



۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی عمران

رساله دکتری

گرایش ژئوتکنیک

تعیین شرایط بهینه و خواص خاک تثبیت شده با بیوپلیمر صمغ فارسی

نگارش:

فرزانه مدیری

استاد راهنما:

دکتر حسن قاسم زاده

زمستان ۱۴۰۰

الحمد لله الذي
خلقنا من
الحمم



تاسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاییدیه هیأت داوران

هیأت داوران پس از مطالعه رساله و شرکت در جلسه دفاع از رساله تهیه شده تحت عنوان :

تعیین شرایط بهینه و خواص خاک تثبیت شده با بیوپلیمر صمغ فارسی

توسط فرزانه مدیری صحت و کفایت تحقیقات انجام شده را برای اخذ درجه دکتری رشته مهندسی

عمران گرایش ژئوتکنیک در تاریخ ۱۴۰۰/۲/۱۵ مورد تأیید قرار دادند.

۱- استاد راهنما آقای دکتر حسن قاسم زاده

امضاء

۲- استاد ممتحن آقای دکتر محمد حائری

امضاء

۳- استاد ممتحن آقای دکتر سعید غفارپور جهرمی

امضاء

۴- استاد ممتحن آقای دکتر فرزین کلانتری

امضاء

۵- استاد ممتحن آقای دکتر امیدرضا بارانی

امضاء



تاسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

اظهارنامه دانشجو

اینجانب فرزانه مدیری دانشجوی دکترای رشته مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک دانشکده

مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه

شده در رساله با عنوان:

تعیین شرایط بهینه و خواص خاک تثبیت شده با بیوپلیمر صمغ فارسی

با راهنمایی استاد محترم جناب آقای دکتر حسن قاسم زاده توسط شخص اینجانب انجام شده

است. صحت و اصالت مطالب نگارش شده در این رساله مورد تأیید می‌باشد. در مورد استفاده

از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به علاوه گواهی می‌نمایم که مطالب

مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری

در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن رساله چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را به طور

کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:

حق طبع، نشر و مالکیت نتایج

- ۱- حق چاپ و تکثیر این رساله متعلق به نویسنده و استاد راهنمای آن می‌باشد. هرگونه تصویربرداری از کل یا بخشی از پایان‌نامه تنها با موافقت نویسنده یا استاد/استادان راهنما یا کتاب-خانه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد.
- ۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.
- ۳- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

تقدیم

این رساله را ضمن پاس بیکران و در کمال افتخار و اتنان تقدیم می نمایم به محضر ارزشمنده پدر و مادر عزیزم که
همواره چراغ وجودشان روشنر راه من در سختی ها و مشکلات بوده است و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده اند
و همین طور به همسرم، همراه همیشگی ام که وجودش مایه دلگرمی من می باشد.

تشکر و قدردانی

پاس بی کران پروردگار یکتا را که، مستیمان، بنحید و سلام و دور در محمد و خاندان پاک ایشان

بانشکر و پاس از استاد کران قدر جناب آقای دکتر قاسم زاده که در جریان این پایان نامه، با صبر و حوصله

فراوان مرا راهنمایی کردند

و بانشکر خالصانه خدمت همه کسانی که به نوعی مراد به انجام رساندن این مهم یاری نموده

چکیده

اثرات مخرب زیست محیطی افزودنی‌های سستی تثبیت خاک از قبیل انتشار گازهای گلخانه‌ای در فرآیند تولید آنها، مصرف زیاد منابع طبیعی و انرژی، عملکرد شکننده خاک پس از تثبیت، آلودگی آب‌های زیر زمینی و تخریب پوشش گیاهی، محققین رشته ژئوتکنیک را به سمت استفاده از افزودنی‌های دوست‌دار محیط زیست با منشأ طبیعی در تثبیت خاک سوق داده است. یکی از افزودنی‌های طبیعی و زیست‌سازگار خاک، هیدروکلوئیدها به عنوان شاخه‌ای از بیوپلیمرها می‌باشند که از طریق ایجاد چسبندگی بین ذرات خاک منجر به افزایش قابل ملاحظه مقاومت خاک می‌گردند. صمغ فارسی به عنوان یک منبع ارزنده هیدروکلوئیدی جدید، به دلیل خواص قابل مقایسه با دیگر هیدروکلوئیدها، در کاربردهای صنعتی مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. ولی تاکنون کاربرد این صمغ به عنوان یک تثبیت کننده خاک مطالعه نشده است.

در این تحقیق، صمغ فارسی به منظور تقویت مقاومت خاک کائولینیت سفید به عنوان یک خاک رسی مسئله‌دار که در دسته‌بندی خاک‌های متورم شونده قرار می‌گیرد، به کار رفته و شرایط بهینه و خواص خاک تثبیت شده با این صمغ با دیگر هیدروکلوئیدهای متداول در تثبیت خاک شامل زانتان و گوار مقایسه گردیده است. نتایج این مقایسه حاکی از اثربخشی مطلوب صمغ فارسی نسبت به دیگر صمغ‌ها در جریان تثبیت و مقاوم سازی خاک می‌باشد. سپس در راستای بهینه نمودن استفاده از صمغ فارسی، با توجه به خواص رئولوژیکی و بافتی ارتقا یافته هیدروژل‌های ترکیبی صمغ‌ها، به بررسی اثر ترکیب صمغ فارسی و زانتان در تثبیت خاک پرداخته شده است. همچنین استفاده از هیدروژل‌های پیوند شده عرضی صمغ فارسی به عنوان یکی دیگر از راه‌های بهبود خواص هیدروژل‌ها و تقویت اثربخشی آنها در تثبیت خاک مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور کلرید کلسیم به عنوان پیوند دهنده عرضی یونی جهت ایجاد اتصالات عرضی بین زنجیره‌های پلیمری صمغ فارسی به کار گرفته شد. نتایج آزمایش‌های ریزمقیاس و بزرگ‌مقیاس بر روی خاک قبل و بعد از تثبیت با هیدروژل‌های ترکیبی و پیوند شده عرضی صمغ فارسی، حاکی از عملکرد موفقیت آمیز این افزودنی در تثبیت خاک به دلیل بهبود خواص مکانیکی و ریزساختار خاک می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تثبیت خاک، هیدروکلوئید، بیوپلیمر، صمغ فارسی، هیدروژل ترکیبی، هیدروژل پیوند شده عرضی، کلرید کلسیم

