بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکدهٔ مهندسی عمران

بررسی عددی و آزمایشگاهی تاثیر پارامترهای تسلیح بر ظرفیت باربری پی‌های سطحی متکی بر ماسه

پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی

حمید توحیدی‌فر

استاد راهنما

دکتر محمود وفائیان

۱۳۸۷

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکدهٔ مهندسی عمران

پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد رشتهٔ مکانیک خاک و پی آقای مهندس حمید توحیدی‌فر

تحت عنـــوان

بررسی عددی و آزمایشگاهی تاثیر پارامترهای تسلیح بر ظرفیت باربری پی‌های سطحی متکی بر ماسه

در تاریخ ۱۳۸۷/۱۲/۲۶ توسط کمیتهٔ تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر محمود وفائیان
۲- استاد داور	دکتر بهروز کوشا
۳- استاد داور	دکتر حمید هاشم‌الحسینی
۴- سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر عبدالرضا کبیری سامانی

تقدیر و تشکر :

قبل از هر چیز، خداوند بزرگ و مهربان را شاکرم که این فرصت را به من داد تا افق مرزهای علم و دانش خودم را توسعه ببخشم. بی‌گمان تا اَبد سپاسگزار این لطف و عنایت الهی خواهم بود.

این پایان‌نامه بدون کمکها و همفکری‌های با ارزش افراد مختلفی که قدردان تک تک آنها هستم قابل انجام نبوده است. پیش از همه از زحمات و راهنمایی‌های استاد راهنمای این پایان‌نامه، جناب آقای دکتر محمود وفائیان ممنون و سپاسگزارم. از اعضای محترم کمیتهٔ دفاع، آقایان دکتر بهروز کوشا و دکتر حمید هاشم‌الحسینی که قبول زحمت فرموده و کار داوری این پایان‌نامه را بعهده گرفتند و نیز بخاطر توصیه‌ها و پیشنهادات ارزنده و بجای آنها سپاسگزارم.

بدون هیچگونه شک و تردیدی بخش اعظمی از کارهای آزمایشگاهی این پایان‌نامه مدیون کمکها، پشتیبانی‌ها و راهنمایی‌های بی‌دریغ مدیریت و پرسنل محترم شرکت مهندسین مشاور جهدآزمای مشهد بوده است. تشکر و سپاس فراوان از آقای مهندس انصاری‌مقدم مدیرعامل محترم و خوش‌اخلاق شرکت که حمایت‌های پیوسته و پیگیر ایشان در مدت حضور بنده در آن شرکت موجب دلگرمی و تشویق اینجانب به انجام هرچه بهتر آزمایشات بوده است. همچنین مشورت‌ها و همفکری‌های آقایان مهندسین خلفایی، اکبریه، سالاری‌منش، تبریزنژاد و ادیبی مورد تقدیر و امتنان می‌باشد. بی‌گمان یکی از پرخاطره‌ترین و پربارترین لحظات زندگی من حضور در کنار پرسنل محترم شرکت جهدآزما بوده‌است که چیزهای زیادی چه به لحاظ تجربهٔ‌کاری و چه به لحاظ تجربهٔ زندگی از آنها آموختم.

همچنین برخود لازم می‌دانم از کمک‌ها و همفکری‌های انسان‌های بزرگی که با وجود هزاران کیلومتر فاصله بی هیچ چشمداشتی بنده را مشورت و راهنمایی نمودند تشکر و سپاسگزاری بنمایم. تقدیر و امتنان فراوان از آقای دکتر Giovanni Cascante از دانشگاه Waterloo کانادا و نیز آقای مهندس Wilson Chung از شرکت مهندسین مشاور Golder کانادا بخاطر راهنمایی‌ها و همفکری‌های ارزشمند آنها در مراحل مختلف آزمایشات تجربی و مدلسازی‌های نرم‌افزاری که موجب دقت هرچه بیشتر در روند انجام پایان‌نامه گردیده است. همچنین کمک‌های آقایان دکتر کیانوش حاتمی از دانشگاه Oklahoma، دکتر Jie Han از دانشگاه Kansas، پرفسور Braja Das از دانشگاه ایالتی Sacramento، دکتر Maher Omar از دانشگاه Sharjah و نیز مهندس محمدرضا قانع از دانشگاه فردوسی مشهد مورد سپاس فراوان می‌باشد. بی‌گمان افتادگی، اخلاق علمی و کمک بی‌دریغ به همنوع را از این بزرگواران آموختم.

از دوست و همکلاسی عزیزم جناب آقای مهندس حسن حبیبیان بخاطر ساعت‌ها بحث و گفتگو بر روی مسائل گوناگون ژئوتکنیکی و مدلسازی‌های نرم‌افزاری آنها که دید بنده را بازتر و روشن‌تر می‌نمود تشکر می‌نمایم.

در نهایت تشکر و سپاس فراوان از پدر، مادر، خواهر و برادر بهتر از جانم که بدون حمایت‌ها و پشتیبانی‌های معنوی آنها که موجبات دلگرمی، تشویق و اطمینان اینجانب را فراهم می‌آورد به اتمام رساندن این پایان‌نامه ممکن نبود. بهترین آرزوهای قلبی من تقدیم به پدر و مادرم که سالها زحمت آموزش، تربیت و نمایاندن مسیر صحیح زندگی در مکتب محمّد(ص) را در حق من تمام کردند. امیدوارم که خداوند تبارک و تعالی همیشه و همه حال حامی و پشتیبان آنها باشد.

کلیهٔ حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به :

پدر بزرگوارم که وجودش مایه افتخار و روشنی بخش راهم است.

