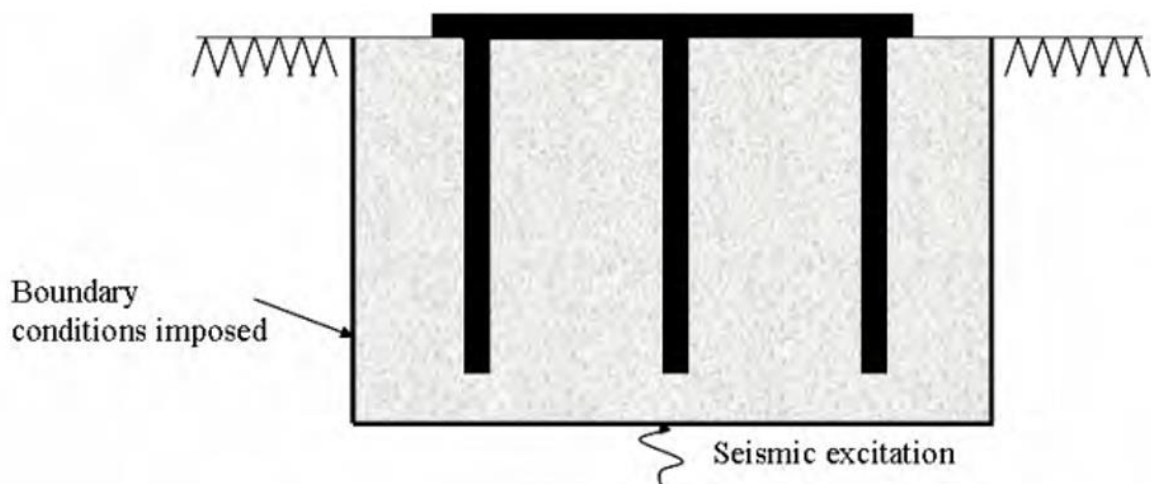
$$\text{با فرض } \alpha = ۰,۵ \text{ و } C_u = ۱۰۰$$

$$Q_u = (۰,۵ \times ۱۰۰ \times ۳۲ \times ۸) + (۹ \times ۶۴ \times ۱۰۰) = ۷۰۰۰۰ \text{ KN}$$

۴-۳ سربار شمع

سربار در مدل سازی های انجام شده صفر الی ۱۵ تن بر متر مربع بوده است. همچنین پی نیز به ابعاد ۸×۸ متر در نظر گرفته شده است.

شکل (۴-۱) به طور شماتیک محل اعمال زلزله، نوع اتصال شمع به پی و همچنین گیرداری مرزها را در مدل سازی نشان می دهد.

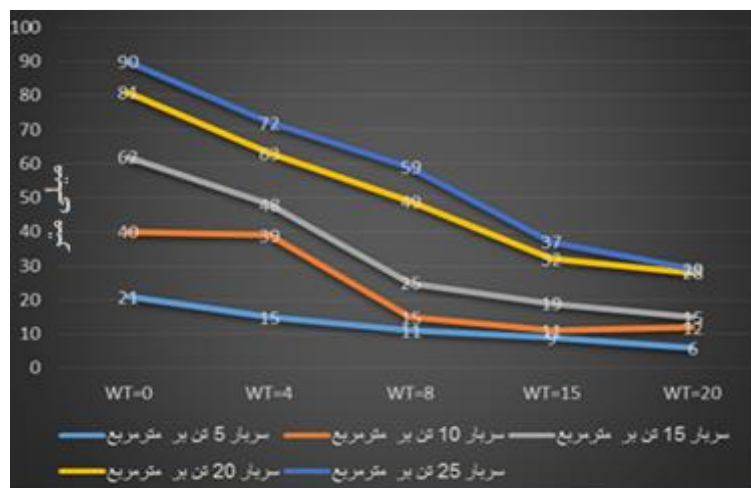


شکل (۴-۱) شمای اتصال شمع به پی [۲۷]

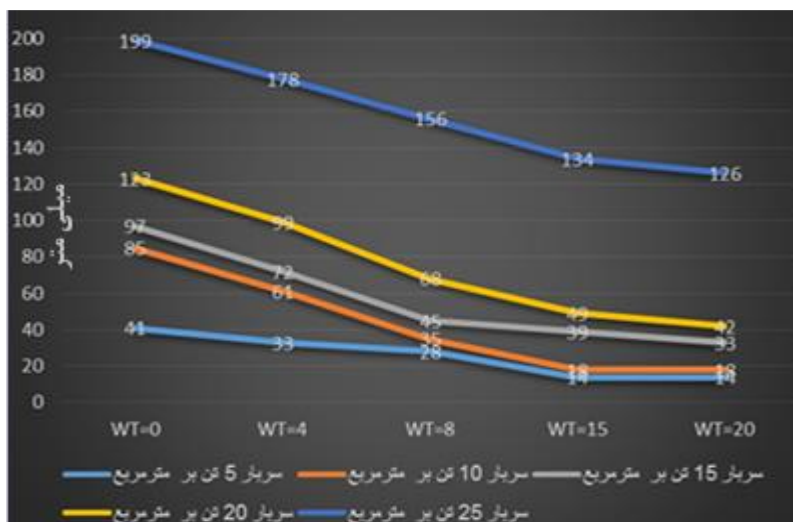
نکته شایان ذکر دیگر این است که سر شمع‌ها هم‌تراز با سطح زمین بوده است و از آنجاکه از المان تیر برای مدل‌سازی شمع‌ها استفاده شده است (و از مدل‌سازی حجمی پی‌ها به دلیل تمرکز بر روی شمع‌ها و عدم اهمیت رفتار پی در این مدل‌سازی صرف‌نظر شدن است) لذا شمع‌ها هم‌سطح زمین و متصل به پی است.

۴-۴ نشست‌های زیر پی در حضور شمع و تأثیرات سطح آب زیرزمینی

شکل‌های (۴-۲) تا (۴-۶) نمودار تغییرات نشست بر حسب میلی‌متر زیر گروه شمع 4×4 را بر حسب سربارهای مختلف و در سه وضعیت سطح آب هم‌تراز با سطح زمین، عمق ۴ متر، ۸ متر، ۱۵ متر و ۲۰ متر را نشان می‌دهد.