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۱	فصل اول (مقدمه)
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ خاک‌های نیازمند تثبیت
۴	۳-۱ افزودنی‌ها در تثبیت خاک
۵	۴-۱ ضرورت انجام تحقیق
۶	۵-۱ هدف تحقیق
۶	۶-۱ نوآوری تحقیق
۷	۷-۱ ساختار رساله
۹	فصل دوم (روری بر ادبیات)
۱۰	۱-۲ مقدمه
۱۰	۲-۲ طبقه‌بندی پلیمرها
۱۱	۳-۲ زیست پلیمرها
۱۲	۴-۲ زیست پلیمرهای مصرفی در ژئوتکنیک
۱۲	۱-۴-۲ هیدروکلوئیدها
۱۳	۲-۴-۲ کاسئین
۱۳	۳-۴-۲ کیتوسان
۱۴	۵-۲ پلی‌ساکاریدها
۱۵	۶-۲ صمغ‌های طبیعی
۱۵	۱-۶-۲ دسته‌بندی صمغ‌های طبیعی
۱۶	۲-۶-۲ ساختار شیمیایی صمغ‌های طبیعی
۱۸	۳-۶-۲ معرفی هیدروکلوئیدهای متداول
۱۸	۱-۳-۶-۲ صمغ زانتان
۲۰	۲-۳-۶-۲ صمغ گوار
۲۱	۳-۳-۶-۲ صمغ آگار
۲۱	۴-۳-۶-۲ صمغ ژلان
۲۱	۵-۳-۶-۲ بتا گلوکان

۲۲	 ۶-۳-۶-۲ صمغ عربی
۲۳	 ۷-۳-۶-۲ آلجینات سدیم
۲۴	 ۸-۳-۶-۲ صمغ قاتی
۲۴	 ۹-۳-۶-۲ صمغ کتیرا
۲۴	 ۴-۶-۲ صمغ فارسی
۲۶	 ۱-۴-۶-۲ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی
۲۸	 ۲-۴-۶-۲ ترکیب و ساختار
۲۹	 ۳-۴-۶-۲ سازگاری با دیگر بیوپلیمرها
۳۰	 ۴-۴-۶-۲ کاربردها
۳۲	 ۷-۲ هیدروژل های صمغ های طبیعی پیوند شده عرضی
۳۲	 ۱-۷-۲ هیدروژل های بر پایه پلی ساکاریدها
۳۴	 ۲-۷-۲ شبکه ای کردن پلی ساکاریدها
۳۷	 ۸-۲ تثبیت خاک با استفاده از هیدروکلوئیدها
۳۷	 ۱-۸-۲ عوامل تأثیرگذار در تثبیت خاک با بیوپلیمرها و مشتقات آنها
۳۸	 ۱-۱-۸-۲ نوع بیوپلیمر
۴۰	 ۲-۱-۸-۲ نوع خاک (درشت دانه و ریزدانه)
۴۱	 ۳-۱-۸-۲ زمان عمل آوری
۴۲	 ۴-۱-۸-۲ شیوه اختلاط بیوپلیمر با خاک
۴۳	 ۵-۱-۸-۲ خشک شدن (کاهش رطوبت)
۴۴	 ۲-۸-۲ اثر هیدروکلوئیدها و مشتقات آنها بر خواص خاک
۴۵	 ۱-۲-۸-۲ اثر بیوپلیمر بر خواص فیزیکی
۴۷	 ۲-۲-۸-۲ اثر بیوپلیمر بر خواص مکانیکی
۴۹	 ۳-۲-۸-۲ اثر بیوپلیمر بر ضریب نفوذپذیری
۴۹	 ۴-۲-۸-۲ اثر بیوپلیمر بر سیکل های تر-خشک و انجماد-ذوب
۵۰	 ۵-۲-۸-۲ اثر بیوپلیمر بر فرسایش خاک
۵۱	 ۶-۲-۸-۲ اثر بیوپلیمر بر پتانسیل رմبندگی
۵۲	 ۹-۲ جمع بندی
۵۳	 فصل سوم (مصالح و آزمایش ها)
۵۴	 ۱-۳ مقدمه
۵۴	 ۲-۳ مصالح مورد استفاده

۵۴	 خاک ۱-۲-۳
۵۶	 ۲-۲-۳ صمغ‌های مورد استفاده
۵۷	 ۳-۲-۳ کلرید کلسیم
۵۷	 ۳-۳ شیوه اختلاط مصالح
۵۸	 ۴-۳ آماده سازی نمونه
۶۰	 ۵-۳ نام‌گذاری نمونه‌ها
۶۲	 ۶-۳ معرفی آزمایش‌های انجام شده
۶۲	 ۱-۶-۳ آزمایش آنالیز بافت و رئولوژی هیدروژل‌ها
۶۳	 ۲-۶-۳ آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)
۶۴	 ۳-۶-۳ آزمایش برش مستقیم (DS)
۶۵	 ۴-۶-۳ آزمایش حدود اتربرگ
۶۷	 ۵-۶-۳ آزمایش تحکیم
۶۹	 ۶-۶-۳ آزمایش تورم
۶۹	 ۷-۶-۳ آزمایش انقباض خطی
۷۰	 ۸-۶-۳ آزمایش ذوب و انجماد
۷۰	 ۹-۶-۳ آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)
۷۲	 ۱-۹-۶-۳ پردازش تصاویر میکروسکوپی
۷۳	 ۱۰-۶-۳ آزمایش میکروسکوپ نوری (SZM)
۷۴	 ۱۱-۶-۳ آزمایش N_2 -BET
۷۸	 ۱۲-۶-۳ آنالیز توزین حرارتی (TGA)
۷۹	 ۱۳-۶-۳ آنالیز اندازه ذرات (PSA)
۸۲	 ۱۴-۶-۳ آزمایش پراش اشعه X (XRD)
۸۵	 ۷-۳ برنامه آزمایش‌ها
۹۰	 ۸-۳ جمع بندی
۹۱	 فصل چهارم (نتایج و بحث)
۹۲	 ۱-۴ مقدمه
۹۳	 ۲-۴ بررسی عملکرد صمغ فارسی در تثبیت خاک در مقایسه با دیگر صمغ‌ها
۹۳	 ۱-۲-۴ مقاومت فشاری تک‌محوری
۹۳	 ۱-۱-۲-۴ مقدار بهینه صمغ‌ها
۹۵	 ۲-۱-۲-۴ اثر زمان عمل‌آوری

