





دانشگاه آزاد اسلامی واحد

تعهد نامه اصالت رساله یا پایان نامه

اینجانب **محمدیوسفی نژاد** دانش آموخته مقطع دکتری تخصصی در رشته **مهندسی عمران** گرایش **ژئوتکنیک** که در تاریخ از پایان نامه / رساله خود تحت عنوان «**امکان سنجی بهبود خواص مکانیکی مخلوط خاک ریزدانه و صمغ فارسی با افزودن مواد نانو و پلیمر**» با کسب نمره و درجه دفاع نموده ام بدینوسیله متعهد می شوم :

۱) این پایان نامه / رساله حاصل تحقیق و پژوهش انجام شده توسط اینجانب بوده و در مواردی که از دستاوردهای علمی و پژوهشی همکاران (اعم از پایان نامه، کتاب، مقاله و ...) استفاده نموده ام، مطابق ضوابط و رویه موجود، نام منبع مورد استفاده و سایر مشخصات آن را در فهرست مربوطه ذکر و درج کرده ام.

۲) این پایان نامه / رساله قبلاً برای دریافت هیچ مدرک تحصیلی (هم سطح، پایین تر یا بالاتر) در سایر دانشگاه ها و موسسات آموزش عالی ارائه نشده است.

۳) چنانچه بعد از فراغت از تحصیل، قصد استفاده و هرگونه بهره برداری اعم از چاپ کتاب، ثبت اختراع و ... از این پایان نامه داشته باشم، از حوزه معاونت پژوهشی واحد مجوزهای مربوطه را اخذ نمایم.

۴) چنانچه در هر مقطع زمانی خلاف موارد فوق ثابت شود، عواقب ناشی از آن را می پذیرم و واحد دانشگاهی مجاز است با اینجانب مطابق ضوابط و مقررات رفتار نموده و در صورت ابطال مدرک تحصیلی ام هیچ گونه ادعایی نخواهم داشت.

نام و نام خانوادگی :

محمد یوسفی نژاد

تاریخ و امضاء :



معاونت پژوهش و فن آوری

به نام خدا

منشور اخلاق پژوهش

با یاری از خداوند سبحان و اعتقاد به این که عالم محضر خداست و همواره ناظر بر اعمال انسان و به منظور پاس داشت مقام بلند دانش و پژوهش و نظر به اهمیت جایگاه دانشگاه در اعتلای فرهنگ و تمدن بشری، ما دانشجویان اعضاء هیات علمی واحد های دانشگاه آزاد اسلامی متعهد می گردیم اصول زیر را در انجام فعالیت های پژوهشی مد نظر قرار داده و از آن تخطی نکنیم:

۱ - اصل حقیقت جویی: تلاش در راستای پی جویی حقیقت و وفاداری به آن دوری از هرگونه پنهان سازی حقیقت.

۲ - اصل رعایت حقوق: التزام به رعایت کامل حقوق پژوهشگران و پژوهیدگان (انسان، حیوان و نبات) و سایر صاحبان حق.

۳ - اصل مالکیت مادی و معنوی: تعهد به رعایت کامل حقوق مادی و معنوی دانشگاه و کلیه همکاران پژوهش.

۴ - اصل منافع ملی: تعهد به رعایت مصالح ملی و در نظر داشتن پیشبرد و توسعه کشور در کلیه مراحل پژوهش.

۵ - اصل رعایت انصال و امانت: تعهد به اجتناب از هرگونه جانب داری غیر علمی و حفاظت از اموال ، تجهیزات و منابع در اختیار.

۶ - اصل رازداری: تعهد به صیانت از اسرار و اطلاعات محرمانه افراد، سازمان ها و کشور و کلیه افراد و نهادهای مرتبط با تحقیق.

۷ - اصل احترام: تعهد به رعایت حریم و حرمت ها در انجام تحقیقات و رعایت جانب نقد و خودداری از هرگونه حرمت شکنی.

۸ - اصل ترویج: تعهد به رواج دانش و اشاعه نتایج تحقیقات و انتقال آن به همکاران علمی و دانشجویان به غیر از مواردی که منع قانونی دارد.

۹ - اصل برائت: الزم به برائت جویی از هرگونه رفتار غیر حرفه ای و اعلام موضع نسبت به کسانی که حوزه علم و پژوهش را به شائبه های غیر علمی می آلاینند.



دانشگاه آزاد اسلامی

واحد رودهن

دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران

رساله دکتری رشته مهندسی عمران (Ph.D)

گرایش ژئوتکنیک

عنوان:

امکان سنجی بهبود خواص مکانیکی مخلوط خاک ریزدانه و صمغ فارسی با افزودن مواد نانو و پلیمر

استاد راهنما:

دکتر حسن قاسم زاده

استاد مشاور:

دکتر محمد علی رمضانپور

نگارنده:

محمد یوسفی نژاد

پاییز ۱۴۰۴

سپاسگزاری

نخست سپاس خداوند را به جا می آورم که فرصت آموختن، اندیشیدن و پیمودن این مسیر علمی را فراهم ساخت.

از استاد راهنمای محترم خود، جناب آقای دکتر حسن قاسم زاده صمیمانه قدردانی می نمایم که با راهنمایی های علمی، نگاه مسئولانه و همراهی صبورانه، نقش مؤثری در شکل گیری و پیشبرد این پژوهش ایفا نمودند. بی تردید هدایت های ایشان سهمی اساسی در به انجام رسیدن این کار داشته است.

همچنین از استاد مشاور محترم جناب آقای دکتر محمدعلی رمضان پور، بابت همراهی و حضور ایشان در فرآیند انجام این پژوهش سپاسگزاری می نمایم.

بدین وسیله از برادران ارجمندم، جناب آقای مهندس هامون فتحی و جناب آقای مهندس علیرضا جلالی، به واسطه همکاری علمی ارزشمند و فراهم نمودن امکانات آزمایشگاهی و تجهیزات مورد نیاز جهت انجام بخش های عملی این پژوهش، صمیمانه تقدیر و تشکر می نمایم.

در پایان صمیمانه از خانواده عزیزم که با حمایت و دلگرمی همیشگی شان، بزرگترین پشتوانه من در این مسیر بوده اند، سپاسگزارم.

تقدیم به

این رساله را با نهایت احترام و ارادت تقدیم می‌کنم به یاد پدر بزرگوار و فداکارم و مادر مهربان و دلسوزم، که همواره چراغ راه من در زندگی و مسیر علمی بودند و با حمایت بی‌دریغ خود، قوت قلب و دلگرمی مرا فراهم ساخته‌اند.