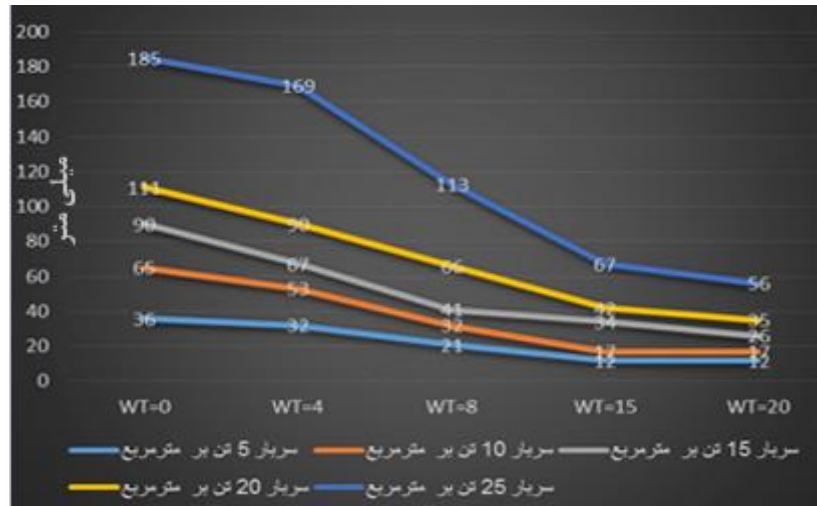
شکل (۲-۴) روند تغییرات نشست در زلزله ی بم



شکل (۳-۴) روند تغییرات نشست در زلزله ی طبس



شکل (۴-۴) روند تغییرات نشست در زلزله ی لوما پریتا



شکل (۴-۵) روند تغییرات نشست در زلزله‌ی نورث‌ریج



شکل (۴-۶) روند تغییرات نشست در زلزله‌ی السنترو

۴-۵ تحلیل نتایج

از تحلیل‌های فوق می‌توان نتایج زیر را استنباط کرد:

۱. به‌طور کل با کاهش عمق آب زیرزمینی نشست‌های طرفین پی کاهش می‌یابد.
۲. از آنجاکه بارگذاری متقارن بوده و پی مورد استفاده صلب است، لذا نشست‌ها متقارن بوده و امکان دوران سازه وجود ندارد و خرابی‌های احتمالی حاصل از نشست غیرمجاز خواهد بود.
۳. با توجه به شدت زلزله‌ی موجود، سواره کار اصلی برای جلوگیری از کاهش صدمات در سطح آب بالا افزایش تراکم؛ پایین بردن سطح آب زیرزمینی و استفاده از شمع با عمق و قطر مناسب هست.

۴. افزایش سربار باعث افزایش نشست خواهد شد و این افزایش نشست‌ها ممکن است به تخریب روسازه منجر شود.

۵. مهم‌ترین نکته‌ای که می‌توان از اشکال (۲-۴) الی (۶-۴) برداشت کرد این موضوع است که با افزایش عمق به بیش از مقطع پایینی شمع، تأثیر چندان‌ی در کاهش نشست‌ها مشاهده نمی‌شود بنابراین حد مناسب حداقلی برای کاهش سطح آب زیر پی را می‌توان نقطه پایینی شمع تعریف نمود.

۴-۶ تأثیر تراکم بر کاهش خطرات حین زلزله

افزایش تراکم از طریق افزایش مقدار دانسیته باعث کاهش خطرات به هنگام زلزله خواهد شد. اما این تراکم به روش‌های مختلف (از جمله تراکم قبل از احداث سازه با ماشین‌آلات) انجام می‌شود و به‌طور طبیعی، تمام توده‌ی خاک را در بر نمی‌گیرد. بنابراین در این بخش با ثابت در نظر گرفتن سایر شاخص‌ها از جمله زاویه‌ی اصطکاک و چسبندگی و فقط با تکیه بر افزایش دانسیته، مدل‌سازی‌ها را دوباره مورد تحلیل قرار داده‌ایم نتایج حاصل به شرح زیر است:

الف) به‌طور کلی افزایش تراکم به‌تنهایی تأثیر زیادی بر مقاومت خاک‌ها نداشته و با افزایش تراکم در گروه شمع 4×4 از ۱۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب مفروض با بار ۲۰ تن بر متر مربع و سطح آب ۴ متری، میزان نشست متوسط از ۶۲ میلی‌متر به نشست ۴۰ میلی‌متر در تراکم ۱۹۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب کاهش یافته است.

ب) تأثیر تراکم با افزایش سطح آب بیشتر می‌شود به‌طوری‌که با در نظر گرفتن سطح آب ۴ متر با افزایش تراکم در گروه شمع 4×4 (از ۱۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب مفروض با بار ۲۰ تن بر مترمربع) میزان متوسط نشست طرفین پی از ۸۱ میلی‌متر به ۵۸ میلی‌متر کاهش پیدا کرده است. این بدان معنا است که در محیط‌های با سطح آب زیرزمینی بالاتر حتماً لازم

است تراکم خاک را افزایش داد اما هرچه سطح آب پایین تر برود تأثیر تراکم کمتر خواهد شد.

ج) این مدل سازی ها در حالتی رخ داده که دانسیته در حالت اول ۱۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و در حالت دوم ۱۹۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده که حتی در حضور شمع نیز نشست های گاه ها زیادی و یا حتی بیشتر از مقدار مجاز را نشان می دهد. بنابراین برای خاک های رس بسیار سست با دانسیته ی کمتر از ۱۶۵۰ لازم است قبل از ساخت و ساز از تراکم خاک به وسیله ی ابزارهای کوبشی و ماشین آلات صنعتی استفاده کرده تا علاوه بر کاهش احتمالاتی از جمله احتمال تورم خاک رس، افزایش مقاومت و کمتر شدن میزان نشست ها را نیز مشاهده کنیم.

۴-۷ تأثیر گروه شمع و فاصله ی آن بر روی کاهش خطرات

تأثیر فاصله بر روی کاهش خطرات و افزایش ضریب اطمینان و همچنین طول بحرانی شمع در این بخش مورد بررسی قرار گرفته است. در اینجا با کاهش فاصله ی بین دو شمع و با فرض ثابت بودن طول پی بالای آن شمع رفتاری مشابه با دیوارهای پیوسته از خود نشان می دهد و لذا به طور طبیعی استحکام خاک و گروه شمع بیشتر شده اما این امر بدان معنا است که برای حفظ این یکپارچگی فاصله شمع های کناری با فضا های مدل نشده نیز باید به همان نسبت کاهش یافته و در نتیجه هزینه ی کلی اجرا افزایش چشمگیری خواهد داشت. از طرف دیگر نیز با کاهش فاصله می توان از طول شمع اجرایی کاست و بنابراین با توجه به هزینه ی زیاد احداث چاهک های عمیق در اجرای شمع یافتن وضعیت بهینه در هر اجرا مستلزم مدل سازی جداگانه ای خواهد بود.

باید در نظر داشته باشیم در مدل سازی این بخش (با توجه به اینکه با تغییر فاصله شمع ها طول و عرض پی تغییر می کند) از سربار گسترده استفاده نشده و به جای آن از سربار ۱۰ الی ۴۰ تن بر روی هر شمع استفاده شده است.

نکته دیگر اینکه جهت افزایش دقت در مدل سازی ظرفیت پی (به دلیل تغییر در ابعاد) صفر در نظر گرفته شده است.

