

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فنی و مهندسی عمران

گروه مکانیک خاک و پی

### پایان نامه

برای دریافت کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران

### عنوان

**تاثیر میکروسیلیس بر مقاومت خاک تثبیت شده با سیمان**

استاد راهنما

دکتر غلام مرادی

استاد مشاور

دکتر هوشنگ کاتبی

پژوهشگر

داود اسماعیل زاده

شهریور ۱۳۹۰

تقديم به

پدر و مادر عزیزم

## تقدیر و تشکر

سپاس خداوند بلند مرتبه را که لطف و مهربانی او شامل حال تمامی موجودات است. از استاد راهنمای بزرگوارم آقای دکتر غلام مرادی به خاطر راهنمایی‌های ارزنده و کمک‌های فراوانشان برای اتمام این تحقیق کمال سپاس و امتنان را دارم و از درگاه خداوند متعال برای ایشان آرزوی سلامتی و کامیابی می‌نمایم.

از استاد مشاور گرانقدرم آقای دکتر هوشنگ کاتبی که اطلاعات ارزشمند و تجارب والای ایشان عامل بسیار مهمی در تسریع روند آزمایشات بود نهایت تقدیر و تشکر را دارم و امیدوارم در زندگی همیشه سعادت‌مند و سربلند باشند. همینطور از استاد داور محترم آقای دکتر محمد حسین امین‌فر که تحقیق حاضر را ارزیابی نمودند تشکر می‌نمایم.

از آقای دکتر محمد محمدی بخاطر دل‌گرمی‌های فراوان ایشان نهایت امتنان و قدردانی را دارم. از پدر و مادر عزیزم که در تمامی مراحل زندگی با من همدل و همراه هستند و همیشه در جهت موفقیت من تلاش می‌نمایند تشکر و قدر دانی نموده و از خداوند مهربان برایشان آرزوی سلامتی دارم. همینطور از دو خواهر مهربانم و برادر بزرگوارم که همیشه با بنده صمیمانه همکاری نموده و موجب آرامش من می‌باشند، سپاسگزاری می‌کنم.

در پایان از همه دوستان و عزیزانی که در انجام این تحقیق بنده را یاری نمودند قدردانی می‌نمایم.

نام خانوادگی دانشجو : اسماعیل زاده	نام : داود
عنوان پایان نامه : تاثیر میکروسیلیس بر مقاومت خاک تثبیت شده با سیمان	
استاد راهنما : آقای دکتر غلام مرادی	
استاد مشاور : آقای دکتر هوشنگ کاتبی	
مقطع تحصیلی : کارشناسی ارشد	رشته : عمران
گرایش : خاک و پی	دانشگاه : تبریز
دانشکده : فنی مهندسی عمران	تاریخ فارغ التحصیلی : شهریور ۱۳۹۰
تعداد صفحه : ۱۱۰	
کلید واژه ها : تثبیت ماسه ریز ، سیمان، میکروسیلیس، آزمایش CBR ، آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده (ucs)	
<p><b>چکیده :</b> ماسه تثبیت شده کاربردهای متنوعی در عرصه ژئوتکنیک دارد که از آن جمله می توان به زیرساز راهها و فرودگاهها و شیبهای سدها و خاکریزها و دیوارهای حائل اشاره کرد. نمونه های خاک که به صورت مصنوعی سخت گردیده اند، با افزودن مقداری ماده تثبیت کننده ایجاد می شوند. مثال هایی از این مواد تثبیت کننده عبارتند از: سیمان، آهک، خاکستر بادی و گچ.</p> <p>در این تحقیق رفتار ماسه ریز تثبیت شده توسط آزمایش های CBR و تک محوری مورد مطالعه قرار گرفت. ماده تثبیت کننده اولیه سیمان با نسبت های ۲، ۴ و ۶ درصد وزن خشک خاک بود که به آن میکروسیلیس نیز با نسبت های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزن خشک خاک افزوده شد.</p> <p>نمونه های لازم با نسبت های سیمان و میکروسیلیس در رطوبت بهینه تهیه و بعد از عمل آوری تحت آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده (ucs) و آزمایش CBR قرار گرفتند و سپس با بررسی نتایج حاصل از انجام آزمایشات مشاهده گردید که با افزایش میکروسیلیس تا ۲۰ درصد وزن سیمان مقاومت CBR افزایش می یابد اما بعد از آن رشد مقاومت کم می شود. تأثیر افزایش میکروسیلیس بر مقاومت فشاری تک محوری بدین صورت است که در عمل آوری یک روزه با افزایش میکروسیلیس تا ۲۰ درصد وزن سیمان مقاومت فشاری تک محوری افزایش می یابد اما با افزایش میکروسیلیس بیشتر از ۲۰ درصد وزن سیمان کاهش مقاومت فشاری تک محوری را شاهد هستیم اما در عمل آوری ۷ روزه افزایش میکروسیلیس تا ۲۰ درصد وزن سیمان باعث رشد زیادی در مقاومت فشاری تک محوری می شود البته در این عمل آوری بعد از ۲۰ درصد نیز افزایش مقاومت فشاری تک محوری را شاهد هستیم. در حالت کلی افزایش مقاومت با افزایش میکروسیلیس تا ۲۰ درصد وزن سیمان به علت واکنش پوزولانی است، بعد از آن پرکنندگی میکروسیلیس نیز سهم می باشد.</p>	