مادر مهربان و فداکارم که زندگی و خوشبختیم را به او مدیونم.

خواهر و برادر عزیزم که دوست، یار و همراهم بوده و هستند.

فهرست مطالب

عنـــوان **صـفحه**

فهرست مطالب ..... هشت
چکیده ۱
فصل اول: مقدمه، اهداف و ساختار پایان‌نامه
۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- تاریخچه خاک مسلح ۳
۱-۳- تسلیح‌کننده‌های ژئوسنتتیکی ۴
۱-۴- اهمیت موضوع ۵
۱-۵- اهداف پایان‌نامه ۵
۱-۶- محتوای فصول پایان‌نامه ۶
فصل دوم: تئوری و پیشینهٔ علمی
۲-۱- مقدمه‌ای بر معادلات ظرفیت باربری خاک ۷
۲-۲- انواع گسیختگی در خاک بر اثر اعمال بار نهایی ۱۷
۲-۳- ضرائب شکل ۱۹
۲-۴- خاک مسلّح ۲۰
۲-۵- توصیف کلی ژئوسنتتیک‌ها ۲۰
۲-۶- مکانیزم خاک مسلح در آزمایش سه محوری ۲۰
۲-۶-۱- مفهوم چسبندگی ناهمسانگرد ۲۱
۲-۶-۲- مفهوم فشار محدودکنندهٔ پیشرفته ۲۲
۲-۷- تولید تنش‌های داخلی در خاک مسلح ۲۳
۲-۸- حالات گسیختگی احتمالی مسلح‌کننده‌ها ۲۶
۲-۹- مروری بر کارهای صورت گرفته روی شالوده‌های خاک مسلح ۲۸
۲-۱۰- خلاصهٔ نتایج ادبیات تخصصی خاک مسلح ۴۵
فصل سوم: ابزار و نحوهٔ انجام آزمایشات
۳-۱- مقدمه ۴۸
۳-۲- آزمایشات و مطالعات اولیهٔ روی ماسهٔ شمارهٔ (۱) ۴۸
۳-۲-۱- تست‌های آزمایشگاهی جهت مشخص کردن خواص خاک ۴۸
۳-۲-۲- تست‌ها انجام شده روی پی‌های مدل ۵۳
۳-۳- آزمایشات و مطالعات اولیهٔ روی ماسهٔ شمارهٔ (۲) ۶۱
۳-۳-۱- مشخصات و خصوصیات خاک ۶۱
۳-۳-۲- تست‌های انجام شده روی پی‌های مدل ۶۲
فصل چهارم: معرفی و اعتبارسنجی نرم‌افزار FLAC3D

عنـــوان **صـفحه**

۴-۱- مقدمه ۶۷
۴-۲- دامنهٔ کاربرد نرم‌افزار ۶۷
۴-۳- برخی اصطلاحات موجود در نرم‌افزار ۶۹
۴-۴- اعتبارسنجی نرم‌افزار ۶۹
۴-۴-۱- آزمایش سه‌محوری ۶۹
۴-۴-۲- پی سطحی مربعی شکل روی محیط الاستیک ۷۳
۴-۴-۳- پی سطحی مربعی روی خاک مسلح ۷۶
فصل پنجم: بررسی نتایج آزمایشها
۵-۱- مقدمه ۸۰
۵-۲- نتایج آزمایشات سری اول ۸۱
۵-۲-۱- اثر فاصلهٔ بالاترین لایهٔ تسلیح تا کف پی ۸۵
۵-۲-۲- اثر تعداد لایه‌های مسلح‌کننده ۸۷
۵-۲-۳- تاثیر فاصلهٔ قائم میان تسلیح‌کننده‌ها ۸۷
۵-۳- نتایج آزمایشات سری دوم ۸۹
۵-۳-۱- بحث در نتایج آزمایشات سری دوم ۸۹
۵-۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۹۵
فصل ششم: مقایسهٔ نتایج نرم‌افزار با کارهای آزمایشگاهی
۶-۱- مقدمه ۹۷
۶-۲- تحلیل عددی سه‌بعدی پی متکی بر خاک مسلح ۹۷
۶-۲-۱- جزئیات هندسهٔ مدل و شرایط مرزی بکار گرفته شده ۹۷
۶-۲-۲- انتخاب مدل رفتاری ۹۹
۶-۲-۳- انتخاب خواص مواد ۹۹
۶-۲-۴- نتایج کالیبراسیون نرم‌افزار ۱۰۲
۶-۳- بررسی نتایج نرم‌افزار برای سایر حالات خاک مسلح ۱۰۳
۶-۳-۱- مقایسهٔ بین نسبت ظرفیت باربری نرم‌افزاری و تجربی ۱۰۴
۶-۳-۲- بررسی مکان بهینهٔ مسلح‌کننده ۱۰۹
۶-۳-۳- بررسی فاصلهٔ قائم بین مسلح‌کننده‌ها ۱۰۹
۶-۳-۴- بررسی اثر تعداد لایه‌تسلیح ۱۱۱
۶-۴- بررسی چگونگی توزیع تنش‌ها و کرنش‌ها در خاک ۱۱۲
۶-۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۱۲۳
فصل هفتم: بررسی جامع پارامترهای موثر بر نسبت ظرفیت باربری
۷-۱- مقدمه ۱۲۴

