



بهسازی و تثبیت خاک‌های نرم و سست ریزدانه به روش رسوب‌زایی زیستی کربنات کلسیم (مطالعه‌ی موردی: خاک ریزدانه دانشکده کشاورزی کرمانشاه)

سارا کرمی^۱، جهانگیر خزائی^{۱*}، محمد شریفی پور^۱، روح الله شریفی^۲

۱- دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۲- دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۰۵

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۶

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۲/۰۲

کلمات کلیدی:

بهسازی بیولوژیکی خاک

رسوب گذاری زیستی

مقاومت فشاری محصور نشده

پلاستیسیته خاک

ژئوتکنیک زیست محیطی

خلاصه: فرآیند رسوب‌زایی زیستی به عنوان یک روش بهسازی بیولوژیکی خاک به مجموعه‌ای از واکنش‌های بیوشیمیایی اشاره دارد که طی آن، رسوب تشکیل شده توسط باکتری‌ها موجب پیوند دانه‌های خاک و در نتیجه بهبود خواص آن می‌شود. در هر کدام از تحقیقات قبلی در زمینه رسوب‌زایی زیستی، یکی از روش‌های اختلاط، جذب سطحی و تزریق جهت افزودن مواد رسوب‌زا به خاک استفاده شده است و تا به حال مقایسه‌ای بر این روش‌ها صورت نگرفته است. آنچه در فرآیند رسوب‌زایی زیستی به عنوان یک روش بهسازی خاک بسیار حائز اهمیت است و در واقع یکی از مهم‌ترین چالش‌های این روش محسوب می‌شود، نفوذ یکنواخت محلول رسوب‌زا و به تبع آن توزیع متناسب رسوبات تشکیل شده در حجم خاک است. در پژوهش حاضر پس از بهینه‌سازی شرایط رسوب‌زایی، تأثیر روش ساخت نمونه‌های آزمایش تک محوری در بهسازی بیولوژیکی خاک ریزدانه رسی کرمانشاه با دو باکتری *Bacillus megaterium* و *Lysinibacillus boronitolerans* مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که روش ساخت نمونه (از نظر اضافه کردن مواد رسوب‌زا) بر میزان بهبود مقاومت فشاری نمونه‌ها تأثیر قابل توجهی دارد و بیشترین بهبود مقاومت تا ۲/۶۸ برابر برای باکتری *Bacillus megaterium* در روش جذب سطحی اتفاق افتاده است و به طور کلی افزودن مواد رسوب‌زا به خاک به روش جذب سطحی در جای‌گیری مناسب رسوب بین دانه‌های خاک، به نسبت روش اختلاط و تزریق، مؤثرتر عمل کرده است و در واقع به محلول‌ها اجازه داده شده که بین دانه‌های خاک به سمت کنج‌ها که محل اتصال دانه‌هاست حرکت کنند و در نتیجه منجر به تشکیل رسوب مؤثر در محل اتصال دانه‌ها شوند. همچنین تثبیت بیولوژیکی نمونه‌ی آزمایش تحکیم، تغییرات نسبت منافذ خاک را از ۰/۵۸۴ به ۰/۳۵۴ و شاخص فشردگی را از ۰/۰۷۷ به ۰/۰۲۸ کاهش داده است و افزودن مواد رسوب‌زا به نمونه‌ی آزمایش حدوداً ۲۶ برابری از ۱۹ شده است.

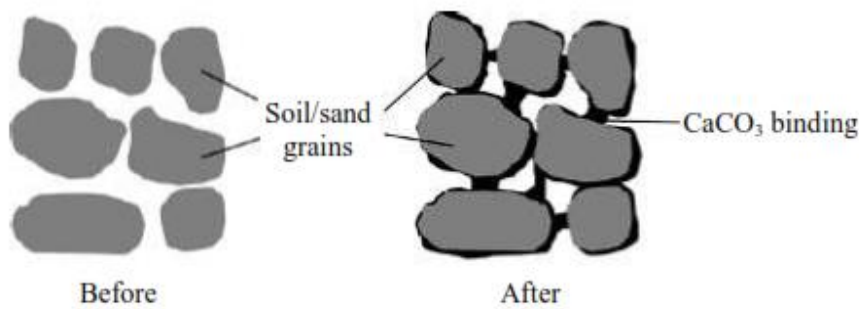
۱- مقدمه

است. در سال‌های اخیر مقوله حفاظت از محیط‌زیست و تلاش برای حفظ و نگهداری از زیستگاه‌ها، بیش از قبل مورد توجه قرار گرفته است و لذا بایستی توجه نمود که تخریب‌های زیست محیطی روش‌های متداول بهسازی می‌تواند از جمله معایب عمده آن‌ها محسوب گردد. به تازگی تکنیک‌های جدیدی در قالب بهسازی بیولوژیکی خاک معرفی شده‌اند که با استفاده از رسوب‌گذاری زیستی، خواص مکانیکی خاک را بهبود می‌بخشند. در این تکنیک‌ها از رسوب تولید شده توسط میکروارگانیسم‌ها طی فرآیندهای بیولوژیکی به عنوان پیوند دهنده‌ی دانه‌های خاک استفاده می‌شود. استفاده از روش رسوب‌زایی زیستی جهت بهسازی خاک در مقایسه با دیگر روش‌های بهسازی خاک دارای مزایایی از جمله هزینه کمتر، شعاع نفوذ بیشتر و سازگاری با محیط‌زیست است. یکی از روش‌های بهسازی بیولوژیکی خاک،