۹۶	 ۳-۱-۲-۴ اثر خشک شدن
۹۸	 ۲-۲-۴ آزمایش برش مستقیم
۱۰۰	 ۳-۲-۴ آزمایش تحکیم
۱۰۲	 ۴-۲-۴ آزمایش تورم
۱۰۴	 ۵-۲-۴ آزمایش انقباض خطی
۱۰۵	 ۶-۲-۴ آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ نوری (SZM)
۱۱۰	 ۷-۲-۴ آزمایش (BET) Brunauer, Emmett and Teller
۱۱۱	 ۸-۲-۴ آنالیز توزین حرارتی (TGA)
۱۱۳	 ۹-۲-۴ آنالیز اندازه ذرات (PSA)
۱۱۴	 ۳-۴ هیدروژل ترکیبی صمغ فارسی
۱۱۴	 ۱-۳-۴ آزمایش آنالیز بافت و رئولوژی هیدروژل‌ها
۱۱۵	 ۲-۳-۴ مقاومت فشاری تک‌محوری
۱۱۷	 ۳-۳-۴ آزمایش برش مستقیم
۱۱۸	 ۴-۳-۴ آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ نوری (SZM)
۱۲۰	 ۵-۳-۴ آزمایش (N2-BET) Brunauer, Emmett and Teller
۱۲۱	 ۶-۳-۴ آنالیز اندازه ذرات (PSA)
۱۲۴	 ۴-۴ هیدروژل پیوند شده عرضی صمغ فارسی
۱۲۴	 ۱-۴-۴ مقاومت فشاری تک‌محوری
۱۲۷	 ۲-۴-۴ آزمایش برش مستقیم
۱۲۹	 ۳-۴-۴ آزمایش حدود اتربرگ
۱۳۱	 ۴-۴-۴ آزمایش دوام
۱۳۳	 ۵-۴-۴ آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ نوری (SZM)
۱۳۷	 ۶-۴-۴ آزمایش (N2-BET) Brunauer, Emmett and Teller
۱۳۹	 ۷-۴-۴ آزمایش پراش اشعه X (XRD)
۱۴۱	 ۵-۴ جمع بندی
۱۴۲	 فصل پنجم (نتیجه گیری و پیشنهادات)
۱۴۳	 ۱-۵ مقدمه
۱۴۳	 ۲-۵ نتیجه گیری
۱۴۷	 ۳-۵ پیشنهادات

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲- انواع پلی ساکاریدها با مثال [28].....	۱۴
جدول ۲-۲- طبقه بندی صمغ های طبیعی از نظر ساختار شیمیایی، بار، رفتار ژلاتینی، منبع و شکل [33].....	۱۶
جدول ۳-۲- آنالیز ترکیبی بخش های قابل حل و غیر قابل حل صمغ فارسی استان فارس [67].....	۲۶
جدول ۴-۲- عوامل مختلف پیوند دهنده عرضی پلیمرها [114].....	۳۵
جدول ۱-۳- پارامترهای مهندسی و خصوصیات شیمیایی خاک رس مورد استفاده ۵۵	۵۵
جدول ۲-۳- خصوصیات و ترکیبات شیمیایی صمغ های مورد استفاده ۵۶	۵۶
جدول ۳-۳- خصوصیات فیزیکی-شیمیایی کلرید کلسیم ۵۷	۵۷
جدول ۱-۴- نتایج حاصل از پردازش تصاویر میکروسکوپی SEM..... ۱۰۹	۱۰۹
جدول ۲-۴- نتایج حاصل از آزمایش رئولوژی و آنالیز بافت برای نمونه های خاک خالص و تثبیت شده ... ۱۱۵	۱۱۵
جدول ۳-۴- سطح ویژه، حجم و قطر حفره نمونه های خاک خالص و تثبیت شده با ترکیب های مختلف صمغ فارسی و زانتان ۱۲۱	۱۲۱
جدول ۴-۴- نتایج حاصل از پردازش تصاویر میکروسکوپی SEM برای نمونه های خاک رس خالص و پیوند شده عرضی ۱۳۶	۱۳۶
جدول ۵-۴- نتایج آزمایش BET رس خالص و تثبیت شده با محلول بهینه کلرید کلسیم و صمغ فارسی. ۱۳۸	۱۳۸