عنـــوان **صـفحه**

۷-۲- بررسی پارامترهای مورد استفاده در مدلسازی ۱۲۴
۷-۳- روش تحلیل مدل ۱۲۶
۷-۴- بررسی پاسخ‌های بدست آمده برای شرایط مدلهای مختلف ۱۲۸
۷-۴-۱- تاثیر سختی محیط خاک بر نسبت ظرفیت باربری(BCR) ۱۳۰
۷-۴-۲- تاثیر سختی مسلح‌کننده بر نسبت ظرفیت باربری(BCR) ۱۳۰
۷-۴-۳- تاثیر زاویهٔ اصطکاک خاک بر نسبت ظرفیت باربری(BCR) ۱۳۵
۷-۴-۴- مقایسهٔ بین نسبت ظرفیت باربری (BCR) برای پی مربعی و مدور ۱۳۹
۷-۴-۵- تاثیر عمق مدفون پی بر نسبت ظرفیت باربری (BCR) ۱۳۹
۷-۴-۶- بررسی تاثیر بعد پی بر نسبت ظرفیت باربری (BCR) ۱۴۵
۷-۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۱۴۷

فصل هشتم: جمع‌بندی نتایج و پیشنهادات

۸-۱- مقدمه ۱۴۹
۸-۲- نتایج ۱۴۹
۸-۳- پیشنهادات برای تحقیقات آتی ۱۵۰

پیوست‌ها

پیوست الف- نحوهٔ تغییرشکل مش زیر پی ۱۵۲
پیوست ب- نتایج آزمایشات برش مستقیم ۱۵۵
پیوست ج- بررسی تکرارپذیری آزمایشات ۱۵۸
پیوست د- کدهای محاسباتی FLAC3D ۱۶۳
د-۱- مدلسازی آزمایش سه‌محوری ۱۶۴
د-۲- مدلسازی پی روی بستر الاستیک ۱۶۵
د-۲-۱- کد محاسباتی مادر ۱۶۵
د-۲-۲- کد محاسباتی فرعی ۱۶۶
د-۳- مدلسازی کار عمر و همکاران (۱۹۹۳a،۱۹۹۳b) ۱۶۹

منابع و مراجع ۱۷۴

چکیده:
در این پایان‌نامه سعی بر نشان دادن مزایای استفاده از تسلیح‌کننده‌ها در محیط خاکی جهت بهبود ظرفیت باربری خاک و کاهش نشست پی داریم. برای رسیدن به این مقصود، تعداد حدوداً چهل آزمایش توسط پی‌های مربع شکل برای بررسی رفتار شالوده‌های خاک مسلح انجام گرفت. نتایج آزمایشات نشان می‌داد که قرار دادن تسلیح‌کننده در خاک می‌تواند بنحو قابل ملاحظه‌ای ظرفیت باربری خاک را بهبود ببخشد و نشست پی را کاهش دهد. همچنین استفاده از مسلح‌کننده‌های سخت‌تر کارایی بهتری نسبت به نوع نرم‌تر آن خواهد داشت. نکتهٔ مهم دیگری که از کارهای آزمایشگاهی استخراج می‌شود، عمق بهینهٔ قرارگیری مسلح‌کننده در خاک می‌باشد بطوری که بهترین حالت تسلیح ایجاد شود. این عمق برابر $1/3\,B$ پیشنهاد می‌شود. از سوی دیگر عمق موثری که بعد از آن وجود المان تسلیح تاثیری روی ظرفیت باربری خاک نخواهد داشت برابر $1B$ و بهترین فاصلهٔ مابین لایه‌های مسلح‌کننده برابر $0.25B$ بدست آمده است.

نحوهٔ توزیع تنش‌ها و کرنش‌ها در محیط خاک با مدلسازی یک سری از تست‌های آزمایشگاهی در نرم‌افزار Flac3D بدست آمده است. نتایج نرم‌افزار نشان دهندهٔ توزیع تنش‌ها و کرنش‌ها در نواحی و لایه‌های وسیع‌تر و عمیق‌تری در محیط خاک در اثر قرارگیری مسلح‌کننده‌ها می‌باشند. این مساله باعث کاهش تمرکز تنش در نواحی نزدیک به پی و در نتیجه کاهش نشست آن خواهد شد.

همچنین تاثیر شرایط مختلف خاک، مسلح‌کننده و پی روی نسبت ظرفیت باربری مورد بررسی قرارگرفته است. نتایج این سری از مدلسازی‌ها نشانگر وجود یک سختی بهینه برای رسیدن به بهترین حالت مسلح‌سازی خاک می‌باشد. همچنین طول بهینهٔ تسلیح‌کننده برای پی‌های مربعی ۲ برابر بعد پی پیشنهاد می‌شود. از سوی دیگر در نظر گرفتن عمق مدفون برای پی باعث کاهش در نسبت ظرفیت باربری می‌شود. علت این مساله نیز افزایش بیشتر ظرفیت باربری خاک غیرمسلح در برابر افزایش ظرفیت باربری خاک مسلح در حالت وجود عمق مدفون برای پی ارزیابی شده است.

فصل اول
مقدمه، اهداف و ساختار پایان‌نامه

۱-۱- مقدمه

استفاده از خاک که همواره ارزان ترین مصالح ساختمانی بوده است از مراحل اولیه صنعت ساختمان مورد توجه قرار داشته است و تا به امروز نیز در ساختمان سازه های مهم از قبیل سدهای بزرگ خاکی متداول بوده است . با توجه به ضعف خواص مکانیکی خاک و ابعاد بزرگ سازه‌های خاکی در مقایسه با سازه‌های بتنی یا فولادی ، مسئله تقویت خواص مکانیکی خاک همواره مورد بررسی پژوهشگران بوده است و در مورد افزایش مقاومت درونی خاک از طریق کاربرد مواد دیگر ، به نحوی که هزینه‌های مربوط غیر اقتصادی نباشند ، مطالعات گوناگونی صورت گرفته است.