فصل اول: کلیات تحقیق.....	۱۵
۱-۱ بیان مساله.....	۱۶
۲-۱ اهمیت تحقیق.....	۱۷
۳-۱ هدف تحقیق.....	۱۸
۴-۱ نوآوری تحقیق.....	۱۹
۵-۱ سوالات تحقیق.....	۲۰
۶-۱ ساختار رساله.....	۲۱
فصل دوم: مروری بر ادبیات تحقیق و پیشینه تحقیق.....	۲۳
۱-۲ مقدمه.....	۲۴
۲-۲ طبقه بندی پلیمرها.....	۲۵
۳-۲ پلیمرهای طبیعی.....	۲۵
۴-۲ پلیمرهای طبیعی مورد استفاده در ژئوتکنیک.....	۲۶
۱-۴-۲ کازئین.....	۲۶
۲-۴-۲ پلی ساکاریدها.....	۲۷
۵-۲ صمغ ها.....	۲۷
۱-۵-۲ صمغ با منشاء گیاهی.....	۲۸
۱-۱-۵-۲ صمغ گوار.....	۲۹
۲-۱-۵-۲ صمغ عربی.....	۳۱
۳-۱-۵-۲ صمغ کتیرا.....	۳۲
۴-۱-۵-۲ صمغ فارسی.....	۳۳
۲-۵-۲ صمغ با منشاء میکروبی.....	۳۶
۱-۲-۵-۲ صمغ زانتان.....	۳۶
۲-۲-۵-۲ صمغ ژلان.....	۳۸
۳-۵-۲ صمغ با منشاء جلبکی.....	۳۹
۱-۳-۵-۲ صمغ آگار.....	۴۰
۲-۳-۵-۲ صمغ آلژینات سدیم.....	۴۱
۴-۵-۲ صمغ با منشاء حیوانی.....	۴۳
۱-۴-۵-۲ کیتوسان.....	۴۳
۶-۲ پلیمرهای مصنوعی.....	۴۳

۴۴	۷-۲ طبقه بندی پلیمر های مصنوعی
۴۷	۸-۲ پلیمرهای مصنوعی مورد استفاده در ژئوتکنیک
۴۷	۱-۸-۲ پل آکرید آمید
۴۸	۲-۸-۲ پلی اتیلن
۴۹	۳-۸-۲ پلی پروپیلن
۵۰	۴-۸-۲ پلی استایرن
۵۱	۵-۸-۲ پلی وینیل الکل
۵۳	۹-۲ نانو مواد
۵۴	۱۰-۲ نانو مواد مورد استفاده در ژئوتکنیک
۵۴	۱-۱۰-۲ نانو رس
۵۵	۲-۱۰-۲ نانو لوله های کربن
۵۶	۳-۱۰-۲ نانو سیلیکا
۵۷	۱۱-۲ جمع بندی
۵۸	فصل سوم: مصالح و روش تحقیق
۵۹	۱-۳ مقدمه:
۵۹	۲-۳ مواد
۵۹	۱-۲-۳ خاک
۶۰	۲-۲-۳ صمغ فارسی
۶۰	۳-۲-۳ پلی وینیل الکل
۶۱	۴-۲-۳ نانو رس مونتموریلونیت
۶۱	۵-۲-۳ سیمان
۶۱	۶-۲-۳ آهک
۶۲	۷-۲-۳ آلاینده های نفتی
۶۲	۳-۳ شیوه اختلاط و آماده سازی نمونه ها
۶۵	۴-۳ روش های آزمایشگاهی
۶۶	۱-۴-۳ آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده
۶۷	۲-۴-۳ آزمایش برش مستقیم
۶۸	۳-۴-۳ آزمایش میکروسکوپی الکترونی روبشی
۶۹	۴-۴-۳ آزمایش تعیین تخلخل و سطح ویژه خاک

۷۰	۳-۴-۵ آزمایش آنالیز اندازه ذرات
۷۱	۳-۴-۶ آزمایش تحلیل گرما وزنی
۷۲	۳-۵ برنامه آزمایش ها
۷۵	۳-۶ بررسی آماری
۷۶	۳-۷ جمع بندی
۷۷	فصل چهارم: نتایج و بحث
۷۸	۴-۱ مقدمه
۷۸	۴-۲ نتایج آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده
۷۸	۴-۲-۱ اثرات صمغ فارسی و پلی‌وینیل‌الکل بر مقاومت فشاری خاک طبیعی
۸۱	۴-۲-۲ اثر آلاینده‌های نفتی بر مقاومت فشاری خاک رس
۸۲	۴-۲-۳ اثر صمغ فارسی بر مقاومت فشاری خاک آلوده به آلاینده‌های نفتی
۸۴	۴-۲-۴ اثر پلی‌وینیل‌الکل بر مقاومت فشاری خاک آلوده به آلاینده‌های نفتی
۸۵	۴-۲-۵ بررسی الگوی شکست
۸۷	۴-۳ اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت برشی خاک تثبیت‌شده
۸۸	۴-۴ نتایج آزمایش برش مستقیم
۸۸	۴-۴-۱ اثر صمغ فارسی و پلی‌وینیل‌الکل بر پارامترهای مقاومت برشی خاک رس طبیعی
۹۳	۴-۴-۲ اثر صمغ فارسی و پلی‌وینیل‌الکل بر پارامترهای مقاومت برشی خاک آلوده به آلاینده‌های نفتی
۹۷	۴-۵ مقایسه رفتار مکانیکی نمونه‌های تثبیت‌شده با پلیمر و افزودنی‌های سنتی
۱۰۰	۴-۶ تجزیه و تحلیل ریزساختاری با استفاده از آزمایش SEM
۱۰۴	۴-۷ تجزیه و تحلیل ریزساختاری با استفاده از آزمون BET
۱۰۷	۴-۸ آنالیز اندازه ذرات با استفاده از آزمایش PSA
۱۰۸	۴-۹ آنالیز گرما وزنی خاک با استفاده از آزمایش TGA
۱۱۰	۴-۱۰ بررسی انتشار دی‌اکسید کربن در فرایند تثبیت خاک
۱۱۴	۴-۱۱ مدل آماری
۱۱۶	۴-۱۲ مقایسه اقتصادی
۱۱۸	۴-۱۳ جمع بندی
۱۱۹	فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها
۱۲۰	۵-۱ مقدمه
۱۲۱	۵-۲ نتیجه گیری
۱۲۲	۵-۳ پیشنهاد برای تحقیقات آینده

شکل ۱-۲ دانه گیاه گوار	۳۰
شکل ۲-۲ صمغ عربی	۳۱
شکل ۳-۲ صمغ کتیرا	۳۲
شکل ۴-۲ صمغ فارسی	۳۳
شکل ۵-۲ ساختار خطی شیمیای صمغ فارسی	۳۵
شکل ۶-۲ ساختار حلقوی شیمیای صمغ فارسی	۳۵
شکل ۷-۲ صمغ زانتان	۳۷
شکل ۸-۲ صمغ ژلان	۳۹
شکل ۹-۲ صمغ آگار	۴۰
شکل ۱۰-۲ صمغ آلژینات	۴۲
شکل ۱۱-۲ طبقه‌بندی پلیمرها بر اساس ساختار، نیروی مولکولی، ساختار مونومری و مکانیزم سنتزی	۴۴
شکل ۱۲-۲ شماتیک انواع ساختارهای پلیمر	۴۵
شکل ۱۳-۲ پلی‌وینیل‌الکل	۵۳
شکل ۱-۳ توده خاک رس کائولینیت(الف)، منحنی دانه بندی خاک رس کائولینیت(ب)	۵۹
شکل ۲-۳ مخلوط صمغ فارسی با آب(الف)، مخلوط پلی‌وینیل‌الکل با آب(ب)، مخلوط صمغ فارسی و پلی‌وینیل‌الکل با خاک و آب(ج)، مخلوط خاک و بنزین(د)، مخلوط خاک و گازوئیل(ه)، مخلوط خاک و نفت‌خام(ی)	۶۵
شکل ۳-۳ نمونه‌های استوانه ای خاک تثبیت شده با مقادیر مختلف از افزودنی ها (الف)، دستگاه آزمون مقاومت فشاری محصور نشده (ب)	۶۷
شکل ۴-۳ نمونه های مکعبی خاک تثبیت شده با افزودنی های مختلف (الف)، دستگاه آزمون برش مستقیم(ب)	۶۸
شکل ۵-۳ دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی	۶۹
شکل ۶-۳ دستگاه BET مدل TriStar II Plus	۷۰
شکل ۷-۳ دستگاه انکسار لیزری Sympatec Helos	۷۱
شکل ۸-۳ دستگاه آنالیزگر حرارتی مدل TG 209F3 NETZSCH	۷۲

