



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست
پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

مطالعه رفتار شالوده‌های تقویت شده با ژئوگرید تحت اثر بارهای سیکلی افقی

نگارنده
شکوفه صادقی فرد

استاد راهنما
دکتر سید مجدالدین میرمحمد حسینی

زمستان ۱۳۸۶

بسمه تعالی
فرم اطلاعات پایان نامه
کارشناسی ارشد و دکترا



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)
معاونت پژوهشی

تاریخ: ۸۷/۸/۱۳
پیوست: دارد

نام و نام خانوادگی: شکوفه صادقی فرد	دانشجوی: آزاد
شماره دانشجویی: ۸۴۱۲۴۰۲۸	دانشکده: عمران و محیط زیست
رشته تحصیلی: مهندسی ژئوتکنیک	
نام و نام خانوادگی استاد راهنما: آقای دکتر سید مجدالدین میرمحمد حسینی	
عنوان پایان نامه به فارسی: بررسی رفتار شالوده‌های تقویت شده با ژئوگرید تحت بارهای سیکلی افقی	
عنوان پایان نامه به انگلیسی: Study the behaviour of reinforcement ground by geogrid under horizontal cyclic loading	
نوع پروژه: کارشناسی ارشد و کاربردی	
تاریخ شروع: ۸۵/۷/۱	تاریخ خاتمه: ۸۶/۱۲/۲۵
تعداد واحد: ۳۴	
سازمان تأمین کننده اعتبار: -	
واژه‌های کلیدی به فارسی: ظرفیت باربری، شالوده سطحی، بارهای سیکلی افقی، مسلح کننده، ژئوگرید.	
واژه‌های کلیدی به انگلیسی: Bearing capacity, shallow foundation, horizontal cyclic loading, reinforcement, geogrid	
نظرها و پیشنهادهای به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه:	
استاد راهنما:	
دانشجو:	
امضاء استاد راهنما:	
تاریخ: ۸۷/۸/۱۳	
نسخه ۱: معاونت پژوهشی	
نسخه ۲: کتابخانه و به انضمام دو جلد پایان نامه به منظور تسویه حساب با کتابخانه و مرکز اسناد و مدارک علمی	

چکیده

آسیبهای جدی وارده به ساختمان‌ها در طی زلزله‌های شدید یا حتی متوسط عموماً به علت ضعف خاک برای نگهداری بارهای وارده هستند. در نبود یک ظرفیت باربری مناسب، بسیاری از پی‌ها چرخش‌های نامطلوب، نشست‌های ناگهانی و حتی واژگونی ساختمان را تجربه می‌کنند در این صورت لازم است تا اینگونه شالوده‌ها به نحوی تقویت شوند. یکی از مناسب‌ترین راه‌ها جهت تقویت خاک که طی چند سال گذشته بسیار نیز متداول شده است، تسلیح خاک به کمک ژئوسینتتیک‌ها (پارچه‌گونه‌ها) می‌باشد. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در خصوص رفتار (ظرفیت باربری و نشست) شالوده‌های سطحی مسلح با انواع پارچه‌گونه‌ها انجام شده که از جنبه‌های گوناگون به بررسی پارامترهای مؤثر در تسلیح شالوده‌های سطحی و میزان اثرگذاری هرکدام از این عوامل (طول، تعداد، عمق قرارگیری و ...) پرداخته‌اند. عمده این تحقیقات مربوط به فعالیت‌های آزمایشگاهی کوچک مقیاس تحت بارهای قائم استاتیکی و اندک شماری از آنها مربوط به بارگذاری سیکلی قائم می‌باشند. متأسفانه تا کنون تحقیق جامعی در خصوص رفتار شالوده‌های سطحی مسلح یا حتی غیرمسلح تحت بارهای سیکلی افقی به عمل نیامده است.

در این پژوهش ضمن تدقیق مدل عددی ساخته شده در محیط نرم‌افزاری *FLAC* با نتایج و داده‌های آزمایشگاهی حاصل از بررسی شالوده تحت بارهای قائم استاتیکی در دو حالت مسلح و غیرمسلح، به مطالعه پارامتریک مدل عددی در شرایط مختلف تسلیح تحت بارهای سیکلی افقی پرداخته شده است. نتایج بررسی‌ها در حالت استاتیکی نشان دهنده سازگاری مناسب مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی در هر دو شرایط غیرمسلح و مسلح بوده است.

در مطالعه پارامتریک انجام شده روی مدل عددی تحت بارهای سیکلی افقی، ضمن بررسی ظرفیت باربری شالوده در حالت قائم میزان توان باربری افقی شالوده نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این راستا با تعریف کمیتی به نام فاکتور ظرفیت باربری افقی (*HBCR*) که از جهاتی قابل مقایسه با فاکتور ظرفیت باربری در جهت قائم (*BCR*) می‌باشد؛ اثر پارامترهای مختلف مثل عمق قرارگیری، تعداد و طول مسلح‌کننده، دامنه نوسان و تعداد سیکل‌های بارگذاری، بر ظرفیت باربری شالوده و توان باربری افقی آن در مقابله با نیروهای محرک لغزشی مورد تحلیل قرار گرفته است.

فهرست مطالب

فصل اول - مقدمه.....	۲
۱-۱- کلیات.....	۲
۲-۱- بیان مسئله.....	۵
۳-۱- اهداف پژوهش.....	۶
۴-۱- فصل‌های مختلف پایان‌نامه.....	۷
فصل دوم- بررسی رفتار شالوده‌های سطحی غیرمسلح و مسلح تحت بارهای دینامیکی.....	۹
۱-۲- مقدمه.....	۹
۲-۲- مروری بر مطالعات انجام شده روی رفتار دینامیکی شالوده‌های غیرمسلح.....	۱۱
۳-۲- مروری بر مطالعات انجام شده روی ظرفیت‌باربری شالوده‌های مسلح.....	۱۸
۱-۳-۲- ظرفیت‌باربری شالوده‌های مسلح در حالت استاتیکی.....	۱۹
۲-۳-۲- ظرفیت‌باربری شالوده‌های مسلح در حالت دینامیکی.....	۲۹
۴-۲- نتیجه‌گیری.....	۴۲
فصل سوم- آشنایی با مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار <i>FLAC</i>	۴۵
۱-۳- مقدمه.....	۴۵
۲-۳- جزئیات روش تحلیلی مورد استفاده در نرم‌افزار <i>FLAC</i>	۴۶
۳-۳- مراحل مدل‌سازی و نحوه کار با نرم‌افزار <i>FLAC</i>	۴۷
۴-۳- تعیین شرایط تعادل به هنگام استفاده از نرم‌افزار <i>FLAC</i>	۴۸