در شاخه مهندسی ژئوتکنیک همانند سایر رشته‌های مهندسی در چند دهه اخیر پیشرفت‌های فراوانی حاصل شده است. از موضوعات جدید و پر اهمیت مطرح شده ، موضوع خاک مسلح می باشد. خاک مسلح مصالح ویژه‌ای است‌که از ترکیب خاک و عضو مسلح کننده بوجود می‌آید. مسلح کننده‌ها اجزاء مقاوم در برابر نیروهای کششی می‌باشند و به صورت سیم ، نوار ، شبکه ، پارچه ، نمد و ... از جنس فولاد ، آلومینیوم ، پلاستیک ، مواد پلیمری و غیره تولید می‌شوند.

اصولا خاک در برابر کشش ضعیف است و ایدهٔ خاک مسلح در حقیقت راه حلی برای رفع این نقطهٔ ضعف می‌باشد. مشارکت مسلح‌کننده‌ها و خاک مناسب ، مصالح ویژه‌ای را ایجاد می‌نماید که دارای خواصی کاملاً متفاوت با خواص اجزاء تشکیل دهندهٔ آن است .

۱-۲- تاریخچه خاک مسلح

اصول اساسی خاک مسلح در طبیعت به طور گسترده‌ای توسط جانوران و گیاهان بکار گرفته شده است. در طبیعت نمونه‌های زیادی از شیب‌های طبیعی که توسط ریشه‌های گیاهان تسلیح شده‌اند را می‌توان مشاهده کرد. اولین کاربرد خاک مسلح توسط انسان به چهار تا پنج هزار سال قبل از میلاد مسیح برمی‌گردد، که از کاه یا نی برای مسلح نمودن خاک رس و آجرهای رسی استفاده می‌کردند. کاربردهای خاک مسلح در برجهای بلند و چندطبقه هرمی شکل پلکان داری که به زیگورات مشهورند، و همچنین در بخشهایی از دیوار چین مشاهده شده است.

ساکنین آفریقا و جنوب آسیا با خاک مسلح آشنایی داشتند و به طریق گوناگون با استفاده از ورقه‌های بامبو، کاه، نی و پوست درختانی مثل خرما پایداری بناهای خاکی خود را بهبود می‌بخشیدند. در ایران نیز ملات کاه‌گل نامی آشنا است که از دیرباز در ساختمانهای روستایی استفاده می‌شده است.

مهندسین و معماران زیادی در طرحهای خود از ایدهٔ خاک مسلح استفاده کرده‌اند ، اما طرح ابتکاری هانری ویدال[1] در فرانسه راه را برای ظهور سازه‌های خاک مسلح مدرن باز نمود. در حقیقت تکنیک خاک مسلح در سال ۱۹۶۶ توسط هانری ویدال ارائه شد.

داستان اختراع روش خاک مسلح از سال ۱۹۵۸ شروع شد که ویدال جهت گذراندن تعطیلات به جزایر بالیارس[2] در دریای مدیترانه رفته بود. در روزی که وی در ساحل بود و با ماسه بازی می‌کرد، چندین بار تلی از ماسه را ساخت و شیب قرار طبیعی آن را مشاهده نمود. همیشه ماسه تحت یک شیب قرار می‌گرفت. در اطرافش مقدار زیادی برگ‌های سوزنی کاج وجود داشت و وی سعی کرد که ردیف‌هایی از برگ‌های سوزنی کاج را در داخل ماسه قرار دهد. به این صورت که پس از استفاده از یک لایه ماسه، یک لایه برگ سوزنی کاج بکار گرفته می‌شد. به نظر رسید که شیب تل ماسه‌ای تندتر شد. در نتیجه ویدال از خودش پرسید که آیا قراردادن رشته‌ای انعطاف‌پذیر در ماسه مفید است؟ در آن زمان این سوال به گمان وی احمقانه به نظر رسید. چون تا آن زمان در هیچ مقاله‌ای، کتاب و یا سخنرانی راجع به ماسه مسلح با رشته‌های انعطاف‌پذیر حرفی گفته نشده بود. پس از پنج سال مطالعات نظری و انجام آزمایش‌ها بر روی الگوهای ساخته شده از ماسه و کاغذ، وی موفق شد جواب سوال بالا را بیابد و این سوال در سال ۱۹۶۳ در یک کتاب ۲۰۰ صفحه‌ای چاپ شد. در این کتاب گفته شد که ترکیب دو مصالح، یعنی ماسه و عنصر تسلیح‌کننده انعطاف‌پذیر، مصالح جدیدی را می‌سازد که خاک مسلح نامیده می‌شود.

در مورد مزیت خاک مسلح باید گفت که خاک مسلح چه از نظر فنی و چه از نظر اقتصادی در اغلب اوقات بر دیگر روشها برتری دارد. از نظر سازه‌ای خاک مسلح به علت انعطاف‌پذیری و میرایی بالایی که دارد در مقابل بار ناشی از زلزله عملکرد خوبی نشان می‌دهد. از نظر اقتصادی با توجه به سهولت اجرا، کم بودن زمان اجرا و ارزان بودن مصالح لازم (خاک و مسلح کننده)، استفاده از این روش می‌تواند در ردیف اول اولویت‌های انتخابی قرار گیرد. از مزایای دیگر خاک مسلح می توان به این نکته اشاره کرد که در این روش هم از خاک دانه‌ای و هم از خاک چسبنده به عنوان مصالح درگیر با تسلیح کننده می‌توان استفاده کرد.