استفاده از روش‌های متداول بهسازی خاک نظیر تسلیح خاک و یا روش‌های مکانیکی مثل انواع تراکم و عملیات خاکی مستلزم انرژی و هزینه‌ی قابل توجهی برای ساخت و نصب‌اند و با محدودیت‌هایی در عمق و گستره‌ی مساحت و ملزومات دسترسی به محل مواجه‌اند. در روش‌های تزریقی نیز اکثر ملات‌هایی که مورد استفاده قرار می‌گیرند سمی و زیان‌آور هستند (به جز سیلیکات سدیم) و آسیب جدی به محیط زیست وارد می‌کنند [۱]. همچنین استفاده از سیمان به عنوان جزء اصلی بیشتر ملات‌ها موجب تولید و انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید می‌شود [۲]. جزء اجتناب‌ناپذیر اکثر روش‌های متداول بهسازی خاک، تغییر اکوسیستم و تأثیر مخرب بر آن

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: j.khazaie@razi.ac.ir



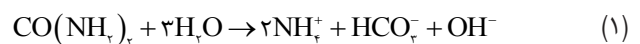


شکل ۱. شبیه‌سازی توده خاک بهسازی شده با رسوب کربنات کلسیم

Fig. 1. Simulation of soil improved by calcium carbonate Precipitation

اتصال موجب تقویت خاک و تغییر خواص مکانیکی آن می‌شود (شکل ۱). رسوب‌زایی زیستی کربنات کلسیم با افزایش مقاومت و سختی خاک می‌تواند به عنوان یک روش بهسازی مقرون به صرفه در مقاوم‌سازی خاک بستر ساختمان‌ها، پایدار کردن شیروانی‌ها، تسهیل حفاری و تونل‌زنی، مقابله با لغزش زمین و کاهش پتانسیل روانگرایی ماسه به کار برده شود [۴-۷]. همچنین کاهش نفوذپذیری خاک به واسطه‌ی تشکیل رسوب در بین دانه‌های خاک و تشکیل محفظه‌ی نفوذناپذیر جهت کاربرهای مختلف مانند ایزوله کردن محل دفن زباله حائز اهمیت است [۸]. رسوب‌زایی زیستی به عنوان یک فرآیند طبیعی، شامل اثر فعالیت متابولیکی باکتری‌ها بر یک سری واکنش‌های شیمیایی است و طبیعتاً عوامل محیطی بسیاری بر بازدهی این روند تأثیر گذارند. از جمله این عوامل می‌توان به دما، غلظت مواد افزودنی، رطوبت، pH، محیط کشت، شوری آب، نوع کانی و اندازه‌ی ذرات خاک، فشار تزریق، زمان انجام واکنش و... اشاره کرد. غلظت محلول رسوب‌زا که عمدتاً شامل اوره و کلسیم کلرید می‌باشد، از جمله پارامترهای مؤثر بر عملکرد رسوب‌زایی زیستی کربنات کلسیم در خاک است که بارها توسط محققان در خاک‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. آنچه از نتایج این تحقیقات برمی‌آید این است که با افزایش غلظت اوره و یون کلسیم، مقدار رسوب کربنات کلسیم تولید شده افزایش پیدا می‌کند اما این افزایش تا غلظت بهینه ادامه دارد و با افزایش غلظت بیش از آن، به علت شوری بالا، تولید کربنات کلسیم با مشکل مواجه می‌شود [۹-۱۲]. همچنین تحقیقات کارمونا^۱ و چیت^۲ نشان داد که غلظت بهینه‌ی اوره-کلسیم کلرید،

روش رسوب‌زایی زیستی کربنات کلسیم است. در این روش طی یک سری واکنش شیمیایی در حضور باکتری‌ها، رسوب کربنات کلسیم در بین دانه‌های خاک تشکیل می‌شود. نقش باکتری در فرآیند رسوب‌زایی، تولید آنزیم اوره‌آز (کاتالیزور واکنش) و بالا بردن pH محیط واکنش می‌باشد. تحقیقات نشان داده است که روند تشکیل رسوب زیستی کربنات کلسیم در pH=۸/۳ شروع و در pH=۹ کامل می‌شود [۳]. واکنش‌های زیادی جهت تشکیل کربنات کلسیم توسط باکتری‌ها وجود دارد که پرکاربردترین این واکنش‌ها، تشکیل رسوب کربنات کلسیم از واکنش هیدرولیز اوره است. هیدرولیز اوره در حضور باکتری اوره‌آز مثبت و یون کلسیم انجام می‌شود. بدین صورت که باکتری که قادر به تجزیه اوره باشد همراه با محلولی از اوره و کلسیم کلرید به خاک اضافه می‌شود. اوره مطابق واکنش رابطه (۱)، توسط باکتری به آمونیوم، کربنات و هیدروکسیل تجزیه می‌شود. افزایش pH محیط به دلیل حضور هیدروکسیل ناشی از تولید آمونیوم اتفاق می‌افتد.



