**دانشـــکده مهندســـی**

پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران (گرایش خاک و پی)

# بررسی امکان بهسازی خاک واگرا به روش بیولوژیکی

**توسط:**

**ساسان مروج**

**استاد راهنما:**

**دکترقاسم حبیب آگهی**

**اسفند ۱۳۹۲**

به نـام خـدا

# بررسی امکان بهسازی خاک واگرا به روش بیولوژیکی

به کوشش:

**ساسان مروج**

**پایان نامه**
**ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی**
**از فعالیت‌های تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد**

در رشته:

**مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی**

**از دانشگاه شیراز**
**شیراز**
**جمهوری اسلامی ایران**

**ارزیابی شده توسط کمیته پایان نامه با درجه: عالی**

دکتر قاسم حبیب‌آگهی، استاد بخش مهندسی راه، ساختمان و محیطزیست (استاد راهنما) .....

دکتر ارسلان قهرمانی، استاد بخش مهندسی راه، ساختمان و محیطزیست (استاد مشاور) .....

دکتر نادر هاتف، استاد بخش مهندسی راه، ساختمان و محیطزیست (استاد مشاور) .....

دکتر علی نیازی، دانشیار پژوهشکده بیوتکنولوژی دانشگاه شیراز (استاد مشاور) .....

دکتر مجتبی جهان‌اندیش، دانشیار بخش مهندسی راه، ساختمان و محیطزیست (استاد داور) .....

**اسفند ۱۳۹۲**

به نام خدا

# اظهارنامه

اینجانب ساسان مروج (۹۰۰۱۱۲) دانشجوی رشته‌ی مهندسی عمران گرایش خاک و پی دانشکده‌ی مهندسی اظهار می‌کنم که این پایان‌نامه حاصل پژوهش خودم بوده و در جاهایی که از منابع دیگران استفاده کرده‌ام، نشانی دقیق و مشخصات کامل آن را نوشته‌ام. همچنین اظهار می‌کنم که تحقیق و موضوع پایان‌نامه‌ام تکراری نیست و تعهد می‌نمایم که بدون مجوز دانشگاه دستاوردهای آن را منتشر ننموده و یا در اختیار غیر قرار ندهم. کلیه حقوق این اثر مطابق با آیین‌نامه مالکیت فکری و معنوی متعلق به دانشگاه شیراز است.

نام و نام خانوادگی: ساسان مروج

تاریخ و امضا: ۱۳۹۲/۱۲/۲۰

**تقدیم به**

**روح پاک پدرم که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه نمایم.**

**و به مادرم، دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر.**

## سپاس‌گزاری

«سپاس‌گزار استادم هستم که سپیدی را بر تخته سیاه زندگیم نگاشت.»

اکنون که به لطف و یاری خداوند متعال پایان‌نامه تحصیلی خود را به اتمام رسانده‌ام، بر خود واجب میدانم که از زحمات استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر حبیب‌آگهی که علاوه بر راهنمایی و حمایت بی‌دریغ برای بنده الگوی کردار و اخلاق نیک بوده‌اند قدردانی نمایم. همچنین از اعضای محترم کمیته علمی آقایان دکتر قهرمانی، دکتر هاتف، دکتر نیازی و دکتر جهان اندیش سپاس‌گزارم.
از خانواده گرامی‌ام که در تمامی شئون زندگی مشوق و پشتیبان من بوده‌اند سپاس‌گزاری و قدردانی می‌نمایم.

# بررسی امکان بهسازی خاک واگرا به روش بیولوژیکی

**به کوشش**

**ساسان مروج**

خاک‌های واگرا خاک‌های رسی هستند که در آب‌های با غلظت پایین نمک به راحتی شسته می‌شوند. این رس‌ها معمولاً دارای مقادیر بالای یون سدیم در کاتیون‌های جذبی خود می‌باشند. پدیده واگرایی پدیده‌ای فیزیکی ـ شیمیایی است و نباید با رگاب که پدیده‌ای کاملاً فیزیکی است و بر اثر شسته شدن ذرات سیلتی خاک رخ می‌دهد اشتباه شود. این خاک‌ها به طور طبیعی در ایران به وفور یافت می‌شوند، بنابراین تحقیق و بررسی روی روش‌های مختلف شناخت، اصلاح و بهبود خاک‌های واگرا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بیوژئوتکنولوژی یک شاخه از مهندسی ژئوتکنیک است که با کاربردهای روش‌های بیولوژیکی در مسائل مهندسی ژئوتکنیکی سروکار دارد. اخیراً در این شاخه روش جدیدی برای بهبود مشخصات مکانیکی خاک، با یک فرآیند بیولوژیک سازگار با محیط‌زیست، معرفی شده است. این تکنیک مبتنی بر استفاده از باکتری‌هایی است که مواد معدنی تولید می‌کنند. این باکتری‌ها در خاک و مواد معدنی طبیعی یافت می‌شوند. پژوهشگران تلاش می‌کنند تا مصارف گوناگونی برای استفاده از مواد معدنی تولیدشده توسط باکتری ارائه دهند. در این تحقیق به بررسی این روش به منظور تثبیت خاک‌های واگرا پرداخته می‌شود.