شکل ۴-۱ منحنی‌های تنش-کرنش خاک رس تثبیت‌شده با مواد پلیمری: نمونه حاوی ۲/۵٪ وزنی صمغ فارسی با ۷ روز عمل‌آوری (الف)، نمونه حاوی ۱/۵٪ وزنی صمغ فارسی با ۷ روز عمل‌آوری (ب)، نمونه حاوی ۲/۵٪ وزنی صمغ فارسی با ۲۸ روز عمل‌آوری (ج)، نمونه حاوی ۱/۵٪ وزنی صمغ فارسی با ۲۸ روز عمل‌آوری (د) ۸۰

شکل ۴-۳ تاثیر صمغ فارسی (P) بر مقاومت فشاری خاک آلوده به آلاینده‌های نفتی. برای نمونه‌های با ۷ روز عمل‌آوری (الف)، برای نمونه‌های با ۲۸ روز عمل‌آوری (ب) ۸۳

شکل ۴-۴ تاثیر پلی‌وینیل‌الکل (V) بر مقاومت فشاری خاک آلوده به آلاینده‌های نفتی. برای نمونه‌های با ۷ روز عمل‌آوری (الف)، برای نمونه‌های با ۲۸ روز عمل‌آوری (ب) ۸۴

شکل ۴-۵ نحوه شکست نمونه‌ها: نمونه خاک طبیعی (الف)، خاک تثبیت‌شده با آهک (ب)، خاک تثبیت‌شده با سیمان (پ)، خاک تثبیت‌شده با صمغ فارسی (ت)، خاک تثبیت‌شده با پلی‌وینیل‌الکل (ث) و خاک تثبیت‌شده با صمغ فارسی و پلی‌وینیل‌الکل (ج)، خاک آلوده شده با ۵٪ نفت خام (د)، خاک آلوده شده به ۵٪ گازوئیل (ه)، خاک آلوده شده به ۵٪ گازوئیل تثبیت‌شده با پلیمر (ی)، ۸۶

به‌طور کلی تثبیت خاک با پلی‌وینیل‌الکل و صمغ فارسی در مقایسه با مواد معدنی، منجر به شکل‌پذیری بیشتر، رفتار نرم‌شونده، شکست مورب یا مخروطی و افزایش ایمنی سازه‌ای از طریق فراهم‌سازی فرصت هشدار قبل از گسیختگی کامل می‌گردد. این یافته‌ها می‌توانند در طراحی پایدار و مقاوم سازه‌های ژئوتکنیکی مورد استفاده قرار گیرند (واسی و دمیر ۲۰۲۴) ۸۷

شکل ۴-۶ بررسی تاثیر مدت زمان عمل‌آوری بر مقاومت برشی خاک رس تثبیت‌شده با درصدهای مختلف پلی‌وینیل‌الکل در ترکیب با: ۱/۵٪ صمغ فارسی (الف)، ۲/۵٪ صمغ فارسی (ب) ۸۸

شکل ۴-۷ منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های مختلف: تنش عمودی ۰/۱۱ مگاپاسکال (الف)، ۰/۲۲ مگاپاسکال (ب)، ۰/۳۳ مگاپاسکال (ج) ۹۰

شکل ۴-۸ تغییرات پارامتر چسبندگی (الف) مخلوط خاک با، بنزین، نفت خام و گازوئیل. (ب) مخلوط خاک تثبیت‌شده با صمغ فارسی. (ج) مخلوط خاک تثبیت‌شده با پلی‌وینیل‌الکل ۹۴

شکل ۴-۹ تغییرات زاویه اصطکاک داخلی (الف) مخلوط خاک رس، بنزین، نفت خام و گازوئیل. (ب) مخلوط خاک تثبیت‌شده با صمغ فارسی. (ج) مخلوط خاک تثبیت‌شده با پلی‌وینیل‌الکل ۹۷

شکل ۴-۱۰ تصاویر SEM برای ترکیب‌های مختلف، C (الف)، CP1.5 (ب)، CP2.5 (ج)، CV2.5 (د)، CP2.5V2.5 (ه)، CP2.5V3 (ی) ۱۰۲

شکل ۴-۱۱ تصاویر SEM برای نمونه‌های مختلف خاک. (الف) مخلوط خاک با ۵٪ نفت خام (CO5)، (ب) مخلوط خاک با ۱۰٪ نفت خام (CO10)، (ج) مخلوط خاک آلوده به ۵٪ نفت خام تثبیت‌شده با ۲/۵٪ صمغ فارسی (CO5P2.5)، (د) مخلوط خاک آلوده به ۵٪ نفت خام تثبیت‌شده با ۲/۵٪ پلی‌وینیل‌الکل (CO5V2.5) ۱۰۳

- شکل ۴-۱۲ نتایج آزمون BET برای نمونه‌های طبیعی و تثبیت‌شده: میانگین قطر حفرات و سطح ویژه (الف)، حجم کل حفرات (ب) ۱۰۵
- شکل ۴-۱۳ نتایج BET برای نمونه‌های خاک طبیعی، خاک آلوده به نفت، خاک آلوده تثبیت‌شده و خاک طبیعی تثبیت شده. (الف) سطح ویژه نمونه‌ها، (ب) حجم کل حفره نمونه‌ها ۱۰۷
- شکل ۴-۱۴ منحنی‌های توزیع اندازه ذرات (PSA) برای خاک طبیعی (C) و نمونه‌های تثبیت‌شده با ۲/۵٪ صمغ فارسی (CP2.5) و ترکیب ۲/۵٪ صمغ فارسی و ۲/۵٪ پلی‌وینیل‌الکل (CP2.5V2.5) ۱۰۸
- شکل ۴-۱۵ منحنی‌های TGA برای خاک طبیعی (C) و نمونه‌های تثبیت‌شده با ۲/۵٪ صمغ فارسی (CP2.5) و ترکیب ۲/۵٪ صمغ فارسی و ۲/۵٪ پلی‌وینیل‌الکل (CP2.5V2.5) ۱۰۹
- شکل ۴-۱۶ برهم‌کنش‌های فیزیکوشیمیایی بین خاک رس کائولینیت، صمغ فارسی و پلی‌وینیل‌الکل ۱۱۰
- شکل ۴-۱۷ روابط همبستگی بین مقادیر نتایج تجربی و مدل پیش‌بینی شده ۱۱۵