سپس یون کلسیم با کربنات حاصل از واکنش فوق، وارد واکنش می‌شود و مطابق رابطه (۲) کربنات کلسیم تولید می‌کند:



رسوب کریستالی کربنات کلسیم به صورت یک پوشش دور دانه‌های خاک به خصوص در محل اتصال دانه‌ها را در بر می‌گیرد. این پوشش و

1 Carmona

2 Chiet

نتایج این پژوهش نشان داد که میزان رسوب تولید شده لزوماً با افزایش مقاومت رابطه‌ی مستقیم ندارد و در واقع بهبود مقاومت خاک به آن دسته از رسوب‌هایی بر می‌گردد که در محل اتصال دانه‌ها با سرعت مناسب محلول رسوب‌زا شکل گرفته‌اند. درجه‌ی اشباع خاک نیز می‌تواند بر محل تشکیل رسوب و در نتیجه عملکرد بهسازی بیولوژیکی تأثیرگذار باشد. در درجات اشباع کم، فضای بین منافذ را هوا اشغال می‌کند و محلول رسوب‌زا بیشتر در گوشه‌ها و در محل اتصال دانه‌های خاک جای می‌گیرد. در نتیجه رسوب در محل اتصال دانه‌ها تشکیل می‌شود و پیوند دانه‌های خاک را افزایش می‌دهد. در حالی که در نمونه اشباع شده، محلول رسوب‌زا این امکان را دارد که در منافذ بین دانه‌ها و روی سطح دانه‌ها همچنین به صورت معلق در آب تشکیل بشود که این بخش از رسوبات عملاً اثری بر پیوند دانه‌ها و در نتیجه بهبود مقاومت ندارد. در واقع هر چه درجه اشباع خاک کمتر باشد رسوبات تولید شده مؤثرتر عمل می‌کنند و در واقع در محل اتصال دانه‌ها تشکیل می‌شوند [۱۷]. با این وجود ون^۲ و همکارانش در سال ۲۰۱۸ روش غوطه‌وری را جهت تثبیت بیولوژیکی نمونه‌های ماسه اوتاوا در قالب‌های منعطف به کار بردند و به بهبود قابل قبولی در مقاومت فشاری دست یافتند [۱۸].

به طور کلی نتایج بررسی‌ها حاکی از آن است که عملکرد مؤثرتر رسوب‌زایی زیستی نیازمند درصدی از تراکم، آرایشی از دانه‌ها و درجه‌ی اشباعی است که در عین این که فضای کافی برای حرکت محلول با سرعت مناسب در فضای خاک وجود داشته باشد، دانه‌ها به اندازه‌ی کافی به هم اتصال داشته باشند و فعالیت باکتری‌ها به سمت محل اتصال دانه‌ها هدایت شود زیرا تنها رسوباتی در بهسازی خاک نقش دارند که موجب اتصال دانه‌ها شوند. بدیهی است روش اضافه کردن محلول‌های رسوب‌زا به خاک نیز بر توزیع مکانی رسوب در بدنه خاک اثرگذار است. در هر کدام از تحقیقات قبلی یکی از روش‌های اختلاط، جذب سطحی و تزریق جهت افزودن مواد رسوب‌زا به خاک استفاده شده است و تا به حال مقایسه‌ای بر این روش‌ها صورت نگرفته است. بر همین اساس در پژوهش حاضر، به بررسی اثر روش ساخت نمونه در بهسازی خاک رس به روش رسوب‌زایی زیستی کربنات کلسیم پرداخته شده است و سه روش اختلاط، جذب سطحی و تزریق با فشار جهت افزودن مواد رسوب‌زا به خاک مورد مقایسه قرار گرفته است. این موضوع در هیچ یک از تحقیقات قبلی مورد بررسی قرار نگرفته و در هر کدام از این تحقیقات یکی از سه روش ذکر شده مورد استفاده قرار گرفته است. بررسی و مقایسه‌ی روش‌های اضافه کردن مواد افزودنی به خاک جهت

بسته به نوع خاک، نوع باکتری و شرایط محیطی و زیستی باکتری متغیر است [۱۴ و ۱۳]. این مطلب در مورد دیگر پارامترهای مؤثر بر واکنش رسوب‌زایی نظیر pH محلول، دما و... صدق می‌کند. پس بهتر است که عوامل دخیل بر واکنش رسوب‌زایی در هر پروژه با توجه به شرایط خاص آن، اختصاصاً مورد بررسی قرار گیرد و یا دست‌کم می‌توان گفت برای دستیابی به یک روش جامع که تمام متغیرها را تحت پوشش قرار دهد مطالعات کامل‌تری مورد نیاز است. آنچه در فرآیند رسوب‌زایی زیستی به عنوان یک روش بهسازی خاک بسیار حائز اهمیت است و در واقع یکی از مهم‌ترین چالش‌های این روش محسوب می‌شود، نفوذ یکنواخت محلول رسوب‌زا و به تبع آن توزیع متناسب رسوبات تشکیل شده در حجم خاک است [۲]. به نظر می‌رسد عواملی همچون غلظت بالای محلول‌های رسوب‌زا و فشار تزریق نامناسب آن‌ها به خاک، می‌تواند مانعی برای توزیع یکنواخت رسوب در بدنه‌ی خاک محسوب شوند. همچنین میزان تراکم خاک می‌تواند بر توزیع متناسب محلول‌های رسوب‌زا در بدنه‌ی خاک و محل تشکیل رسوب اثرگذار باشد. در دهه‌ی اخیر عواملی چون دانه‌بندی، تراکم و درجه اشباع خاک و غلظت و فشار تزریق محلول‌های رسوب‌زا که بر توزیع متناسب رسوب در بدنه‌ی خاک اثرگذارند توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در سال ۲۰۱۲ سون^۱ و همکارانش در پژوهشی اثرگذاری تراکم خاک بر عملکرد رسوب‌زایی زیستی کربنات کلسیم را برای دو نوع خاک ماسه‌ای و برجا مورد بررسی قرار دادند [۱۵]. نتایج این بررسی، وجود رابطه‌ی عکس بین تراکم و میزان بهبود مقاومت خاک ماسه‌ای را اثبات کرد. در حالی که برای خاک‌های برجا میزان بهبود در مقاومت با افزایش تراکم افزایش یافت. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که پیچیدگی ساختار خاک در مقیاس میکروسکوپی و توزیع مکانی رسوب در فضای خالی خاک موجب می‌شود که تراکم خاک، در خاک‌های مختلف اثر متفاوتی بر روند رسوب‌زایی زیستی داشته باشد. جهت جابجایی و توزیع متناسب محلول رسوب‌زا در حجم خاک، تراکم و آرایش دانه‌های خاک باید به گونه‌ای باشد که فضای کافی برای حرکت محلول با سرعت مناسب وجود داشته باشد و از طرفی دانه‌ها به اندازه‌ی کافی به هم اتصال داشته باشند. در این میان روش اضافه کردن محلول‌ها و فشار تزریق نیز پارامترهای اثرگذارند که باید در هر پروژه بسته به شرایط خاص آن، بهینه‌سازی شوند. سون و همکارانش در سال ۲۰۱۴ این بار به مطالعه اثر سرعت تزریق مواد رسوب‌زا به خاک به عنوان یکی از عوامل اثرگذار بر توزیع یکنواخت و مؤثر رسوب در بدنه خاک پرداختند [۱۶].