میکرو ارگانیسم مورد استفاده در این پژوهش، باکتری باسیلوس اسفاریکوس از خانواده باسیلاس می‌باشد که در فرآیند هیدرولیز اوره نقش کاتالیزور را انجام داده و تولید رسوب کربنات کلسیم می‌کند. آزمایش استفاده‌شده به منظور تعیین واگرایی، آزمایش پین‌هول بوده که مطمئن‌ترین روش برای تعیین واگرایی می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان دادند که این روش کارکرد مناسبی برای غیر واگرا کردن خاک با واگرایی زیاد دارد. با درصد مناسب مواد مغذی مورد نیاز برای رشد باکتری، با تغییر درصد رطوبت، تغییر مواد اضافه شونده کلرید کلسیم، تغییر دما در مدت عمل‌آوری و تغییر غلظت باکتری، عملکرد باکتری تغییر خواهد کرد. با تغییر این پارامترها مقادیر بهینه آن‌ها جهت تثبیت خاک واگرای مورد مطالعه در این تحقیق تعیین گردیدند.

**واژه‌های کلیدی:** بهسازی خاک واگرا، روش بیولوژیکی، آزمایش پین‌هول

## فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**


**فصل اول: مقدمه**

**۱. مقدمه ..... ۲**

۱-۱. مقدمه ..... ۲

**فصل دوم: تاریخچه**

**۲. تاریخچه ..... ۵**

۲-۱. تثبیت خاک‌های واگرا ..... ۵

۲-۲. استفاده از باکتری ..... ۶

**فصل سوم: مبانی نظری**

**۳. مبانی نظری ..... ۱۴**

۳-۱. بهسازی بیولوژیک ..... ۱۴

۳-۲. خاک واگرا ..... ۲۰

*۳-۲-۱. پدیده واگرایی در خاک‌های رسی ..... ۲۰*

*۳-۲-۲. جذب آب در رس‌ها ..... ۲۰*

*۳-۲-۳. لایه دوگانه ..... ۲۲*

*۳-۲-۴. اجتماع و پراکندگی ذرات رس ..... ۲۳*

*۳-۲-۵. علت پدیده واگرایی ..... ۲۵*

*۳-۲-۶. اثرات خاک‌های واگرا در سازه‌های آبی ..... ۲۵*

*۳-۲-۷. ویژگی‌های فیزیوشیمیایی خاک‌های واگرا و سابقه شناخت آن‌ها ..... ۲۶*

*۳-۲-۸. مکانیزم واگرایی در خاک‌های رسی ..... ۲۸*

*۳-۲-۹. تأثیر میزان تراکم و درصد رطوبت در واگرایی ..... ۲۹*

*۳-۲-۱۰. شناسایی خاک‌های واگرا ..... ۲۹*

## فصل چهارم: نحوه انجام مطالعه


**۴. نحوه انجام مطالعه ..... ۳۴**

۴-۱. تهیه خاک واگرا ..... ۳۴
۴-۲. تهیه باکتری مناسب و کشت آن ..... ۳۸
۴-۳. نحوه اندازه‌گیری غلظت محلول باکتری ..... ۴۴
۴-۴. انتقال محلول باکتری و کلرید کلسیم به خاک ..... ۵۰
۴-۵. تراکم نمونه خاک و نگهداری نمونه‌ها ..... ۵۰
۴-۶. آزمایش پین‌هول ..... ۵۱
*۴-۶-۱. دستگاه آزمایش پین‌هول ..... ۵۱*
*۴-۶-۲. روش انجام آزمایش پین‌هول ..... ۵۴*