فهرست مطالب

فهرست ..... صفحه

فصل اول : مقدمه

۱-۱ مقدمه ..... ۲

فصل دوم: بررسی منابع

۱-۲-۱ مقدمه ..... ۵

۲-۲ کلیاتی در مورد تثبیت ..... ۵

۱-۲-۲ مقدمه ..... ۵

۲-۲-۲ تعریف تثبیت خاک ..... ۵

۳-۲-۲ اهداف تثبیت خاکها و کاربرد آن ..... ۶

۴-۲-۲ انتخاب ماده تثبیت کننده مناسب برای خاکها ..... ۷

۳-۲ تثبیت خاک با سیمان ..... ۱۰

۱-۳-۲ مقدمه ..... ۱۰

۲-۳-۲ تثبیت خاکهای ریزدانه با سیمان ..... ۱۰

۳-۳-۲ تثبیت خاک های درشت دانه با سیمان ..... ۱۱

۴-۳-۲ خصوصیات خمیری خاکهای تثبیت شده با سیمان ..... ۱۲

۵-۳-۲ تراکم خاکهای تثبیت شده با سیمان ..... ۱۳

۶-۳-۲ مقاومت خاکهای تثبیت شده با سیمان ..... ۱۴

۷-۳-۲ تعیین مقدار سیمان لازم برای تثبیت خاکها ..... ۱۷

۴-۲ سیمان ..... ۱۸

۱-۴-۲ کلیاتی در مورد سیمان ..... ۱۸

۲-۴-۲ تاریخچه کشف سیمان ..... ۱۹

ادامه فهرست ..... صفحه

۲۰	.....	۳-۴-۲	علت نامگذاری سیمان پرتلند
۲۰	.....	۴-۴-۲	تولید صنعتی سیمان
۲۱	.....	۵-۴-۲	نحوه تولید سیمان پرتلند
۲۳	.....	۶-۴-۲	ترکیبات شیمیایی سیمان
۲۶	.....	۷-۴-۲	انواع سیمان پرتلند
۳۰	.....	۸-۴-۲	خواص سیمان پرتلند
۳۰	.....	۱-۸-۴-۲	گرمای آگیری سیمان
۳۱	.....	۲-۸-۴-۲	نرمی
۳۱	.....	۳-۸-۴-۲	زمان گیرش
۳۱	.....	۴-۸-۴-۲	چگالی و وزن سیمان
۳۱	.....	۹-۴-۲	واکنش قلیایی سنگدانه
۳۴	.....	۱۰-۴-۲	کربناتی شدن
۳۴	.....	۱۱-۴-۲	تأثیر سولفات
۳۴	.....	۵-۲	میکروسیلیس
۳۴	.....	۱-۵-۲	مقدمه
۳۵	.....	۲-۵-۲	تعریف میکروسیلیس
۳۵	.....	۳-۵-۲	تاریخچه استفاده از میکروسیلیس
۳۶	.....	۴-۵-۲	خصوصیات فیزیکی میکروسیلیس
۳۶	.....	۱-۴-۵-۲	رنگ میکروسیلیس
۳۶	.....	۲-۴-۵-۲	چگالی، اندازه و شکل ذرات میکروسیلیس
۳۷	.....	۵-۵-۲	خصوصیات شیمیایی میکروسیلیس
۳۸	.....	۶-۵-۲	خاصیت پوزولانی میکروسیلیس
۳۹	.....	۷-۵-۲	خاصیت پرکنندگی میکروسیلیس
۳۹	.....	۸-۵-۲	تأثیر میکروسیلیس بر نفوذپذیری