---

[1] - Henry Vidal
[2] - Baleares Islands

در حال حاضر روشهای گوناگون و زیادی در زمینه ایجاد خاک مسلح ابداع شده است که مصالح مختلف مقاوم در برابر نیروهای کششی را با اشکال گوناگون بکار می‌گیرد. روشهای مختلفی نیز برای تحلیل و طراحی خاک مسلح، بخصوص دیوارها، خاکریزها، شیروانی‌ها و شالوده‌های خاکی مسلح ارائه شده است. روش‌های طراحی معمول که هنوز هم بکار می‌روند روش تعادل حدی ، روش تئوری فشار خاک و روشهای شبه تجربی می‌باشند و در طی دو دهه اخیر روش اجزاء محدود و تفاضل محدود به سرعت به یک روش معمول برای تحلیل مسائل پیچیدهٔ ژئوتکنیک تبدیل شده‌اند.

۱-۳- تسلیح کننده‌های ژئوسنتتیکی

امروزه از مصالح گوناگونی جهت مسلح کردن خاک استفاده می شود که از آن جمله می‌توان به نوارهای مسلح-کننده با فولاد گالوانیزه، نوارهای آجدار، تسمه‌ها و مصنوعات صنعتی و ... اشاره کرد. در چند دههٔ اخیر یکی از مواد اصلی و کاربردی در خاک مسلح استفاده از مواد مصنوعی می‌باشد که از معروف‌ترین آنها مواد پلیمری می‌باشند. پیشرفت سریع پلیمرهای صنعتی نظیر پلی‌آمید و پلی‌استر بعد از سال ۱۹۴۰ بود. امروزه گروهی از مصالح، که از پلیمرها ساخته شده‌اند و در مهندسی عمران بکار می‌روند اصطلاحاً ژئوسنتتیک نامیده می‌شوند. ژئوسنتتیک‌ها مصالحی مصنوعی و عمدتاً از جنس مواد پلیمری هستند که به همراه زمین (خاک و سنگ) به کار می‌روند تا خصوصیات مقاومتی آن را بهبود ببخشند. این مواد بطور وسیعی در بسیاری از پروژه‌های مهندسی ژئوتکنیک، نظیر دیوارهای خاکی، شیب‌ها، خاکریزها، روسازی‌ها و شالوده‌های خاکی مسلح بکار می‌روند.

بطور کلی مزایای ژئوسنتتیک‌ها را می‌توان بصورت زیر دسته‌بندی نمود :

۱- محصولاتی هستند که در کارخانه و با کنترل کیفیت بالا تولید می‌شوند.

۲- از سرعت نصب بالایی برخوردار هستند.

۳- معمولاً جایگزین منابع مواد خام می‌شوند.

۴- زمان‌بندی اجرای آنها بسیار مناسب است.

۵- به وفور و بطور گسترده در دسترس هستند.

ژئوسنتتیک ها به پنج دسته کلی ژئوتکستایل‌ها، ژئوگریدها، ژئونت‌ها، ژئوممبرین‌ها و ژئوکامپوزیت‌ها تقسیم می‌شوند. ژئوتکستایل‌ها بزرگترین گروه ژئوسنتتیک‌ها را تشکیل می‌دهند که حوزهٔ کاربردی گسترده‌تری دارند. از جمله عملکردهای مختلف ژئوتکستایل‌ها می‌توان به جداسازی[1] ، تسلیح[2] ، زهکشی[3] و فیلتراسیون اشاره کرد. از میان

[1] - Separation
[2] - Reinforcement
[3] - Drainage

این کاربردها، استفاده از ژئوسنتتیک‌ها برای مسلح‌سازی خاک زیر پی سازه‌ها اخیراً از اهمیت بیشتری برخوردار شده است.

۱-۴- اهمیت موضوع

پی‌های سطحی در برخی از مواقع بر روی خاکهایی بنا می‌شوند که یا ظرفیت باربری آنها ناکافی است و یا در اثر بار وارده نشست‌هایی بیش از مقدار مجاز در آنها به‌وقوع می‌پیوندد. این مساله می‌تواند باعث خسارات سازه‌ای، کاهش پایایی و ماندگاری بنا و یا ایجاد نقصان در سطح کارائی و بازدهی سازه گردد. برای جلوگیری از وقوع چنین حوادثی می‌توان از روشهای مرسوم نظیر جایگزینی بخشی از خاک ضعیف با لایه‌ای از خاک دانه‌ای قوی‌تر ، افزایش ابعاد پی و یا ترکیبی از هر دو روش استفاده کرد. هرچند، یک راه‌حل بهتر و اقتصادی‌تر استفاده از ژئوسنتتیک‌ها برای مسلح کردن خاک‌ها می‌باشد. خاک مسلح حاصله ظرفیت باربری پی را بهبود خواهد بخشید و توزیع فشار بهتری را روی خاکهای ضعیف زیرین حاصل خواهد کرد و به همین جهت نشستهای ایجاد شده کاهش خواهند یافت.

فواید قرار دادن تسلیح‌کننده‌ها در داخل تودهٔ خاک به جهت افزایش ظرفیت باربری و نیز کاهش نشست خاک شالوده در بسیاری از موارد تایید شده است. همچنین فرضیه‌های زیادی در باب طرز گسیختگی شالوده‌های خاک مسلح پذیرفته شده است. هرچند، مکانیزم تقویت خاک در مورد شالوده‌های خاکی مسلح هنوز کاملاً درک نشده است. در مقام مقایسه با سایر کاربردهای خاک مسلح، توسعهٔ روشهای طراحی و تئوری‌های مربوط به شالوده خاک مسلح به کندی صورت می‌پذیرد. از سوی دیگر ، این محدودیت‌ها مانع رشد و پیشرفت بیشتر تکنولوژی مسلح‌سازی می‌گردند. از اینرو اهمیّت تحقیق و بررسی مکانیزم مسلح‌سازی و تقویت خاک ناشی از قرارگیری مصالح تسلیح‌کننده بخصوص برای شالوده‌های خاکی، روشن می‌شود.