۵۰	۵-۳-المان‌های کششی در <i>FLAC</i>
۵۵	۶-۳-انتخاب مدل رفتاری مصالح.....
۵۵	۱-۶-۳-مدل الاستیک همسان.....
۵۵	۲-۶-۳-مدل الاستیک همسان عرضی.....
۵۶	۳-۶-۳-مدل دراگر-پراگر.....
۵۶	۴-۶-۳-مدل موهر-کولمب.....
۵۶	۵-۶-۳-مدل <i>Ubiquitous-Joint</i>
۵۶	۶-۶-۳-مدل <i>Strain-Hardening / Softening</i>
۵۷	۷-۶-۳-مدل <i>Cam-Clay</i> اصلاح شده.....
۵۷	۷-۳-آنالیز دینامیکی.....
۵۸	۱-۷-۳-شرایط مرزی.....
۶۱	۲-۷-۳-میرایی مکانیکی.....
۶۴	۳-۷-۳-انتقال موج در مدل.....
۶۵	فصل چهارم-مدل‌سازی اولیه و مقایسه تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی.....
۶۵	۱-۴-مقدمه.....
۶۶	۲-۴-فعالیت‌های آزمایشگاهی انجام شده.....
۶۶	۱-۲-۴-دستگاه آزمایش.....
۶۷	۲-۲-۴-مصالح.....
۷۰	۳-۲-۴-نتایج آزمایش‌های استاتیکی انجام شده.....
۷۲	۳-۴-ایجاد هندسه مدل.....
۷۲	۱-۳-۴-ابعاد مدل.....
۷۳	۲-۳-۴-ابعاد المان‌ها.....
۷۴	۳-۳-۴-مدل خاک.....
۷۶	۴-۳-۴-مدل پی.....
۷۶	۵-۳-۴-شرایط مرزی.....
۷۷	۶-۳-۴-ایجاد تنش‌های اولیه.....
۷۹	۴-۴-معتبرسازی تحلیل عددی تحت بارگذاری قائم استاتیکی.....
۸۰	۱-۴-۴-شالوده غیر مسلح.....
۸۴	۲-۴-۴-شالوده مسلح.....
۸۸	۵-۴-بررسی تأثیر مقدار تراکم خاک بر فاکتور ظرفیت باربری.....
۹۰	۶-۴-آماده‌سازی مدل عددی برای تحلیل دینامیکی.....
۹۰	۱-۶-۴-کنترل انتقال موج.....
۹۱	۲-۶-۴-انتخاب میرایی.....
۹۲	۳-۶-۴-تعریف شرایط مرزی.....
۹۲	۴-۶-۴-اعمال بارگذاری دینامیکی.....
۹۳	۵-۶-۴-نمایش پاسخ مدل.....
۹۵	فصل پنجم-مطالعه ظرفیت باربری شالوده‌های سطحی مسلح تحت بارهای سیکلی افقی.....

۹۵.....	۱-۵- مقدمه.....
۹۶.....	۲-۵- روش کار.....
۱۰۲.....	۳-۵- تعداد سیکل‌های بارگذاری.....
۱۰۲.....	۱-۳-۵- شالوده غیرمسلح و دامنه نوسان بارگذاری ۰/۵۵ میلی‌متر.....
۱۰۷.....	۲-۳-۵- شالوده غیرمسلح و دامنه نوسان بارگذاری ۱/۱۰ میلی‌متر.....
۱۱۰.....	۳-۳-۵- شالوده مسلح و دامنه نوسان بارگذاری ۰/۵۵ میلی‌متر.....
۱۱۵.....	۴-۳-۵- شالوده مسلح و دامنه نوسان بارگذاری ۱/۱۰ میلی‌متر.....
۱۲۰.....	۵-۳-۵- جمع‌بندی تحلیل‌های انجام شده.....
۱۲۶.....	۴-۵- تعداد لایه‌های مسلح‌کننده.....
۱۲۷.....	۱-۴-۵- یک لایه مسلح‌کننده.....
۱۳۰.....	۲-۴-۵- دو لایه مسلح‌کننده.....
۱۳۵.....	۳-۴-۵- سه لایه مسلح‌کننده.....
۱۴۰.....	۴-۴-۵- چهار لایه مسلح‌کننده.....
۱۴۳.....	۵-۴-۵- جمع‌بندی تحلیل‌های انجام شده.....
۱۵۱.....	۵-۵- طول لایه‌های ژئوگرید.....
۱۵۲.....	۱-۵-۵- ژئوگرید به طول ۹ سانتی‌متر.....
۱۵۴.....	۲-۵-۵- ژئوگرید به طول ۱۸ سانتی‌متر.....
۱۵۶.....	۳-۵-۵- ژئوگرید به طول ۳۶ سانتی‌متر.....
۱۵۷.....	۴-۵-۵- جمع‌بندی تحلیل‌های انجام شده.....
۱۶۳.....	۶-۵- عمق قرارگیری مسلح‌کننده.....
۱۶۴.....	۱-۶-۵- عمق قرارگیری ۲ سانتی‌متر ($\frac{u}{B} = 0/22$).....
۱۶۷.....	۲-۶-۵- عمق قرارگیری ۴ سانتی‌متر ($\frac{u}{B} = 0/44$).....
۱۶۷.....	۳-۶-۵- عمق قرارگیری ۶ سانتی‌متر ($\frac{u}{B} = 0/67$).....
۱۷۰.....	۴-۶-۵- عمق قرارگیری ۸ سانتی‌متر ($\frac{d}{B} = 0/89$).....
۱۷۲.....	۵-۶-۵- جمع‌بندی تحلیل‌های انجام شده.....
۱۸۱.....	فصل ششم- نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای ادامه کار.....
۱۸۱.....	۱-۶- مقدمه.....
۱۸۲.....	۲-۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....
۱۸۵.....	۲-۶- پیشنهاد برای مطالعات آینده.....
۱۸۷.....	فصل هفتم- مراجع.....