جدول ۱. مشخصات خاک

Table 1. Soil Properties

خصوصیات نمونه‌های خاک		
۱/۳	G	درصد شن
۶/۷	S	درصد ماسه
۴۸	M	درصد لای
۴۴	C	درصد رس
۲۳	PL	حد خمیری
۴۹	LL	حد روانی
۲۶	PI	شاخص خمیری
۲۳/۲	OMC	درصد رطوبت بهینه
۱/۶۲	γ_{dmax}	حداکثر وزن مخصوص خشک (گرم بر سانتی متر مکعب)
۷	pH	pH

۲-۲- باکتری

در این پژوهش جهت مقایسه‌ی عملکرد میکروارگانیسم‌های کارآمد در بهسازی بیولوژیکی، دو باکتری *Lysin- Bacillus megaterium* و *bacillus boronitolerans* مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات این دو باکتری در جدول ۲ ارائه شده است.

۲-۳- محلول رسوب‌زا

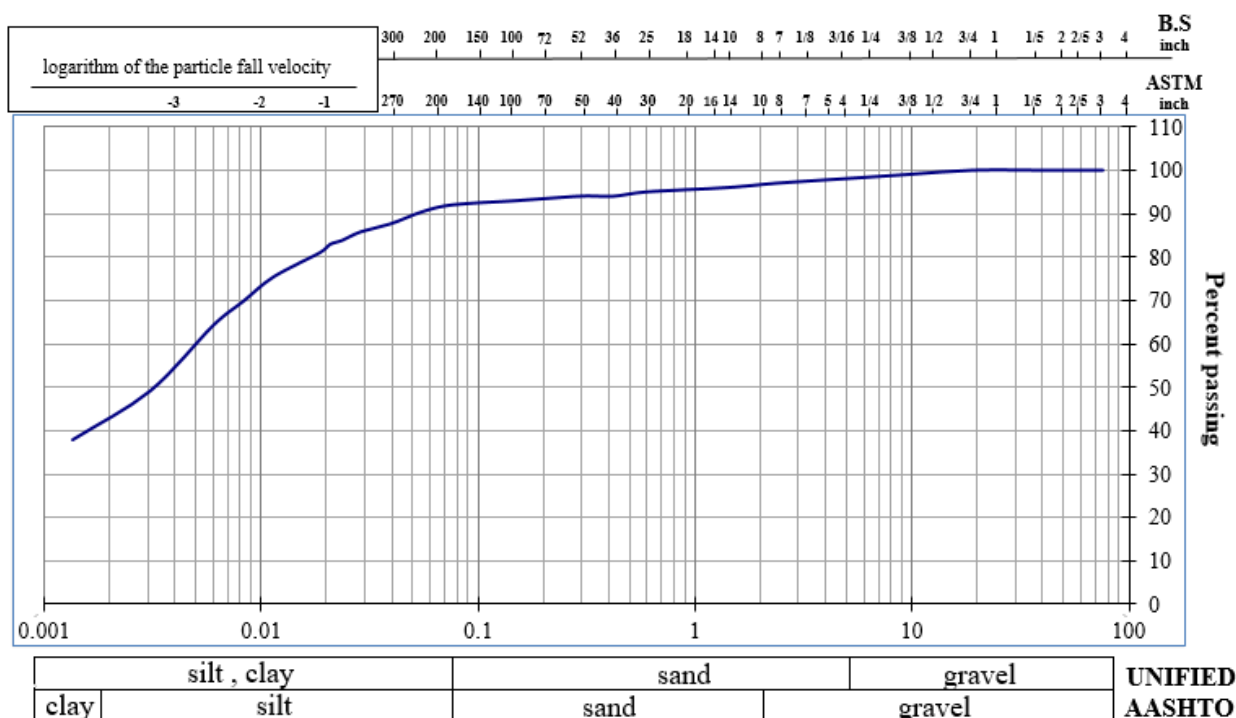
محلول رسوب‌زا شامل اوره و کلسیم کلرید هم مولار محلول در آب می‌باشد. در این پژوهش از اوره با فرمول شیمیایی (CH_4N_2O) با وزن مولکولی ۶۰/۰۶ گرم بر مول و کلسیم کلرید با فرمول شیمیایی ($CaCl_2$) و وزن مولکولی ۱۴۷/۰۲ گرم بر مول استفاده شد. تعیین غلظت بهینه‌ی افزودنی‌ها در هر پروژه با توجه به نوع باکتری و نوع خاک و شرایط منحصر به فرد آن در مقیاس میکروسکوپی ضروری است. زیرا ممکن است با تغییر نوع خاک و باکتری‌های مورد استفاده متفاوت باشد. بر همین اساس، سه غلظت ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ مولار بر اساس تحقیقات قبلی به منظور یافتن مناسب‌ترین غلظت محلول اوره-کلسیم کلرید در ارتباط با باکتری و خاک