نکته ی دیگر اینکه با افزایش فاصله ی شمع ها ظرفیت برشی در هر یک از شمع ها افزایش می یابد. این امر احتمالاً به این دلیل است که با کاهش فاصله ی سطح باربری هر کدام کمتر شده و هم زمان تراکم خاک اطراف نیز از حرکت توده خاک و ایجاد فشار برشی بر اندام شمع می کاهد.

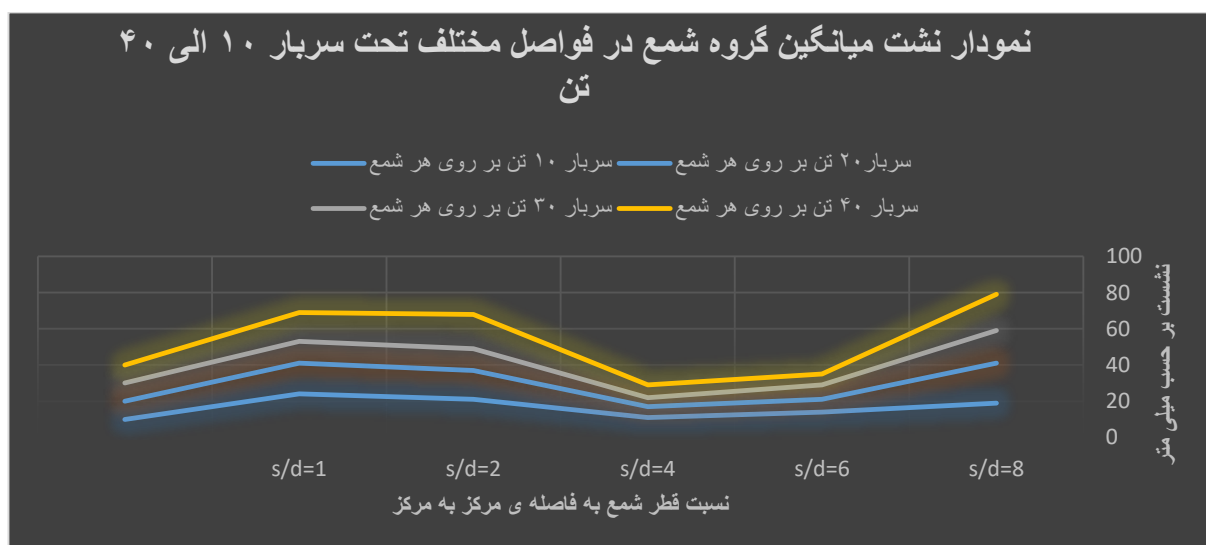
در صورتی که شمع به پی اتصال گیردار داشته باشد تأثیر کاهش فاصله کمتر به چشم می آید نسبت به زمانی که سر شمع آزاد باشد.

در اینجا چهار گروه مدل سازی انجام شده که در آن ها نسبت بار ثابت ۲۰ تن بر روی هر شمع با سطح آب زیرزمینی ۴ متر در فواصل $S/D=2$ ، $S/D=1$ ، $S/D=4$ ، $S/D=6$ و $S/D=8$ انجام شده است که در این حالات فاصله ی $4D$ کمترین نشست میانگین را به همراه دارد. فاصله های کمتر منجر به عدم استفاده ی صحیح از ظرفیت شمع ها و فواصل بیشتر نیز منجر به افزایش فشار بر پی و عدم توزیع مناسب نیرو در شمع ها می شود در واقع با افزایش فاصله به $S/D=6$ و بالاتر رفتار شمع ها به صورت تکی بوده و از گروه شمع خارج می شوند.

با افزایش فاصله ی شمع ها در گروه شمع میزان جابه جایی و لنگرهای ایجاد شده افزایش می یابد. همچنین میزان فشار آب حفره ی و زمان لازم برای زایل شدن فشار آب حفره ی نیز افزایش می یابد. منحنی به دست آمده برای گروه شمع 4×4 با فاصله ی مختلف بین شمع ها برای زلزله ی بم در شکل (۴-۸) نشان داده شده است. برای یک بار مشخص، تغییر مکان

گروه شمع با نسبت $S/D=4$ کمتر است درحالی که برای گروه شمع‌های با نسبت $S/D=2$ ، تغییر مکان بزرگ‌تری مشاهده می‌شود. این اختلاف به دلیل اثر سایه‌ای است که ناشی از تداخل مناطق تنش است.

در فاصله‌های بسته‌ی گروه شمع، ($S/D=2$ و 1) هنگامی که شمع‌ها تحت بار جانبی سیکلی رفت و برگشتی قرار می‌گیرند، به دلیل تداخل تنش‌ها، کل ستون خاکی که بین شمع‌ها قرار دارد، با حرکت گروه شمع‌ها همانند یک بلوک منفرد در نیمه‌ی اول بار سیکلی در یک جهت و در نیمه‌ی دوم بار سیکلی در جهت دیگر حرکت می‌کنند. به هم‌ریختگی بلوک خاک بین شمع‌ها تحت بارهای جانبی سیکلی در فاصله‌ی بسته‌ی گروه شمع باعث کاهش مقاومت خاک شده و همین امر سبب به وجود آمدن تغییرشکل‌های بزرگ می‌شود. در واقع با افزایش فاصله‌ی بین شمع‌ها، تداخل مناطق تنش کاهش پیدا کرده و این امر منجر به افزایش ظرفیت باربری جانبی گروه شمع می‌شود. به بیان دیگر در یک گروه شمع هر چه فاصله محور به محور شمع‌ها کاهش یابد اثرات اندرکنش بیشتر شده و ضریب اندرکنش سینماتیک افزایش می‌یابد. این افزایش به علت تداخل امواج بین شمع‌های گروه و اثر آن بر روی پاسخ سر شمع است.