جدول ۱-۲ طبقه‌بندی صمغ‌های طبیعی از نظر ساختار شیمیایی، بار، رفتار ژلاتینی، منبع و شکل	۲۹
جدول ۱-۳ پارامترهای مهندسی و خصوصیات شیمیایی خاک رس	۶۰
جدول ۲-۳ خصوصیات و ترکیبات شیمیایی صمغ فارسی (PG)	۶۰
جدول ۳-۳ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی پلی‌وینیل‌الکل (PVA)	۶۱
جدول ۴-۳ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نانو رس مونتموریلونیت (NC)	۶۱
جدول ۵-۳ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سیمان (E)	۶۱
جدول ۶-۳ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آهک (L)	۶۲
جدول ۷-۳ مشخصات بنزین، گازوئیل و نفت خام	۶۲
جدول ۸-۳ مخلوط‌های خاک رس کائولینیت با پلی‌وینیل‌الکل، صمغ فارسی، آهک و سیمان	۶۴
جدول ۹-۳ مخلوط‌های خاک رس آلوده به بنزین، گازوئیل و نفت خام با پلی‌وینیل‌الکل و صمغ فارسی	۶۴
جدول ۱۰-۳ طرح آزمایش ترکیبات خاک-پلیمرها در دوره‌های مختلف عمل‌آوری	۷۴
جدول ۱۱-۳ طرح آزمایش ترکیبات خاک تثبیت شده با آهک و سیمان در دوره‌های مختلف عمل‌آوری	۷۴
جدول ۱۲-۳ طرح آزمایش ترکیبات خاک آلوده به مواد نفتی تثبیت شده با پلیمر در دوره‌های مختلف عمل‌آوری	۷۵
جدول ۱-۴ پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های تثبیت‌شده با صمغ فارسی و پلی‌وینیل‌الکل	۹۱
جدول ۲-۴ پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک و سیمان	۹۲
جدول ۳-۴ مقایسه حداکثر مقاومت فشاری، کرنش شکست و چگالی انرژی کرنش نمونه‌های تثبیت شده	۹۹
جدول ۴-۴ میزان انتشار CO ₂ در فرآیند تولید مواد افزودنی مختلف	۱۱۳
جدول ۵-۴ مقایسه اقتصادی تثبیت خاک با استفاده از مصالح نوین و سنتی	۱۱۶

چکیده

خاک‌های ریزدانه با مقاومت پایین، به‌ویژه رس‌های با پلاستیسیته کم، در پروژه‌های عمرانی چالش‌های قابل توجهی ایجاد می‌کنند و اغلب نیازمند تثبیت برای دستیابی به عملکرد مهندسی مطلوب هستند. روش‌های متداول تثبیت، مانند استفاده از آهک و سیمان، با مصرف بالای انرژی و انتشار قابل توجه گازهای گلخانه‌ای همراهند و آسیب‌های جدی به محیط زیست وارد می‌کنند. این موضوع باعث شده است جایگزین‌های پایدار مورد توجه قرار گیرند. در سال‌های اخیر، افزودنی‌های نوین از جمله پلیمرها، بیوپلیمرها و نانو مواد به‌عنوان گزینه‌هایی کارآمد در بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این میان صمغ فارسی، یک بیوپلیمر طبیعی، سازگار با محیط زیست و بومی به‌عنوان تثبیت‌کننده‌ای موثر مطرح شده است و ترکیب آن با پلی‌وینیل‌الکل می‌تواند عملکرد تثبیت را نسبت به کاربرد تک‌ماده‌ای بهبود بخشد. با این حال بررسی جامع این ترکیب، به‌ویژه در خاک‌های آلوده به فرآورده‌های نفتی، محدود است. در این پژوهش ابتدا اثرگذاری صمغ فارسی و پلی‌وینیل‌الکل بر افزایش مقاومت و بهبود ریزساختار خاک رس کائولینیتی طبیعی ارزیابی شد. پس از تأیید اثربخشی، همین ترکیب برای تثبیت خاک‌های آلوده به بنزین، گازوئیل و نفت خام به‌کار رفت. برای ایجاد مبنای مقایسه قابل اعتماد، خاک طبیعی نیز تحت شرایط یکسان با سیمان و آهک تثبیت شد. این روش امکان ارزیابی هم‌زمان عملکرد مکانیکی، انتشار CO_2 و هزینه تثبیت را فراهم کرد و مقایسه دقیقی بین تثبیت‌کننده‌های سنتی و نوین از نظر فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی ارائه داد. نتایج نشان می‌دهند که صمغ فارسی به‌تنهایی باعث افزایش چسبندگی و مقاومت خاک در حالت طبیعی و آلوده شد. اما ترکیب دوگانه صمغ فارسی و پلی‌وینیل‌الکل اثرات بسیار چشمگیرتری داشت و به‌طور قابل توجهی مقاومت فشاری، چسبندگی و شکل‌پذیری خاک را بهبود داد. در مقابل افزودن نانو رس به مخلوط خاک و صمغ فارسی، برخلاف عملکرد موثر پلی‌وینیل‌الکل با صمغ فارسی، بهبود معناداری در مقاومت ایجاد نکرد. تحلیل‌های شیمیایی حاکی از آن است که تشکیل پیوندهای هیدروژنی پایدار بین گروه‌های هیدروکسیل صمغ فارسی، پلی‌وینیل‌الکل و ذرات رس عامل اصلی بهبود ساختاری است. ارزیابی کمی انتشار CO_2 نیز نشان داد که استفاده از ترکیب صمغ فارسی و پلی‌وینیل‌الکل به‌طور قابل توجهی انتشار گازهای گلخانه‌ای را نسبت به سیمان و آهک کاهش می‌دهد. از منظر فنی و اقتصادی، اگرچه این روش نوین در ابتدا پرهزینه به نظر می‌رسد، اما مزایای قابل توجهی در عملکرد مکانیکی، زمان عمل‌آوری و شکل‌پذیری ارائه می‌دهند. به‌طور کلی یافته‌ها نشان می‌دهد که صمغ فارسی به‌ویژه در ترکیب با پلی‌وینیل‌الکل، برای تثبیت خاک‌های ریزدانه طبیعی و آلوده به فرآورده‌های نفتی بسیار موثر است و با توجه به مزایای زیست‌محیطی، یک راهکار پایدار و کارآمد برای کاربردهای مدرن ژئوتکنیکی محسوب می‌شود.

کلمات کلیدی: تثبیت خاک، بیوپلیمر، صمغ فارسی، پلیمر، پلی‌وینیل‌الکل، رس، آلاینده‌های نفتی، مقاومت برشی

فصل اول: کلیات تحقیق

فصل اول: کلیات تحقیق

۱-۱ بیان مساله

تثبیت خاک های رس با مقاومت پایین معمولاً با روش های شیمیایی یا مکانیکی انجام می گردد. در روش شیمیایی، افزودن سیمان، آهک یا خاکستر بادی باعث بهبود خواص مکانیکی و مقاومت خاک می شود. روش های مکانیکی شامل تراکم، و تقویت خاک با الیاف یا ژئوگریدها است. بهسازی خاک های سست و آلوده به آلاینده های نفتی همواره یکی از چالش های مهم مهندسی ژئوتکنیک بوده و در طول تاریخ، شیوه های مختلفی برای بهبود خواص خاک توسعه یافته اند. در گذشته استفاده از مصالح بومی مانند نی، الیاف گیاهی و خاکستر رایج بود، اما با پیشرفت دانش مهندسی، سیمان پرتلند و آهک در پروژه های عمرانی بیشترین کاربرد را پیدا کردند. (ابود و شاکر ۲۰۲۳،