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- موارد استعمال گوناگون خاک مسلح در مهندسی ژئوتکنیک..... ۳
- شکل ۱-۲- دیوار بارانداز از عهد امپراتوری روم..... ۴
- شکل ۱-۳- دیوار مسلح ابداع شده توسط Vidal..... ۵
- شکل ۱-۲- مکانیزم گسیختگی حلزونی ارائه شده توسط Bundhu..... ۱۲
- شکل ۲-۲- مکانیزم گسیختگی ارائه شده توسط Paolucci..... ۱۳
- شکل ۲-۳- نحوه توزیع تنش در آنالیز کران پائین Kumar..... ۱۴
- شکل ۲-۴- فاکتورهای ظرفیت باربری N_{qE} و $N_{\gamma E}$ به دست آمده از حل‌های کران بالا و پائین..... ۱۴
- شکل ۲-۵- واژگونی ساختمان طی زلزله سپتامبر سال ۱۹۸۵ در Mexico City..... ۱۶
- شکل ۲-۶- نشست ساختمان طی زلزله سپتامبر سال ۱۹۸۵ در Mexico City..... ۱۷

- شکل ۷-۲- بارگذاری برون محور وارد بر سیستم مسلح یک شالوده ماسه‌ای..... ۲۲
- شکل ۸-۲- منحنی‌های بار بر واحد سطح $q_{R(e)}$ در مقابل نشست..... ۲۴
- شکل ۹-۲- ظرفیت باربری نهایی $q_{uR(e)}$ در مقابل $\frac{e}{B}$ ۲۵
- شکل ۱۰-۲- نمودار R_{KR} در مقابل $\frac{e}{B}$ برای مقادیر مختلف $\frac{d_f}{B}$ ۲۶
- شکل ۱۱-۲- نمودار مقدار میانگین α_1 در مقابل $\frac{e}{B}$ ۲۶
- شکل ۱۲-۲- پارامترهای هندسی مرتبط با نحوه قرارگیری ژئوگرید در تسلیح خاک فونداسیون..... ۳۰
- شکل ۱۳-۲- شکل کلی بارگذاری گذرا بر روی فونداسیون..... ۳۲
- شکل ۱۴-۲- تغییرات q_d و s_d در مقابل زمان t ($N = 1/0$)..... ۳۳
- شکل ۱۵-۲- تغییرات $\frac{S_{d(ult)}}{s_u}$ در مقابل $\frac{q_{d(max)}}{q_u}$ ۳۴
- شکل ۱۶-۲- تغییرات فاکتور کاهش نشست با $\frac{q_{d(max)}}{q_u}$ ۳۶
- شکل ۱۷-۲- شکل کلی بارگذاری دینامیکی..... ۳۷
- شکل ۱۸-۲- تغییرات دامنه نوسان بارگذاری با زمان..... ۳۷
- شکل ۱۹-۲- تغییرات نشست فونداسیون با زمان..... ۳۷
- شکل ۲۰-۲- تغییرات $\frac{S_d}{B}$ با تعداد سیکل‌های بارگذاری برای چند نمونه از تست‌های انجام شده..... ۳۸
- شکل ۲۱-۲- روند تغییرات $\frac{S_{du}}{B}$ با $\frac{q_d}{q_{ur}}$ ۳۹
- شکل ۲۲-۲- شکل کلی تغییرات $\frac{S_d}{B}$ با n ۴۰
- شکل ۲۳-۲- منحنی $\frac{S_{du}}{B}$ در مقابل $\frac{q_{dmax}}{q_{uR}}$ برای مقادیر مختلف $\frac{q_s}{q_{uR}}$ ۴۱
- شکل ۱-۳- ترتیب محاسبات به روش صریح..... ۴۷
- شکل ۲-۳- مشخصات مورد نیاز جهت معرفی المان کابل..... ۵۱
- شکل ۳-۳- نحوه مدل‌سازی رفتار برشی مصالح ملات اطراف المان کابل..... ۵۲

- شکل ۳-۴- رفتار مصالح ملات در المان کابل.....۵۳
- شکل ۳-۵- مدل آنالیز لرزه‌ای سازه‌های سطحی در شرایط مرزی میدان آزاد.....۶۰
- شکل ۳-۶- تغییرات نسبت میرایی بحرانی بی‌بعد بر حسب فرکانس زاویه‌ای.....۶۳
- شکل ۴-۱- طرح کلی دستگاه آزمایش.....۶۷
- شکل ۴-۲- منحنی دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در آزمایش‌ها.....۶۸
- شکل ۴-۳- دوایر موهر حاصل از انجام آزمایش سه‌محوری روی خاک ماسه‌ای شالوده مورد مطالعه.....۶۸
- شکل ۴-۴- نمودار تنش- کرنش حاصل از انجام آزمایش سه‌محوری روی خاک شالوده مورد مطالعه.....۶۹
- شکل ۴-۵- نمودار تنش- کرنش ژئوگرید مورد استفاده حاصل از آزمایش کشش مستقیم.....۷۰
- شکل ۴-۶- منحنی ظرفیت باربری شالوده غیرمسلح مورد آزمایش.....۷۱
- شکل ۴-۷- منحنی ظرفیت باربری شالوده مسلح مورد آزمایش.....۷۱
- شکل ۴-۸- حباب‌های تنش قائم ایجاد شده در خاک شالوده مورد مطالعه در حالت استاتیکی.....۷۳
- شکل ۴-۹- شکل کلی مش‌بندی مدل عددی در محیط نرم‌افزاری *FLAC*.....۷۴
- شکل ۴-۱۰- کانتورهای تنش قائم ناشی از وزن خاک.....۷۸
- شکل ۴-۱۱- نحوه تغییرات نیروی نامتعادل در طول زمان تحلیل تحت بار ثقلی.....۷۹
- شکل ۴-۱۲- منحنی تنش قائم تحمل شده توسط شالوده غیرمسلح در مقابل نشست در حالت استاتیکی.....۸۲
- شکل ۴-۱۳- نحوه توزیع بردارهای تغییرمکان در شالوده غیرمسلح در حالت اعمال بار قائم استاتیکی.....۸۳
- شکل ۴-۱۴- زون‌های پلاستیک تشکیل شده در شالوده غیرمسلح در حالت بارگذاری قائم استاتیکی.....۸۳
- شکل ۴-۱۵- منحنی تنش قائم تحمل شده توسط شالوده مسلح در مقابل نشست در حالت استاتیکی.....۸۶
- شکل ۴-۱۶- نحوه توزیع بردارهای تغییرمکان در شالوده مسلح در حالت اعمال بار قائم استاتیکی.....۸۶
- شکل ۴-۱۷- زون‌های پلاستیک تشکیل شده در شالوده مسلح در حالت بارگذاری قائم استاتیکی.....۸۷
- شکل ۴-۱۸- نحوه توزیع نیروی محوری در المان کابل (ژئوگرید) در حالت اعمال بار قائم استاتیکی.....۸۷
- شکل ۴-۱۹- نحوه توزیع تغییرشکل‌های برشی در المان کابل در حالت استاتیکی.....۸۸
- شکل ۴-۲۰- مقادیر فاکتور ظرفیت باربری به دست آمده در دانسیته‌های مختلف.....۸۹
- شکل ۴-۲۱- نمایش موج سینوسی وارده برای ۱۰ سیکل بارگذاری.....۹۴
- شکل ۵-۱- منحنی بار- نشست شالوده غیرمسلح برای سربار استاتیکی یک سوم ظرفیت باربری استاتیکی.....۹۷
- شکل ۵-۲- منحنی بار- نشست شالوده مسلح برای سربار استاتیکی یک سوم ظرفیت باربری استاتیکی.....۹۷