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲- ساختار شیمیایی صمغ‌های طبیعی (الف) کتیرا (ب) قاتی (ج) تارا (د) ژلان (ه) عربی (و) ژلان (ز) دانه لوبیا (ح) زانتان (ط) استرکولیا (ی) گوار [34]..... ۱۷
- شکل ۲-۲- (الف) باکتری زانتاناموس (ب) شکل پودری زانتان [35]..... ۱۹
- شکل ۳-۲- (الف) گیاه گوار (ب) دانه و پودر صمغ گوار [47]..... ۲۰
- شکل ۴-۲- درخت سنگال آکاسیا و تراوش‌های صمغ عربی تشکیل‌شده بر روی شاخه‌های آن [59]..... ۲۳
- شکل ۵-۲- ساختار شیمیایی آلجینات سدیم [60]..... ۲۳
- شکل ۶-۲- صمغ فارسی بر روی کنده درخت بادام‌کوهی وحشی در اندازه، رنگ و شکل طبیعی [67]..... ۲۶
- شکل ۷-۲- ساختار شیمیایی صمغ فارسی [68]..... ۲۸
- شکل ۸-۲- طیف FTIR صمغ فارسی و بخش‌های محلول و غیرمحلول [77]..... ۲۹
- شکل ۹-۲- پیوند عرضی هیدروژل‌های ماکرومولکولی بر پایه پلی‌ساکاریدها (الف) پیوند عرضی فیزیکی (ب) پیوند عرضی شیمیایی (ج) شبکه‌های پلیمری نیمه در هم نفوذ کرده (د) شبکه‌های پلیمری در هم نفوذ کرده [114]..... ۳۶
- شکل ۱-۳- منحنی دانه‌بندی خاک رس کائولینیت..... ۵۶
- شکل ۲-۳- نام‌گذاری نمونه‌ها: آزمایش‌های مربوط به (الف) صمغ فارسی (ب) هیدروژل ترکیبی (ج) هیدروژل پیوند شده عرضی..... ۶۱
- شکل ۳-۳- (الف) دستگاه مقاومت فشاری سه‌محوری مدل ۳۵۱۸ ساخت شرکت ELE (ب) شکل شماتیک [154]..... ۶۴
- شکل ۴-۳- (الف) دستگاه برش مستقیم مدل ۲۱۱۴ ساخت شرکت ELE (ب) شکل شماتیک [157]..... ۶۵
- شکل ۵-۳- حدود اتربرگ [159]..... ۶۶
- شکل ۶-۳- (الف) دستگاه کاساگرانده به کار رفته در این تحقیق (ب) شکل شماتیک [158]..... ۶۶
- شکل ۷-۳- (الف) دستگاه ادنومتر ساخت شرکت ELE (ب) شکل شماتیک دستگاه ادنومتر [162]..... ۶۸
- شکل ۸-۳- منحنی شماتیک نسبت تخلخل-تنش موثر بدست آمده از آزمایش ادنومتر [161]..... ۶۸
- شکل ۹-۳- آزمایش انقباض خطی (الف) قالب‌های به کار رفته (ب) نمونه خاک در معرض آزمایش..... ۷۰
- شکل ۱۰-۳- (الف) میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل VEGA\TESCAN-LMU به کار رفته در تحقیق (ب) نحوه عملکرد میکروسکوپ الکترونی [168]..... ۷۱
- شکل ۱۱-۳- دیاگرام شماتیک روش پردازش تصویر به کار رفته..... ۷۳

- شکل ۳-۱۲- (الف) میکروسکوپ نوری (SZM) مدل Motic SZM-140-143-FBGG (ب) نحوه عملکرد میکروسکوپ نوری [172] ۷۴
- شکل ۳-۱۳- طرح شماتیک جذب مولکول‌های گاز بر روی سطح یک نمونه (الف) مدل جذب تک لایه‌ای فرض شده در تئوری لانگمیر (ب) مدل جذب چند لایه‌ای فرض شده در تئوری BET [151] ۷۵
- شکل ۳-۱۴- (الف) دستگاه BET مدل TriStar II Plus ساخت شرکت Micromeritics به کار رفته در تحقیق (ب) نحوه عملکرد دستگاه BET [174] ۷۷
- شکل ۳-۱۵- (الف) دستگاه آنالیزگر حرارتی مدل TG 209F3 NETZSCH به کار رفته در تحقیق (ب) نحوه عملکرد دستگاه TGA [178] ۷۹
- شکل ۳-۱۶- (الف) دستگاه انکسار لیزری Sympatec Helos به کار رفته در تحقیق (ب) شمایی از نحوه عملکرد دستگاه [180] ۸۱
- شکل ۳-۱۷- (الف) نحوه انکسار موج برخورد کننده مطابق رابطه برگ (ب) تداخل امواج سازنده و ویرانگر [182] ۸۳
- شکل ۳-۱۸- (الف) دستگاه پراش اشعه X مدل X'pert pro MPD ساخت شرکت Malvern Panalytical به کار رفته در تحقیق (ب) شمایی از نحوه عملکرد دستگاه [181] ۸۵
- شکل ۳-۱۹- برنامه آزمایش‌ها: (الف) بررسی عملکرد صمغ فارسی (ب) اثر ترکیبی صمغ فارسی و زانتان (ج) اثر هیدروژل پیوند شده عرضی صمغ فارسی ۹۰
- شکل ۴-۱- مقاومت فشاری نمونه‌های خاک خالص و تثبیت شده با صمغ‌های (الف) زانتان (ب) گوار (ج) اختلاط خشک فارسی (د) اختلاط تر فارسی ۹۵
- شکل ۴-۲- اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری نمونه‌های خاک خالص و تثبیت شده با صمغ زانتان، گوار و صمغ فارسی در حالت اختلاط خشک و تر ۹۶
- شکل ۴-۳- نتایج اثر خشک شدن نمونه‌های تثبیت شده با صمغ‌های زانتان، گوار و فارسی در دمای اتاق: (الف) افت رطوبت (ب) مقاومت فشاری و در آون: (ج) افت رطوبت (د) مقاومت فشاری ۹۷
- شکل ۴-۴- منحنی‌های تنش-کرنش برای نمونه‌های خشک در تنشهای قائم (الف) $\sigma_v=50$ (ب) $\sigma_v=50$ (ج) $\sigma_v=150$ kPa ۹۸
- شکل ۴-۵- منحنی‌های تنش-کرنش برای نمونه‌های تر در تنشهای قائم (الف) $\sigma_v=50$ (ب) $\sigma_v=50$ (ج) $\sigma_v=150$ kPa ۹۹
- شکل ۴-۶- نتایج آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های خاک خالص و تثبیت شده در حالت خشک و تر (الف) زاویه اصطکاک داخلی (ب) چسبندگی ۱۰۰
- (ب) ۱۰۲
- شکل ۴-۷- نتایج مربوط به آزمایش تحکیم: (الف) منحنی تحکیم (ب) شاخص تراکم و انبساط خاک ... ۱۰۲
- شکل ۴-۸- درصد تورم خاک خالص و تثبیت شده با در نظر گرفتن (الف) مقدار بیوپلیمر (ب) زمان ۱۰۴
- شکل ۴-۹- انقباض خطی خاک با مقادیر مختلف بیوپلیمرهای زانتان، گوار و صمغ فارسی ۱۰۵

