



بررسی اثر بیولوژیکی بر روی بهبود وضعیت رمبندگی خاک

بابک نیک اقبال سی سخت^۱، قاسم حبیب آگهی^۲، علی نیازی^۲، احسان نیکویی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی راه و ساختمان، گرایش مکانیک خاک و پی، دانشگاه شیراز

۲- استاد بخش مهندسی راه و ساختمان، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

۳- دانشیار پژوهشکده بیوتکنولوژی، دانشگاه شیراز

۴- محقق پسادکتر، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز
babaknikeghball@yahoo.com

خلاصه

رمبندگی، کاهش حجم خاک غیر اشباع در تنش خالص ثابت در اثر افزایش رطوبت می باشد. خاک رمبنده در رطوبت طبیعی خود در مقابل تنش های وارده تغییر مکان های نسبتا کمی را تجربه می نماید. اما این خاک بعد از مرطوب شدن تحت بار ثابت، نشست نسبتا زیادی را تجربه می کند. در پروژه های مهندسی در صورت احداث هر گونه سازه ای بر روی اینگونه خاکها با اشباع شدن خاک نشست زیادی در خاک بوجود می آید، که این به نوبه خود باعث صدمه دیدن سازه می گردد. روشهای متعددی جهت تثبیت خاکهای رمبنده توسط محققین مختلف پیشنهاد گردیده است. در این تحقیق یک روش جدید جهت تثبیت خاکهای رمبنده مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش اثر بیولوژیکی یک باکتری رسوب دهنده کلسیت بر روی کاهش پتانسیل رمبندگی بررسی گردیده است. برای بررسی کارایی روش پیشنهادی، نمونه های متعددی از یک خاک فروریزی تهیه و با محلولهای شامل باکتری و درصد های مختلف کلرید کلسیم (عامل رسوب ساز) تثبیت (بهسازی) شده اند. ابتدا دو حالت مختلف اختلاط خاک با محلول باکتری و عامل رسوب ساز بررسی و نحوه اختلاط مناسب تعیین شده است. سپس تاثیر غلظت های مختلف کلرید کلسیم مورد نیاز و مدت زمان عمل آوری نمونه با باکتری و کلرید کلسیم مورد بررسی قرار گرفته و مقادیر بهینه آن ها برای نمونه های آزمایش شده تعیین گردیده اند.

کلمات کلیدی: بهسازی خاک، خاک فروریزی، تثبیت بیولوژیکی

۱. مقدمه

رمبندگی (Collapse) به ریزش ناگهانی خاک در اثر از دست رفتن مقاومت عامل پیوند دهنده ذرات خاک اطلاق می شود و میزان رمبندگی ایجاد شده وابسته به نسبت تخلخل اولیه خاک است [1]. تعدادی از نهشته های سیلتی تشکیل یافته تحت شرایط آب و هوایی خشک مستعد کاهش حجم قابل ملاحظه یا رمبندگی در هنگام اشباع شدن (مرطوب شدن) هستند. بنابراین نفوذ آب سطحی، به شکل آبیاری، نشست از لوله ها و بالا آمدن سطح آب زیرزمینی ممکن است موجب بوقوع پیوستن نشست های زیاد گردد. ویژگی های اصلی که باعث می شوند خاکها خصوصیات فروریزی از خود نشان می دهند، عبارتند از: تخلخل بالا (بیش از ۴۰٪) درجه اشباع پایین (زیر ۶۰٪)، میزان لای بالا (بیش از ۳۰٪) و نرم شدگی سریع در آب (زمان بازشدگی پیوند های خاک های بادرفتی با فروریزش بالا کمتر از ۱ دقیقه است) [1].

شاخص رمبندگی به صورت زیر تعریف می گردد:

$$I_c = \left[\frac{d_f - d_0}{h} - \frac{d_i - d_0}{h} \right] \times 100 = \left[\frac{d_f - d_i}{h} \right] \times 100 \quad (1)$$

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی راه و ساختمان
^۲ استاد بخش مهندسی راه و ساختمان



در فرمول ۱، h_0 : ارتفاع اولیه نمونه ۱۹ میلیمتر، d_0 (Seat load): قرائت در بار ۵ کیلو پاسکال، d_f : قرائت در قبل از اشباع شدن و d_f : قرائت دستگاه تحکیم (ادئومتر) بعد از اشباع شدن می باشند. جدول ۱ نشان دهنده طبقه بندی خاک رمنده بر اساس شاخص رمنده گی می باشد [2].