ادامه فهرست ..... صفحه

۹-۵-۲	تأثیر میکرو سیلیس در کاهش قلیایی ها و کربنات کلسیم	۴۰
۱۰-۵-۲	تأثیر میکروسیلیس بر زمان گیرش	۴۱
۱۱-۵-۲	تأثیر میکروسیلیس بر حرارت زایی	۴۱
۱۲-۵-۲	تأثیر میکروسیلیس بر مقاومت در مقابل سولفات ها	۴۱
۱۳-۵-۲	انواع شکل های موجود میکروسیلیس	۴۱
۶-۲	آزمایش دانه بندی خاک	۴۲
۱-۶-۲	کلیاتی در مورد دانه بندی خاک	۴۲
۲-۶-۲	کاربرد دانه بندی خاک	۴۳
۳-۶-۲	نحوه دانه بندی خاک ها	۴۳
۱-۳-۶-۲	دانه بندی در خاک های درشت دانه	۴۴
۲-۳-۶-۲	دانه بندی در خاک های ریزدانه	۴۵
۴-۶-۲	تأثیر مقدار ریزدانه بر خواص خاک های درشت دانه	۴۵
۷-۲	آزمایش تراکم خاک	۴۷
۱-۷-۲	مقدمه	۴۷
۲-۷-۲	تئوری آزمایش تراکم	۴۸
۳-۷-۲	روش آزمایش تراکم	۴۹
۸-۲	آزمایش CBR	۵۰
۱-۸-۲	مقدمه	۵۰
۲-۸-۲	تئوری آزمایش CBR	۵۰
۳-۸-۲	بررسی عوامل مؤثر بر CBR	۵۱
۹-۲	آزمایش مقاومت فشاری تک محوری	۵۲
۱-۹-۲	مقدمه	۵۲
۲-۹-۲	تعریف مقاومت فشاری تک محوری	۵۲



ادامه فهرست ..... صفحه

۳-۹-۲ مقاومت در خاک‌های چسبنده و تئوری آزمایش فشاری تک محوری ..... ۵۳

۴-۹-۲ عوامل موثر بر آزمایش مقاومت فشاری تک محوری ..... ۵۴

۱۰-۲ پیشینه تحقیق ..... ۵۵

۱۱-۲ اهداف تحقیق ..... ۵۷

**فصل سوم: مواد و روش‌ها**

۱-۳ مقدمه ..... ۵۹

۲-۳ مواد استفاده شده در آزمایش‌ها ..... ۵۹

۱-۲-۳ خاک ماسه‌ای مورد استفاده در آزمایش‌ها ..... ۵۹

۲-۲-۳ سیمان مورد استفاده در آزمایش‌ها ..... ۶۰

۳-۲-۳ میکروسیلیس مورد استفاده در آزمایش‌ها ..... ۶۱

۳-۳ آزمایش‌های انجام یافته ..... ۶۱

۱-۳-۳ آزمایش دانه بندی ..... ۶۱

۲-۳-۳ آزمایش تعیین  $G_s$  ..... ۶۲

۳-۳-۳ آزمایش تراکم خاک ..... ۶۳

۴-۳-۳ آزمایش CBR ..... ۶۵

۵-۳-۳ آزمایش مقاومت فشاری تک محوری ..... ۶۷

**فصل چهارم: نتایج و بحث**

۱-۴ مقدمه ..... ۷۰

۲-۴ نتایج آزمایش‌های دانه بندی و تراکم روی خاک مورد مطالعه ..... ۷۰

۳-۴ بررسی نتایج آزمایش‌ها ..... ۷۲

۱-۳-۴ تاثیر مواد افزودنی بر خصوصیات تراکمی خاک ..... ۷۲

۲-۳-۴ نتایج آزمایش‌های CBR ..... ۷۸

۳-۳-۴ نتایج آزمایش‌های تک محوری ..... ۸۰

۱-۳-۳-۴ تاثیر مواد افزودنی بر مقاومت فشاری نمونه‌ها در عمل‌آوری ۱ روزه ..... ۸۰

ادامه فهرست ..... صفحه

۲۰۳-۳-۴ تاثیر مواد افزودنی بر مقاومت فشاری نمونه‌ها در عمل‌آوری ۷ روزه ..... ۸۴

۳-۳-۳-۴ مقایسه مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های بدون میکروسیلیس ..... ۸۸