- شکل ۴-۱۰- تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه خاک (الف) تثبیت نشده و تثبیت شده با مقادیر بهینه صمغ های (ب) زانتان (ج) گوار (د) فارسی اختلاط خشک (ه) فارسی اختلاط تر ۱۰۷
- شکل ۴-۱۱- تصاویر پردازش شده SEM برای خاک (الف) تثبیت نشده و تثبیت شده با مقادیر بهینه صمغ های (ب) زانتان (ج) گوار (د) فارسی اختلاط خشک (ه) فارسی اختلاط تر ۱۰۸
- شکل ۴-۱۲- تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه خاک (الف) تثبیت نشده و تثبیت شده با صمغ های (ب) زانتان (ج) گوار (د) فارسی اختلاط خشک (ه) فارسی اختلاط تر ۱۱۰
- شکل ۴-۱۳- نتایج آزمایش BET بر روی نمونه های خاک خالص و تثبیت شده (الف) سطح ویژه (ب) حجم خفرات ۱۱۱
- شکل ۴-۱۴- نمودارهای TGA خاک خالص و تثبیت شده با صمغ های زانتان، گوار و فارسی در حالت بهینه ۱۱۳
- شکل ۴-۱۵- توزیع اندازه ذرات نمونه های خاک خالص و تثبیت شده با صمغ های زانتان، گوار و فارسی ۱۱۴
- شکل ۴-۱۶- مقاومت فشاری نمونه های خاک خالص و تثبیت شده با ترکیب های مختلف صمغ فارسی و زانتان در زمان های عمل آوری (الف) ۷ (ب) ۱۴ (ج) ۲۸ و (د) ۹۰ روز ۱۱۶
- شکل ۴-۱۷- پوش گسیختگی نمونه های خاک خالص و تثبیت شده با ترکیب های مختلف صمغ فارسی و زانتان ۱۱۸
- شکل ۴-۱۸- تصاویر میکروسکوپی (الف) SEM (ب) SZM نمونه های خاک خالص و تثبیت شده با مقادیر بهینه زانتان و صمغ فارسی و ترکیب بهینه آنها ۱۱۹
- شکل ۴-۱۹- نمودار توزیع حفره خاک خالص و تثبیت شده با ترکیبات مختلف صمغ فارسی و زانتان ... ۱۲۱
- شکل ۴-۲۰- منحنی توزیع اندازه ذرات برای خاک های خالص و تثبیت شده با ترکیب های مختلف صمغ فارسی و زانتان ۱۲۲
- شکل ۴-۲۱- روش محاسبه نسبت کلوخگی از روی منحنی توزیع اندازه ذرات قبل و بعد از تثبیت ۱۲۳
- شکل ۴-۲۲- مقاومت فشاری نمونه های تثبیت شده با درصدهای مختلف بیوپلیمر صمغ فارسی (۰/۵، ۱/۰، ۱/۵، ۲/۰، ۳/۰ و ۴/۰) و محلول کلرید کلسیم (الف) ۰/۰ (ب) ۰/۵ (ج) ۱/۰ (د) ۱/۵ (ه) ۲/۰ (و) ۲/۵ مولار .. ۱۲۶
- شکل ۴-۲۳- نتایج آزمایش برش مستقیم برای نمونه خاک خالص و تثبیت شده با مقادیر مختلف صمغ فارسی و پیوند دهنده عرضی (الف) چسبندگی (ب) زاویه اصطکاک داخلی ۱۲۹
- شکل ۴-۲۴- حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری خاک های خالص و تثبیت شده با مقادیر بهینه صمغ فارسی خالص و پیوند شده عرضی ۱۳۰
- شکل ۴-۲۵- نتایج آزمایش دوام برای نمونه خاک خالص و تثبیت شده با مقادیر بهینه صمغ خالص و پیوند شده عرضی (الف) افت جرم (ب) افت رطوبت ۱۳۳
- شکل ۴-۲۶- تصاویر SEM (الف) خاک خالص و تثبیت شده با هیدروژل های بهینه (ب) KPG1C0.5 (ج) KPG1C1 (د) KPG1.5C1.5 (ه) KPG2C2 (و) KPG2C2.5 ۱۳۴

شکل ۴-۲۷- تصاویر پردازش شده SEM (الف) خاک خالص و خاک تثبیت شده با هیدروژل‌های (ب)

KPG1C0.5 (ج) KPG1C1 (د) KPG1.5C1.5 (ه) KPG2C2 (و) KPG2C2.5 ۱۳۵

شکل ۴-۲۸- تصاویر SZM (الف) خاک رس خالص و خاک تثبیت شده با هیدروژل‌های (ب) KPG1C0.5 (ج)

KPG1C1 (د) KPG1.5C1.5 (ه) KPG2C2 (و) KPG2C2.5 ۱۳۶

شکل ۴-۲۹- نتایج آزمایش BET: (الف) توزیع حفرات تجمعی (ب) گراف توزیع حفرات برای نمونه‌های خالص

و تثبیت شده با هیدروژل‌های بهینه ۱۳۹

شکل ۴-۳۰- نتایج آنالیز XRD نمونه‌های خاک خالص و تثبیت شده با هیدروژل‌های بهینه KPG1C0.5،

KPG1C1، KPG1.5C1.5، KPG2C2 و KPG2C2.5 ۱۴۱

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

امروزه رشد جمعیت و افزایش ساخت و ساز از یک سو و نبود خاک مناسب و باکیفیت در بسیاری از مناطق از سوی دیگر، نیاز به بهبود خاک را بیش از پیش محسوس نموده است. بدین جهت، روش‌های متعددی جهت بهبود خاک در مهندسی ژئوتکنیک به کار گرفته شده‌اند که به‌طور کلی به دو دسته مکانیکی و شیمیایی طبقه‌بندی می‌شوند. روش‌های مکانیکی از طریق فشردن‌سازی (تراکم) و یا خشک‌کردن (زهکشی و تحکیم) وضعیت خاک را بهبود می‌بخشند. در حالی که روش‌های شیمیایی اتصال بین ذرات را از طریق سمته کردن با اختلاط یا تزریق سیمان پرتلند معمولی و یا افزودنی‌های شیمیایی تقویت می‌کنند. مواد شیمیایی معمول مورد استفاده در بهبود خاک نگرانی‌های محیط‌زیستی همچون انتشار زیاد گازهای گلخانه‌ای در طی فرآیند تولید آن‌ها و همچنین اختلال در اکوسیستم خاک بعد از تزریق مواد افزودنی در زمین را در پی دارند. تولید تنها یک تن سیمان پرتلند تقریباً یک تن دی‌اکسید کربن و تولید یک تن آهک تقریباً ۰/۸۶ تن دی‌اکسید کربن آزاد می‌کند. انتشار دی‌اکسید کربن در اثر تولید سیمان پرتلند که معادل بیش از ۵ درصد دی‌اکسید کربن منتشر شده جهانی است، دومین عامل بزرگ تولید گازهای گلخانه‌ای توسط بشر است. تثبیت خاک با استفاده از روش‌های شیمیایی متعارف علاوه بر مصرف مقادیر زیاد انرژی و منابع، معمولاً میزان pH خاک را افزایش می‌دهد که این موضوع اثرات مخربی از قبیل تهدید کیفیت آب زیرزمینی یا محدود کردن پوشش گیاهی در پی دارد. علاوه بر این، خاک‌های تثبیت شده با استفاده از روش‌های متعارف، عملکرد بسیار شکننده‌ای از خود نشان می‌دهند که بر عملکرد و پایداری سازه‌ها تأثیر می‌گذارد. در راستای تلاش برای کاهش و یا جایگزین کردن سیمان، گزینه‌های مختلف همچون ژئوپلیمر، سیمان فعال شده در محیط قلیایی، ژئوسیمان و بتن پلیمری غیرارگانیک به کار گرفته می‌شوند. اما تأثیر کاهش دی‌اکسید کربن در این روش‌ها به دلیل وابسته بودن آن‌ها به سیمان معمولی و محصولات جانبی صنایع سنگین همچون خاکستر بادی و سرباره کوره آهن محسوس نمی‌باشد.