## فصل پنجم: نتایج آزمایش‌ها


**۵. نتایج ..... ۵۹**

۵-۱. متغیرها ..... ۵۹
۵-۲. آزمایش‌های انجام‌شده ..... ۶۰
*۵-۲-۱. آزمایش‌های سری F: بررسی اثر محلول $CaCl_2$ به تنهایی ..... ۶۰*
*۵-۲-۲. آزمایش‌های سری C: بررسی اثر نحوه اضافه کردن محلول $CaCl_2$ و محلول باکتری و زمان تراکم ..... ۶۱*
*۵-۲-۳. آزمایش‌های سری E: بررسی اثر زمان عمل‌آوری نمونه‌ها ..... ۶۲*
*۵-۲-۴. آزمایش‌های سری‌های G و H: بررسی غلظت‌های نوری ۰٫۵ و ۱ و ۱٫۵ و ۲ در زمان‌های مختلف در رطوبت ۲۰ درصد و محلول $CaCl_2$=5% ..... ۶۳*
*۵-۲-۵. آزمایش‌های سری I: بررسی اثر محلول $CaCl_2$=7.5% با غلظت‌های نوری ۱ و ۱٫۵ و ۲ در زمان‌های ۱ و ۳ و ۵ روزه: ..... ۶۵*
*۵-۲-۶. آزمایش‌های سری K: بررسی اثر درصد رطوبت (با تغییر مقادیر محلول $CaCl_2$و باکتری) با OD=۲ در زمان‌های مختلف: ..... ۶۶*
*۵-۲-۷. آزمایش‌های سری L: بررسی اثر درصد رطوبت با OD=1.5 ..... ۶۷*
*۵-۲-۸. آزمایش‌های سری M: بررسی اثر درصد رطوبت با غلظت‌های نوری ۱ و ۱٫۵: ..... ۶۸*
*۵-۲-۹. آزمایش‌های سری N: بررسی اثر محلول $CaCl_2$ و محیط کشت و بررسی رطوبت ۲۳ درصد با محلول باکتری ۲ =OD ..... ۷۰*
*۵-۲-۱۰. آزمایش‌های سری O: مقایسه باکتری اسفاریکوس با ۲ =OD و باکتری پاستوری با ۱٫۷ =OD در دمای ۲۸ درجه و رطوبت ۲۰ درصد ..... ۷۲*
*۵-۲-۱۱. آزمایش‌های سری P: بررسی باکتری اسفاریکوس با ۲ = OD و در دمای ۳۵ درجه ..... ۷۳*
۵-۳. خلاصه نتیجه‌گیری از آزمایشهای واگرایی ..... ۷۴
۵-۴. آزمایش جهت شناسایی فرآیندها ..... ۷۷
*۵-۴-۱. تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی SEM ..... ۷۷*
*۵-۴-۲. آزمایش pH ..... ۸۶*

۵-۴-۳. *آزمایش حدود اتربرگ* ..... ۸۷
۵-۴-۴. *آنالیز XRD* ..... ۸۸

**فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها**

**۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها ..... ۹۶**

۶-۱. نتیجه‌گیری ..... ۹۶
۶-۲. پیشنهادها ..... ۹۸

**۷. فهرست منابع ..... ۹۹**

# فهرست جداول

**عنوان** **صفحه**


جدول ۴-۱.مشخصات خاک مورد آزمایش ..... ۳۶
جدول ۴-۲.ترکیبات محیط کشت مایع باکتری ..... ۳۸
جدول ۴-۳.تعداد کلونی‌های شمارش‌شده در کشت جامد باکتری پس از ۲۴ ساعت..... ۵۰
جدول ۴-۴.معیارهای طبقه‌بندی خاک واگرا بر اساس آزمایش پین‌هول ..... ۵۵
جدول ۵-۱.آزمایش‌های سری F ..... ۶۰
جدول ۵-۲.آزمایش‌های سری c..... ۶۱
جدول ۵-۳.آزمایش‌های سری E..... ۶۲
جدول ۵-۴.آزمایش‌های سری‌های G و H: بررسی غلظت‌های نوری ۱ و ۱,۵ و ۲ در زمان‌های مختلف در رطوبت ۲۰ درصد و$CaCl_2$=5% ..... ۶۴
جدول ۵-۵.آزمایش‌های سری J بررسی اثر $CaCl_2$=7.5% با غلظت‌های نوری ۱ و ۱,۵ و ۲..... ۶۵
جدول ۵-۶.آزمایش‌های سری K: بررسی اثر درصد رطوبت (با تغییر مقادیر محلول $CaCl_2$و باکتری).....۶۶
جدول ۵-۷.آزمایش‌های سری L: بررسی اثر درصد رطوبت با OD=1.5 ..... ۶۷
جدول ۵-۸.آزمایش‌های سری M: بررسی اثر درصد رطوبت با غلظت‌های نوری ۱ و ۱,۵ ..... ۶۹
جدول ۵-۹.آزمایش‌های سری N: بررسی اثر محلول$CaCl_2$ و محیط کشت ..... ۷۰
جدول ۵-۱۰.آزمایش‌های سری O ..... ۷۲
جدول ۵-۱۱.آزمایش‌های سری P..... ۷۳
جدول ۵-۱۲.مقایسه حدود اتربرگ روی دو نمونه خاک اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده..... ۸۷
جدول ۶-۱.مقادیر بهینه متغیرهای مورد آزمایش ..... ۹۸