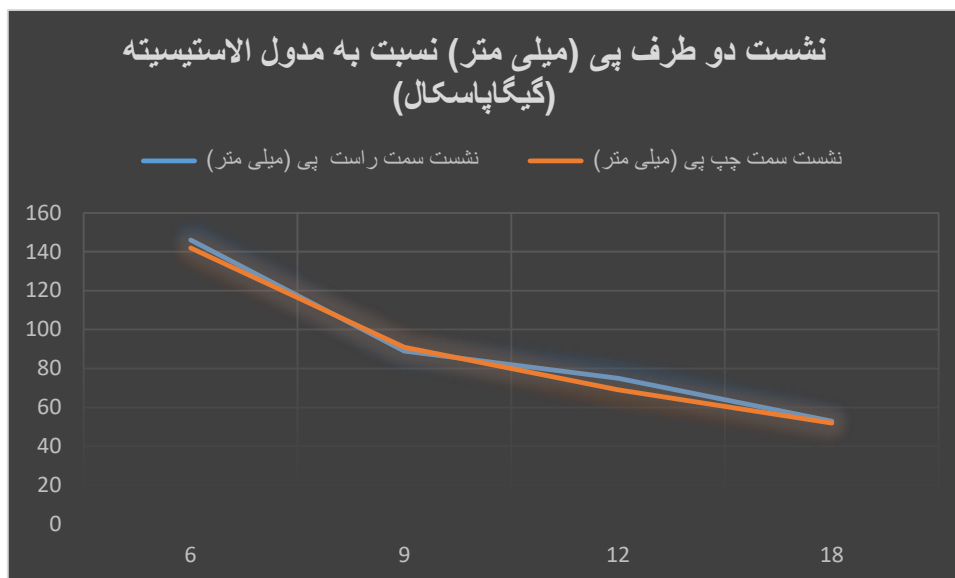


شکل (۴-۷) نمودار میانگین نشست بر حسب فاصله شمع‌ها

همین مدل‌سازی‌ها به صورت موردی با سر شمع آزاد نیز انجام و مشخص شده است که اگر سر شمع آزاد باشد تغییرات بیشتر خواهد شد به عبارتی در صورتی که شمع به پی اتصال گیردار داشته باشد تأثیر کاهش فاصله کمتر به چشم می‌آید نسبت به زمانی که سر شمع آزاد باشد. این امر احتمالاً بدان دلیل است که یکپارچگی و صلبیت گروه شمع کاهش یافته و در اغتشاش تنش‌های خاک در هنگام زلزله مقاومت کمتری را نشان می‌دهد.

۴-۸ تأثیر مدول الاستیسیته بر مدل

با افزایش مدول الاستیسیته در واقع شمع را سخت‌تر کرده‌ایم. همان گونه که می‌دانیم افزایش سختی منجر به کاهش فشار وارد بر شمع شده و نیروهای عکس‌العملی نیز به سمت پایین شمع بیشتر می‌شوند به همین دلیل می‌توان استفاده از سر گیردار را به دلیل انتقال بهتر نیرو از بالا به سمت پایین شمع بهتر دانست این انتقال بهتر نیرو به افزایش بهره‌وری شمع منجر می‌شود. همچنین این افزایش سختی باعث افزایش زمان محاسبات نیز می‌شود. نکته قابل‌بیان دیگر است که افزایش سختی شمع‌ها تأثیری بر روی کاهش نشست‌ها ندارد. در شکل (۴-۹) مشاهده می‌شود که افزایش این پارامتر تنها بر توزیع بهتر نیرو بر روی شمع و افزایش توان باربری آن مؤثر است اما نشست‌ها توسط افزایش قطر شمع و یا کاهش بارگذاری یا فاصله میسر خواهد بود. در مدل‌سازی زیر شمع 4×4 با قطر ۰,۷ متر و سربار ۱۰ تن بر مترمربع بر روی هر یک از شمع‌ها تحت بارگذاری طبس قرار گرفت است.



شکل (۴-۸) تأثیر مدول الاستیسیته بر نشست پی

لازم به ذکر است که جهت ایجاد تمایز واضح و مشخص بین حالات مختلف از سربار زیاد و شمع‌های با عمق نسبتاً کم و خاک متوسط استفاده شده است حال اینکه تمامی این مقادیر بیش از نشست‌های مجاز بوده و الزاماً تنها کاربرد مقایسه‌ای دارد.

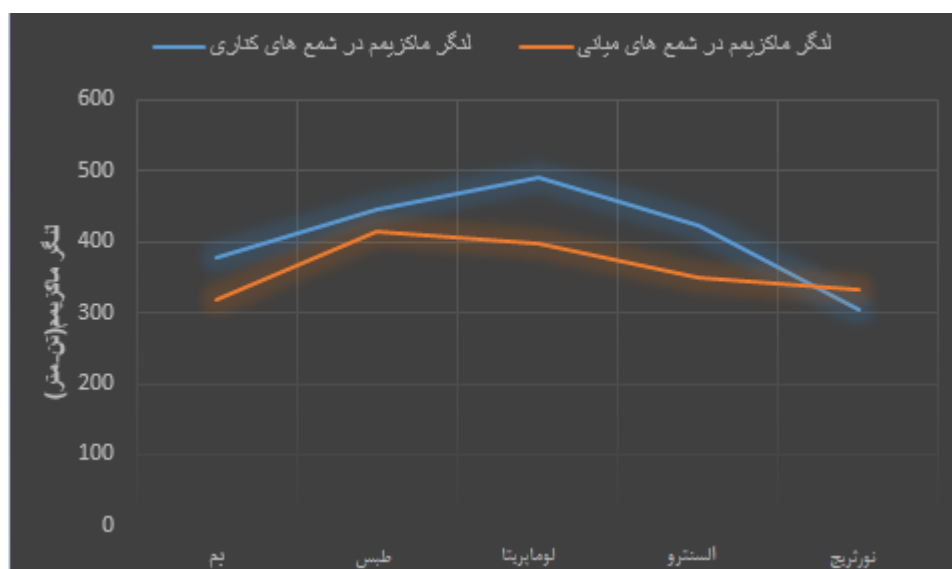
به بیان دیگر هر چه سختی خاک نسبت به شمع کمتر باشد یعنی خاک نرم‌تر باشد، اختلاف بین رفتار الاستیک و پلاستیک بیشتر می‌شود. این افزایش به خصوص در فرکانس‌های پایین ارتعاش محسوس‌تر است.

۴-۹ مقادیر لنگر خمشی و نیروی برشی در گروه شمع

با در نظر گرفتن خاک رس معمولی طبیعی است که نیروهای وارده بر سطح شمع افزایش یابد. شکل‌های (۴-۱۰) تا (۴-۱۱) نیروهای برشی و لنگر خمشی بر شمع‌های میانی و کناری را با در نظر داشتن سطح آب ۴ متر (وسط شمع) و سرباری برابر با ۱۰ تن بر متر مربع نشان می‌دهد.