پلیمرها به عنوان نسل جدید افزودنی‌های خاک غیروابسته به سیمان در سال‌های اخیر به صورت گسترده‌ای در تثبیت خاک مطرح گردیده‌اند [1-3] و بر اساس منشا به دو دسته طبیعی و مصنوعی طبقه‌بندی می‌گردند. بیوپلیمرها پلیمرهای طبیعی دوست‌دار محیط زیست تولیدشده با ارگانسیم‌های زنده هستند که حفرات خاک را پر کرده و خصوصیات آن را بدون فعال کردن پروسه میکروبی تقویت می‌کنند. در سال‌های اخیر استفاده از انواع صمغ‌ها همچون صمغ‌های زانتان، گوار، آگار و ژلان و غیره به عنوان بیوپلیمر در

تثبیت خاک رواج یافته است [4-6]. این صمغ‌ها در طبیعت به فراوانی یافت می‌شوند و به‌منظور مصارف صنعتی به‌صورت پودر در دسترس و قابل استفاده می‌باشند.

۱-۲ خاک‌های نیازمند تثبیت

نوع خاک یکی از مسائل مهم در هر پروژه عمرانی از قبیل ساختمان‌سازی، راه‌سازی، سدسازی، تونل‌سازی و غیره است. خاک‌های مسئله‌دار می‌توانند به علت خواص مکانیکی ضعیف، پتانسیل تورم، ظرفیت باربری پایین و نشست زیاد مشکلات اجرایی فراوانی ایجاد کنند که این خصوصیات بیشتر مربوط به ترکیب، تخلخل، ساختار و کانی‌های این نوع خاک‌ها است. برخی از انواع این نوع خاک‌ها شامل خاک‌های رمبنده، خاک‌های واگرا، خاک‌های روانگرا و خاک‌های متورم‌شونده می‌باشد. خاک‌های رمبنده با ساختار باز و پیوندهای ضعیف بین ذرات، دچار کاهش حجم چشمگیر در هنگام اشباع شدن و در نتیجه کاهش ظرفیت باربری می‌گردند. خاک‌های واگرا نوع خاصی از خاک‌های ریزدانه هستند که در هنگام تماس با آب به سرعت شسته شده و باعث تخریب خاکریزها می‌گردند. خاک‌های روانگرا عموماً شامل خاک‌های ماسه‌ای اشباع یا نزدیک به اشباع، لای، ماسه بسیار سست و خاک‌های رس بسیار حساس می‌باشند. خاک‌های متورم‌شونده در اثر افزایش رطوبت دچار افزایش قابل توجه در حجم می‌شوند و فشار ناشی از این تورم باعث آسیب به ساختمان‌ها و کف‌سازی‌ها می‌گردد. یکی از خاک‌های مسئله‌دار، خاک رس است که در دسته بندی خاک‌های متورم‌شونده قرار گرفته و به دلیل فراوانی در طبیعت و ایجاد مشکلات متعدد در ساخت و ساز، بسیار مورد توجه محققین می‌باشد. خاک رس دارای کانی‌های مونتموریلونیت، ایلیت و کائولینیت می‌باشد، و سه اکسید سیلیسم (SiO_2)، آلومینیم (Al_2O_3)، و کلسیم (CaO) ۷۵ درصد ترکیب این نوع خاک را تشکیل می‌دهند. سایر کانی‌های غیر رسی این خاک عبارتند از کوارتز، مواد آلی و اکسیدهای کلونیدی [7]. خاک رس از فرسایش شیمیایی سنگ مادر آن به وجود می‌آید. از آنجا که نحوه تشکیل این نوع خاک تفاوت زیادی با سایر خاک‌ها از قبیل ماسه و لای دارد، که از هوازدهی فیزیکی سنگ‌ها ایجاد می‌شوند، خواص آن نیز با این خاک‌ها متفاوت است. به طور کلی، خصوصیات خاک‌های رسی بسیار وابسته به رطوبت آنها است. با افزایش رطوبت خاک، آب می‌تواند چسبندگی بین دانه‌ها را از بین برده و منجر به تغییرات حجمی زیاد شود [5]. لذا با توجه به مطالب گفته شده، ساخت و ساز بر روی این نوع خاک‌ها نیاز به تمهیدات ویژه‌ای دارد.

تاکنون افزودنی‌های متعددی برای بهبود خصوصیات خاک‌های رسی به منظور افزایش ظرفیت باربری، کاهش نشست و نفوذپذیری و کنترل تورم و انقباض این نوع خاک کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. ولی کماکان تحقیقات گسترده‌ای پیرامون مواد جدید تثبیت کننده این خاک‌ها در حال انجام است [8,9].