مولایی و دیگران ۲۰۲۴، الحدادی ۲۰۲۵). این مصالح، هرچند موجب ارتقاء نسبی کیفیت و پایداری خاک در بسیاری از پروژه ها شد، اما به مرور زمان چالش های فنی و زیست محیطی متعددی را آشکار ساخت. از نظر فنی، اگرچه تثبیت با مصالحی مانند آهک و سیمان باعث افزایش مقاومت خاک می شود، اما در خاک های ریزدانه با شاخص خمیری پایین کارایی کمتر داشته و به سطح مطلوبی از مقاومت و پایداری نمی رسد. این خاک ها همچنان در شرایط بارگذاری و تغییرات رطوبتی رفتار ضعیفی نشان داده و دچار نشست و کاهش ظرفیت باربری می شوند. افزون بر این، خاک های تثبیت شده با مصالح سنتی به دلیل ماهیت سخت و ترد، شکل پذیری لازم در برابر بارهای وارده را ندارند و تقریباً رفتار شکننده ای از خود بروز می دهند. از منظر زیست محیطی نیز تولید و مصرف مصالح سیمانی و آهکی با انتشار قابل توجه گازهای گلخانه ای به ویژه CO₂ همراه است که این موضوع نه تنها مغایر با اهداف توسعه پایدار است بلکه تبعات اقتصادی و محیطی گسترده ای را نیز در پی دارد. در نتیجه اعتماد تنها به این روش ها دیگر پاسخگوی نیازهای کنونی پروژه های عمرانی نیست و لزوم توسعه و ارزیابی روش های نوین به شدت احساس می شود. در سال های اخیر پژوهش ها به سمت استفاده از مواد جایگزین با منشأ طبیعی، پلیمرهای زیست سازگار و نانو مواد سوق یافته اند. بیوپلیمرها به دلیل ویژگی هایی مانند توانایی ایجاد ساختارهای چسبنده در خاک، جذب بالای آب، رفتار شبه ژلی و قابلیت زیست تجزیه پذیری، به عنوان گزینه ای نویدبخش برای بهسازی خاک مطرح شده اند. در کنار آن ها، پلیمرهای محلول در آب با ایجاد تغییرات رئولوژیکی و بهبود ساختار میکروسکوپی خاک، می توانند مقاومت و پایداری آن را به شکل موثری افزایش دهند (پری و دیگران ۲۰۲۳، رازقی و دیگران ۲۰۲۴، یان و دیگران ۲۰۲۵). با وجود اهمیت موضوع، مطالعات انجام شده در زمینه هم افزایی بیوپلیمرها و پلیمرها در تثبیت خاک محدود بوده و مکانیسم های دقیق برهم کنش میان خاک و این افزودنی ها، از جمله تغییرات ساختار میکروسکوپی و اثرات رطوبتی، همچنان نیازمند بررسی های عمیق تر است.

به همین منظور در این پژوهش، با هدف پر کردن خلأ علمی موجود، از یک بیوپلیمر بومی (صمغ فارسی) و یک پلیمر سنتتیک محلول در آب (پلی وینیل الکل) و نانو مواد (نانو رس) برای تثبیت خاک های رس طبیعی و همچنین آلوده به آلاینده های نفتی استفاده شد. این ترکیبات به خاک افزوده شدند تا از طریق انجام مجموعه ای از آزمایش های

ژئوتکنیکی، تأثیر آن‌ها بر بهبود مشخصات مقاومتی، افزایش شکل‌پذیری در برابر بارهای وارده و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (CO_2) مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین به‌منظور تضمین صحت و اعتبار نتایج، خاک تثبیت‌شده با مصالح سنتی پرکربنی، از جمله سیمان و آهک، نیز در شرایط آزمایشگاهی مشابه مورد بررسی قرار گرفت تا امکان مقایسه دقیق بین عملکرد خاک تثبیت‌شده با مصالح پلیمری و خاک تثبیت‌شده با مصالح سنتی فراهم شود.

۱-۲ اهمیت تحقیق

گسترش پروژه‌های عمرانی در مناطق دارای خاک‌های ضعیف و آلوده به آلاینده‌های نفتی، به‌ویژه خاک‌های رسی با ساختار کائولینیتی، چالش‌های متعددی را در زمینه پایداری و عملکرد سازه‌های عمرانی ایجاد کرده است. با توجه به محدودیت‌های موجود در روش‌های تثبیت سنتی خاک، از جمله کاهش شکل‌پذیری، شکنندگی خاک تثبیت‌شده، مصرف بالای انرژی و اثرات زیست‌محیطی ناشی از تولید گازهای گلخانه‌ای، نیاز به راهکارهای نوین و پایدار برای بهبود ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه بیش از پیش احساس می‌شود. اهمیت این موضوع در پروژه‌های عمرانی امروزی، به ویژه در زمینه طراحی‌های سازگار با اصول توسعه پایدار و کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی، قابل توجه است. در این پژوهش، رویکردی چندجانبه برای تثبیت خاک‌های ریزدانه ارائه شده است که بر تلفیق بیوپلیمرهای طبیعی و پلیمرهای سنتزی سازگار با محیط زیست، همراه با نانو مواد، تمرکز دارد. صمغ فارسی به‌عنوان یک بیوپلیمر طبیعی با ساختار مولکولی پیچیده، توانایی بالایی در ایجاد پیوندهای مؤثر با ذرات خاک، جذب آب مناسب و ارتقای چسبندگی خاک دارد که آن را به گزینه‌ای مؤثر برای تثبیت پایدار خاک تبدیل می‌کند. در مقابل پلی‌وینیل‌الکل، به‌عنوان یک پلیمر سنتزی محلول در آب، با قابلیت ایجاد پیوند بین ذرات و بهبود انسجام داخلی، نقش مؤثری در تقویت ساختار داخلی و افزایش دوام خاک ایفا می‌کند. ترکیب این دو ماده امکان شکل‌گیری شبکه‌های هیدروژلی پایدار را فراهم می‌آورد که می‌تواند همزمان خواص مکانیکی، شکل‌پذیری و مقاومت خاک را در برابر بارگذاری بهبود بخشد. علاوه بر این استفاده از نانو رس‌ها به عنوان تقویت‌کننده‌های ریزساختاری، می‌تواند ضمن ارتقای انسجام ذرات خاک، دوام و عملکرد طولانی‌مدت خاک‌های تثبیت‌شده را تضمین کند. این رویکرد ترکیبی امکان ایجاد خاک‌هایی با عملکرد بالاتر و اثرات مخرب زیست‌محیطی کمتر را فراهم می‌آورد و به‌طور بالقوه می‌تواند جایگزین روش‌های سنتی تثبیت خاک شود.