جدول (۳-۴) لنگر ماکزیمم در شمع‌های میانی و کناری

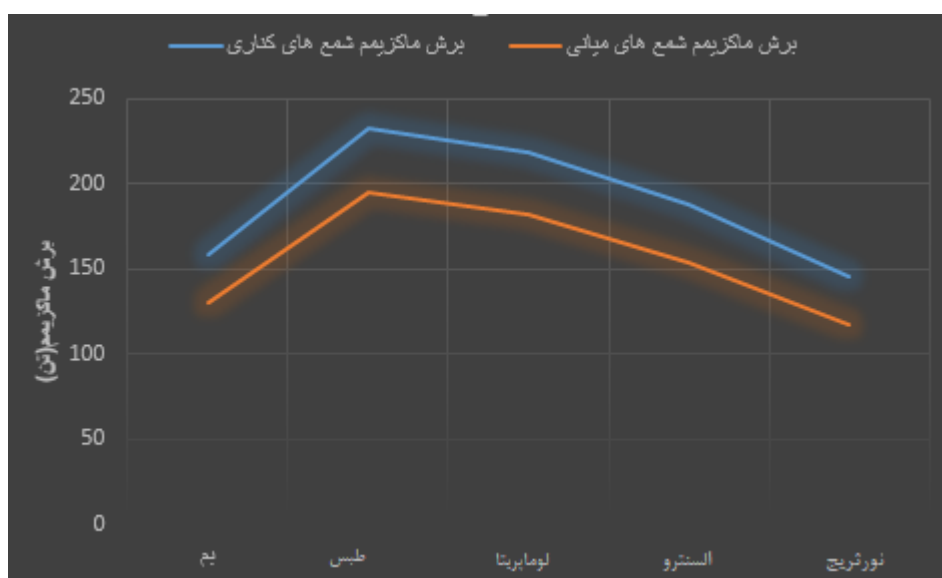
نام زلزله	لنگر ماکزیمم در شمع‌های میانی (kg.m) $\times 10^3$	لنگر ماکزیمم در شمع‌های کناری (kg.m) $\times 10^3$
بم	۳۱۸	۳۷۹
طیس	۴۱۵	۴۴۵
لوماپریتا	۳۹۸	۴۹۰
ال سنترو	۳۵۰	۴۲۲
نورثریج	۳۳۳	۳۰۵



شکل (۴-۹) مقایسه لنگر ماکزیمم در شمع‌های کناری و میانی

جدول (۴-۴) برش ماکزیمم در شمع‌های میانی و کناری

نام زلزله	برش ماکزیمم در شمع‌های میانی Ton	برش ماکزیمم در شمع‌های کناری Ton
بم	۱۳۰	۱۵۸
طبس	۱۹۵	۲۳۲
لوماپریتا	۱۸۲	۲۱۹
ال سنترو	۱۵۴	۱۸۸
نورثریچ	۱۱۷	۱۴۶



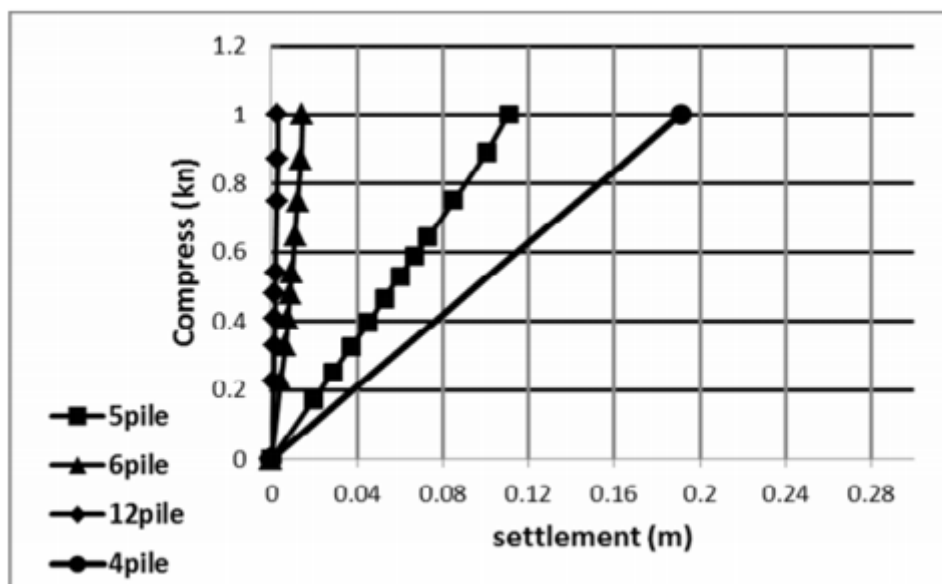
شکل (۴-۱۰) مقایسه برش ماکزیمم در شمع‌های کناری و میانی

با توجه به نتایج به دست آمده، لنگر و برش ماکزیمم شمع‌های کناری به صورت محسوسی از شمع‌های میانی بیشتر است. لذا در طراحی‌ها این مورد باید مورد توجه قرار بگیرد.

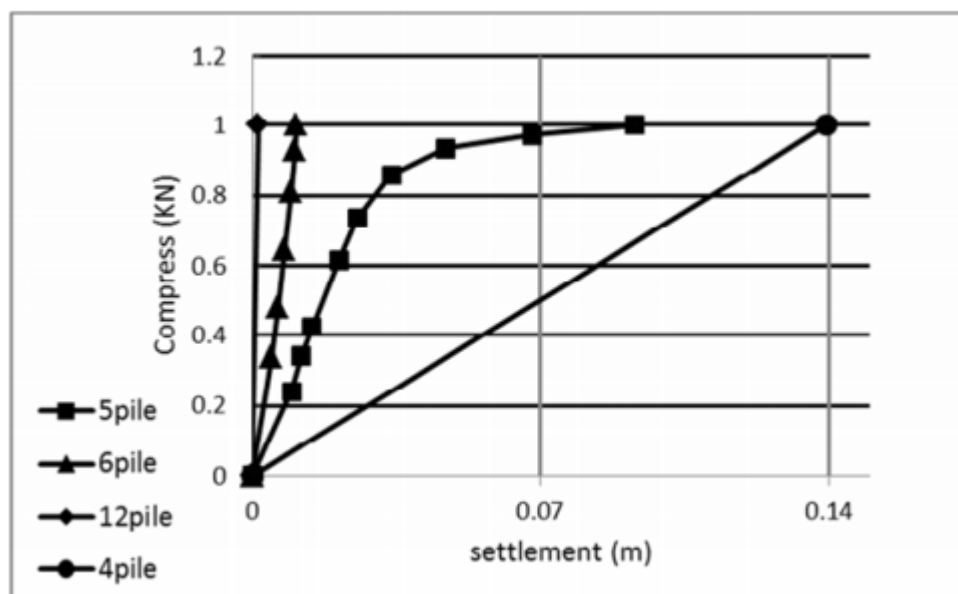
۱۰-۴ صحت سنجی

جعفری و حمیدی فر [۳۱] با استفاده از نرم افزار 3D-PLAXIS 1.6 و روش حل عددی، به بررسی عملکرد شمع- رادیه در خاک‌های رسی که تحت اثر نشست زمین ناشی از افت سطح سفره‌های آب زیرزمینی قرار گرفته است، پرداختند.

آنها بیان کردند مدل‌های شمع - رادیه برای چهار حالت گروه چهار، پنج شمعی، گروه شش شمعی و گروه دوازده شمعی طراحی و نشست هر کدام در ترازهای مختلف آب زیرزمینی محاسبه گردید. نتایج حاکی از این است که عملکرد شمع رادیه مدل ۶ شمعی بهتر از مدل‌های ۴ و ۵ شمعی است و نسبت به ۱۲ شمعی اقتصادی‌تر به نظر می‌رسد. شکل‌های (۴-۱۲) و (۴-۱۳) نتایج حاصل از پژوهش آنها را نشان می‌دهد.