۴-۳-۳-۴ تاثیر افزایش مواد سیمانی و مدت زمان عمل‌آوری بر نرخ افزایش مقاومت فشاری تک محوره ..... ۸۹

**فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات**

۱-۵ مقدمه ..... ۹۳

۲-۵ نتیجه گیری ..... ۹۳

۳-۵ پیشنهادات ..... ۹۴

پیوست (الف): نمودارهای آزمایش‌های CBR ..... ۹۵

پیوست (ب): نمودارهای آزمایش‌های فشار تک‌محوری ..... ۱۰۲

## فهرست جداول

## فهرست جداول

### فهرست ..... صفحه

جدول ۱-۲ تعیین نوع ماده مناسب تثبیت کننده .....	۹
جدول ۲-۲ حدود تقریبی سیمان لازم برای تثبیت خاک‌های دانه‌ای و ماسه‌ای.....	۱۲
جدول ۳-۲ منابع مواد خام که در تولید سیمان مصرف می شوند.....	۲۲
جدول ۴-۲ واکنش های تبدیلی ترکیبات سیمان پرتلند.....	۲۵
جدول ۴-۲ فازهای کلینگر و مشخصات آنها ( درصدها وزنی است).....	۲۸
جدول ۵-۲ استانداردهای آمریکا (ASTM-C ۱۵۰) برای سیمان.....	۲۹
جدول ۶-۲ برخی از مواد معدنی ، سنگ ها و مواد مصنوعی که بالقوه دارای واکنش زیان آورند.....	۳۳
جدول ۷-۲ در صد ترکیبات شیمیایی موجود در میکروسیلیس .....	۳۸
جدول ۱-۳ مشخصات سیمان نوع ۱.....	۲۶
جدول ۲-۳ درصد سیمان و میکروسیلیس نسبت به وزن خشک خاک برای انجام تراکم و تهیه نمونه‌های لازم برای آزمایش‌ها.....	۶۳
جدول ۳-۳ مشخصات مربوط به تراکم استاندارد (D۶۹۸).....	۶۵
جدول ۱-۴ نتایج آزمایش تراکم.....	۷۱
جدول ۲-۴ نتایج آزمایش CBR بر روی نمونه‌های با نسبت سیمان ۲ درصد.....	۷۴
جدول ۳-۴ نتایج آزمایش CBR بر روی نمونه‌های با نسبت سیمان ۴ درصد.....	۷۵
جدول ۴-۴ نتایج آزمایش CBR بر روی نمونه‌های با نسبت سیمان ۶ درصد.....	۷۵
جدول ۵-۴ مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها در عمل‌آوری ۱ روزه.....	۷۸
جدول ۶-۴ مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها در عمل‌آوری ۷ روزه.....	۸۱