۳-۱ افزودنی‌ها در تثبیت خاک

ارتقا و بهبود خاک عبارت است از تثبیت خصوصیات مکانیکی خاک به منظور فراهم نمودن سطح عملکرد موردنیاز. در سال‌های اخیر، محققین روش‌های متعددی به منظور بهبود وضعیت خاک به کار برده‌اند. روش‌های به کار گرفته شده برای تثبیت خاک شامل روش‌های الکتریکی، بیولوژیکی، شیمیایی و مکانیکی می‌باشند. روش‌های مکانیکی متداول عبارت‌اند از تسلیح خاک [10,11]، تراکم [12] و خشک کردن [13,14]. که از میان روش‌های تثبیت خاک، تثبیت شیمیایی به نظر پرکاربردترین روش جایگزین مورد استفاده است. روش‌های شیمیایی متداول و روش‌های بیولوژیکی شامل بهبود وضعیت خاک‌های مسئله‌دار از طریق افزودنی‌های شیمیایی و عملیات بیولوژیکی می‌شوند [15-17]. در یک دسته‌بندی کلی تثبیت کننده‌های شیمیایی خاک به‌طور کلی به دو گروه متعارف و غیرمتعارف طبقه‌بندی می‌گردند [18]. افزودنی‌های متعارف شامل سیمان، آهک و مواد قیری و محصولات جانبی صنعتی از قبیل خاکستر بادی، باقیمانده کربید کلسیم و خاکستر سرباره کوره می‌باشند [19-21]. استفاده افزودنی‌های متعارف دارای مضرات زیست مخرب بودن و تهدید پوشش گیاهی و کیفیت آب منطقه، افزایش pH خاک پس از تثبیت، عملکرد شکننده خاک و مصرف زیاد منابع و انرژی است.

در راستای کمک به حذف اثرات مخرب افزودنی‌های متعارف، تثبیت کننده‌های غیرمتعارف شامل مواد شیمیایی مختلف به شکل پودر یا مایع همچون آنزیم‌ها، پلیمرها، صمغ‌ها، رزین‌ها، سیلیکات‌ها، مواد نانو، یون‌ها و افزودنی‌های لیگنین در تثبیت خاک مورد استفاده قرار گرفتند [22-25]. ولیکن این افزودنی‌ها نیز اغلب قابل تجزیه نبوده و به طور کامل قادر به حذف مضرات زیست محیطی نبودند. در سال‌های اخیر نسل جدیدی از افزودنی‌های غیرمتعارف که کاملاً زیست سازگار و زیست تجزیه پذیر می‌باشند، معرفی گردیده و بسیار مورد توجه محققین ژئوتکنیک قرار گرفته‌اند. به عنوان مثال، بیوپلیمرهایی همچون صمغ زانتان، گوار، کیتوسان و آلجینات سدیم به شکل ژل قابل انحلال در آب می‌توانند به عنوان افزودنی برای بهبود وضعیت خاک و کاهش روانگرایی خاک مورد استفاده قرار گیرند [5,26]. علیرغم فواید بسیار مهم

این افزودنی‌ها، بسیاری از مهندسين نسبت به استفاده از آن‌ها در عمل تمایلی ندارند. این عدم پذیرش به ترکیب عواملی از قبیل عدم وجود تحقیق جداگانه‌ای برای تأیید توجیه اقتصادی و تقویت عملکردی که توسط سازندگان افزودنی‌ها ادعا می‌شود، فقدان روش‌های آزمایشگاهی استاندارد برای ارزیابی عملکرد میدانی و اطلاعات نامناسب تهیه‌شده از طرف سازنده‌ها در رابطه با محتویات پنهان افزودنی که در برخی موارد موجب نگرانی‌های زیست‌محیطی می‌گردد، ربط داده می‌شود. بنابراین ارزیابی رفتار این مواد و اندرکنش آن‌ها با خاک از طریق انجام آزمایش‌های مختلف ژئوتکنیکی می‌تواند به مهندسين پروژه‌های ژئوتکنیکی در به‌کارگیری این مواد جدید دوست‌دار محیط‌زیست کمک فراوانی برساند.

۱-۴ ضرورت انجام تحقیق

با توجه به گرم شدن کره زمین و مشکلات زیست محیطی فراوان ایجاد شده، استفاده از منابع دوست‌دار محیط زیست در تثبیت خاک به دلیل حذف اثرات مخرب افزودنی‌های وابسته به سیمان ضرورت یافته است. اگرچه افزودنی‌های غیرمتعارف تا حدود زیادی قادر به کاهش مضرات زیست محیطی افزودنی‌های متعارف می‌باشند، ولیکن به طور کامل زیست تجزیه پذیر نبوده و نیازهای زیست محیطی را ارضا نمی‌کنند. در سال‌های اخیر، هیدروکلوئیدها به عنوان شاخه‌ای از بیوپلیمرها به عنوان مصالح ارزنده تثبیت خاک مطرح شده‌اند.

خصوصیات برجسته هیدروکلوئیدها شامل غلظت‌دهندگی، ایجاد ویسکوزیته بالا، چسبندگی زیاد و امکان ایجاد ذرات با قطر بزرگ‌تر از یک سو و فراوانی در طبیعت و سهولت استفاده از آنها، محققین رشته ژئوتکنیک را به جستجوی منابع جدید هیدروکلوئیدی به منظور تثبیت خاک تشویق نموده است.

صمغ فارسی به عنوان یک منبع جدید هیدروکلوئیدی که بومی کشور ما بوده، خاصیت چسبندگی بالا داشته و به علت امکان کشت گسترده آن در مناطق وسیعی از کشور دارای قیمت پایین‌تری نسبت به دیگر هیدروکلوئیدهای متداول است، اخیراً مورد توجه محققین در سایر علوم مانند کشاورزی، تغذیه و پزشکی قرار گرفته است.