بهره‌گیری مناسب از نتایج تحقیقات موجود و همچنین دستیابی به یک روش کاربردی و جامع بهسازی بیولوژیکی حائز اهمیت است. همچنین جهت بهینه‌سازی شرایط رسوب‌زایی، پارامترهای pH و غلظت محلول رسوب‌زا، نوع باکتری و زمان عمل‌آوری مورد بررسی قرار گرفته‌اند. زیرا همانطور که ذکر شد، پیچیدگی عملکرد باکتری‌ها در رسوب‌زایی زیستی و شرایط خاک در مقیاس میکروسکوپی موجب می‌شود که عوامل مؤثر بر بهسازی بیولوژیکی در شرایط خاص هر پروژه متفاوت باشد.

۲- مواد و روش کار

۲-۱- خاک

خاک مورد استفاده در این پژوهش، از محل دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی واقع در شرق شهر کرمانشاه از عمق تقریبی یک متری سطح زمین برداشت شده است. این خاک بر اساس آزمایش‌های انجام شده عمدتاً ریزدانه و نرم و سست ارزیابی گردیده است. مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک مذکور در جدول ۱ خلاصه شده است و منحنی دانه‌بندی خاک در شکل ۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۲. منحنی دانه بندی خاک

Fig. 2. Particle Size Distributions of the Soil Specimens

جدول ۲. مشخصات باکتری

Table 2. Bacteria Characteristics

مشخصات	اسم کامل	باکتری
Ureas+, From honey	Bacillus.Megaterium	Bacteria. B.m
Ureas+,from Tomato fields	Lysinibacillus boronitolerans	Bacteria. B.124

محیط‌های قلیایی هنگام مواجهه با pH کمتر، برای بالا بردن pH تا مقدار مطلوب فعالیت اوره‌آزی بیشتری انجام می‌دهند در نتیجه رسوب بیشتری تولید خواهد شد. در محیط‌های اسیدی فعالیت باکتری‌ها مختل می‌شود و روند تشکیل رسوب به شدت کاهش می‌یابد. علاوه بر روند تغییرات pH در پی فعالیت باکتری‌ها، pH مواد افزودنی و همچنین pH خاک مورد درمان از عوامل کنترل کننده روند رسوب‌زایی زیستی می‌باشند. در پژوهش حاضر pH خاک محل پروژه برابر با مقدار ثابت ۷ بود لیکن pH محلول رسوب‌زا در دو مقدار ۷ و ۹ مورد استفاده قرار گرفت تا امکان مقایسه‌ی عملکرد

انتخابی مورد بررسی قرار گرفت. در جدول ۳ جزئیات سه محلول رسوب‌زای انتخابی ارائه شده است.

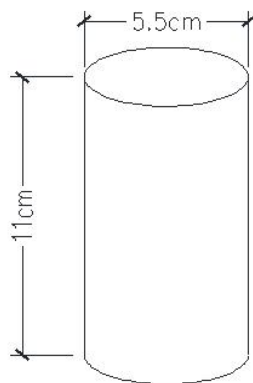
۲-۴ - pH

همانگونه که پیش‌تر اشاره شد باکتری‌هایی در فرآیند رسوب‌زایی مؤثر واقع می‌شوند که قادر به بالا بردن محیط تا مقادیر قلیایی باشند. افزایش محیط شرایط لازم جهت تولید رسوب کربنات کلسیم را فراهم می‌کند. باکتری‌های مورد استفاده در فرآیند هیدرولیز اوره قلیادوست هستند و در

جدول ۳. مشخصات شیمیایی محلول‌های رسوب‌زا

Table 3. Chemical composition of cementation reagents

مقدار کلسیم کلرید (گرم بر لیتر)	مقدار اوره (گرم بر لیتر)	غلظت محلول اوره-کلسیم کلرید
۳۶/۷۵	۱۵/۰۱۵	۰/۲۵ مولار
۷۳/۵۱	۳۰/۰۳	۰/۵ مولار
۱۱۰/۳	۴۵/۰۴۵	۰/۷۵ مولار



شکل ۳. نمونه‌ی آزمایش تک محوری

Fig. 3. Sample prepared for uniaxial test (UCS)

کلسیم کلرید با فاصله زمانی به خاک اضافه شد. در مرحله‌ی اول مقدار ۲۳ میلی‌لیتر از محلول باکتری به خاک خشک عبوری از الک ۸ اضافه گردید و کاملاً مخلوط شد سپس در کیسه‌ی پلاستیکی زیپ‌دار به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط نگهداری شد. این کار به لانه‌گزینی باکتری‌ها در خاک و فوق‌پذیری آن‌ها با محیط جدید کمک می‌کند. در مرحله بعد به خاک حاوی محلول باکتری، ۲۳ میلی‌لیتر محلول رسوب‌زا شامل اوره و کلسیم کلرید هم‌مولار (هر بار به غلظت مورد نظر با توجه به جدول ۳) اضافه شد و کاملاً مخلوط گردید. سپس خاک حاوی محلول‌های لازم، جهت تهیه‌ی نمونه آزمایش تک محوری در قالب کوبیده شد. نمونه‌ی آماده شده در کیسه زیپ‌دار به مدت زمان لازم نگهداری گردید و پس از آن، آماده‌ی انجام آزمایش تک محوری شد (شکل ۴).