# فهرست شکل‌ها

**عنوان** **صفحه**


شکل ۲-۱.تصاویر میکروسکوپ الکترونی از A) نمونه اصلاح‌نشده، B) نمونه اصلاح‌شده با سنگ گچ، C) نمونه اصلاح‌شده با باکتری به مقدار کم، D) نمونه اصلاح‌شده با باکتری به مقدار زیاد ..... ۸
شکل ۲-۲.تغییر نفوذپذیری پس از اصلاح بیولوژیکی ..... ۹
شکل ۲-۳.نمودار تغییر مقاومت فشاری محدود نشده و مقاومت پسماند پس از شکست ..... ۹
شکل ۲-۴.نتایج آزمایشگاهی تأثیر اصلاح بیولوژیکی روی نشست و ظرفیت باربری خاک زیر پی سطحی .. ۱۰
شکل ۲-۵.اثر بهسازی بیولوژیکی در پاسخ خاک در برابر بارهای دینامیکی در آزمایش سانتریفیوژ ..... ۱۱
شکل ۲-۶.اثر بهسازی بیولوژیکی در پاسخ خاک در برابر بارهای دینامیکی در آزمایش سانتریفیوژ ..... ۱۱
شکل ۳-۱.توانایی بهسازی زیستی و تغییرات ویژگی‌های مهندسی خاک ..... ۱۶
شکل ۳-۲.روش رسوب بیولوژیکی کربنات کلسیم ..... ۱۷
شکل ۳-۳.نحوه عملکرد رسوب کلسیت در خاک ..... ۱۸
شکل ۳-۴.مولکول دوقطبی آب ..... ۲۱
شکل ۳-۵.آب لایه دوگانه در حالت خشک و در حالت اضافه کردن آب ..... ۲۲
شکل ۳-۶.ساختمان خاک ..... ۲۴
شکل ۴-۱.نمودار تراکم ..... ۳۶
شکل ۴-۲.نمودار دانه‌بندی ..... ۳۷
شکل ۴-۳.همزن مغناطیسی ..... ۳۸
شکل ۴-۴.مواد لازم برای تهیه محیط کشت ..... ۳۹
شکل ۴-۵.سرنگ و فیلتر به منظور اضافه کردن اوره به محیط کشت اتوکلاو شده ..... ۴۰
شکل ۴-۶.اتوکلاو که در فشار و حرارت بالا محیط کشت را استریل می‌کند. ..... ۴۱
شکل ۴-۷.انکوباتور مورداستفاده ..... ۴۱
شکل ۴-۸.تهیه محیط کشت در هود ..... ۴۲
شکل ۴-۹.ویال حاوی باکتری اسفاریکوس به صورت منجمد ..... ۴۳
شکل ۴-۱۰.ظروف حاوی محلول باکتری با عمر بیش از یک روز ..... ۴۴
شکل ۴-۱۱.اسپکترومتر برای اندازه‌گیری OD محلول ..... ۴۶
شکل ۴-۱۲.کوت‌های حاوی محیط کشت و باکتری برای اندازه‌گیری غلظت نوری ..... ۴۶
شکل ۴-۱۳.رقیق‌سازی گام به گام محلول باکتری ..... ۴۸
شکل ۴-۱۴.کشت جامد باسیلوس اسفاریکوس و کلونی‌های باکتری تشکیل‌شده پس از ۲۴ ساعت ..... ۴۸
شکل ۴-۱۵.طریقه اختلاط محلول باکتری و کلرید کلسیم با خاک ..... ۵۰