۱-۵- اهداف پایان‌نامه

مهم‌ترین هدف این کار تحقیقاتی بررسی مزایای استفاده از خاک مسلح برای بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست پی‌های قرارگرفته بر روی محیط خاکی می‌باشد. برای نیل به این هدف مراحل مختلفی را در این پایان‌نامه طی کرده‌ایم. این مراحل عبارتند از (۱) بررسی متغییرها و پارامترهای گوناگونی که روی بهبود رفتار خاک مسلح تاثیرگذار هستند، (۲) بررسی چگونگی توزیع تنش و کرنش در تودهٔ خاک با و بدون وجود مسلح‌کننده، (۳) بررسی شرایط مختلف خاک که روی پارامترهای تسلیح تاثیرگذار می‌باشند.

در جهت تکمیل اهداف این مطالعه، دو سری مختلف از تست‌های آزمایشگاهی صورت پذیرفت. هر سری از تست‌ها با خاک ماسه‌ای متفاوت و با شرایط آماده‌سازی و آزمایش مختلف انجام گردیدند. پارامترهایی که در این آزمایشات مورد بررسی قرار گرفته‌اند عبارتند از (۱) فاصلهٔ اولین لایهٔ تسلیح تا کف پی (u)، (۲) تعداد لایه‌های تسلیح (N)، (۳) عمق کلی مسلح‌کننده‌ها (d)، (۴) فاصلهٔ قائم بین تسلیح‌کننده‌ها (h)، (۵) نوع و سختی مسلح‌کننده‌ها، (۶) عمق مدفون پی (D_f)، (۷) نوع خاک استفاده شده. در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار $FLAC3D$ به مدلسازی

سری اول آزمایشات پرداخته‌ایم و نحوهٔ توزیع تنش‌ها و کرنش‌ها در محیط خاک را با آن مورد بررسی قرار داده‌ایم. همچنین از این نرم‌افزار برای بررسی تاثیر شرایط مختلف خاک بر ظرفیت باربری نیز استفاده کرده‌ایم.

۱-۶- محتوای فصول پایان‌نامه

این پایان‌نامه به هشت فصل تقسیم می‌شود. خلاصهٔ کوتاهی از محتوای هر فصل در ادامه خواهد آمد.

فصل ۲ مروری بر ادبیات تخصصی مربوط به ظرفیت باربری خاکهای مسلح و غیرمسلح را به شیوه‌های تجربی و مدلسازی‌های عددی در بر خواهد داشت.

فصل ۳ راجع به مواد، مصالح، ابزار و تکنیکهای انجام آزمایشهای ظرفیت باربری در آزمایشگاه توضیح خواهد داد.

فصل ۴ در مورد نرم‌افزار بکار رفته در انجام بخشی از کارهای این پایان‌نامه و بررسی اعتبارسنجی صحت نتایج حاصل از پاسخ‌های نرم‌افزار در شرایط مختلف مدلسازی بحث خواهد نمود.

فصل ۵ جزئیات کاملی از نتایج تست‌های آزمایشگاهی را ارائه خواهد کرد.

فصل ۶ نتایج نرم‌افزار تفاضل محدود در مورد بخشی از کارهای آزمایشگاهی مدلسازی شده در آن و مقایسهٔ نتایج آزمایشگاهی و عددی و بررسی شرایط تنش‌ها و کرنش‌ها در محیط خاکی خواهد بود.

فصل ۷ به بررسی نرم‌افزاری بازهٔ وسیعی از شرایط مختلف خاک، مسلح‌کننده و پی روی ظرفیت باربری نهایی خاک خواهد پرداخت.

و در نهایت فصل ۸ خلاصه‌ای از نتایج این فعالیت تحقیقاتی را به همراه پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی ارائه خواهد نمود.

فصل دوم
تئوری و پیشینهٔ علمی

۲-۱- مقدمه‌ای بر معادلات ظرفیت باربری خاک

شاید به جرات می‌توان گفت که ترزاقی[1](۱۹۴۳) اولین کسی بود که نظریه‌ای برای برآورد ظرفیت باربری نهایی پی-های سطحی زبر ارائه نمود. طبق تعریف ترزاقی یک پی سطحی در نظر گرفته می‌شود اگر عمق پی، D_f، کوچکتر یا برابر عرض آن، B، باشد (یعنی $D_f/B \leq 1$) [۱]. هرچند محققین بعدی پی‌هایی با D_f تا حد ۳ تا ۴ برابر عرض پی را نیز بعنوان پی سطحی لحاظ نمودند (بعنوان نمونه، داس ۱۹۹۵[۲]).