جدول ۱- شاخص رمنده گی

شاخص رمنده گی، I_c %	درجه رمنده گی نمونه
۰	خاک عادی
۰/۱-۲	کم
۲-۶	متوسط
۶-۱۰	تقریباً شدید
>۱۰	شدید

نایت به پیوندهای رسی که به صورت پلی بین ذرات خاک عمل می کنند اشاره می کند و تحمل قسمت اعظم نیروهای بین ذره ای را به عهده این پیوندها می داند. در نتیجه به عقیده وی، در اثر رطوبت بر خاک که موجب وقوع شکست برشی در این پیوند ها و در نتیجه از بین رفتن آنها می شود، رمنده گی در خاک اتفاق می افتد [3]. باردن و همکارانش با استفاده از عکس های میکروسکوپی مربوط به نمونه های مختلف خاک ملاحظه کردند که پیوندهای رسی بین ذرات که در حالت طبیعی وجود دارند در نمونه های ساخته شده در آزمایشگاه که خاک دچار دست خوردگی می شود دیده نمی شود. البته با وجود اینکه پیوندهای رسی بین ذرات در این نمونه ها وجود ندارد، لیکن در این حالت نیز برای مقادیر مختلف درجه اشباع، میزان رمنده گی بیشتری نسبت به نمونه های دست نخورده دیده می شود [4].

عوامل موثر بر رمنده گی:

بطور کلی می توان گفت که نوع خاک، درصد رطوبت اولیه، وزن مخصوص خشک اولیه و فشار اولیه و فشار اعمالی هنگام اشباع از مهمترین عوامل موثر بر میزان رمنده گی می باشند. از تحقیقات پیشین بر روی خاک های رمنده می توان نتیجه گرفت که کاهش پتانسیل رمنده گی خاک ها منوط است به:

- ۱- افزایش تفاوت بین درصد ماسه و رس.
- ۲- افزایش درصد رطوبت اولیه.
- ۳- افزایش وزن مخصوص خشک اولیه.
- ۴- کاهش فشار اعمالی هنگام اشباع.

درسال های اخیر، پژوهش های مختلفی در ارتباط با استفاده از باکتری هادر زمینه ی مهندسی عمران انجام شده است. در ابتدا، استفاده از باکتری ها محدود به جدا کردن مواد شیمیایی از فاضلاب ، پاکسازی خاک آلوده و از بین بردن گازهای گلخانه ای در مکان های دفن زباله بود. اما اخیراً از انواع باکتری ها و به طور خاص از باکتری های رسوب دهنده ی کربنات کلسیم، در زمینه ی مهندسی ژئوتکنیک ، به ویژه در تثبیت خاک و اگر [5]، کاهش نفوذپذیری [6,7] و بهبود وضعیت مکانیکی خاک [8] استفاده شده است. همچنین لازم به ذکر است از باکتری های فوق الذکر برای می توان برای ترمیم ترک های بتن و بهبود دوام بتن استفاده کرد. [9,10]. در این راستا، در تحقیق کنونی روش نوینی جهت تثبیت خاک رمنده مورد بررسی قرار گرفته است. روش پیشنهادی در شاخه علم بیوژئوتکنولوژی قرار دارد. در این تحقیق به بررسی امکان استفاده از باکتری باسیلوس اسفائریکوس برای تثبیت خاک فروریزی پرداخته می شود.

۲. مصالح و روش ها

خاک مورد آزمایش از سد سیوند در ۱۰۰ کیلومتری شمال شرق شیراز تهیه شده است که پس از انجام آزمایش اولیه در رده بندی خاک با رمنده گی شدید قرار گرفت. برای آماده سازی نمونه، ابتدا خاک از الک شماره ۱۰ گذرانده شد تا نمونه ای یکنواخت از خاک جهت آزمایشات بدست آید. سپس با استفاده از دستگاه تحکیم و استاندارد ASTM D5333 D-03 آزمایش رمنده گی انجام شد [2]. از باکتری باسیلوس اسفاریکوس (*Bacillus Sphaericus*) برای بهبود وضعیت رمنده گی استفاده گردید. همچنین از محیط کشت (Culture media) برای کشت باکتری استفاده شد که در جدول ۲ اجزای محیط کشت آورده شده است.