شکل ۴-۱۶.دستگاه تراکم هاروارد ..... ۵۱
شکل ۴-۱۷.درب بطری پلاستیکی قرار داده‌شده در دو طرف نمونه متراکم شده ..... ۵۲
شکل ۴-۱۸.شکل شماتیک دستگاه آزمایش پین‌هول ..... ۵۲
شکل ۴-۱۹.هادی مخروطی‌شکل و سوزن به قطر یک میلی‌متر ..... ۵۳
شکل ۴-۲۰.مقطع از نمونه برای آزمایش پین‌هول ..... ۵۴
شکل ۴-۲۱.سوراخ کردن خاک متراکم شده با سوزن ..... ۵۴
شکل ۴-۲۲.دستگاه کامل پین‌هول ..... ۵۶
شکل ۴-۲۳.کدری‌های آب پس از آزمایش پین‌هول ..... ۵۷
شکل ۵-۱.جدول متغیرهای مورد آزمایش ..... ۵۹
شکل ۵-۲.آزمایش‌های سری c ..... ۶۲
شکل ۵-۳.آزمایش‌های سری E ..... ۶۳
شکل ۵-۴.آزمایش‌های سری‌های G و H ..... ۶۴
شکل ۵-۵.آزمایش‌های سری I: بررسی اثر $CaCl_2$=7.5% با غلظت‌های نوری ۱ و ۱,۵ و ۲ ..... ۶۵
شکل ۵-۶.آزمایش‌های سری K: بررسی اثر درصد رطوبت (با تغییر مقادیر محلول $CaCl_2$ و باکتری) ..... ۶۷
شکل ۵-۷.بررسی اثر درصد رطوبت با OD=۱,۵ ..... ۶۸
شکل ۵-۸.بررسی اثر درصد رطوبت با غلظت‌های نوری ۱ و ۱,۵ ..... ۶۹
شکل ۵-۹.بررسی اثر محلول $CaCl_2$ و محیط کشت ..... ۷۱
شکل ۵-۱۰.بررسی باکتری اسفاریکوس با OD=۲ و باکتری پاستوری با OD =۱,۷ ..... ۷۳
شکل ۵-۱۱.بررسی تأثیر غلظت محلول باکتری ..... ۷۴
شکل ۵-۱۲.بررسی درصد بهینه محلول کلرید کلسیم ..... ۷۵
شکل ۵-۱۳.بررسی مدت زمان بهینه نگهداری نمونه ..... ۷۶
شکل ۵-۱۴.بررسی تأثیر میزان رطوبت نمونه ..... ۷۶
شکل ۵-۱۵.بررسی تأثیر دمای عمل‌آوری ..... ۷۷
شکل ۵-۱۶.تصویر دستگاه طلادهی نمونه‌ها برای تصویربرداری SEM ..... ۷۹
شکل ۵-۱۷.دستگاه میکروسکوپ الکترونی ..... ۸۱
شکل ۵-۱۸.تصویر SEM با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر (۵۰ میکرومتر) ..... ۸۱
شکل ۵-۱۹.تصویر SEM با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر (۲۰ میکرومتر) ..... ۸۲
شکل ۵-۲۰.تصویر SEM با بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر (۱۰ میکرومتر) ..... ۸۳
شکل ۵-۲۱.تصویر SEM با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر ( ۲ میکرومتر) ..... ۸۴
شکل ۵-۲۲.تصویر SEM با بزرگنمایی ۲۰۰۰۰ برابر (۲ میکرومتر) ..... ۸۵
شکل ۵-۲۳.نمودار تغییرات pH با زمان در طول مدت عمل‌آوری ..... ۸۶
شکل ۵-۲۴.دستگاه آنالیز XRD ..... ۹۱
شکل ۵-۲۵.آنالیز XRD برای دو نمونه خاک قبل و بعد از بهسازی با باکتری ..... ۹۱
شکل ۵-۲۶.مقایسه پیک‌های مربوط به کلسیت قبل و بعد از بهسازی ..... ۹۲
شکل ۵-۲۷.مقایسه پیک‌های مربوط به کلسیت قبل و بعد از بهسازی ..... ۹۳

# فصل اول

## مقدمه

# ۱. مقدمه

## ۱-۱. مقدمه

یکی از موضوعاتی که همواره در انتخاب منابع قرضه ریزدانه برای خاکریزهای مهندسی نظیر سدهای خاکی باید مورد بررسی و توجه قرار گیرد، وجود انواع مختلف نمک‌های محلول و غیر محلول در این مصالح می‌باشد. عدم توجه به این مهم در اجرای سازه‌های آبی مشکلات زیادی را پدید آورده و موجب تخریب و غیرقابل استفاده شدن این‌گونه مصالح شده است.

تجربیات گذشته نشان می‌دهد که خواص مکانیکی اغلب خاک‌ها با افزایش رطوبت و اشباع شدن تغییر می‌کند. در برخی از خاک‌ها بر اثر افزایش رطوبت پدیده‌های خاصی بروز می‌کند که بعضاً به خسارت‌های عمده‌ای در طرح‌های عمرانی منجر می‌گردد. این خاک‌ها «خاک‌های حساس در مقابل آب» نامیده می‌شوند و از مهم‌ترین اقسام آن‌ها می‌توان به خاک‌های متورم‌شونده، خاک‌های واگرا و خاک‌های رمبنده اشاره نمود.

خاک‌های واگرا، خاک‌های رسی هستند که در آب‌های با غلظت پایین نمک، به راحتی شسته می‌شوند. این رس‌ها معمولاً دارای مقادیر بالای یون سدیم در کاتیون‌های جذبی خود می‌باشند.