۲-۵-۲- ساخت نمونه به روش جذب سطحی

در روش جذب سطحی ابتدا خاک با تراکم مورد نظر درون قالب کوبیده شد و سپس مواد افزودنی لازم، به صورت جذب سطحی به نمونه اضافه

باکتری‌ها در این دو pH و ارتباط آن با نوع خاک انتخابی وجود داشته باشد.

۲-۵-۲- روش ساخت نمونه

آزمایش تک محوری مطابق با استاندارد ASTM D 2166 بر نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۵/۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که در قالب‌های تهیه شده از لوله پولیکا با همین ابعاد ساخته شدند. جهت سهولت خارج شدن نمونه بدون تخریب احتمالی، لوله‌ها قبل از ساخت نمونه، در امتداد ارتفاع برش خوردند و با بست‌های فلزی مهار شدند (شکل ۳).

در تهیه نمونه‌ها از جهت نحوه‌ی اضافه کردن مواد افزودنی، از سه روش اختلاط، جذب سطحی و تزریق با فشار استفاده شد که در ادامه هر کدام به صورت جداگانه توضیح داده شده است.

۲-۵-۱- ساخت نمونه به روش اختلاط

در روش اختلاط، مواد افزودنی شامل محلول باکتری و محلول اوره-



شکل ۴. مراحل ساخت نمونه به روش اختلاط

Fig. 4. Sample making by mixing method



شکل ۵. مراحل ساخت نمونه به روش جذب سطحی

Fig. 5. Sample making by adsorption method

۲-۵-۳- ساخت نمونه به روش تزریق با فشار

در این روش مانند روش جذب سطحی، ابتدا خاک با درصد تراکم مورد نظر در قالب کوبیده شد و برای جلوگیری از بهم ریختگی سطح نمونه در هنگام تزریق، از یک لایه ماسه در بالای نمونه و توری فلزی و کاغذ صافی در بالا و پایین نمونه استفاده شد.

برای ایجاد جریان با فشار، از ست‌آپ نشان داده شده در شکل ۶ استفاده شد که شامل قالبی برای جای‌گیری نمونه است که با شلنگ به مخزن متصل است. محلول باکتری و محلول اوره-کلسیم کلرید در دو مرحله با فاصله زمانی ۲۴ ساعت با فشار ۲ بار به خاک اضافه شدند.

گردید. برای جلوگیری از به هم خوردگی سطح نمونه و شستگی خاک، از توری فلزی و کاغذ صافی در بالا و پایین نمونه استفاده شد. نمونه در ظرفی حاوی شن قرار داده شد که امکان خروج محلول از زیر نمونه فراهم باشد. مواد افزودنی در مراحل جداگانه به نمونه‌ی خاک اضافه شدند. در مرحله‌ی اول مقدار محلول باکتری مورد نظر به ظرف فوقانی اضافه شد و بالای نمونه کاملاً عایق شد تا هدر رفت رطوبت از سطح نمونه در محاسبات درصد رطوبت ایجاد خطا نکند. بعد از گذشت ۲۴ ساعت، محلول اوره-کلسیم کلرید در چند مرحله به خاک اضافه شد. پس از افزودن محلول‌های لازم، به مدت ۱۰ روز به نمونه فرصت رسوب‌زایی داده شد (شکل ۵).



شکل ۶. ساخت نمونه به روش تزریق با فشار

Fig. 6. Sample making by pressure injection method

بخش دیگری از پژوهش اثر رسوب‌زایی زیستی بر نتایج آزمایش تحکیم و حدود اتربرگ مورد مطالعه قرار گرفته است. برای هر سری از آزمایش‌های فوق، نمونه‌ی شاهد بهسازی نشده با شرایط مشابه، جهت به حداقل رساندن خطاهای احتمالی ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. جهت سهولت مطالعه این تحقیق و ارائه بهتر نتایج، جزئیات آزمایش‌های انجام گرفته به تفکیک نوع آزمایش در جداول ۴ تا ۶ ارائه شده است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- مقاومت فشاری تک محوری خاک

۴-۱-۱- اثر گونه‌ی باکتری

جهت بررسی و مقایسه‌ی اثر گونه‌ی باکتری بر مقاومت فشاری خاک، آزمایش تک محوری بر روی نمونه‌های بهسازی شده با دو گونه باکتری *Bacillus Megaterium* (B.m) و *Lysinibacillus boronitolerans* (124.B)، مطابق با آزمایش‌های شماره ۲ و ۳ جدول ۴ انجام پذیرفته و با نمونه‌ی شاهد مطابق با آزمایش شماره ۱ مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۷ ارائه شده است. در ادامه به منظور مقایسه‌ی دقیق‌تر نتایج، منحنی‌های تنش- کرنش حاصل از این آزمایش‌ها، در یک نمودار ارائه گردیده است (شکل ۷). طبق نمودار شکل ۷، بهسازی بیولوژیکی خاک مورد نظر برای هر دو