فهرست اشکال

فهرست	صفحه
شکل (۱-۲) تثبیت کننده‌های مناسب برای خاک‌های مختلف.....	۷
شکل (۲-۲) مثلث دانه‌بندی (FAA).....	۸
شکل (۳-۲) تاثیر میزان سیمان مخلوط‌های خاک-سیمان بر خصوصیات خمیری یک نمونه رس لای‌دار.....	۱۳
شکل (۴-۲) الف) ارتباط بین مقدار سیمان با مقاومت فشاری تک محوره در مخلوط خاک-سیمان.....	۱۴
شکل (۴-۲) ب) تاثیر مدت زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری تک محوره در مخلوط خاک-سیمان.....	۱۵
شکل (۵-۲) رابطه بین مقاومت فشاری و CBR چند نمونه خاک تثبیت شده با سیمان.....	۱۶
شکل (۶-۲) حداقل مقاومت فشاری قابل قبول خاک های تثبیت شده با سیمان را که به اندازه درشت ترین دانه آنها کوچکتر از ۴/۷۶ میلیمتر است.....	۱۷
شکل (۷-۲) حداقل مقاومت فشاری قابل قبول خاک‌های تثبیت شده با سیمان را که به اندازه درشت‌ترین دانه آنها بزرگتر از ۴/۷۶ میلیمتر است.....	۱۸
شکل (۸-۲) عکس میکروسکوپی فازهای مختلف سیمان.....	۲۴
شکل ۹-۲ مکانیزم کاهش لوله‌های موئینه در خمیر سیمان به علت حضور میکروسیلیس.....	۴۰
شکل (۱۰-۲) سه حالت متمایز مصالح شنی از نظر میزان ریزدانه آنها.....	۴۵
شکل (۱۱-۲) تأثیر میزان ریزدانه بر وزن مخصوص و CBR یک نمونه مصالح شنی.....	۴۷
شکل (۱۰-۳) منحنی دانه‌بندی خاک.....	۶۰
شکل (۲-۳) قالب تراکم.....	۶۴
شکل (۳-۳) دستگاه تراکم.....	۶۴
شکل (۴-۳) قالب و وزنه‌های آزمایش CBR.....	۶۶
شکل (۵-۳) دستگاه CBR.....	۶۶
شکل (۶-۳) دستگاه آزمایش مقاومت فشاری تک محوری.....	۶۸
شکل (۱۰-۴) منحنی دانه‌بندی خاک.....	۷۰
شکل (۲-۴) منحنی تراکم خاک.....	۷۱
شکل (۳-۴) تاثیر افزایش مقدار میکروسیلیس بر وزن مخصوص خشک ماکزیمم خاک بهمراه ۲ درصد سیمان.....	۷۲

ادامه فهرست اشکال ..... صفحه

- شکل (۴-۴) تاثیر افزایش مقدار میکروسیلیس بر وزن مخصوص خشک ماکزیمم خاک به همراه ۴ درصد  
سیمان ..... ۷۲
- شکل (۵-۴) تاثیر افزایش مقدار میکروسیلیس بر وزن مخصوص خشک ماکزیمم خاک به همراه ۶ درصد  
سیمان ..... ۷۳
- شکل (۶-۴) تاثیر افزایش مقدار میکروسیلیس بر وزن مخصوص خشک ماکزیمم خاک به همراه نسبت‌های  
متفاوت سیمان ..... ۷۳
- شکل (۷-۴) مقایسه نتایج آزمایش CBR برای نفوذ ۵ میلیمتری ..... ۷۶
- شکل (۸-۴) نمودار تنش- کرنش برای نمونه‌های با ۲٪ سیمان و نسبت‌های متفاوت میکروسیلیس  
در عمل‌آوری ۱ روزه ..... ۷۹
- شکل (۹-۴) نمودار تنش- کرنش برای نمونه‌های با ۴٪ سیمان و نسبت‌های متفاوت میکروسیلیس  
در عمل‌آوری ۱ روزه ..... ۸۰
- شکل (۱۰-۴) نمودار تنش- کرنش برای نمونه‌های با ۶٪ سیمان و نسبت‌های متفاوت میکروسیلیس  
در عمل‌آوری ۱ روزه ..... ۸۰
- شکل (۱۱-۴) نمودار تنش- کرنش برای نمونه‌های با ۲٪ سیمان و نسبت‌های متفاوت میکروسیلیس  
در عمل‌آوری ۷ روزه ..... ۸۲
- شکل (۱۲-۴) نمودار تنش- کرنش برای نمونه با ۴٪ سیمان و نسبت‌های متفاوت میکروسیلیس  
در عمل‌آوری ۷ روزه ..... ۸۲
- شکل (۱۳-۴) نمودار تنش- کرنش برای نمونه با ۶٪ سیمان و نسبت‌های متفاوت میکروسیلیس  
در عمل‌آوری ۷ روزه ..... ۸۳
- شکل (۱۴-۴) نمودار تنش- کرنش برای نمونه با نسبت‌های متفاوت سیمان و بدون میکروسیلیس  
در عمل‌آوری ۱ روزه ..... ۸۴
- شکل (۱۵-۴) نمودار تنش- کرنش برای نمونه‌های با نسبت‌های متفاوت سیمان و بدون میکروسیلیس  
در عمل‌آوری ۷ روزه ..... ۸۴
- شکل (۱۶-۴) نمودار تاثیر افزایش مقدار سیمان بر مقاومت فشاری تک محوری برای نمونه‌های  
بدون میکروسیلیس در عمل‌آوری ۱ و ۷ روزه ..... ۸۵