اهمیت این پژوهش نه تنها در ارزیابی علمی و سیستماتیک اثرات بیوپلیمرهای طبیعی و پلیمرهای سنتزی بر خواص ژئوتکنیکی خاک است، بلکه در مقایسه عملکرد آن‌ها با مصالح سنتی پرکربنی تحت شرایط آزمایشگاهی یکسان نهفته است. این مقایسه امکان تحلیل دقیق و اعتبارسنجی نتایج را فراهم کرده و قابلیت سنجش اثر بخشی نسبی این مواد را در شرایط کنترل‌شده ایجاد می‌کند. یافته‌های حاصل می‌توانند چارچوبی علمی برای بهبود

طراحی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه، ارتقای درک ما از رفتار ریزساختاری و مکانیکی خاک‌های اصلاح‌شده و توسعه راهکارهای پایدار برای پروژه‌های عمرانی ارائه دهند. به طور کلی این تحقیق با تمرکز بر تلفیق هدفمند بیوپلیمرهای طبیعی، پلیمرهای سنتزی و نانو مواد، ضمن ارائه رویکردی نوین و پایدار برای تثبیت خاک، قابلیت افزایش مقاومت و شکل‌پذیری خاک‌های ریزدانه را فراهم کرده و می‌تواند نقش مؤثری در طراحی و اجرای پروژه‌های عمرانی مبتنی بر اصول توسعه پایدار ایفا کند.

۱-۳ هدف تحقیق

با توجه به افزایش اهمیت پایداری محیط‌زیست و کاهش اثرات کربن‌زا در پروژه‌های عمرانی، به‌ویژه در حوزه مهندسی ژئوتکنیک، ضرورت استفاده از تثبیت‌کننده‌های طبیعی و زیست‌سازگار به‌عنوان جایگزینی مؤثر برای افزودنی‌های متداول نظیر سیمان و آهک بیش از پیش احساس می‌شود. در این راستا هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی اثر همزمان یک بیوپلیمر بومی (صمغ فارسی) به همراه افزودنی‌های مکمل پلی‌وینیل‌الکل و نانو رس در تثبیت خاک رس طبیعی و همچنین آلوده به آلاینده‌های نفتی است، به‌گونه‌ای که مشخصات مکانیکی، شکل‌پذیری و پایداری خاک در برابر بارگذاری و تغییرات رطوبتی نیز ارتقا یابد.

صمغ فارسی به‌عنوان یک ماده طبیعی، در دسترس و با ساختار مولکولی پیچیده، قابلیت بالایی در ایجاد پیوندهای مؤثر با ذرات خاک و افزایش چسبندگی و انسجام خاک دارد و از این نظر ظرفیت بالقوه‌ای برای تثبیت پایدار خاک‌های ریزدانه به شمار می‌رود. در کنار آن پلی‌وینیل‌الکل به‌عنوان یک پلیمر سنتزی محلول در آب، با توانایی ایجاد پیوندهای مؤثر بین ذرات و تقویت انسجام داخلی، نقش مؤثری در بهبود رفتار مکانیکی و دوام خاک ایفا می‌کند. استفاده همزمان از این دو ماده امکان شکل‌گیری شبکه‌های هیدروژلی پایدار را فراهم می‌آورد که اثرات هم‌افزایی آن‌ها بر خواص مکانیکی، شکل‌پذیری و رفتار ریزساختاری خاک تثبیت‌شده قابل بررسی و تحلیل است. علاوه بر این به‌کارگیری نانو رس‌ها به‌عنوان عامل تقویت ریزساختاری، می‌تواند ضمن افزایش انسجام ذرات خاک، عملکرد پایدار خاک‌های اصلاح‌شده را تضمین کند. این رویکرد چندجانبه و جامع، امکان ارائه راهکاری نوین و پایدار برای جایگزینی تثبیت‌کننده‌های سنتی را فراهم می‌سازد و در عین حال، اثرات زیست‌محیطی منفی را به حداقل می‌رساند. برای ارزیابی دقیق تأثیر این ترکیب، آزمایش‌های مکانیکی در مقیاس کلان و مجموعه‌ای از آزمایش‌های ریزمقیاس برای تحلیل تغییرات ریزساختاری، فیزیک و شیمیایی خاک روی نمونه‌ها انجام شده است. علاوه بر این، نمونه‌های تثبیت‌شده با ترکیب پیشنهادی، در شرایط آزمایشگاهی یکسان با نمونه‌های تثبیت‌شده با مصالح سنتی مانند سیمان و آهک مورد مقایسه قرار گرفته‌اند تا امکان تحلیل دقیق اثر بخشی نسبی و مزایای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی روش نوین فراهم شود.

به طور کلی، هدف این پژوهش، بررسی اثر همزمان صمغ فارسی، پلی وینیل الکل و نانو رس بر تثبیت خاک رس طبیعی و آلوده به مواد نفتی و ارزیابی عملکرد آن‌ها در بهبود خواص مکانیکی، شکل پذیری و رفتار ریزساختاری است. نتایج حاصل از این تحقیق، چارچوب علمی ارزشمندی برای درک بهتر رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های اصلاح شده فراهم می‌آورد و می‌تواند راهکارهای پایدار، کارآمد و با حداقل اثرات زیست محیطی برای اجرای پروژه‌های عمرانی مبتنی بر اصول توسعه پایدار ارائه کند.

۴-۱ نوآوری تحقیق

یکی از نوآوری‌های کلیدی این تحقیق، بهره‌گیری از صمغ فارسی به عنوان یک بیوپلیمر بومی، تجدیدپذیر و سازگار با محیط زیست در عمل تثبیت خاک رس طبیعی و همچنین خاک آلوده به آلاینده‌های نفتی است. این ماده به دلیل ویژگی‌های رئولوژیکی مطلوب، ظرفیت بالای جذب آب، رفتار شبه ژلی و توانایی ایجاد پیوندهای چسبنده میان ذرات خاک، به عنوان جایگزینی نویدبخش برای تثبیت‌کننده‌های سنتی نظیر آهک و سیمان مطرح می‌شود. افزون بر این، صمغ فارسی در مقایسه با بسیاری از بیوپلیمرهای تجاری، هزینه تولید و تأمین کمتری دارد که آن را به گزینه‌ای تقریباً مقرون به صرفه و قابل استفاده در پروژه‌های عمرانی بزرگ مقیاس تبدیل می‌کند. این رویکرد که بر استفاده از یک منبع بومی و پایدار استوار است، ضمن کاهش وابستگی به مواد پرانرژی و پرکربن مانند سیمان و آهک، هم‌راستا با اصول مهندسی سبز و توسعه پایدار در حوزه تثبیت خاک‌های ریزدانه به ویژه خاک‌های رس کائولینیته طراحی شده است. به کارگیری صمغ فارسی می‌تواند نه تنها عملکرد مکانیکی خاک را بهبود بخشد، بلکه اثرات زیست محیطی ناشی از عملیات تثبیت را نیز به میزان قابل توجهی کاهش دهد.

نوآوری دیگر این پژوهش، ترکیب صمغ فارسی با پلی وینیل الکل به عنوان یک پلیمر صنعتی است. این ترکیب با ایجاد پیوندهای موثر و تقویت ساختار ژل مانند در خاک، انسجام داخلی، عملکرد مکانیکی و مقاومت در برابر نفوذپذیری خاک را بهبود می‌بخشد. چنین ترکیبی از بیوپلیمر و پلیمر صنعتی در حوزه تثبیت خاک تاکنون گزارش نشده و از این رو، رویکردی کاملاً نوین محسوب می‌شود. همچنین با افزودن نانو رس به عنوان مکمل، ویژگی‌های سطحی و واکنش پذیری بالای نانوذرات برای بهبود ریزساختار خاک مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. انتظار می‌رود ترکیب سه گانه صمغ فارسی، پلی وینیل الکل و نانو رس، ضمن بهبود پایداری و مقاومت خاک، گامی مؤثر در توسعه روش‌های تثبیت خاک با رویکردی پایدار و زیست محیطی بردارد.