- شکل ۳-۵- توزیع نیروی محوری کششی در لایه ژئوگرید در شالوده مسلح پس از اعمال تغییرمکان اولیه.....۹۸
- شکل ۴-۵- ارتباط تنش قائم ایجاد شده در زیر پی با دامنه اعمال بارگذاری.....۹۹
- شکل ۵-۵- ارتباط تنش افقی ایجاد شده در زیر پی با دامنه اعمال بارگذاری.....۹۹
- شکل ۶-۵- نمودارهای تنش قائم و افقی تولید شده در زیر پی در مقابل مقدار تغییرمکان اعمال شده.....۱۰۰
- شکل ۷-۵- مقادیر تنش قائم و افقی تولید شده در زیر پی با افزایش مقدار تغییرشکل افقی اعمال شده۱۰۱
- شکل ۸-۵- ظرفیت باربری نهایی شالوده غیرمسلح در مقابل نشست، دامنه نوسان بارگذاری ۰/۵۵ میلی‌متر.....۱۰۴
- شکل ۹-۵- تنش افقی شالوده غیرمسلح در مقابل تغییرشکل افقی، دامنه نوسان بارگذاری ۰/۵۵ میلی‌متر.....۱۰۶
- شکل ۱۰-۵- ظرفیت باربری و تنش افقی برای شالوده غیرمسلح و دامنه نوسان بارگذاری ۰/۵۵ میلی‌متر.....۱۰۷
- شکل ۱۱-۵- تنش افقی شالوده غیرمسلح در مقابل تغییرشکل افقی، دامنه نوسان بارگذاری ۱/۱ میلی‌متر.....۱۰۹
- شکل ۱۲-۵- ظرفیت باربری شالوده غیرمسلح و تنش افقی تحمل شده، دامنه نوسان بارگذاری ۱/۱۰ میلی‌متر.....۱۱۰
- شکل ۱۳-۵- تنش افقی در مقابل تغییرشکل افقی در شالوده مسلح و دامنه نوسان بارگذاری ۰/۵۵ میلی‌متر.....۱۱۲
- شکل ۱۴-۵- ظرفیت باربری و تنش افقی در شالوده مسلح و دامنه نوسان بارگذاری ۰/۵۵ میلی‌متر.....۱۱۳
- شکل ۱۵-۵- توزیع نیروی محوری کششی در لایه ژئوگرید برای دامنه نوسان بارگذاری ۰/۵۵ میلی‌متر.....۱۱۴
- شکل ۱۶-۵- نیروی محوری ژئوگرید در مقابل سیکل‌های بارگذاری برای دامنه نوسان بارگذاری ۰/۵۵ میلی‌متر.....۱۱۵
- شکل ۱۷-۵- تنش افقی در مقابل تغییرشکل افقی در شالوده مسلح و دامنه نوسان ۱/۱۰ میلی‌متر.....۱۱۷
- شکل ۱۸-۵- تغییرات ظرفیت باربری و تنش افقی شالوده مسلح در دامنه نوسان بارگذاری ۱/۱۰ میلی‌متر.....۱۱۸
- شکل ۱۹-۵- تغییرات ماکزیمم نیروی محوری در ژئوگرید برای دامنه نوسان بارگذاری ۱/۱۰ میلی‌متر.....۱۱۹
- شکل ۲۰-۵- کانتورهای تغییرشکل افقی در زیر پی و تغییرشکل‌های ایجاد شده در لایه مسلح‌کننده.....۱۲۰
- شکل ۲۱-۵- ظرفیت باربری شالوده‌های غیرمسلح و مسلح در دامنه نوسان ۰/۵۵ و ۱/۱۰ میلی‌متر.....۱۲۱
- شکل ۲۲-۵- تغییرات فاکتور ظرفیت باربری در مقابل تعداد سیکل‌های بارگذاری.....۱۲۲
- شکل ۲۳-۵- تنش افقی برای تمام حالات بررسی شده در مقابل سیکل‌های مختلف بارگذاری.....۱۲۳
- شکل ۲۴-۵- تغییرات فاکتور ظرفیت باربری افقی در مقابل تعداد سیکل‌های بارگذاری.....۱۲۴
- شکل ۲۵-۵- تغییرات ماکزیمم نیروی محوری تحمل شده در لایه ژئوگرید به طول ۷۶ سانتی‌متر.....۱۲۶
- شکل ۲۶-۵- لایه ژئوگرید قرارگرفته به طول ۳۶ سانتی‌متر، در عمق ۴ سانتی متری از سطح خاک.....۱۲۷
- شکل ۲۷-۵- تغییرات تنش افقی در مقابل تغییرشکل افقی برای شالوده مسلح با یک لایه ژئوگرید.....۱۲۹