## فهرست اشکال

---

### ادامه فهرست اشکال ..... صفحه

- شکل (۱۷-۴) نمودار تاثیر افزایش میکروسیلیس بر نرخ افزایش مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها  
با نسبت‌های متفاوت سیمان در عمل آوری ۱ روزه ..... ۸۶
- شکل (۱۸-۴) نمودار تاثیر افزایش میکروسیلیس بر نرخ افزایش مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها  
با نسبت‌های متفاوت سیمان در عمل آوری ۷ روزه ..... ۸۷

# فصل اول

## مقدمه

## ۱-۱ مقدمه

خاک طبیعی موجود در عملیات ساختمانی همواره به طور کامل مطلوب برای تحمل سازه مورد نظر نیست. به عنوان مثال خاک ممکن است خیلی شل باشد و بعد از احداث سازه نشست زیادی را از خود نشان دهد. در چنین حالتی لازم است که قبل از احداث ساختمان، خاک متراکم شود تا وزن مخصوص و در نتیجه مقاومت برشی آن افزایش یابد.

در برخی مواقع خاک لایه فوقانی نامناسب است که در این صورت بایستی خاک لایه فوقانی را برداشته و با نوع دیگری از خاک که مناسب است جایگزین نماییم. یکی از راهکارهای دیگری که برای ارتقاء کیفیت خاک به کار می‌رود استفاده از مواد افزودنی نظیر آهک، سیمان، خاکستر بادی و ... است.

استفاده از مواد افزودنی که برای بهبود خصوصیات خاک در وضعیت درجا به کار می‌رود در اصطلاح به تثبیت کردن خاک معروف است. این روش در صورت استفاده صحیح علاوه بر افزایش کیفیت خاک مزایای اقتصادی زیادی را نیز به همراه خود دارد.

ماسه تثبیت شده کاربردهای متنوعی در عرصه ژئوتکنیک دارد که از آن جمله می‌توان به زیر اساس راه‌ها و فرودگاه‌ها، شیب‌های سدها، خاکریزها و دیوارهای حایل اشاره کرد.

در این پایان‌نامه از سیمان و میکروسیلیس جهت تثبیت خاک ماسه‌ای ریز استفاده شده است. تاثیر سیمان و میکروسیلیس بر مقاومت فشاری تک محوری بعد از عمل‌آوری یک روزه و هفت روزه روی نمونه‌ها با انجام آزمایش تک محوری مورد بحث قرار گرفت. همینطور تاثیر این مواد بر مقاومت CBR خاک بعد از عمل-آوری هفت روزه توسط آزمایش CBR بررسی شد.

در فصل دوم پایان‌نامه ابتدا در مورد تثبیت، تاثیر سیمان بر خصوصیات خاک تثبیت شده با سیمان، انواع سیمان و اجزای تشکیل دهنده آن، میکروسیلیس و خصوصیات آن بحث گردیده است و سپس به کلیاتی در



مورد آزمایش‌های دانه بندی، تراکم، CBR، فشار تک محوری اشاره شده است. نهایتاً پیشینه‌ای از پژوهش‌های انجام یافته در این مورد و اهداف تحقیق، آورده شده است.

در فصل سوم ابتدا نوع مواد استفاده شده در آزمایش‌ها یعنی خاک ماسه‌ای ریز، سیمان، میکروسیلیس معرفی شده است و سپس به روش‌های بررسی خصوصیات خاک یعنی، آزمایش دانه بندی، آزمایش تراکم، آزمایش تعیین  $G_s$ ، آزمایش CBR و آزمایش مقاومت فشاری تک محوری پرداخته شده است.

در فصل چهارم نتایج حاصل از انجام آزمایشات روی نمونه‌های تهیه شده از خاک، سیمان و میکروسیلیس ارائه و مورد بحث قرار گرفته است.

در فصل پنجم، نتیجه‌گیری‌های نهایی حاصل از تحقیق انجام یافته، آورده شده است و در پایان نیز پیشنهاداتی برای ادامه کار داده شده است.