۲-۵-۴- نمونه‌های شاهد

تحقیقات نشان داده است که رفتار خاک تا حد زیادی متأثر از روش نمونه‌سازی می‌باشد. در مورد خاک رس میزان رطوبت نمونه هنگام آزمایش اثر بسزایی بر نتایج آزمایش دارد همچنین میزان تراکم نمونه و همگنی و یکنواختی آن تأثیر مسقیم بر نتایج دارد. لذا در این تحقیق علاوه بر ساخت نمونه‌ها با تراکم یکسان و سعی بر همگن بودن هر نمونه، به منظور مقایسه‌ی صحیح درصد بهسازی هر روش، یک یا چند نمونه‌ی شاهد همراه با نمونه‌های بهسازی شده در هر روش (و در شرایطی مشابه با شرایط آن‌ها) به صورت جداگانه تهیه شد. نتایج هر سری از آزمایش‌ها با نمونه‌ی شاهد خودش که از نظر درصد رطوبت نهایی و مراحل رطوبت دهی و شرایط نگهداری یکسان بود مقایسه شد تا خطاهای احتمالی کاهش یابد.

۳- طراحی آزمایش‌ها

پژوهش حاضر بر اساس مطالعه‌ی اثر "روش ساخت نمونه" بر بهبود مقاومت فشاری در بهسازی به روش رسوب‌زایی زیستی کرنات کلسیم شکل گرفته است. دیگر پارامترهای مورد بررسی شامل اثر غلظت و pH محلول رسوب‌زا و زمان درمان، جهت بهینه‌سازی اختصاصی شرایط رسوب‌زایی در خاک رس مورد مطالعه با دو باکتری مختلف، انجام پذیرفته است. در

جدول ۴. جزئیات و شماره گذاری آزمایش های تک محوری انجام شده

Table 4. Details and numbering of UCS test

شماره تست	وضعیت بهسازی	نوع باکتری	مشخصات محصولات واکنش		زمان درمان (روز)
			غلظت محلول سیمانتاسیون (مولار)	pH محلول سیمانتاسیون	
۱	بهسازی نشده	—	—	—	۱۰
۲	بهسازی شده	B.m	۰/۲۵	۹	۱۰
۳	بهسازی شده	B.124	۰/۵	۹	۱۰
۴	بهسازی شده	B.m	۰/۵	۹	۱۰
۵	بهسازی شده	B.124	۰/۵	۷	۱۰
۶	بهسازی شده	B.124	۰/۲۵	۹	۱۰
۷	بهسازی شده	B.m	۰/۷۵	۹	۱۰
۸	بهسازی شده	B.124	۰/۷۵	۹	۱۰
۹	بهسازی شده	B.m	۰/۲۵	۷	۱۰
۱۰	بهسازی نشده	—	—	جذب سطحی	۱۰
۱۱	بهسازی شده	B.m	۰/۲۵	جذب سطحی	۹
۱۲	بهسازی شده	B.124	۰/۵	جذب سطحی	۹
۱۳	بهسازی نشده	—	—	تزریق	۱۰
۱۴	بهسازی شده	B.m	۰/۲۵	تزریق	۹
۱۵	بهسازی شده	B.124	۰/۵	تزریق	۹
۱۶	بهسازی شده	B.m	۰/۲۵	اختلاط	۴۰

جدول ۵. جزئیات و شماره گذاری آزمایش های حدود اتبرگ انجام شده

Table 5. Details and numbering of Atterberg Limits Test

شماره تست	وضعیت بهسازی	نوع باکتری	مشخصات محصولات واکنش		زمان درمان (روز)
			غلظت محلول سیمانتاسیون (مولار)	pH محلول سیمانتاسیون	
۱۷	بهسازی نشده	—	—	—	۲
۱۸	بهسازی شده	B.m	۰/۲۵	۹	۲
۱۹	بهسازی شده	B.124	۰/۵	۹	۲

جدول ۶. جزئیات و شماره گذاری آزمایش های تحکیم انجام شده

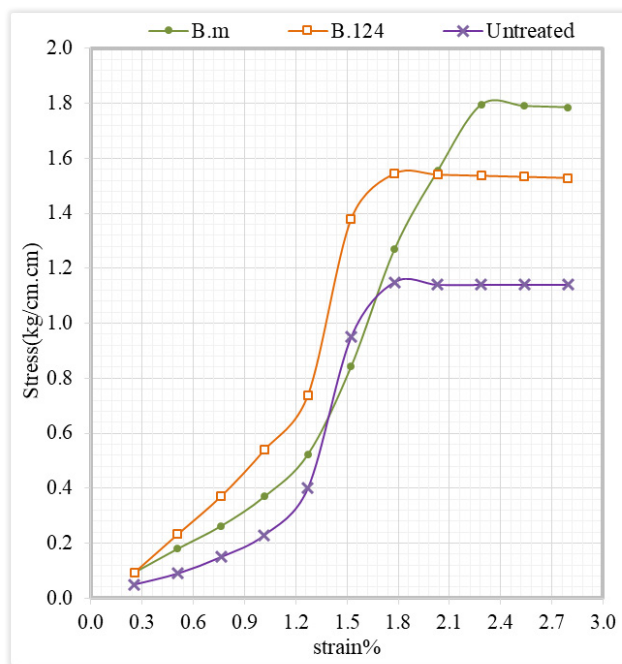
Table 6. Details and numbering of Consolidation Test