- شکل ۵-۲۸- ظرفیت باربری و تنش افقی برای شالوده با یک لایه مسلح‌کننده.....۱۲۹
- شکل ۵-۲۹- تغییرات ماکزیمم نیروی محوری ایجاد شده در ژئوگرید برای شالوده با یک لایه مسلح‌کننده. ۱۳۰
- شکل ۵-۳۰- لایه‌های ژئوگرید قرارگرفته به طول ۳۶، در عمق ۴ و ۶ سانتی متری از سطح خاک.....۱۳۱
- شکل ۵-۳۱- تغییرات تنش افقی در مقابل تغییرشکل افقی برای شالوده مسلح با دو لایه ژئوگرید.....۱۳۲
- شکل ۵-۳۲- تغییرات ظرفیت باربری و تنش افقی برای شالوده با دو لایه مسلح‌کننده.....۱۳۳
- شکل ۵-۳۳- توزیع نیروی محوری کششی در لایه ژئوگرید برای شالوده با دو لایه مسلح‌کننده.....۱۳۴
- شکل ۵-۳۴- تغییرات ماکزیمم نیروی محوری در لایه‌های ژئوگرید برای شالوده با دو لایه مسلح‌کننده.....۱۳۵
- شکل ۵-۳۵- لایه‌های ژئوگرید قرارگرفته به طول ۳۶، در عمق ۴، ۶ و ۸ سانتی‌متری از سطح خاک.....۱۳۵
- شکل ۵-۳۶- تغییرات تنش افقی در مقابل تغییرشکل افقی برای شالوده مسلح با سه لایه ژئوگرید.....۱۳۷
- شکل ۵-۳۷- تغییرات ظرفیت باربری و تنش افقی برای شالوده با سه لایه مسلح‌کننده.....۱۳۸
- شکل ۵-۳۸- توزیع نیروی محوری کششی در لایه‌های ژئوگرید برای شالوده مسلح با سه لایه ژئوگرید.....۱۳۹
- شکل ۵-۳۹- تغییرات ماکزیمم نیروی محوری در لایه‌های ژئوگرید برای شالوده با سه لایه مسلح‌کننده.....۱۴۰
- شکل ۵-۴۰- لایه‌های ژئوگرید قرارگرفته به طول ۳۶، در عمق ۴، ۶، ۸ و ۱۰ سانتی‌متری از سطح خاک...۱۴۱
- شکل ۵-۴۱- تنش افقی در مقابل تغییرشکل افقی برای شالوده مسلح با چهار لایه ژئوگرید.....۱۴۲
- شکل ۵-۴۲- تغییرات ظرفیت باربری و تنش افقی برای شالوده مسلح با چهار لایه ژئوگرید.....۱۴۲
- شکل ۵-۴۳- تغییرات ماکزیمم نیروی محوری در لایه‌های ژئوگرید برای شالوده با چهار لایه مسلح‌کننده...۱۴۳
- شکل ۵-۴۴- بهبود ظرفیت باربری شالوده با افزایش تعداد لایه‌های مسلح‌کننده.....۱۴۴
- شکل ۵-۴۵- تغییرات فاکتور ظرفیت باربری (*BCR*) با افزایش تعداد لایه‌های مسلح‌کننده.....۱۴۴
- شکل ۵-۴۶- تغییرات ظرفیت باربری شالوده غیرمسلح و مسلح با یک، دو، سه و چهار لایه ژئوگرید.....۱۴۵
- شکل ۵-۴۷- تغییرات فاکتور ظرفیت باربری برای شالوده‌های مسلح با یک، دو و سه لایه مسلح‌کننده.....۱۴۶
- شکل ۵-۴۸- تغییرات تنش افقی برای سیکل‌های مختلف بارگذاری در مقابل تعداد لایه‌های مسلح‌کننده...۱۴۶
- شکل ۵-۴۹- نمودار تغییرات تنش افقی برای شالوده غیرمسلح و مسلح با تعداد لایه‌های مختلف ژئوگرید...۱۴۷
- شکل ۵-۵۰- تغییرات فاکتور ظرفیت باربری افقی در شالوده‌های مسلح با یک، دو، سه و چهار لایه ژئوگرید...۱۴۸
- شکل ۵-۵۱- تغییرات ماکزیمم نیروی محوری در اولین لایه ژئوگرید در مقابل تعداد لایه‌های ژئوگرید.....۱۴۹
- شکل ۵-۵۲- تغییرات ماکزیمم نیروی محوری در لایه‌های مختلف ژئوگرید در مقابل سیکل‌های بارگذاری...۱۵۰

- شکل ۵-۵۳- کانتورهای تغییرشکل افقی و بردارهای تغییرشکل ایجاد شده در شالوده و ژئوگرید..... ۱۵۱
- شکل ۵-۵۴- لایه ژئوگرید به طول ۹ سانتی متری در عمق ۴ سانتی متری از سطح خاک..... ۱۵۲
- شکل ۵-۵۵- تغییرات ظرفیت باربری و تنش افقی برای شالوده مسلح با ژئوگرید به طول ۹ سانتی متر..... ۱۵۳
- شکل ۵-۵۶- لایه ژئوگرید به طول ۱۸ سانتی متری در عمق ۴ سانتی متری از سطح خاک..... ۱۵۴
- شکل ۵-۵۷- تغییرات تنش افقی برای شالوده مسلح با ژئوگرید به طول ۱۸ سانتی متر..... ۱۵۶
- شکل ۵-۵۸- بهبود ظرفیت باربری شالوده با افزایش طول لایه مسلح کننده..... ۱۵۷
- شکل ۵-۵۹- تغییرات مقدار فاکتور ظرفیت باربری در مقابل نسبت $(\frac{b}{B})$ در سیکل های مختلف بارگذاری..... ۱۵۸
- شکل ۵-۶۰- نمودار تغییرات فاکتور ظرفیت باربری (BCR) با افزایش تعداد سیکل های بارگذاری..... ۱۵۹
- شکل ۵-۶۱- نمودار تغییرات ظرفیت باربری شالوده های مسلح و غیرمسلح در مقابل سیکل های بارگذاری... ۱۶۰
- شکل ۵-۶۲- نمودار تغییرات تنش افقی در مقابل نسبت های مختلف $\frac{b}{B}$ در سیکل های مختلف بارگذاری.. ۱۶۱
- شکل ۵-۶۳- نمودار تغییرات فاکتور ظرفیت باربری افقی ($HBCR$) با افزایش تعداد سیکل های بارگذاری.. ۱۶۲
- شکل ۵-۶۴- تغییرات ماکزیمم نیروی محوری کششی در لایه ژئوگرید در مقابل نسبت $\frac{b}{B}$ ۱۶۳
- شکل ۵-۶۵- لایه ژئوگرید به طول ۳۶ سانتی متری در عمق ۲ سانتی متری از سطح خاک..... ۱۶۵
- شکل ۵-۶۶- تنش افقی در مقابل تغییرشکل افقی برای شالوده با لایه ژئوگرید در عمق ۲ سانتی متری..... ۱۶۶
- شکل ۵-۶۷- لایه ژئوگرید به طول ۳۶ سانتی متر و عمق قرارگیری ۶ سانتی متر..... ۱۶۷
- شکل ۵-۶۸- تنش افقی در مقابل تغییرشکل افقی برای شالوده با لایه ژئوگرید در عمق ۶ سانتی متری..... ۱۶۹
- شکل ۵-۶۹- بردارهای تغییرمکان افقی شالوده و مسلح کننده برای ژئوگرید واقع در عمق ۶ سانتی متری..... ۱۷۰
- شکل ۵-۷۰- لایه ژئوگرید به طول ۳۶ سانتی متری در عمق ۸ سانتی متری از سطح خاک..... ۱۷۱
- شکل ۵-۷۱- تنش افقی در مقابل تغییرشکل افقی در شالوده با لایه ژئوگرید واقع در عمق ۸ سانتی متری.. ۱۷۲
- شکل ۵-۷۲- تغییرات ظرفیت باربری شالوده با عمق قرارگیری ژئوگرید در سیکل های مختلف بارگذاری..... ۱۷۳
- شکل ۵-۷۳- تغییرات ظرفیت باربری شالوده غیرمسلح و مسلح با عمق قرارگیری ژئوگرید..... ۱۷۴
- شکل ۵-۷۴- نمودار تغییرات فاکتور ظرفیت باربری برای شالوده مسلح با لایه های مختلف ژئوگرید..... ۱۷۵
- شکل ۵-۷۵- نمودار تغییرات فاکتور ظرفیت باربری در مقابل $\frac{u}{B}$ برای سیکل های مختلف بارگذاری..... ۱۷۶