در تحقیق حاضر میکروسیلیس که از محصولات جنبی حاصل از صنایع فلز سیلیکون و آلیاژ فروسیلیکون می‌باشد و قبلاً باعث آلودگی هوا می‌شد، به عنوان ماده ثانویه بر خاک تثبیت شده با سیمان اضافه گردیده است تا تأثیرات آن مورد بحث واقع شود.

# فصل دوم

## بررسی منابع

**۲-۱- مقدمه**

بنابه دلایل مختلفی در ساخت و سازها مجبور به ارتقاء کیفیت خاک به لحاظ مقاومت و دوام می شویم که در این میان تثبیت بعنوان یک راهکار سازنده و موثر به حساب می آید. تعیین نوع ماده یا ماده‌های تثبیت کننده و همینطور مقدار آنها در دستیابی به اهداف تثبیت اهمیت زیادی دارد در این فصل ابتدا کلیاتی در مورد تثبیت و تاثیر سیمان در تثبیت خاک‌ها و سپس اجزاء متشکله سیمان، خصوصیات آن و میکروسلیس مورد بحث واقع شده است. با توجه به اینکه در این تحقیق روش‌های بررسی تاثیر مواد افزودنی روی خاک توسط آزمایش‌های آزمایشگاهی می‌باشد لذا در مورد آزمایش‌های مربوط توضیحاتی آورده شده است. در پایان سابقه تحقیق و اهداف تحقیق ذکر شده است.

**۲-۲ کلیاتی در مورد تثبیت****۲-۲-۱ مقدمه**

تثبیت خاک و مصالح دانه‌ای (شنی) روشی است که در راه‌سازی و روسازی فرودگاه‌ها به منظور بهبود کیفیت مصالح به کار می‌رود تا مصالحی با مشخصات مناسب برای به کار بردن در لایه‌های روسازی بدست آید.

**۲-۲-۲ تعریف تثبیت خاک**

تثبیت شامل روند ترکیب و مخلوط نمودن موادی با خاک جهت بهبودی ویژگی‌های مربوطه خاک می‌باشد. این پروسه ممکن است شامل ترکیب نمودن خاک‌ها برای دست یابی به دانه بندی مناسب باشد یا شامل مخلوط نمودن افزودنی‌های قابل دسترس چسباننده برای سخت کردن خاک باشد. اصلاح خاک نیز مربوط به پروسه تثبیت می‌باشد که باعث بهبودی خواص خاک می‌شود اما افزایش زیادی در مقاومت و دوام خاک ایجاد نمی‌کند [۳۲].

## ۲-۳-۳ اهداف تثبیت خاک‌ها و کاربرد آن

تثبیت خاک دو ویژگی عمده ایجاد می‌کند [۳۲]:

۱. کیفیت خاک را بهبود می‌بخشد.
  ۲. ضخامت لایه‌های خاکریزی را کم می‌کند.
- علاوه بر دو مورد فوق سایر اهداف مهم تثبیت خاک به شرح زیر است [۱۱]:
۱. استفاده موثر از قرضه‌های جانبی
  ۲. اصلاح خاک‌های نرم و کم مقاومت
  ۳. افزایش دوام خاک
  ۴. افزایش مقاومت باربری خاک
  ۵. کاهش تورم و انقباض خاک
  ۶. کاهش چسبندگی خاک‌های رسی اشباع
  ۷. جلوگیری از فرسایش خاک
  ۸. ایجاد لایه‌های اساس و زیراساس با قابلیت باربری بیشتر
  ۹. بازسازی روسازی‌های فرسوده با استفاده از مصالح موجود
  ۱۰. آماده‌سازی محوطه‌ای برای اجرای آسانتر عملیات ساختمانی
  ۱۱. کاهش گرد و غبار
  ۱۲. صرفه جوئی در مصرف مصالح
  ۱۳. صرفه جوئی در مصرف انرژی
  ۱۴. تسریع در عملیات اجرائی

از مصالح تثبیت شده برای ایجاد خاکریزها، ساختن لایه‌های اساس، زیر اساس و خاک بستر روسازی‌ها و حتی در پاره‌ای موارد به عنوان یک لایه رویه می‌توان استفاده کرد.