ترزاقی معادله کلی برای ظرفیت باربری یک پی نواری را بصورت زیر ارائه نمود :

$$q_{ult} = cN_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma \qquad [۱-۲]$$

بگونه‌ای که در این معادله :

c = چسبندگی خاک (kN/m^2)

γ = وزن واحد خاک (kN/m^3)

q= $\gamma D_f (kN/m^2)$

B = عرض پی یا قطر پی مدور (m)

N_c, N_q, N_γ = فاکتورهای بدون بعد ظرفیت باربری که به زاویه اصطکاک خاک وابسته هستند

ترزاقی فاکتورهای ظرفیت باربری را به اینصورت تعریف کرد :

---

[1] - Terzaghi

$$N_c = \cot\phi \left[\frac{e^{2\left(\frac{3\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\tan\phi}}{2\cos^2\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\phi}{2}\right)} \right] \qquad [۲-۲]$$

$$N_q = \frac{e^{2\left(\frac{3\pi}{4}-\frac{\phi}{2}\right)\tan\phi}}{2\cos^2\left(45+\frac{\phi}{2}\right)} \qquad [۲-۳]$$

$$N_\gamma = \frac{1}{2}\left(\frac{K_{p\gamma}}{\cos^2\phi}-1\right)\tan\phi \qquad [۲-۴]$$

بطوری که :

$K_{p\gamma}$ = ضریب فشار غیرفعال

ϕ = زاویه اصطکاک خاک

عموماً فاکتورهای ظرفیت باربری در جداول از پیش آماده شده‌ای وجود دارند و نیاز به حل معادلات بالا نمی-باشد.

معادلهٔ اصلی ظرفیت باربری ترزاقی برای یک پی نواری با بارگذاری مرکزی روی لایه‌ای نیمه بینهایت تهیه شده بود. این معادله می‌تواند برای سایر اشکال پی با استفاده از ضرائب شکل اصلاح گردد(s_q, s_c, s_γ) . در حالت خاصی که پی روی سطحی از خاک دانه‌ای اشباع قرار دارد ($c = 0; D_f = 0$)، دو جملهٔ اول معادلهٔ ۲-۱ صفر خواهند شد و معادلهٔ ترزاقی بصورت زیر در خواهد آمد :

$$q_{ult} = \frac{1}{2}\gamma' B N_\gamma s_\gamma \qquad [۲-۵]$$

بطوری که :

s_γ = ضریب شکل

γ' = وزن واحد شناور (KN/m^3)

میرهوف[1] (۱۹۵۳) رابطهٔ کلی‌تری برای محاسبهٔ ظرفیت باربری پیشنهاد نمود[۳] :

$$q_{ult} = cN_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + qN_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2}\gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i} \qquad [۲-۶]$$

بطوری که :

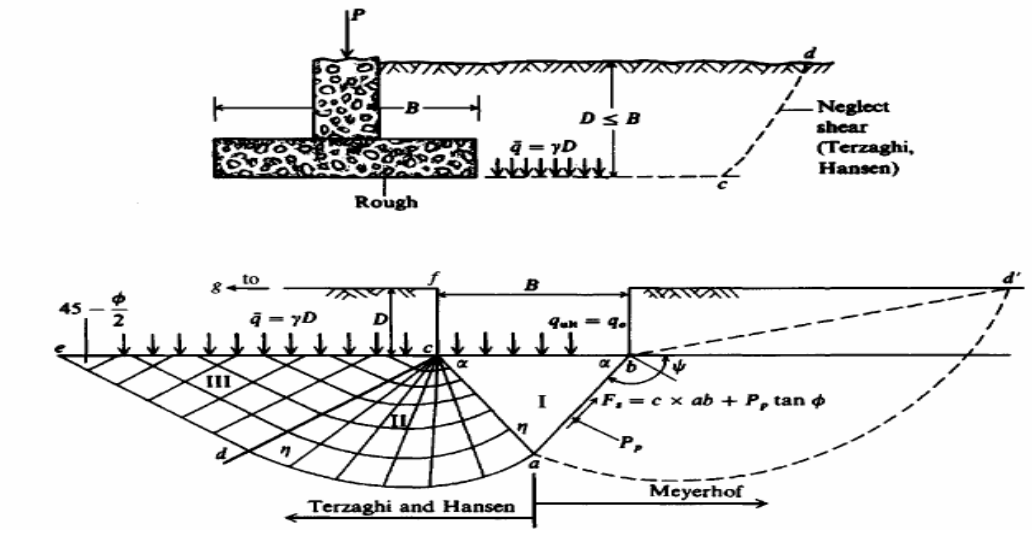
$F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s}$ = ضرایب شکل

$F_{cd}, F_{qd}, F_{\gamma d}$ = ضرایب عمق

$F_{ci}, F_{qi}, F_{\gamma i}$ = ضرایب مایل بودن بار

[1] - Meyerhof

جدول ۲-۱ فرض‌های تئوری ظرفیت باربری ترزاقی(۱۹۴۳)، میرهوف(۱۹۵۳)، و هانسن[1](۱۹۶۱)[۴] را نشان می‌دهد. جدول بیانگر این مساله است که ترزاقی مواردی را نظیر مقاومت برشی بین کف پی و سطح زمین و نیز پی قرارگرفته بر سطوح مایل را مد نظر قرار نداده است. در واقع رابطهٔ ترزاقی(۱۹۴۳) برای محاسبهٔ ظرفیت باربری پی-های سطحی یک رابطهٔ محافظه کارانه است. همین مساله یکی از دلایلی است که باعث شده روش ترزاقی برای پی-های سطحی که شرایط $D_f \le B$ را دارا هستند محدود. شکل ۲-۱ سطح گسیختگی زیر یک پی را نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۱- سطوح و نواحی گسیختگی ایجاد شده زیر یک پی نواری (باولز، ۱۹۹۶[۵]).

محققین مختلف بر اساس داده‌های تجربی و آزمایشگاهی ، فاکتورهای تجربی شکل، عمق و تمایل بار دیگری ارائه نموده‌اند (مانند ترزاقی ۱۹۴۳[۱]؛ ترزاقی و پک[2] ۱۹۴۸[۶]؛ میرهوف ۱۹۵۳[۳]؛ میرهوف ۱۹۶۳[۷]؛ دبیر[3] ۱۹۷۰[۸]؛ هانسن ۱۹۷۰[۹]؛ ماندل[4] و سالنسون[5] ۱۹۷۲[۱۰]؛ میرهوف ۱۹۷۴ [۱۱]؛ هانّا[6] و میرهوف ۱۹۷۹ [۱۲]).