ابتدا با استفاده از آب مقطر محلولی بدون اوره از مواد ذکر شده در جدول (۲) آماده گردید و پس از آن محلول برای زمان ۲۰ دقیقه در در اتوکلاو تحت دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد قرار گرفت و سپس اوره با فیلتری با اندازه بازشدگی ۰/۲۲ میکرومتر به محلول اضافه گردید. pH محلول قبل و بعد از اتوکلاو به ترتیب ۷/۸ و ۷/۹ و پس از اضافه نمودن اوره ۸/۰ بود.

برای اندازه گیری غلظت باکتری در واحد حجم از دستگاه اسپکترومتر نوری استفاده شد که مقدار چگالی نوری (Optical Density) را برای محلول تعیین می کند. نحوه کار با این دستگاه بدین صورت است که ابتدا محیط کشت را درون ظرف مخصوص ریخته و عدد مرتبط با محیط کشت به تنهایی به عنوان شاخص در نظر گرفته می شود (که در واقع چگالی نوری صفر را داراست). سپس بقیه مقادیر (چگالی نوری مخلوط باکتری و ترکیبات محیط کشت) را نسبت به آن مقدار پایه اندازه می گیریم. به این ترتیب چگالی نوری محلول باکتری به دست می آید. دستگاه اسپکترومتر نوری (اسپکتروفوتومتر) در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۲- ترکیبات محیط کشت

مقدار (گرم بر لیتر)	اجزاء محیط کشت
۲/۱۲	بیکربنات سدیم (Sodium bicarbonate)
۳	نوترینت برات (Nutrient broth)
۱۰	کلرید آمونیوم (Ammonium chloride)
۱۰	اوره (Urea)



شکل ۱- اسپکتروفوتومتر برای اندازه گیری چگالی نوری (OD) محلول باکتری و محیط کشت محلول

غلظت باکتری باسیلوس اسفاریکوس در OD مساوی ۱، معادل با 10^8 cell/ml است. پس از تهیه باکتری با غلظت و رطوبت مورد نظر، محلول باکتری به خاک تزریق می شود و به صورت یکنواخت با خاک مخلوط می گردد. براساس آزمایشهای انجام شده با مقادیر مختلف عامل رسوب ساز (کلرید کلسیم (۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ گرم بر لیتر)، مقدار بهینه عامل رسوب ساز (کلرید کلسیم) ۷۵ گرم بر لیتر تعیین گردید. لازم به ذکر است که باکتری باسیلوس اسفاریکوس با کمک عامل شیمیایی رسوب ساز به رسوب کربنات کلسیم بر روی (و در بین) ذرات خاک می پردازد و سبب تقویت ریزافت (میکروساختار) خاک فروریزی می گردد. بهسازی خاک به روش بیوشیمیایی نیازمند افزودن باسیل اسفاریکوس و کلرید کلسیم، هر دو، به خاک می باشد.

برای متراکم کردن نمونه در حلقه دستگاه تحکیم از تراکم ایستایی استفاده شد که با نرخ ۲ میلیمتر بر دقیقه نمونه را متراکم نمود. ارتفاع نمونه ۱۹ میلیمتر می باشد.