- شکل ۵-۷۶- تغییرات تنش افقی در مقابل عمق قرارگیری مسلح‌کننده در سیکل‌های مختلف بارگذاری.....۱۷۶
- شکل ۵-۷۷- تنش افقی در مقابل عمق‌های مختلف قرارگیری مسلح‌کننده در سیکل‌های مختلف بارگذاری.....۱۷۷
- شکل ۵-۷۸- فاکتور ظرفیت باربری افقی (*HBCR*) در مقابل $\frac{u}{B}$ برای سیکل‌های مختلف بارگذاری.....۱۷۸
- شکل ۵-۷۹- تغییرات نیروی محوری در ژئوگرید در مقابل عمق‌های مختلف قرارگیری مسلح‌کننده.....۱۷۹
- شکل ۵-۸۰- تغییرات نیروی محوری در ژئوگرید در مقابل تعداد سیکل‌های بارگذاری.....۱۸۰

فهرست جدول‌ها

- جدول ۴-۱- مشخصات خاک ماسه‌ای مورد استفاده در آزمایش‌ها.....۶۹
- جدول ۴-۲- مشخصات ژئوگرید مصرفی در آزمایشگاه.....۷۰
- جدول ۵-۱-۵- ظرفیت باربری و تنش افقی در شالوده غیرمسلح و دامنه نوسان بارگذاری ۰/۵۵ میلی‌متر.....۱۰۳
- جدول ۵-۲- ظرفیت باربری و تنش افقی در شالوده غیرمسلح و دامنه نوسان بارگذاری ۱/۱ میلی‌متر.....۱۰۸
- جدول ۵-۳- ظرفیت باربری، تنش افقی و نیروی محوری ژئوگرید در دامنه نوسان بارگذاری ۰/۵۵ میلی‌متر.....۱۱۱

- جدول ۴-۵- ظرفیت باربری، تنش افقی و نیروی محوری ژئوگرید در دامنه نوسان بارگذاری ۱/۱۰ میلی متر ۱۱۶
- جدول ۵-۵- ظرفیت باربری، تنش افقی و نیروی محوری ژئوگرید در صورت استفاده از یک لایه ژئوگرید..... ۱۲۸
- جدول ۶-۵- ظرفیت باربری، تنش افقی و نیروی محوری ژئوگرید در صورت استفاده از دو لایه ژئوگرید..... ۱۳۲
- جدول ۷-۵- ظرفیت باربری، تنش افقی و نیروی محوری ژئوگرید در صورت استفاده از سه لایه ژئوگرید..... ۱۳۶
- جدول ۸-۵- ظرفیت باربری، تنش افقی و نیروی محوری ژئوگرید در صورت استفاده از سه لایه ژئوگرید..... ۱۴۱
- جدول ۹-۵- ظرفیت باربری، تنش افقی و نیروی محوری ژئوگرید به طول ۹ سانتی متر..... ۱۵۳
- جدول ۱۰-۵- ظرفیت باربری، تنش افقی و نیروی محوری ژئوگرید به طول ۱۸ سانتی متر..... ۱۵۵
- جدول ۱۱-۵- ظرفیت باربری، تنش افقی و نیروی محوری ژئوگرید در عمق ۲ سانتی متری..... ۱۶۵
- جدول ۱۲-۵- ظرفیت باربری، تنش افقی و نیروی محوری ژئوگرید در عمق ۲ سانتی متری..... ۱۶۸
- جدول ۱۳-۵- ظرفیت باربری، تنش افقی و نیروی محوری تحمل شده ژئوگرید در عمق ۸ سانتی متری..... ۱۷۱

فصل اول

مقدمه

۱-۱- کلیات

در بسیاری از مناطق زلزله‌خیز از پی‌های سطحی در طراحی و ساخت ساختمان‌های کوچک تا متوسط استفاده می‌شود. بدیهی است که ظرفیت باربری اینگونه پی‌ها، وقتی در طول زلزله تحت لنگر و بارهای افقی ناگهانی قرار می‌گیرند، به دامنه نوسان کاهش می‌یابد. از سویی دیگر تحقیقات انجام شده توسط محققین مختلف نشان می‌دهد که خسارات وارد شده به ساختمان‌ها در اثر زلزله‌های قوی یا حتی متوسط اغلب به علت ضعف خاکی است که متحمل سربار شده است. عدم وجود ظرفیت باربری مناسب خاک باعث بروز چرخش‌های نامطلوب، نشست‌های ناگهانی و یا حتی واژگونی ساختمان، زیان‌های اقتصادی سنگین و به خطر افتادن جان انسان‌ها به هنگام وقوع زلزله می‌شود.

دلایل این مسأله به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی در بسیاری از مطالعات، تحت عنوان اختلاف در مکانیزم گسیختگی (استاتیکی و دینامیکی)، مورد بررسی قرار گرفته است. هرچند ابهام در شکل واقعی مکانیزم گسیختگی در شالوده‌های سطحی باعث شده تا نتوان به مکانیزم‌های گسیختگی تئوری فرض شده اعتماد کافی داشت.

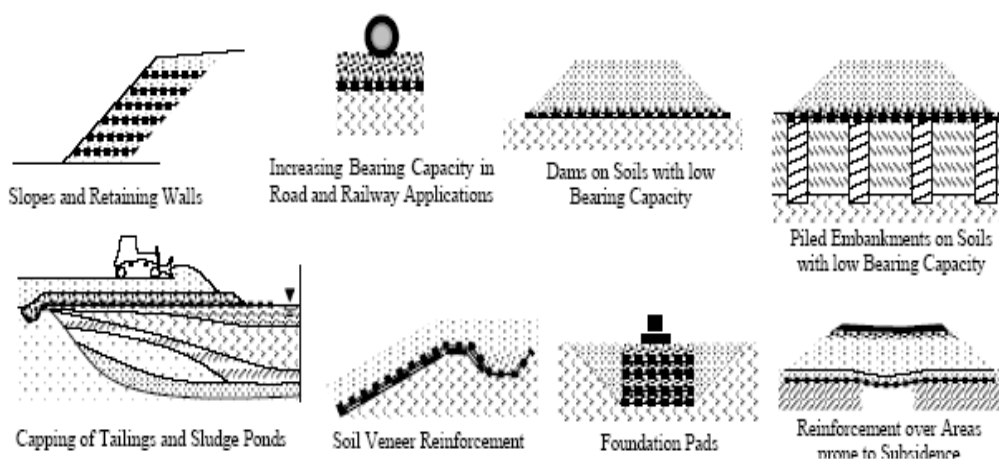
بنابراین برای داشتن اطمینان از عملکرد ساختمان‌ها تحت بارهای دینامیکی ناشی از زلزله، لازم است تا علاوه بر تقویت اجزا و عناصر به کار رفته در ساخت آن، خاک و زمینی که قرار است ساختمان بر روی آن احداث گردد نیز پایداری لازم را داشته باشد. در این صورت، چنانچه خاک به خودی خود مقاومت و ظرفیت باربری مناسب را نداشته باشد می‌بایست به نحوی آن را تقویت یا به اصطلاح بهسازی نمود.