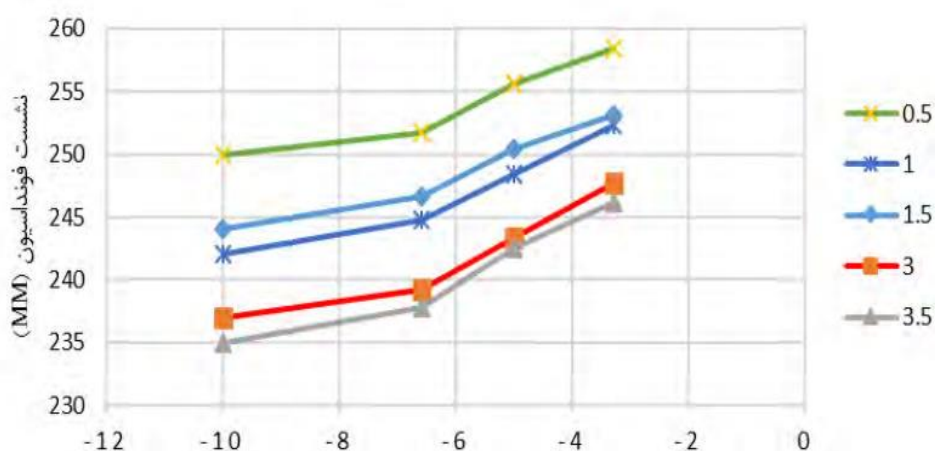


شکل (۴-۱۱) نمودار بار-جابجایی گروه شمع با تراز آب زیرزمینی ۰,۵ متر [۳۱]



شکل (۴-۱۲) نمودار بار-جابجایی در گروه شمع با تراز آب زیرزمینی ۲,۵ متر [۳۱]

مرتضی مرنندی و مرضیه خسروی [۳۲] نیز به بررسی تأثیر فاصله مرکز به مرکز میکرو شمع‌ها نسبت به قطر آن‌ها پرداختند. آن‌ها بیان کردند که میکروپایل به‌عنوان شمع بدون جابجایی با قطر کمتر از ۳۰ سانتی‌متر، تشکیل شده از دوغاب تزریق‌شده یا قرار گرفته در آن و شامل نوعی از تسلیح فولاد برای مقاومت در برابر بار طراحی معرفی شده است. میکروپایل‌ها به روش‌هایی که کمترین آسیب را به خاک و سازه و محیط اطراف خود وارد آورند اجرا می‌گردند. و شکل (۴-۱۴) را ارائه داده‌اند.



شکل (۴-۱۳) تأثیر فاصله بین شمع‌ها در کاهش نشست زیر پی [۳۲]

در مجموع با مقایسه نتایج به دست آمده و مقایسه آن‌ها با پژوهش‌های انجام شده و با توجه به تغییر در مشخصات خاک و شمع‌های مورد استفاده می‌توان از انسجام خوب بین نتایج به اعتبار آن‌ها پی برد.

فصل پنجم

نتیجه گیری

۵-۱ مقدمه

در این پژوهش تأثیر بار زلزله و همچنین تغییر سطح آب زیرزمینی در گروه شمع بتنی 4×4 در خاک رس در نظر گرفته شد. علاوه بر این تأثیر تغییر پارامترهایی نظیر تراکم، نسبت فاصله به قطر گروه شمع و مدول الاستیسیته نیز بررسی شد.

۵-۲ نتایج

نکات زیر از مدل‌سازی‌ها قابل‌مشاهده است.

۱- در مجموع مدل‌سازی‌ها شمع‌های کناری نیروی برشی مقادیر بیشتری را نسبت به شمع‌های میانی متحمل می‌شوند بنابراین در خاک‌های رس خصوصاً در رس‌های غیر متراکم می‌بایست بارگذاری‌ها به‌گونه‌ای باشد که ضریب اطمینان بیشتری برای شمع‌های کناری لحاظ شده به‌طوری‌که در توزیع بارهای ساختمان نسبت بار شمع‌های میانی به شمع‌های کناری در حدود ۱,۲ باشد بنابراین می‌توان توزیع غیریکنواخت شمع را برای مدل‌سازی توصیه کرد به‌طوری‌که فاصله بین شمع‌های کناری و میانی کمتر شده و فاصله بین شمع‌های میانی قدری بیشتر شود.

۲- در مورد سطح آب زیرزمینی از آنجا که نیمه‌ی پایینی شمع، خاک اشباع بوده و نیمه‌ی بالایی آن خشک است مشاهده می‌شود که نیروی برشی وارد بر سطح شمع‌ها به‌شدت در نیمه‌ی اشباع شمع کمتر بوده و دلیل آن را در روان‌تر بودن خاک در حالت اشباع می‌توان جستجو کرد.

۳- در مورد لنگر نیز قابل‌مشاهده است که در شمع‌ها جهت لنگر، حدوداً در میانه‌های شمع عوض شده است.

۴- در یک مدل‌سازی واحد، با افزایش قطر شمع، مقاومت و سختی شمع در مقابل نیروهای استاتیکی و دینامیکی افزایش یافته، بنابراین نیرو و ممان خمشی مؤثر جداره کاهش می‌یابد

۵-افزایش سختی شمع که نشان‌دهنده صلبیت نسبی شمع نسبت به خاک است موجب کاهش دامنه شتاب و جابجایی سر شمع می‌شود این بیان را می‌توان بر اساس اثر تثبیت‌کنندگی شمع و ممانعت از حرکت آزادانه ذرات خاک توجیه کرد.

۶-افزایش سختی شمع منجر به افزایش لنگرهای تولیدشده در شمع می‌شود و این به این معنا است که لزوماً با قوی‌تر کردن مقطع شمع در طراحی‌ها در جهت اطمینان نیست.

۷-افزایش طول شمع باعث افزایش لنگر در سر شمع می‌شود یعنی دقتی در محل اتصال سر شمع و کلاهک گروه شمع

۸-افزایش قطر شمع باعث کاهش دامنه شتاب و جابجایی سر شمع شده و تأثیر مثبت دارد ولی باعث می‌شود که لنگر سر شمع افزایش یابد.

۹- از آنجا که از تنش‌نگاشت در مدل‌سازی‌ها استفاده شود مشاهده می‌شود که PGA تنها پارامتر مهم در زلزله نبوده و مدت زمانی که زلزله شدید رخ می‌دهد در کنار شدت آن تأثیرگذار است به‌طوری‌که گاهی زلزله بم با PGA کمتر نشست‌های بیشتری را نسبت به زلزله نورث‌ریج با بزرگای بیشتر، نشان می‌دهد.