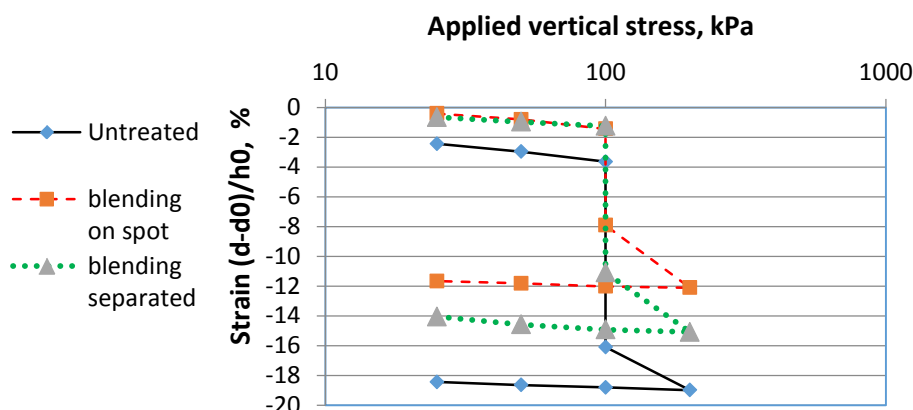
۳. نتایج

در این تحقیق ابتدا نوع مخلوط کردن نمونه با باکتری و عامل رسوب ساز مورد آزمایش قرار گرفت. بدین صورت که در حالت اول ابتدا کلرید کلسیم کاملاً با خاک مخلوط و سپس محلول باکتری به خاک اضافه گردید (اختلاط نوع ۱). در حالت دوم محلول باکتری و کلرید کلسیم باهم به خاک اضافه و مخلوط گردیدند (اختلاط نوع ۲). چگالی نوری باکتری ۲، رطوبت ۱۲ درصد، چگالی خشک خاک ۱/۵ گرم بر سانتیمتر مکعب بود. در این آزمایش ها از خاک طبیعی با پتانسیل رմبندگی شدید استفاده شد. همانگونه که قبلاً اشاره گردید، جهت به دست آوردن بهترین غلظت عامل رسوب ساز، سه غلظت مختلف از آن مورد آزمایش قرار گرفت که به ترتیب ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ گرم کلرید کلسیم محلول در یک لیتر آب می باشد. چگالی نوری باکتری در این آزمایشها ثابت، ۲، در نظر گرفته شد. متغیر دیگری که مورد آزمایش قرار گرفت مدت زمان عمل آوری نمونه می باشد که به ترتیب مدت زمان ۱، ۳ و ۱۴ روز مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمایش ها نیز برای کنترل بهتر خروجی آزمایش ها، درصد رطوبت در همه نمونه ها، ثابت، ۱۲ درصد و نسبت باکتری به عامل رسوب ساز دو در نظر گرفته شد.

با توجه به پتانسیل رմبندگی دو نمونه ی تهیه شده در دو حالت ۱ و ۲، می توان گفت نمونه ی تهیه شده با روش اختلاط نوع ۲ (اختلاط همزمان خاک با باکتری و کلرید کلسیم)، کاهش پتانسیل رմبندگی بیشتری را نسبت به نمونه دیگر داشته است (جدول ۳). البته هر دو آزمایش کاهش پتانسیل رմبندگی را (برای نمونه تثبیت شده در مقایسه با نمونه تثبیت نشده) به همراه داشته است. در شکل ۲ به وضوح می توان این اختلاف پتانسیل رմبندگی را مشاهده نمود.

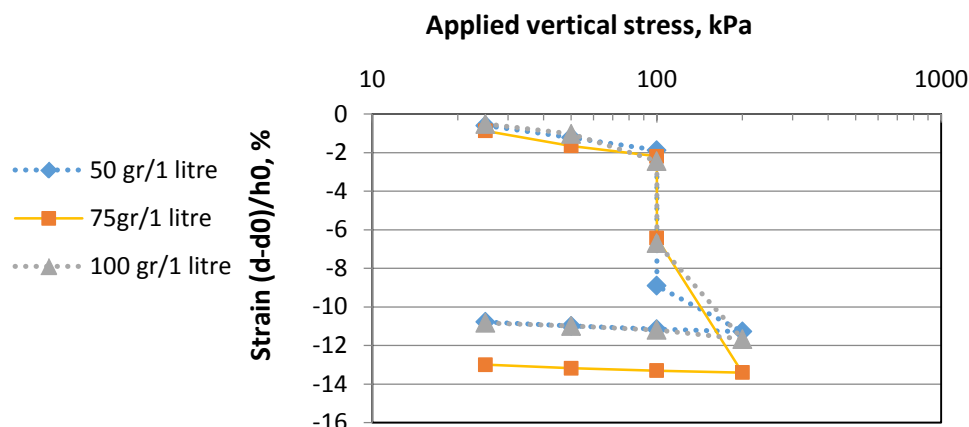
جدول ۳- بررسی تاثیر نوع اختلاط بر میزان کاهش پتانسیل رմبندگی خاک فروریزی

نوع نمونه	پتانسیل رմبندگی خاک (%)
نمونه شاهد	۱۲/۴۴
اختلاط نوع ۱	۹/۸۳
اختلاط نوع ۲	۶/۴۷