مسلح نمودن خاک و موارد استعمال گوناگون آن، امروزه به طور گسترده‌ای در مهندسی ژئوتکنیک توسعه یافته است. با تعبیه عنصر مسلح‌کننده (*reinforcer*) درون یک شیروانی، می‌توان به شیب‌های تندتری دست یافت و یا با قراردادن آن در زیر خاکریزی که بر روی لایه رس نرم احداث می‌شود، ظرفیت باربری لایه ضعیف را بهبود بخشید. در شکل (۱-۱) بعضی از موارد متداول استعمال خاک مسلح در مهندسی ژئوتکنیک نشان داده شده است. عنصر تسلیح به کار رفته در سازه‌های خاکی نشان داده شده در شکل (۱-۱) می‌تواند یکی از موارد زیر باشد:

- شبکه‌ها و نوارهای فلزی

- شبکه‌ها و نوارها و ورقه‌های پلیمری

- میخ‌گونه‌ها

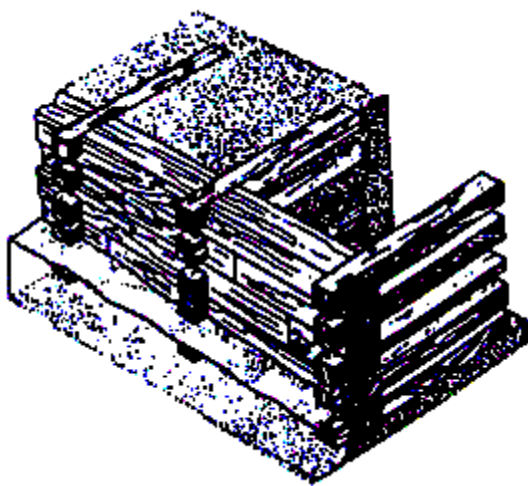


شکل ۱-۱- موارد استعمال گوناگون خاک مسلح در مهندسی ژئوتکنیک

ایده خاک مسلح مفهوم جدیدی نیست. موارد استفاده از الیاف طبیعی به عنوان یک عنصر مسلح‌کننده در آجرها و دیوارهای ساخته شده از خاک رس در متون مذهبی از جمله انجیل ذکر شده است. در بین آثار به جای مانده از عهد باستان در سرزمین بابل (عراق کنونی) و دیوار بزرگ چین، می‌توان استفاده از تکنیک خاک مسلح را به وضوح مشاهده نمود.

زیگورات (برج بلند و هرمی شکل پلکان‌دار در معماری بابلی) مربوط به هزاره اول قبل از میلاد می‌باشد که در پنج کیلومتری شمال بغداد واقع است. این بنا از آجرهای گل رس با ضخامتی بین ۱۳۰ الی ۱۴۰ میلی‌متر ساخته شده است که توسط شبکه حصیری بافته شده، مسلح شده‌اند. این شبکه‌ها به صورت افقی و درون لایه‌ایی از جنس شن و ماسه اجرا شده‌اند که فاصله آنها در جهت قائم بین نیم تا دو متر بوده است. هم‌اکنون ارتفاع این بنا ۴۵ متر می‌باشد، این در حالیست که گفته می‌شود، ارتفاع اولیه آن حدود ۸۰ متر بوده است. در دیوار بزرگ چین نیز که بخش‌هایی از آن در قرن دوم میلاد کامل شده است، نمونه‌هایی از تکنیک خاک مسلح مشاهده می‌شود. در این نمونه‌ها انواع خاک‌های رسی، شنی و ماسه‌ای توسط الیاف طبیعی مسلح شده‌اند.

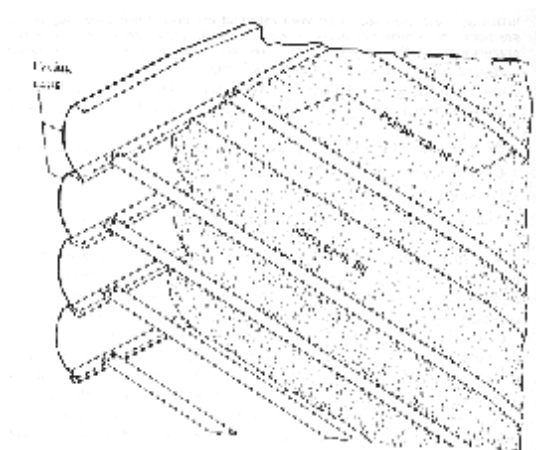
در عهد رومی‌ها نیز به طور گسترده‌ای از خاک مسلح استفاده شده است. بقایای موجود از یک دیوار بارانداز در مجاورت رودخانه تایمز در لندن شکل (۱-۲) که در قرن اول میلادی احداث شده است، بیانگر شناخت رومی‌ها از تکنیک خاک مسلح می‌باشد.



شکل ۱-۲- دیوار بارانداز از عهد امپراتوری روم [۱]

تا قبل از سال ۱۹۳۰ میلادی، پیشرفت قابل توجهی در زمینه خاک مسلح حاصل نشده بود تا اینکه *Coyne* (۱۹۳۰) با معرفی یک نوع دیوار به نام دیوار نردبانی (*Ladder Wall*) باعث شد که استفاده از خاک مسلح متداول شود.

نسل جدید سازه‌های خاکی مسلح در سال ۱۹۶۰ میلادی توسط *Vidal* معرفی شدند. دیوار مسلح *Vidal* همانطور که در شکل (۳-۱) نیز دیده می‌شود، از نوارهای مسلح کننده‌ای که به صورت افقی در خاک ماسه‌ای تعبیه شده‌اند، تشکیل شده است.