با این حال تاکنون در محیط خاک به منظور اهداف تثبیت خاک مورد تحقیق قرار نگرفته است. با توجه به خصوصیات برجسته قابل مقایسه این صمغ جدید نسبت به دیگر هیدروکلوئیدهای متداول که در تثبیت خاک به کار رفته‌اند، به نظر می‌رسد این صمغ داخلی بتواند به عنوان یک افزودنی جایگزین ارزشمند برای

کاربردهای تثبیت خاک مورد استفاده قرار گیرد. ضمناً با توجه به گران‌قیمت بودن هیدروکلوئیدهای متداول در کشور ما و قیمت پایین صمغ فارسی، استفاده از این صمغ می‌تواند برای پروژه‌های عملی بسیار مثر و واقع‌گردد، که این موضوع در این رساله با انجام آزمایش‌های لازم مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۵-۱ هدف تحقیق

در این تحقیق، هدف به‌کارگیری یک منبع هیدروکلوئیدی جدید تولید داخل کشور به عنوان یک منبع بیوپلیمری جدید و ارزان قیمت به منظور حذف مضرات افزودنی‌های سنتی تثبیت خاک می‌باشد. این صمغ به دلیل ویژگی‌های ساختاری مشابه با هیدروکلوئیدهای متداول در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به گران‌قیمت بودن منابع هیدروکلوئیدی حاضر، استفاده از این صمغ محلی در صورت ارضای نیازهای پروژه بسیار مفید خواهد بود. برای این منظور آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس و ریزمقیاس متنوعی بر روی خاک تثبیت‌شده با صمغ فارسی ترتیب داده شده است. بهبود و تقویت هیدروژل صمغ فارسی با بهره‌گیری از پیشرفت‌های صورت گرفته در علم شیمی از دیگر اهداف تحقیق می‌باشد که منجر به تشکیل هیدروژل‌های موثرتر با خواص رئولوژیکی ارتقا یافته و ویسکوزیته بیشتر می‌گردد. در این راستا، استفاده از صمغ فارسی، ترکیب و اصلاح شیمیایی آن می‌تواند به عنوان یک افزودنی سازگار با محیط زیست در پروژه‌های تثبیت خاک مفید واقع شود.

۶-۱ نوآوری تحقیق

در این تحقیق، صمغ فارسی که بومی منطقه ایران است با خواص برجسته آن که قابل‌مقایسه با هیدروکلوئیدهای متداول است، به عنوان یک افزودنی ارزنده دوسندار محیط زیست در مهندسی ژئوتکنیک جهت تثبیت خاک به کار برده می‌شود. با این حال، با توجه به اینکه تاکنون تحقیقی در مورد تثبیت خاک با استفاده از این صمغ انجام نشده است و به دلیل وابستگی رفتار هیدروکلوئیدها در تثبیت خاک به عوامل متنوعی از قبیل نوع و ترکیب و ساختار خاک، میزان بیوپلیمر مورد استفاده، شرایط اختلاط و مدت زمان عمل‌آوری، قبل از استفاده به صورت گسترده می‌بایست از طریق انجام آزمایش‌های ژئوتکنیکی عملکرد آن مورد تحقیق قرار گیرد. لذا در این تحقیق اثر این صمغ جدید بر خصوصیات خاک مورد بررسی قرار گرفته

و به منظور سنجش میزان اثربخشی آن در مقایسه با دیگر هیدروکلوئیدها، نتایج با سایر هیدروکلوئیدهای رایج در تثبیت خاک شامل زانتان و گوار مقایسه شده است.

از طرفی مطالعات پیشین صورت گرفته در زمینه تثبیت خاک با استفاده از هیدروکلوئیدها، اغلب به بررسی اثر هیدروکلوئیدها به تنهایی در خاک پرداخته است. در حالیکه اثر بخشی استفاده از ترکیب صمغ‌های مختلف در کاربردهای صنایع دیگر مورد توجه می‌باشد. همچنین در علم شیمی و پلیمر به منظور بهبود خواص مکانیکی و ساختار هیدروژل‌های پلی ساکاریدی ایجاد شده و استحکام آن‌ها، استفاده از عوامل شبکه‌ای کننده شیمیایی و فیزیکی که منجر به ایجاد پیوندهای عرضی بین زنجیره‌های پلیمری می‌شود، بسیار مورد تحقیق قرار گرفته است. با توجه به امکان تقویت هیدروژل‌های حاصل از صمغ فارسی از طریق ترکیب با صمغ‌های دیگر و نیز ایجاد پیوند عرضی یونی بین زنجیره‌های پلیمری، که یکی از انواع روش‌های پیوند عرضی می‌باشد، بررسی خصوصیات خاک‌های تثبیت شده با این نوع هیدروژل‌ها که از استحکام، دوام و ویسکوزیته بهتری برخوردارند، در این تحقیق مورد نظر می‌باشد.

برای نیل به اهداف فوق، یک سری آزمایش بزرگ‌مقیاس شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت برشی، تحکیم، تورم و انقباض، حدود اتربرگ، دوام در برابر سیکل‌های ذوب و انجماد و تعدادی آزمایش ریزمقیاس شامل تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی، تخلخل BET، پراش اشعه X، آنالیز اندازه ذرات و توزین حرارتی بر روی نمونه‌های خاک تثبیت شده انجام شده است.

۷-۱ ساختار رساله

رساله حاضر به شرح زیر در پنج فصل به بیان مطالب موردنیاز می‌پردازد:

فصل اول: در این فصل به بیان مقدمه و کلیات موضوع رساله پرداخته شده و موضوع مورد تحقیق به صورت اجمالی و کلی شرح داده شده و ضرورت و هدف از انجام تحقیق مطرح گردیده است.

فصل دوم: در این فصل به معرفی مفاهیم کلی زیست‌پلیمرها و مصارف آنها در ژئوتکنیک، پلی ساکاریدها و صمغ‌های طبیعی پرداخته شده است و با توجه به اینکه موضوع اصلی رساله پیرامون صمغ جدید فارسی می‌باشد، خصوصیات مختلف و کاربردهای آن شرح داده شده است. در ادامه مفاهیم مرتبط با هیدروژل‌های پیوند شده عرضی صمغ‌های طبیعی بیان شده است. سپس، خلاصه‌ای از ادبیات فنی عوامل تاثیرگذار در تثبیت خاک با بیوپلیمرها و همچنین اثر آنها بر بهبود خواص خاک آورده شده است.

فصل سوم: در این فصل مصالح مورد استفاده معرفی شده، نحوه ساخت نمونه‌ها، شیوه اختلاط و نام‌گذاری آنها توضیح داده شده و نحوه انجام هر یک از آزمایش‌ها شرح داده شده است. در پایان این فصل، برنامه آزمایش‌های مورد نظر در رساله آورده شده است.

فصل چهارم: در این فصل نتایج آزمایش‌های انجام شده در قالب برنامه آزمایش‌های فصل قبل، ارائه شده و به بحث و تفسیر نتایج پرداخته شده است.

فصل پنجم: نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته به صورت مختصر آورده شده و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارائه شده است.