واگرایی، یک پدیده پیش‌رونده می‌باشد که از یک نقطه با تمرکز جریان آب شروع شده و به تدریج گسترش می‌یابد. نقطه شروع پدیده واگرایی می‌تواند ترک‌های حاصل از انقباض، نشست و یا ترک‌های حاصل از ریشه گیاهان باشد. این پدیده در طرح‌هایی نظیر سدهای خاکی و کانال‌های آب‌رسانی که تمرکز فشار آب در داخل خاک وجود دارد، دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد و در خاکریزها، دیواره‌های کانال‌های خاکی و سدهای خاکی مشکلاتی به وجود می‌آورد که غیرقابل‌جبران می‌باشد.

پدیده واگرایی پدیده‌ای فیزیکی ـ شیمیایی است و نباید با رگاب که پدیده‌ای کاملاً فیزیکی است و بر اثر شسته شدن ذرات سیلتی خاک رخ می‌دهد اشتباه شود. این خاک‌ها به طور طبیعی در ایران به وفور یافت می‌شوند، بنابراین تحقیق و بررسی روی روش‌های مختلف شناخت، اصلاح و بهبود خاک‌های واگرا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

بیوژئوتکنولوژی یک شاخه از مهندسی ژئوتکنیک است که با کاربردهای روش‌های بیولوژیکی در مسائل مهندسی ژئوتکنیکی سروکار دارد. اخیراً در این شاخه روش جدیدی برای بهبود مشخصات مکانیکی خاک، با یک فرآیند بیولوژیک سازگار با محیط‌زیست، معرفی شده است. این تکنیک که در آزمایشگاه‌ها در حال بررسی شدن است، مبتنی بر استفاده از باکتری‌هایی است که مواد معدنی تولید می‌کنند. این باکتری‌ها در خاک و مواد معدنی طبیعی یافت می‌شوند. پژوهشگران تلاش می‌کنند تا مصارف گوناگونی برای استفاده از مواد معدنی تولیدشده توسط باکتری ارائه دهند. در این تحقیق به بررسی این روش، به منظور تثبیت خاک‌های واگرا پرداخته می‌شود.

# فصل دوم

# تاریخچه

# ۲. تاریخچه

## ۲-۱. تثبیت خاک‌های واگرا

تاکنون تلاش‌های زیادی به‌منظور تثبیت خاک‌های واگرا انجام گرفته است و به این منظور روش‌های مختلفی به کار گرفته شده است. تثبیت با آلومینیوم سولفات در بسیاری از پروژه‌های ژئوتکنیکی ازجمله سد سبردینهو (Sobradinho dam) در برزیل [1]، در نهر اسکو (Squaw—creek) در آمریکا [2] و در روی خاکی واقع در منطقه جنوب شرقی اوکلاهما (Oklahoma) [3] انجام‌شده است. به‌منظور تثبیت خاک واگرای منابع قرضه سد میرزاخانلو در شهرستان طارم نیز از آلومینیوم سولفات استفاده گردید که نتایج نشان داد با زیادشدن غلظت الکترونی اطراف ذرات رس، نیروی جاذبه الکتریکی در دانه‌ها ایجادشده که سبب لخته شدن ذرات و ایجاد دانه‌های بزرگ‌تر می‌گردد و این عمل باعث تغییر ساخت خاک و کاهش مشکل واگرایی می‌گردد [4].

در سال ۲۰۱۲ وکیلی و همکاران [5] اثر اختلاط پوزولان با خاک رس، همراه با عمل‌آوری را مورد تحقیق قراردادند که نتایج، کاهش واگرایی خاک را نشان دادند. مکانیزم کاهش واگرایی بدین صورت است که واکنش تبادل یونی بین یون‌های کلسیم و آلومینیوم و کاتیون‌های خاک رس صورت می‌گیرد و یون کلسیم و آلومینیوم جایگزین یون سدیم که دارای ظرفیت کمتری است می‌شود که این عمل، سبب تجمع یون‌های کلسیم و آلومینیوم در اطراف ذرات رس می‌گردد. با زیادشدن غلظت الکترونی اطراف ذرات رس، نیروی جاذبه الکتریکی در دانه‌ها ایجادشده که سبب لخته شدن ذرات و ایجاد دانه‌های بزرگ‌تر می‌گردد و این عمل باعث تغییر ساختار خاک، کاهش پلاستیسیته خاک و کاهش مشکل واگرایی می‌گردد.

استفاده از آهک به‌منظور کاهش واگرایی خاک توسط مک دانیل [6] روی خاک سد لس استروس (Los Esteros Dam) انجام پذیرفته شده است که نتایج، غیر واگرا بودن خاک تثبیت‌شده را تأیید کرد. از خاکستر بادی نیز به‌منظور بهبود خواص خاک رس واگرا توسط ایندراراتنا و نوتالایا [7] در تایلند استفاده شد.