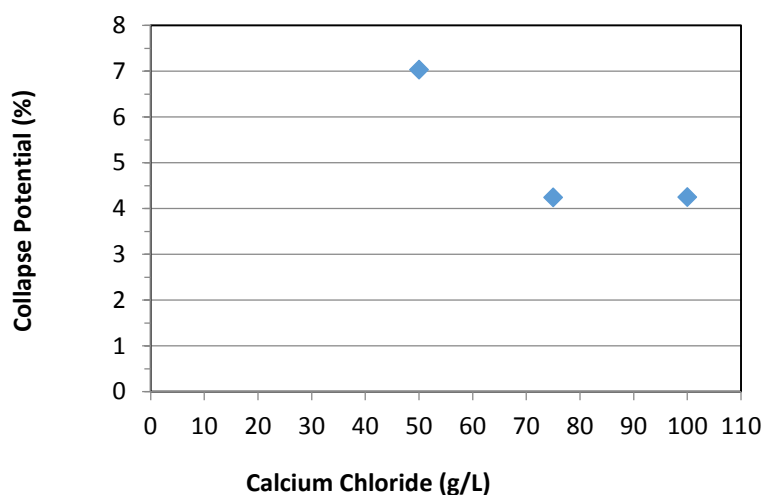
شکل ۲- نمودار تنش- کرنش (بارگذاری با مکش ثابت، تواندازی و باربرداری) برای نمونه های تثبیت شده با محلول باکتری (اختلاط نوع ۱ و ۲) و نمونه تثبیت نشده

شکل ۳ تاثیر غلظت های مختلف کلرید کلسیم (عامل رسوب ساز) را بر نمودار تنش- کرنش نشان می دهد. در این آزمایش ها، چگالی خشک خاک ۱/۵ گرم بر سانتی متر مکعب و رطوبت ۱۲ درصد می باشد و از محلول باکتری با چگالی نوری ۲ استفاده شده است.



شکل ۳- تاثیر غلظت های مختلف عامل رسوب ساز بر نمودار تنش - کرنش: ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ گرم بر لیتر

شکل ۴ نمایانگر تاثیر غلظت های مختلف محلول کلرید کلسیم (۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ گرم بر لیتر) بر پتانسیل رمبندگی است. مقادیر عددی پتانسیل رمبندگی برای نمونه های تثبیت شده با محلول باکتری و محلول کلرید کلسیم با غلظت های مختلف در جدول ۴ ارائه شده اند.



شکل ۴- مقایسه پتانسیل رمبندگی در سه مقدار کلرید کلسیم

خاک تثبیت نشده (بر اساس تعریف ارائه شده در جدول ۱) در طبقه ی خاک های رمبند شدید قرار می گیرد. پس از تثبیت خاک با محلول باکتری و کلرید کلسیم با غلظت ۷۵ گرم بر لیتر، درجه ی رمبندگی خاک به متوسط تغییر می کند. از آنجایی که با افزایش مقدار عامل رسوب ساز میزان کاهش رمبندگی تغییر چندانی نمی نماید، بر اساس آزمایش های انجام گرفته، غلظت بهینه کلرید کلسیم جهت تثبیت ۷۵ گرم بر لیتر می باشد. البته، با انجام تعداد بیشتری آزمایش، با دقت بیشتری می توان در مورد غلظت بهینه کلرید کلسیم مورد نیاز اظهار نظر نمود.

جدول ۴- بررسی تاثیر غلظت کلرید کلسیم مورد نیاز بر میزان کاهش پتانسیل رمبندگی خاک فروریژی