شکل ۳-۱- دیوار مسلح ابداع شده توسط *Vidal* [۱]

۲-۱- بیان مسئله

همانطور که در بخش قبل نیز ذکر گردید، با توجه به استفاده وسیع از پی‌های سطحی ($D_f \leq B$ ؛ D_f عمق گیرداری پی) در ساختمان‌های کوچک تا متوسط، مطالعه رفتار، ظرفیت باربری، میزان نشست و... این پی‌ها همواره مدنظر محققین و دانشمندان بوده است. به ویژه در دهه‌های گذشته تلاش‌های بسیاری جهت تعیین رفتار دینامیکی پی‌های سطحی برای رسیدن به پاسخ‌های سریع و کاربردی در طراحی پی شده است.

تا کنون آزمایش‌های زیادی روی نمونه‌های مختلف فونداسیون، تحت شرایط مختلف بارگذاری انجام شده است. به علت پرهزینه بودن آزمایش بر روی نمونه‌های با مقیاس واقعی، اکثر این آزمایش‌ها روی نمونه‌های کوچک-مقیاس

انجام گرفته است. نتیجه این بررسی‌ها روابط تدوین شده‌ای جهت به دست آوردن ظرفیت باربری پی‌های سطحی تحت بارهای دینامیکی ارائه داده است.

با ورود انواع مسلح‌کننده‌ها به عرصه صنعت و کاربرد رضایت‌بخش آنها در زمینه ژئوتکنیک، آزمایش‌های فراوانی بر روی فونداسیون‌های مسلح نیز انجام گرفته و اثر پارامترهای مختلف مثل تعداد لایه‌ها، عمق قرارگیری، نوع و جنس مسلح‌کننده‌ها بر ظرفیت باربری و نشست پی‌ها تحت اثر بار دینامیکی به دست آمده است که عمده این تحقیقات نیز بر روی مدل‌های کوچک-مقیاس و با استفاده از تکنیک میز ارتعاش یا دستگاه سانتریفیوژ انجام گرفته است. با توجه به اینکه در عمده این تحقیقات به بررسی تأثیر بارهای سیکلی قائم در رفتار شالوده‌های سطحی پرداخته شده است. همچنین، با عنایت به اهمیت موضوع، گستره فراوان آن و محدودیت‌هایی که در مطالعات مختلف بر حسب روش یا نوع وسیله آزمایش وجود دارد هنوز بسیاری ابعاد رفتاری پی‌های سطحی مسلح و غیرمسلح، به خصوص در رابطه با چگونگی تأثیر بارهای افقی سیکلی در ظرفیت باربری یا نشست، به درستی شناخته نشده است.

۱-۳- اهداف پژوهش

با توجه به موضوع پایان‌نامه انتظار می‌رود، هدف اصلی آن بررسی رفتار دینامیکی (سیکلی) شالوده‌های سطحی مسلح تحت بارهای افقی باشد. در این راستا و با توجه به آزمایش‌هایی که در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه امیرکبیر، توسط دانشجویان مقطع دکتری در حال انجام است، در این پژوهش سعی شده تا با مقایسه نتایج حاصل از آزمایش روی پی‌های سطحی نواری مستقر بر ماسه مسلح با تحلیل‌های عددی انجام شده در محیط نرم‌افزاری *FLAC*، تلفیقی از فعالیت‌های آزمایشگاهی و عددی در کنار هم ارائه شود؛ هرچند اساس تحقیق حاضر مطالعات عددی انجام شده می‌باشد.

همانطور که می‌دانیم، بارهای سیکلی ناشی از زلزله بر مرکز جرم ساختمان اثر خواهند کرد. در نتیجه تأثیر آنها بر پی سازه علاوه بر بارهای قائم یک بار سیکلی افقی و ممان ناشی از اختلاف ارتفاع مرکز جرم سازه و تراز فونداسیون خواهد بود. کاملاً مشخص است که هرچه اختلاف فاصله بین مرکز جرم سازه و فونداسیون بیشتر باشد، لنگر اثر غالب را بر پی خواهد داشت و در حالت عکس بارهای افقی نقش تعیین‌کننده را بر رفتار شالوده‌ها خواهند گذاشت.

علاوه بر بارهای قائم استاتیکی ناشی از وزن سازه که همواره وجود خواهند داشت، در شرایطی که اثر رانش افقی مهم باشد (آنچنانکه در این تحقیق مورد نظر می‌باشد) پی تحت بار مرکزی متمایل واقع خواهد شد و در صورتی که اثر هر دو عامل لنگر و رانش قابل ملاحظه باشند، پی تحت بار خروج از مرکز متمایل واقع خواهد شد.

لازم به ذکر است، با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی موجود امکان بررسی رفتار شالوده‌های سطحی مسلح تحت بارهای سیکلی افقی و یا متمایل به صورت مستقیم در آزمایشگاه وجود نداشته است. بنابراین مدل عددی تهیه شده توسط نتایج به دست آمده از آزمایش بر روی پی‌های سطحی و تحت بارهای استاتیکی و سیکلی قائم در دو حالت مسلح و غیرمسلح کالیبره شده است.

پس از معتبرسازی نتایج عددی به دست آمده با جواب‌های آزمایشگاهی و رفع مشکلات احتمالی مدل‌سازی، باقی مراحل به صورت عددی دنبال شده و تأثیر پارامترهای مختلف مثل دامنه و تعداد سیکل‌های بارگذاری دینامیکی، تعداد، طول و عمق قرارگیری مسلح‌کننده و... بر میزان ظرفیت باربری پی‌های سطحی مسلح تحت بارهای سیکلی افقی به دست آمده است.

۱-۴- فصل‌های مختلف پایان‌نامه

براساس مطالب ذکر شده در بخش‌های پیش، در این تحقیق سعی شده تا پس از روشن شدن مسیر تحقیق در فصل اول، با جمع‌بندی نتایج حاصل از برخی تازه‌ترین مطالعات صورت گرفته در خصوص رفتار دینامیکی پی‌های سطحی غیرمسلح در فصل دوم، به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف از جمله شتاب بارگذاری، فرکانس، عمق گیرداری و... بر مکانیزم گسیختگی پی‌های سطحی تحت بارهای لرزه‌ای پرداخته شود. در ادامه این فصل و پس از توضیح اجمالی رفتار دینامیکی پی‌های سطحی و نحوه گسیختگی آنها تحت بارهای لرزه‌ای، برای آگاهی از میزان تأثیر مسلح‌کننده‌ها (ژئوگرید) بر رفتار شالوده‌های سطحی (ظرفیت باربری) برخی مطالعات انجام شده در این رابطه ذکر می‌گردد. مطالعات مزبور در دو دسته استاتیکی و دینامیکی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

در فصل سوم چگونگی ساخت مدل عددی در محیط نرم‌افزاری *FLAC*، شامل هندسه مدل، مشخصات اجزا و مصالح، نحوه اعمال بارگذاری استاتیکی و دینامیکی و... ارائه شده است.