در سال ۱۹۹۸ صدر کریمی، اثر جریان الکترواسمز را روی خاک واگرا بررسی کرد و ملاحظه کرد که جریان الکترواسمز موجب از بین رفتن واگرایی در حوالی آند می‌گردد، ولی در زمان محدود در حوالی کاتد آن را افزایش می‌دهد. به موازات تغییر واگرایی خاک مقادیر حد روانی و دامنه خمیری در هر دو قطب نسبت به مقادیر اولیه افزایش پیدا می‌کند و موجب افزایش مقاومت خاک به ازای یک رطوبت ثابت می‌گردد. با افزایش ولتاژ، زمان اصلاح خاک به‌شدت کاهش پیدا می‌کند، بااین‌حال ممکن است موجب ترک خوردن آن شود [8].

در سال ۱۳۷۴، رحیمی و فکور [9]، سیمان و امولسیون قیر را در تثبیت خاک‌های واگرا جهت استفاده در پوشش کانال‌ها مقایسه کردند. نتایج تحقیق نشان داد که دوام و کیفیت فنی مخلوط سیمان در شرایط مختلف به‌مراتب بهتر از مخلوط‌های امولسیون قیر بوده و فرسایش‌پذیری آن‌ها در مقابل جریان آب در مخازن خاکی در حد قابل‌قبول است.

در سال ۲۰۰۳، بلوری‌بزاز و ثقفی [10]، تأثیر درصد اشباع خاک‌های واگرا را در میزان واگرایی آن‌ها مورد بررسی قراردادند و مشخص شد که میزان رطوبت تأثیری در میزان واگرایی خاک ندارد. در این تحقیق از ماده آلی پلیمری PVA برای اصلاح واگرایی خاک استفاده شد و مشخص شد که افزودن این ماده تأثیر مثبت قابل‌توجهی بر خصوصیات خاک دارد.

## ۲-۲. استفاده از باکتری

استفاده از باکتری برای مقاصد محیط زیستی به‌طور روزافزون زیاد می‌شود. در تحقیقات اخیر از باکتری برای جدا کردن مواد شیمیایی از فاضلاب، پاک‌سازی خاک‌های آلوده و از بین بردن گازهای گلخانه‌ای در محل‌های دفن زباله استفاده شده است. باکتری‌هایی که توانایی تولید مواد معدنی دارند نیز برای تحکیم ماسه و تعمیر بناهای یادبود از جنس سنگ آهک به کار رفته‌اند. این‌گونه باکتری‌ها با تولید مواد معدنی، حفرات و منافذ موجود در سنگ را پرکرده

و از جابجا شدن آب جلوگیری می‌کنند. این روش از لحاظ هزینه و کارایی جایگزین خوبی برای اپوکسی بوده است.

گلاپودی و همکاران [11] جزء اولین کسانی بودند که این تکنیک جدید سازگار با محیط‌زیست را در سال ۱۹۹۵ معرفی کردند. بعد از آن استاکس و فیشر و همکاران [12] در سال ۱۹۹۹، باخمیر و همکاران [13] در سال ۲۰۰۲، رودریگز و ناوارو و همکاران [14] در سال ۲۰۰۳ و دیک و همکاران [15] در سال ۲۰۰۶ یافته‌های خود را در این زمینه منتشر کردند.

بنگ و راماچاندران و همکاران [16] در سال ۲۰۰۱ دوموینک و همکاران [17] در سال ۲۰۰۸ از جمله گروه‌های تحقیقاتی بودند که از این روش برای پر کردن حفره‌ها و ترک‌های بتن استفاده کردند [16,17].

وندویور و باوی [18] و بنالا و ردی [19] مشاهده کردند که تجمع توده‌های باکتری، لجن‌های باکتریایی غیرحل‌شونده و حباب‌های گاز ناشی از فعالیت باکتری‌ها در خاک سبب کاهش نفوذپذیری آب در خاک می‌شود.

در سال ۲۰۰۱ استوارت و فوگلر [20] مشاهده کردند از تولید پلیمرهای باکتریایی در محل می‌توان به منظور بهبود مشخصات خاک استفاده کرد. این روش به منظور پاک‌سازی خاک‌های آلوده به نفت پذیرفته شده است.