پتانسیل رمبندگی (%)	کلرید کلسیم (گرم بر لیتر)
۷/۰۳	۵۰
۴/۲۵	۷۵
۴/۲۵	۱۰۰



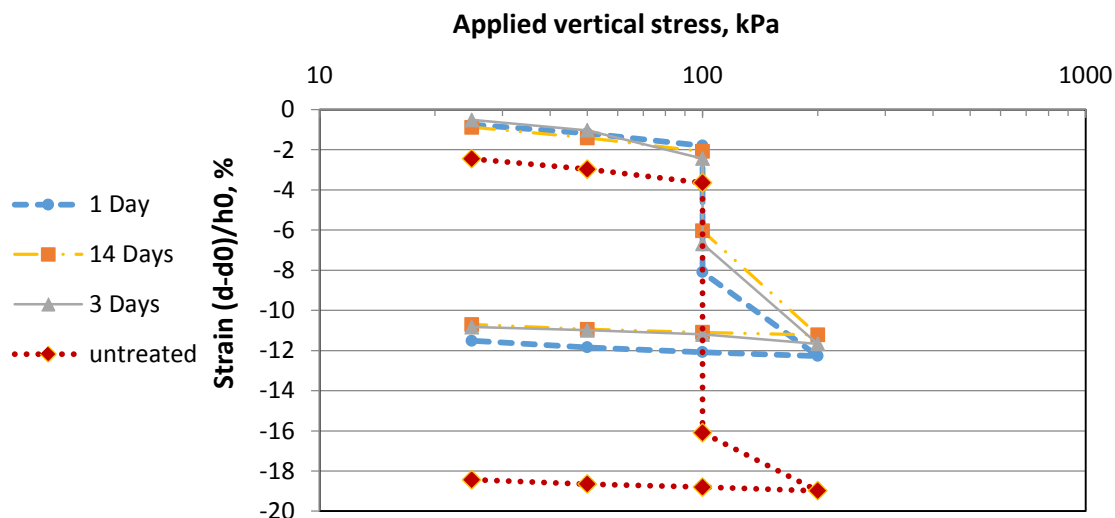
جدول ۵ پتانسیل رمبندگی در نمونه های ۱، ۳ و ۱۴ روزه را نشان می دهد. با توجه به معیار طبقه بندی خاک های رمبنده (ارائه شده در جدول ۱) برای نمونه های مورد آزمایش نتایج ذیل بدست می آید:

همانگونه که پیش تر بیان گردید، نمونه تثبیت نشده براساس میزان پتانسیل رمبندگی (۱۲/۴۴٪) و با استفاده از جدول ۱، در رده خاک رمبند شدید می باشد. نمونه ۱ روزه تثبیت شده در طبقه بندی خاک رمبند متوسط رو به شدید قرار می گیرد که پتانسیل رمبندگی این نمونه با توجه به جدول ۵ مقدار ۶/۳٪ است. نمونه ۳ روزه تثبیت شده در طبقه بندی خاک رمبند متوسط قرار گرفت که پتانسیل رمبندگی این نمونه با توجه به جدول ۵ مقدار ۴/۲۵٪ است. نمونه تثبیت شده ۱۴ روزه در طبقه بندی خاک رمبند متوسط قرار گرفت که پتانسیل رمبندگی این نمونه با توجه به جدول ۵ مقدار ۳/۹۶٪ است.

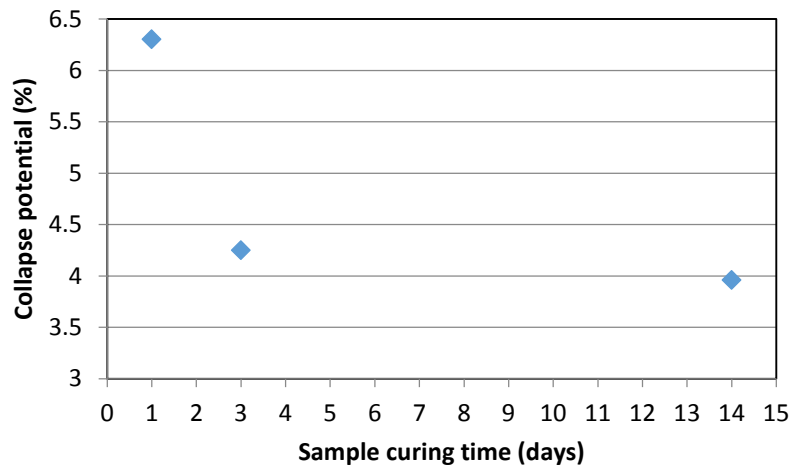
شکل ۵ نشانگر نمودار تنش- کرنش نمونه های ۱، ۳، ۱۴ روزه و نمونه تثبیت نشده می باشد. شکل ۶ پتانسیل رمبندگی نمونه های تثبیت شده و تثبیت شده در زمان عمل آوری متفاوت را به نمایش می گذارد.