از دیگر جنبه‌های نوآورانه این تحقیق، مقایسه عملکرد تثبیت کننده‌های جدید با تثبیت کننده‌های سنتی نظیر آهک و سیمان از نظر پارامترهای مقاومتی و انتشار CO_2 است. این تحلیل تطبیقی می‌تواند جایگاه علمی و اجرایی استفاده از مواد نوین را در تثبیت خاک روشن تر سازد. همچنین این پژوهش با رویکردی چندلایه، مجموعه‌ای از

بررسی‌های آزمایشگاهی را در دو مقیاس مختلف در بر می‌گیرد. در کنار آزمایش‌های مکانیکی بزرگ‌مقیاس از جمله مقاومت فشاری محصورنشده^۱ (UCS) و برش مستقیم^۲ (DST)، مجموعه‌ای از آزمایش‌های ریزمقیاس شامل میکروسکوپ الکترونی روبشی^۳ (SEM)، آزمون جذب سطح ویژه^۴ (BET)، آنالیز حرارتی گرماسنجی وزنی^۵ (TGA) و آنالیز اندازه ذرات^۶ (PSA) نیز به کار گرفته شده است تا نحوه تأثیرگذاری افزودنی‌های بیوپلیمری و پلیمری بر ساختار درونی خاک، خصوصیات سطحی، پایداری حرارتی و توزیع اندازه ذرات به دقت بررسی شود. این ترکیب از آزمون‌ها امکان تحلیل جامع‌تری از عملکرد مواد تثبیت‌کننده نوین را فراهم می‌سازد. یافته‌های این آزمایش‌ها با نتایج آزمایش‌های مکانیکی، چارچوبی منسجم برای شناخت دقیق عملکرد ترکیب بیوپلیمر-پلیمر در فرآیند تثبیت خاک فراهم آورده است. چنین رویکرد چندبعدی، گامی نوآورانه در جهت توسعه سامانه‌های تثبیت پایدار، کارآمد و دوستدار محیط زیست به شمار می‌آید.

۱-۵ سوالات تحقیق

با توجه به اهداف و نوآوری‌های این پژوهش، سوالات اصلی تحقیق که پاسخ آن‌ها در پایان رساله ارائه خواهد شد، عبارتند از:

۱. آیا استفاده از صمغ فارسی به‌تنهایی می‌تواند خواص مکانیکی خاک رس را بهبود دهد و نقش مؤثری در تثبیت آن داشته باشد؟
۲. ترکیب صمغ فارسی با پلی‌وینیل‌الکل چه تأثیری بر انسجام داخلی، مقاومت و شکل‌پذیری خاک دارد؟
۳. افزودن نانو رس به ترکیب صمغ فارسی و پلی‌وینیل‌الکل تا چه حد می‌تواند ریزساختار، پایداری و مقاومت طولانی‌مدت خاک را بهبود بخشد؟
۴. عملکرد خاک تثبیت‌شده با ترکیب پیشنهادی در مقایسه با خاک تثبیت‌شده با مواد سنتی (سیمان و آهک) از نظر مقاومت مکانیکی و توجیه اقتصادی چگونه است؟
۵. آلودگی خاک رس با بنزین، گازوئیل و نفت‌خام در درصدهای مختلف چه تأثیری بر مقاومت مکانیکی، پارامترهای ژئوتکنیکی و ریزساختار آن دارد؟

¹Unconfined Compressive Strength

²Direct Shear Test

³ Scanning Electron Microscopy

⁴Brunauer-Emmett-Teller

⁵ Thermogravimetric Analysis

⁶ Particle Size Analysis

۶. صمغ فارسی و پلی‌وینیل‌الکل تا چه اندازه می‌تواند اثرات منفی آلودگی‌های نفتی را بر رفتار مکانیکی و ریزساختاری خاک رس کاهش داده و مقاومت نهایی خاک آلوده را بهبود بخشد؟

۷. آیا استفاده از ترکیب صمغ فارسی، پلی‌وینیل‌الکل و نانو رس می‌تواند روش پایدار و سازگار با محیط‌زیست برای تثبیت خاک‌های ریزدانه باشد و تأثیر آن بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (CO_2) چگونه است؟

۱-۶ ساختار رساله

در فصل اول به بیان موضوع تحقیق پرداخته شده و سپس مسأله تحقیق به صورت دقیق و نظام‌مند تبیین شده و ضرورت انجام تحقیق، هدف اصلی، محدوده تحقیق، سوالات تحقیق و نوآوری‌های آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در فصل دوم به بررسی مطالعات پیشین در زمینه تثبیت خاک‌های رسی با استفاده از مواد نوین پرداخته و مفاهیم مرتبط با انواع پلیمرها، بیوپلیمرها و نانو رس‌ها تشریح می‌گردد. همچنین، جایگاه صمغ فارسی به عنوان یک بیوپلیمر جدید و بومی با پتانسیل زیست‌محیطی مناسب معرفی شده و عملکرد تثبیت‌کننده‌های جدید شامل انواع بیو پلیمرها و پلیمرهای مصنوعی و نانو مواد در تحقیقات گذشته مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

در فصل سوم خاک مورد استفاده (خاک رس کائولینیت) و افزودنی‌های صمغ فارسی، پلی‌وینیل‌الکل، نانو رس، آهک و سیمان و همچنین مواد نفتی شامل بنزین، گازوئیل و نفت خام معرفی می‌شوند. سپس مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها، نحوه اختلاط و شرایط عمل‌آوری تشریح می‌شود. پس از آن روش انجام آزمایش‌های مکانیکی بزرگ‌مقیاس شامل مقاومت فشاری محصورنشده و برش مستقیم و همچنین آزمایش‌های ریزمقیاس شامل SEM، BET، TGA و PSA و مدل‌های آماری توضیح داده می‌شود.

در فصل چهارم نتایج حاصل از آزمایش‌ها به تفکیک مراحل بررسی و انواع نمونه‌ها ارائه شده و عملکرد مواد مختلف در تثبیت خاک طبیعی و آلوده به آلاینده‌های نفتی تحلیل می‌شود. مقایسه میان افزودنی‌های جدید (مواد بیوپلیمری و پلیمری) با تثبیت‌کننده‌های سنتی (سیمان و آهک) نیز انجام می‌گیرد. علاوه بر تحلیل کمی و کیفی نتایج، به بررسی رفتار مقاومتی، پایداری حرارتی، ساختار ریز و ویژگی‌های سطحی خاک تثبیت‌شده پرداخته می‌شود. سپس با استفاده از داده‌های استخراج شده از مطالعات آزمایشگاهی، مدل‌هایی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری محصور نشده و چسبندگی خاک تثبیت شده با صمغ فارسی و پلی‌وینیل‌الکل ارائه شد. در نهایت به مقایسه اقتصادی بین این پلیمرها و مواد سنتی در عمل تثبیت خاک پرداخته می‌شود.

در فصل پنجم، نتایج اصلی پژوهش به صورت خلاصه و منسجم بیان شده و دستاوردهای علمی و کاربردی آن مطرح می‌شود. سپس با توجه به یافته‌ها، پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده در زمینه کاربرد مواد پلیمری در بهبود خاک‌های مسئله‌دار ارائه می‌گردد.