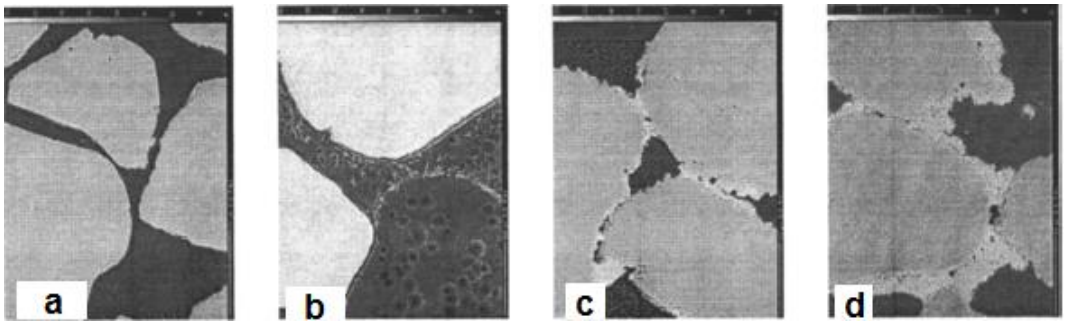
همچنین گروه‌های مختلفی از میکروارگانیسم‌ها وجود دارند که با تولید پلی ساکارید برون سلولی می‌توانند سبب چسبندگی بین ذرات خاک و پر کردن منافذ خاک شوند. این رویه توسط محققان بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است [21,22].

در عمل تلاش‌هایی به منظور کاهش نفوذپذیری هیدرولیکی سدها و بندها، کاهش نفوذ دریاچه در محل‌های ساخت یا لندفیل‌ها، جلوگیری از فرسایش خاک و ایجاد مانع در محل آلودگی خاک صورت پذیرفته است [23,24,25].

به منظور تقویت خاک، مطالعاتی بر روی مقاومت فشاری تک‌محوری به‌دست‌آمده با استفاده از این روش با تزریق تک‌فازه تحت فشار بالا در دانشگاه مرداک انجام گرفت که در سال‌های بعد، این مطالعات بر روی تقویت خاک با شرایط تزریق بهتر و با فشار کمتر گسترش یافت [ 26,27].

دی یونگ و همکاران در سال ۲۰۰۶ تأثیر سیمانتاسیون ناشی از رسوب میکروبی کلسیت در کنترل واکنش برشی ماسه، تحت برش زهکشی نشده را بررسی کردند. بدین منظور نمونه

ماسه سست اصلاح‌نشده، نمونه ماسه اصلاح‌شده با سنگ گچ و نمونه اصلاح‌شده با روش رسوب میکروبی کلسیت را تحت آزمایش سه محوری فشاری تحکیم یافته زهکشی نشده قرار دادند. همچنین به منظور بررسی تأثیر سیمانتاسیون ایجادشده، تغییرات سرعت موج برشی در نمونه-های اصلاح‌شده، اندازه‌گیری شده است. در شکل ۲-۱ تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه‌های اصلاح‌نشده، اصلاح‌شده با سنگ گچ، اصلاح‌شده با باکتری به مقدار کم و اصلاح‌شده با مقدار زیاد باکتری در این آزمایش‌ها با اندازه ۱۰۰ میکرومتر نشان داده شده است. در این مطالعه، نمونه ماسه اصلاح‌شده با روش رسوب میکروبی کلسیت، بیش‌ترین میزان مقاومت را از خود نشان داد [28].




شکل ۲-۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از *a*) نمونه اصلاح‌نشده، *b*) نمونه اصلاح‌شده با سنگ گچ، *c*) نمونه اصلاح‌شده با باکتری به مقدار کم، *d*) نمونه اصلاح‌شده با باکتری به مقدار زیاد*[28]*

ون پاسن و همکاران به بررسی تأثیر رسوب میکروبی کلسیت به عنوان روش مقاوم‌سازی خاک در مقیاس‌های مختلف پرداختند. در این مطالعه ابتدا به بررسی مطالعه ویفین در سال ۲۰۰۷ مبنی بر عملیات تزریق در ستون ماسه پرداخته شده است. این عملیات، شبیه‌سازی وضعیت یک‌بعدی تزریق نقطه‌ای بود و نشان داد که در این وضعیت سیمانتاسیون ناشی از تزریق میکروبی قادر خواهد بود که در فاصله زیادی از نقطه تزریق نیز ایجاد شود. تزریق در این ستون با فشار کم و از بالا به پایین انجام گرفته است. مقدار رسوب کلسیت در سرتاسر ستون ۵ متری مشاهده شده، ولی توزیع آن در نقاط مختلف متفاوت بوده است. مطابق شکل ۲-۲ میزان نفوذپذیری پس از پایان عملیات تزریق از مقدار $۱,۹۲ \times ۱۰^{-۵}$ متر بر ثانیه، حدود ۳۰ درصد کاهش نشان داده است که در این شکل خط‌چین بیانگر نفوذپذیری قبل از تزریق و مربع‌های