۱۰. در مورد آب‌های زیرزمینی مشاهده شد که کاهش سطح آب‌های زیرزمینی هرچند افزایش نیروی برشی و لنگر خمشی را بر روی شمع‌ها منجر شده است با این حال به دلیل اندرکنش بهتر بین خاک خشک و شمع، لذا پایداری سازه بالاتر رفته و از آنجا که سطوح پایین‌تر از کف شمع، تأثیر زیادی بر روی پاسخ‌ها ندارد لذا پیشنهاد بر این است ساخت‌وساز در مناطقی انجام شود که سطح آب حداقل به‌اندازه‌ی طول شمع پایین باشد، و یا اینکه از ریز شمع‌های با طول کمتر و تعداد بیشتر (به دلیل ارتباط کمتر با خاک اشباع) استفاده شود.

۱۱- حالت بحرانی برای عملکرد شمع - رادیه سطح آب برابر با سطح زمین است به این دلیل که با افزایش درصد رطوبت مقدار مدول الاستیسیته خاک به شدت کاهش می‌یابد.

۱۲- تأثیر کاهش سطح آب زیرزمینی تنها تا رسیدن به عمق کف شمع مؤثر بوده و از آنجا به بعد تأثیر آن به شدت کاهش می‌یابد.

۱۳- دلیل افزایش نشست‌ها در سربار ۲۵ تن بر متر مربع در زلزله طبس رسیدن به ظرفیت نهایی شمع‌های کناری و گسیختگی در بعضی از مش‌ها بوده که باعث واگرایی در پاسخ‌ها شده است.

۱۴- به‌طور کلی می‌توان گفت از آنجاکه هم گروه شمع و هم خاک رس رفتارهای پیچیده‌ای دارند لذا اندرکنش بین این دو نیز همواره پیچیده و مورد سؤال است. در این پژوهش موارد مختلفی از جمله سطح آب زیرزمینی؛ سربار سازه و سربار همسایه؛ پارامترهای خاک و هندسه شمع؛ پارامترهای زلزله و سایر موارد هر کدام جداگانه تغییر یافته تا تأثیر آن‌ها در مدل شناسایی شود.

در مورد آب‌های زیرزمینی مشاهده شد که کاهش سطح آب‌های زیرزمینی هرچند افزایش نیروی برشی و لنگر خمشی را بر روی شمع‌ها منجر شده است با این حال به دلیل اندرکنش بهتر بین خاک خشک و شمع، لذا پایداری سازه بالاتر رفته و از آنجاکه سطوح پایین‌تر از کف شمع، تأثیر زیادی بر روی پاسخ‌ها ندارد لذا پیشنهاد بر این است ساخت‌وساز در مناطقی انجام شود که سطح آب حداقل به اندازه‌ی طول شمع پایین باشد، و یا اینکه از ریز شمع‌های با طول کمتر و تعداد بیشتر (به دلیل ارتباط کمتر با خاک اشباع) استفاده شود.

در مورد پارامترهای زلزله نیز از آنجاکه این امر اختیاری نبوده لذا می‌بایست همواره بحرانی‌ترین حالت را مدنظر داشته اما با این حال افزایش زمان پیک زلزله می‌توان نشست‌ها را افزایش دهد و از طرفی نیز بیشترین نشست در زمان اوج زلزله که بیشترین شتاب را در طیف خود نشان می‌دهد، رخ خواهد داد.

در مورد پارامترهای خاک نیز پر واضح است که مهم‌ترین عامل تراکم خاک بوده به‌طوری‌که تراکم خاک فارغ از تغییر در سایر پارامترها بیشترین تأثیر را بر کاهش مخاطرات دارد. در مجموع در اندرکنش بین خاک و شمع و آب حرکت به‌سوی ریز شمع‌های با قطر و عمق کمتر اما تعداد بیشتر جوابگو بوده و از آنجاکه غالباً در کناره‌ها بنا بر تأثیر سایه گاه‌ها لنگر بیشتری مشاهده می‌شود لذا می‌توان در اطراف از شمع‌های تنومند و در مرکز از ریز شمع‌ها به جهت انتقال بهتر نیرو استفاده کرد. همچنین فاصله شمع‌ها نیز $S/D=4$ الی $S/D=6$ پیشنهاد می‌شود.

۵-۳ پیشنهادها:

با توجه به گستردگی مباحث در بحث شمع‌ها پیشنهاد می‌شود محققین موضوعاتی را برای تکامل بحث فوق مورد بررسی قرار دهند. اولاً با توجه به تأثیر چشم‌گیر استفاده از شمع‌ها، بررسی تغییرات ابعاد و ویژگی‌های مقاومتی شمع بر نشست‌های زیر پی مورد بررسی قرار گیرد. دوماً به دلیل آنکه غالباً ساخت‌وسازها مجاور هم بوده و امکان تأثیرپذیری نشست‌ها از سربارهای مجاور نیز وجود دارد، تحقیقات بر روی اثر وجود سربار مجاور در حالات و جهات مختلف بر روی نشست‌های زیر پی انجام شود. سوماً می‌توان در فلک زهکش‌های قائم و افقی را مدل‌سازی کرد، بنابراین امکان بررسی تأثیر قرار دادن زهکش بر کاهش نشست‌ها بر اثر پایین آمدن سطح آب از دیگر موضوعات قابل بررسی خواهد بود. سایر موضوعات پیشنهادی:

۱- بررسی عملکرد پی شمعی با تعداد شمع کوتاه و شمع بلند که در زیر کلاهک قرار گرفته‌اند.

۲- بررسی عملکرد رفتار گروه شمع با تمرکز شمع‌ها در زیر مرکز کلاهک

۳- بررسی ظرفیت باربری دینامیکی پی شمعی تحت زلزله متفاوت

۴- بررسی ظرفیت باربری استاتیکی پی شمعی با شمع‌های مایل

۵- بررسی عملکرد پی شمعی با شمع‌هایی با مقطع متغییر در خاک‌های چسبنده

۶- بررسی ترکیب ریز شمع‌ها با شمع‌های معمول در کاهش نشست‌های زیر پی

منابع

منابع:

- [۱] بررسی تأثیر تغییر سطح آب زیرزمینی بر روی ضریب اطمینان؛ ماهرانی، احسان. سلطان، فضل‌الله. نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی "شمع‌های مدفون در خاک‌های رسی تحت اثر بارهای قائم. عمران، اصفهان، ۱۳۹۱
- [۲] داس، ام، براجا، اصول مهندسی ژئو تکنیک، ترجمه طاحونی، ش، انتشارات مترجم، ۱۹۸۴.
- [۳] خوشنودی، فرامرز، ۱۳۸۱، اثر اندرکنش سینماتیک بر روی رفتار لرزه‌ای شمع منفرد،/ولین کنفرانس ایمن‌سازی و بهسازی سازه ها، تهران، دانشگاه امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، عمران
- [4] Fioravante, V., and Giretti, D. 2010. Contact versus noncontact piled raft foundation. Canadian Geotechnical Journal, 47, pp. 1271-1287.
- [5] Saeedi Azizkandi, A., et al. "Centrifuge modeling of non-connected piled raft system." International Journal of Civil Engineering 13.2 (2015): 114-123
- [6] Poulos, H.G. (1991), "Analysis of Piled Strip Foundations", Proc. of the 7th Int. Con. on Computer Methods and Advances in Geomechanics/Cairns/6-10 May 1991 : Computer methods and advances in geomechanics. Rotterdam Balkema. 183-191
- [7] Clancy, P. and Randolph, M.F. (1993), "An Approximate Analysis Procedure for Piled Raft Foundations", Int. J. Numer. and Analytical Methods in Geomech., London, 17(12), 849-869.
- [8] Russo, G. (1998), "Numerical Analysis of Piled Rafts", Int. Journ ,Analytical and Numerical Methods in Geomechanics, 22(6): 477-493.
- [9] Kim, K. N., Lee, S. H., Kim, S. K., Chung, C. K., Kim, M. M., and Lee, H. S. (2001), "Optimal Pile Arrangement for Minimizing Differential Settlements in Piled Raft Foundations", Computers and Geotechnics 28: 235-253.
- [10] Kitiyodom P, Matsumoto T. (2002), "A simplified analysis method for piled raft and pile group foundations with batter piles". Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 2002; 26:1349–1369.
- [11] Davis, E.H. and Poulos, H.G. (1972), "The Analysis of Piled Raft Systems", Aust. Geomechs.J. , G2: 21-27.
- [12] Butterfield, R. and Banerjee, P.K. (1971), "The Elastic Analysis of Compressible Piles and

- [13] Mendonca A.V., Paiva J.B.. “A Bboundary Element Method for the Static Analysis of Raft Foundations on Piles”. Engng Anal Bound Elem 2000; 24:237– 247. Elsevier.
- [14] Poulos, H.G. (1994), “An Approximate Numerical Analysis of Pile- Raft Interaction”, Int. J. Numer. And Analytical Methods in Geomech., London, 18(2), 73-92.
- [15] Hooper, J.A. (1973), “Observations on the Behavior of a Piled-Raft Systems”, Geotechnique, 28 (1): 65-83.
- [16] Hassen G., Buhan P., (2006), “Elasto-plastic Multiphase Model for Simulating the Response of Piled Raft Foundations Subject to Combined Loadings”, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 2006; 30:843–864.
- [17] Ottaviani, M. (1975), Three Dimensional Finite Element Analysis of Vertically Loaded Pile Groups”, Geotechnique 25, no.- 2, 159-174.
- [18] Sanctis, L D., Mandolini, A., (2006), “Bearing Capacity of Piled Raft on Soft Clay Soil”, Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, ASCE, vol. 132, no.-12, pp.1600-1610
- [19] Novak J.L, Reese L.C., Wang S.T. (2005), “Analysis of Piled Raft Foundation with 3D Finite Element Method” Structures, ASCE
- [20] Hain, S. J. & Lee, I. K. (1978), “The Analysis of Flexible Raft-Pile Systems”, Géotechnique 28, No.1, 65-83.
- [21] Franke, E., Lutz, B. and El-Mossallamy, Y. (1994), “Measurements and Numerical Modelling of High-Rise Building Foundations on Frankfurt Clay”, Geot. Spec. Pub. 40, ASCE, 2: 1325-1336, New York: American Society of Civil Engineers.
- [22] Russo, G. (1998), “Numerical Analysis of Piled Rafts”, Int. Journ. Analytical and Numerical Methods in Geomechanics, 22(6): 477-493
- [23] Mendonca A.V., Puiva J.B, (2003), “An Elastostatic FEM/BEM Analysis of Vertically Loaded Eaft and Piled Raft Foundation”, Engineering Analysis with Boundary Elements 27 (2003) 919–933, Elsevier.

[۲۴] مصطفی پسران بهبهانی ؛ «شناخت و ارزیابی ساختگاه»، ماهنامه فنی تخصصی دانشنما، شماره

پیاپی، ص ۱۷۲-۱۷۳ (۱۳۸۸)

- [25] Schmertmann J.H. Static cone to compute static settlement over sand, Journal of the Soil Mechanicsand Foundations Division, ASCE, No. 3, Vol. 961970, pp. 1011-1043.

- [26] wahls, h. "tolerable settlement of buildings"
j.geotech.Engrg.,10.1061/(asce)07339410, 1495-1496.(1981)
- [27] Itasca (2002)."Flac_Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions",Version2.1 Users Manual ,Itasca Consulting Group, Minnesota,USA.
- [28] Lysmer, J., & Kuhlemeyer, R. L. (1969). Finite dynamic model for infinite media. Journal of the Engineering Mechanics Division, 95(4), 859-878.
- [29] Vermeer.P.,A.,Borst,R.,"Non-associated Plasticity for soils."Concrete and Rock, Heron, Vol.29,No.3,pp.1-64,1984.
- [30] Swiss Standard SN 670 010b, Characteristic Coefficients of soils, Association of Swiss Road and Traffic Engineers

[۳۱] بهمن جعفری، حسین حمیدی فر؛ «بررسی عددی تأثیر تعداد شمع و تغییرات تراز آب زیر زمینی بر نشست سیستم شمع- رادیه با استفاده از نرم افزار پلکسیس» تهران؛ ایران؛ موسسه هنر و کشاورزی (۲۰۱۶).

[۳۲] مرتضی مرندی، مرضیه خسروی فر؛ «تأثیر تغییر سطح آب زیر زمینی بر نشست گروه میکروپایل در خاک های چسبنده و غیر چسبنده»؛ کنفرانس بین المللی مهندسی عمران و معماری و سازه های شهری؛ تبریز؛ ایران (۱۳۹۴).

Abstract:

In recent years, numerous studies have been done on the effect of earthquake load on the behavior of pile-soil interaction. Considering the importance of this issue, much research is still under way. Among these investigations, the presence of water on the dynamic behavior of the pile-clay group and the effects of strain softening can be mentioned.

In this research, the effect of groundwater level on settlement in the pile group as well as the moment on the pile group, considering the interaction between the pile-clay group has been investigated, And a comparison between different earthquakes, as well as the effects of density of soils has been investigated. The study was carried out in a 4×4 concrete pile group on a layer of medium clay. According to the results, the effect of water surface and earthquake magnitude have a significant effect on the settlement and bending strength of the pile group. Also, soil compaction can greatly reduce the settlement.

Keywords: pile group-soil interaction, earthquake, groundwater level



Faculty of Civil Engineering
M.Sc. Thesis in Geotechnical Engineering

**Interaction of pile group-clay in seismic behavior of concrete
pile group considering ground water**

By: Majid Shahnazi Moghadam

Supervisor:

Dr. Amir Bazrafshan Moghadam

Feb 2018