برای بار قائم وارد بر مرکز پی ضریب تمایل بار به مقدار ۱ کاهش می‌یابد. بنابراین ، تنها فاکتور نامعلوم در این حالت ضریب شکل می‌باشد که بطور مفصل در بخش ۲-۳ راجع به آن بحث خواهد شد. در تمام این تئوری‌ها فرض بر این است که پی بر روی لایه‌ای ضخیم و نامحدود از خاک قرار گرفته است. البته مسلّماً این تنها حالتی نیست که در طبیعت وجود داشته باشد. به همین جهت برخی محققین اثر یک بستر سخت را که در عمقی نزدیک به سطح زمین قرار گرفته باشد بر روی ظرفیت باربری بررسی نموده‌اند. این حالت در واقع شرایطی را نشان می‌دهد که مثلاً پی روی خاک دانه‌ای واقع بر بستری از سنگ یا رس سخت قرار گرفته باشد.

---

[1] - Hansen
[2] - Peck
[3] - DeBeer
[4] - Mandel
[5] - Salencon
[6] - Hanna

جدول ۲-۱- مقایسه سه تئوری در زمینه ظرفیت باربری خاک

موضوع	ترزاقی(۱۹۴۳)	میرهوف(۱۹۵۳)	هانسن(۱۹۶۱)
تحکیم	هیچگونه تحکیمی در خاک رخ نمی دهد	همانند ترزاقی	همانند ترزاقی
صلبیت پی	پی نسبت به خاک از صلبیت خیلی زیادی برخوردار است	//	//
اندرکنش خاک با پی	کف پی به اندازهٔ کافی زبر لحاظ می شود تا لغزشی میان خاک و پی بوجود نیاید	//	//
وضعیت لایه های زیر پی	خاک زیر پی همگن و توده ای نیمه بینهایت است	//	//
مقاومت برشی	مقاومت برشی خاک با این فورمول بیان میگردد: $s = c + \sigma\tan\phi.$	مقاومت برشی خاک با این فورمول بیان میگردد: $m = \tau/(c + \sigma\tan\phi)$	مقاومت برشی خاک با این فورمول بیان میگردد: $s = c + \sigma\tan\phi.$
حالت گسیختگی	گسیختگی برشی کلی حاکم است، ولی برای برشی موضعی $\phi \rightarrow \frac{2}{3}\phi$	گسیختگی برشی کلی حاکم است.پیشنهاد شده که زاویهٔ اصطکاک سه محوری برای حالت کرنش صفحه ای بر اساس شکل پی اصلاح گردد.	گسیختگی برشی کلی حاکم است.پیشنهاد شده که زاویهٔ اصطکاک سه محوری برای کرنش صفحه ای با افزایش ۱۰ درصدی اصلاح گردد.
تعیین عمق پی سطحی	عمق پی کوچکتر یا برابر با عرض آن است	هیچ محدودیتی برای عمق وجود ندارد. در عوض از فاکتورهای عمق بهره می گیریم.	هیچ محدودیتی برای عمق وجود ندارد. در عوض از فاکتورهای عمق بهره می گیریم.

ادامه جدول در صفحهٔ بعدی

جدول ۲-۱- ادامه

موضوع	ترزاقی(۱۹۴۳)	میرهوف(۱۹۵۳)	هانسن(۱۹۶۱)
فرض مقاومت برشی	مقاومت برشی خاک بین سطح زمین و کف پی را لحاظ نمی کند. این خاک فقط بصورت سربار وارد می شود.	مقاومت برشی خاک میان سطح زمین و کف پی را با لحاظ فاکتور عمق مدنظر قرار می دهد.	مقاومت برشی خاک بین سطح زمین و کف پی را لحاظ نمی کند. این خاک فقط بصورت سربار وارد می شود.
ضرایب شکل	تئوری برای پی های ممتد بسط یافته است.این یک مساله ۲بعدی است.وی برای پی های مدور و مربع ضرائب تجربی که ازتستهای مدل بدست آمده بود را بکاربرد	محدودهٔ وسیع تری از شکل پی ها را در نظر میگیردو ضرائب شکل مخصوص بخود را دارد.	محدودهٔ وسیع تری از شکل پی ها را در نظر میگیردو ضرائب شکل مخصوص بخود را دارد.
بار مایل	بار وارده فشاری و بطور قائم به مرکز پی وارد می شودو هیچ گونه لنگری لحاظ نمی گردد.	از ضرایب تمایل بار برای بارهایی که به طور قائم وارد نمی شوند بهره می برد ولی کماکان بار باید به مرکز پی وارد شود.	از ضرایب تمایل بار برای بارهایی که به طور قائم وارد نمی شوند بهره می برد ولی کماکان بار باید به مرکز پی وارد شود.
نحوهٔ قرارگیری پی	پی روی سطح زمین افقی قرار می گیرد.	پی روی سطح زمین افقی قرار می گیرد.	ضرایب شیب زمین برای حالاتی که پی روی یک شیب قرار دارد در نظر گرفته می شود.
هندسهٔ ناحیهٔ فعال زیر پی	هندسهٔ ناحیه فعال زیر پی بدین صورت میباشد: $\beta = \phi$	هندسهٔ ناحیه فعال زیر پی بدین صورت میباشد: $\beta = 45 + \phi/2$	هندسهٔ ناحیه فعال زیر پی بدین صورت میباشد: $\beta = 45 + \phi/2$