فصل دوم: مروری بر ادبیات تحقیق و پیشینه تحقیق

۲-۱ مقدمه

این فصل به بررسی مواد نوین مورد استفاده در تثبیت خاک و مرور مطالعات پیشین مرتبط با آن اختصاص دارد. تمرکز پژوهش حاضر بر به کارگیری مواد بیوپلیمری، پلیمری و نانو مواد در بهسازی خاک رسی از نوع کائولینیت، با هدف دستیابی به رویکردی پایدار، زیست سازگار و از نظر فنی کارآمد است. در همین راستا مواد تثبیت کننده مورد استفاده در این پژوهش در سه گروه اصلی شامل بیوپلیمرها، پلیمرهای مصنوعی و نانو مواد دسته بندی شده و ویژگی ها و عملکرد هر یک به طور جداگانه مورد بررسی قرار می گیرد.

در بخش نخست بیوپلیمرها به عنوان ترکیبات زیست تخریب پذیر با منشأ طبیعی، معرفی و بررسی می شوند. این ترکیبات به دلیل قابلیت تعامل شیمیایی با ذرات خاک، توانایی تشکیل ساختارهای ژل مانند و اثرگذاری مستقیم بر ویژگی های مکانیکی خاک، مورد توجه قرار گرفته اند. بیوپلیمرهای متنوعی تاکنون در مطالعات ژئوتکنیکی به کار رفته اند که از جمله آنها می توان به صمغ گوار، صمغ عربی، صمغ کتیرا، صمغ فارسی، صمغ زانتان، ژلان، آگار و آلژینات سدیم اشاره کرد. از این میان صمغ فارسی به دلیل منشأ بومی، قیمت مناسب، زیست سازگاری بالا و توانایی ایجاد پیوندهای هیدروژنی قوی با ذرات خاک، در تحقیق حاضر انتخاب شده است. این صمغ طبیعی با ساختار پلی ساکاریدی خود، نه تنها پتانسیل بالایی در بهبود ویژگی های مهندسی خاک دارد، بلکه از منظر زیست محیطی نیز جایگزین مناسبی برای تثبیت کننده های پرکربن محسوب می شود.

در بخش دوم پلیمرهای مصنوعی بررسی شده اند که به دلیل کنترل پذیری در فرآیند ساخت، پایداری فیزیکی و شیمیایی، و قابلیت بهینه سازی خواص فنی، در تثبیت خاک کاربرد گسترده ای یافته اند. در این حوزه پلیمرهایی نظیر پلی آکریل آمید، پلی اتیلن، پلی پروپیلن، پلی استایرن و پلی وینیل الکل مورد توجه قرار گرفته اند. از میان این ترکیبات، پلی وینیل الکل به دلیل خواص منحصربه فردی همچون چسبندگی بالا، انعطاف پذیری، پایداری حرارتی و توانایی تعامل با بیوپلیمرها در تحقیق حاضر به عنوان مکمل صمغ فارسی انتخاب شده است. ساختار مولکولی این ماده امکان تشکیل پیوندهای عرضی با گروه های عاملی بیوپلیمرها را فراهم کرده و موجب ارتقاء قابل توجه عملکرد تثبیت خاک می گردد. استفاده هم زمان از بیوپلیمر و پلیمر احتمالاً می تواند مقاومت مکانیکی و شکل پذیری خاک را افزایش دهد که در ادامه به طور کامل به آن پرداخت م شود.

در بخش پایانی نانو مواد و به ویژه نانو رس ها به عنوان نسل جدیدی از افزودنی های پیشرفته معرفی شده اند. این مواد به دلیل اندازه بسیار کوچک، نسبت سطح به حجم بالا، و قابلیت واکنش پذیری ویژه، توانایی بهبود ساختار میکروسکوپی خاک را دارند. همچنین کاربرد سایر نانو مواد مؤثر نظیر نانولوله های کربنی و نانوسیلیکا در حوزه ژئوتکنیک مرور گردیده است. در مجموع این فصل تلاش دارد با ارائه مروری جامع و انتقادی بر مفاهیم علمی و مطالعات انجام شده در زمینه تثبیت خاک با استفاده از بیوپلیمرها، پلیمرهای مصنوعی و نانو مواد، جایگاه پژوهش

حاضر را در ادبیات علمی مشخص کرده و نوآوری آن در به کارگیری ترکیبی صمغ فارسی، پلی وینیل الکل و نانو رس را در راستای توسعه فناوری های نوین، زیست سازگار و پایدار برای بهسازی خاک های ریزدانه نشان دهد.

۲-۲ طبقه بندی پلیمرها

پلیمرها مواد درشت مولکولی هستند که از تکرار واحدهای ساختاری مشابه به هم و از طریق پیوندهای کووالانسی تشکیل شده اند. این مواد به دلیل ساختار منحصر به فرد خود، کاربردهای متعددی در علوم مهندسی از جمله تثبیت خاک دارند. بر اساس منشأ تولید، پلیمرها به دو دسته طبیعی (بیوپلیمرها) و مصنوعی تقسیم می شوند. در مهندسی ژئوتکنیک، هر دو دسته به منظور بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی خاک، مورد توجه قرار گرفته اند. پلیمرهای طبیعی یا بیوپلیمرها معمولاً از منابع زیستی استخراج می شوند. این پلیمرها به دلیل زیست تخریب پذیری، سازگاری با محیط زیست و قابلیت تعامل با مواد خاک، گزینه مناسبی برای تثبیت پایدار خاک محسوب می شوند. در مقابل پلیمرهای مصنوعی از مونومرهای کوچک با منشأ نفتی یا گازی ساخته می شوند و در مهندسی عمران به دلیل مقاومت مکانیکی بالا و قابلیت کنترل دقیق ساختار، کاربردهای وسیعی دارند.

۳-۲ پلیمرهای طبیعی

پلیمرهای طبیعی یا بیوپلیمرها از منابع زیستی و موجودات زنده تولید می شوند. این مواد در واقع پلیمرهایی هستند که به طور طبیعی توسط میکروارگانیسم ها، گیاهان، و سایر جانداران تولید می شوند و از نظر شیمیایی گونه ای هستند که در محیط زیست به راحتی تجزیه و بازیافت می شوند. در واقع منظور از اینکه این زیست پلیمرها، زیست تخریب پذیر هستند، یعنی در شرایط متعارف طبیعی به ترکیبات ساده آلی، آب و کربن تبدیل و وارد چرخه طبیعت میشوند. زیست پلیمرها را بر اساس ساختار شیمیایی به هفت گروه کلی نوکلئیک اسیدها^۱، پلی اسیدها^۲ مانند پروتئین ها و پلی آمینواسیدها، پلی ساکارید^۳ مانند سلولز و نشاسته، پلی تیواسترها^۴، پلی استرهای معدنی^۵، پلی ایزوپرنوئیدها^۶ مانند لاستیک طبیعی، پلی فنولها^۷ مانند لیگنین یا هومیک اسیدها تقسیم می شوند (قاسم زاده و همکاران ۲۰۲۱).

^۱Nucleic acids

^۲Poly acids

^۳Polysaccharides

^۴Poly thioesters

^۵Inorganic polyesters

^۶Polyisoprenoids

^۷Polyphenols