جدول ۵- پتانسیل رمبندگی در نمونه های ۱، ۳ و ۱۴ روزه

پتانسیل رمبندگی (%)	زمان عمل آوری نمونه (روز)
۶/۳	۱
۴/۲۵	۳
۳/۹۶	۱۴



شکل ۵- تاثیر زمان عمل آوری نمونه با باکتری بر نمودار تنش- کرنش



شکل ۶- پتانسیل رمبندگی و زمان عمل آوری ۱، ۳ و ۱۴ روزه

تصویر نمونه پس از عمل آوری با باکتری در شکل ۷ ارائه شده است. مشاهده می گردد که لایه ای سبز رنگ بر روی نمونه تشکیل شده است. تغییر خصوصیات ظاهری نمونه نیز می تواند به تاثیر عمل آوری با باکتری نسبت داده شود.



شکل ۷- نمونه پس از عمل آوری با باکتری باسیلوس اسفاریکوس

۴. نتیجه گیری

با بررسی نتایج آزمایشهای روی خاک رمبنده و تثبیت شده با باکتری باسیلوس اسفاریکوس مشاهده شد:

- ۱- خاک رمبنده با استفاده از باکتری باسیلوس اسفاریکوس قابل تثبیت است.
- ۲- با ثابت نگه داشتن درصد رطوبت، چگالی خشک خاک، مقدار باکتری و عامل رسوب ساز با گذشت زمان عمل آوری، رمبندگی خاک کاهش می یابد.
- ۳- در هر دو حالت اختلاط همزمان و جداگانه باکتری و عامل رسوب ساز با خاک، رمبندگی خاک کاهش می یابد. البته، اگر عامل رسوب ساز و باکتری هردو باهم به خاک اضافه و در یک زمان با خاک مخلوط گردند، کاهش رمبندگی بیشتری مشاهده می گردد.



۴- پتانسیل رمبندگی در نمونه تثبیت شده با افزایش غلظت عامل رسوب ساز (کلرید کلسیم) از ۷۵ گرم بر لیتر به ۱۰۰ گرم بر لیتر تغییری نکرد، بنابراین، بر اساس آزمایش های صورت گرفته و برای حالت های تحت بررسی، بهینه مقدار غلظت عامل رسوب ساز ۷۵ گرم بر لیتر است.

۵. قدردانی

نویسندگان مقاله از جناب آقای مهندس اصغر ملاحفیع، مسئول آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده ی مهندسی دانشگاه شیراز و سرکار خانم مهندس آرام از پژوهشکده ی بیوتکنولوژی دانشگاه شیراز که درانجام تحقیق حاضر همکاری نمودند، صمیمانه تشکر و قدردانی می نمایند.

۶. مراجع

1. Jenings J. E. B. and Burland J. B. (1962), " Limitations to the use of Effective Stress in Partly Saturated Soils," *Geotechnique*, **12** (2), pp. 125-144.
2. " Standard test method of measurement of collapse potential soils," ASTM D5333 D-03.
3. Knight, K. (1961), "The Collapse of Structure of Sandy Subsoils on Wetting, " Ph.D. Thesis, University of Witwatersrand, South Africa.
4. Barden, L., McGowen A., and Collins K. (1973), " The Collapse Mechanism in partly saturated soil, " *Engineering Geology*, **7**, pp.49-60.
۵. مروج، س.، حبیب آگهی، ق. و نیازی، ع. (۱۳۹۲)، " تثبیت خاک و اگر با استفاده از باکتری باسیلوس اسفاریکوس " اولین کنفرانس ملی ژئوتکنیک ایران، جلد چهارم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، ۳۰ مهر تا ۱ آبان ماه ۱۳۹۲.
6. Vandevivere ,P. and Baveye, P. (1992), "Relationship between transport of bacteria and their clogging efficiency in sand columns," *Appl Environ Microbiol*,**58**, pp. 2523–2530.
7. Bonala, M. and Reddi, L. (1998), "Physicochemical and biological mechanisms of soil clogging: an overview, " *ASCE Geotech Spec Publ.*, **78**, pp. 43–68.
8. Stewart, T. and Fogler, H. (2001), "Biomass plug development and propagation in porous media," *Biotechnol. Bioeng.*, **72**, pp. 353–363.
9. Ramachandran, S., Ramakrishnan, V. and Bang, S. (2001), "Remediation of concrete using microorganisms," *ACI Mater.j.*, **98**, pp. 3-9.
10. De Muynck, W., Cox, K., Belie, N. D., and Verstraete, W. (2008) ,"Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete," *Construction and Building Materials*, **22**(5), pp. 875-885.