شماره تست	وضعیت بهسازی	نوع باکتری	مشخصات محصولات واکنش		زمان درمان (روز)
			غلظت محلول سیمانتاسیون (مولار)	pH محلول سیمانتاسیون	
۲۰	بهسازی نشده	—	—	—	۷
۲۱	بهسازی شده	B.m	۰/۲۵	۹	۷

جدول ۷. جزئیات و نتایج آزمایش تک محوری جهت بررسی اثر نوع باکتری

Table 7. Details and results of uniaxial test to evaluate the effect of bacterial type

مشخصات نمونه	رطوبت:	۲۳/۷۶ cm ²	سرعت دستگاه: mm/min	۰/۵	مشخصات دستگاه	ضریب نیروسنج: kg/n	۰/۳۷
	خشک:	۱/۲۳ gr/cm ³					
	دانسیده						
	٪۱۵						
پارامتر مورد بررسی: نوع باکتری	شماره آزمایش	مقاومت فشاری (kg/cm ²)	کرنش گسیختگی (%)				
نمونه‌ی شاهد	۱	۱/۱۵	۱/۷۸				
B.m	۲	۱/۸۰	۲/۲۹				
B.124	۳	۱/۵۵	۱/۷۸				



شکل ۷. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با باکتری *Bacillus.Megaterium*(B.m) و *Lysinibacillus boronitolerans*(B.124) در مقایسه با نمودار تنش-کرنش نمونه‌ی تثبیت نشده (مطابق با آزمایش‌های ۱ تا ۳ جدول ۴)

Fig. 7. Stress-strain diagram of samples stabilized with *Bacillus.Megaterium*(B.m) and *boronitolerans* (B.124) comparison with unstabilized sample (According to experiments 1 to 3 in Table 4)

باکتری *B.megaterium* بهترین عملکرد رسوب‌زایی را در غلظت M ۰/۵ محلول رسوب‌زا گزارش شد. این تمایز نشان دهنده‌ی تأثیر نوع خاک و شرایط واکنش بر عملکرد باکتری مشخص است. همچنین از میزان بهبود مقاومت نمونه‌ها در غلظت M ۰/۷۵ محلول رسوب‌زا مشاهده می‌شود که بر خلاف تصور، افزایش غلظت محلول رسوب‌زا اثر مثبتی بر رسوب‌زایی بیولوژیکی نداشته و حتی عاملی محدود کننده بوده است.

۴-۱-۳ اثر pH محلول رسوب‌زا

در این پژوهش، pH محلول اوره-کلسیم کلرید در دو مقدار خنثی ۷ و قلیایی ۹ در بهسازی بیولوژیکی به کار برده شده است. جهت بررسی و مقایسه‌ی اثر این دو pH، آزمایش تک محوری بر نمونه‌های بهسازی شده برای pH=۷ مطابق آزمایش‌های شماره ۵ و ۹ جدول ۴ و برای pH=۹ مطابق تست‌های ۲ و ۳ جدول ۴ انجام شده است. در جدول ۹ مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی حاصل از این آزمایش‌ها مشاهده می‌شود.

در ادامه، نمودارهای تنش-کرنش آزمایش‌ها با متغیر pH، به تفکیک نوع باکتری ارائه شده است (شکل‌های ۱۰ و ۱۱).

همانطور که مشاهده می‌شود بهترین عملکرد باکتری‌ها در pH=۹

گونه‌ی باکتری، با افزایش مقاومت فشاری همراه بوده اما میزان این افزایش متفاوت بوده است. بهبود مقاومت فشاری ۱۰ روزه‌ی نمونه خاک بهسازی شده با باکتری B.124 چیزی حدود ۳۴ درصد بوده در حالی که این مقدار برای باکتری *B.megaterium* چیزی حدود ۵۶ درصد است.

۴-۱-۲ اثر غلظت محلول رسوب‌زا

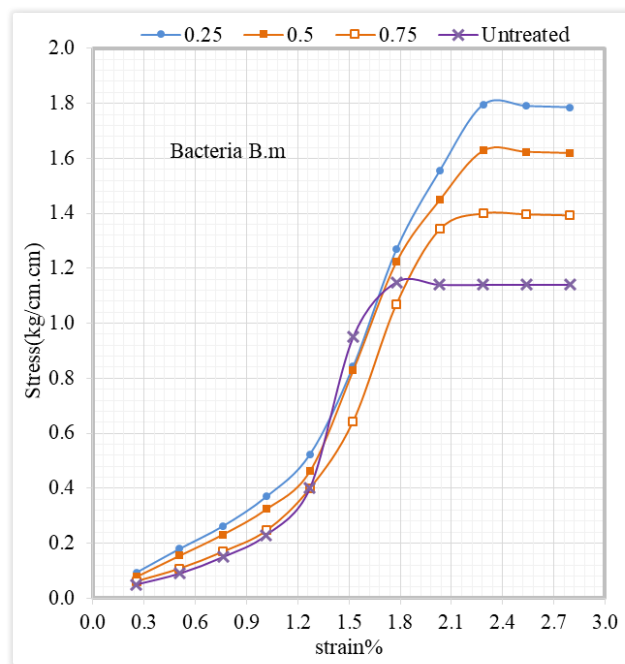
جهت تعیین مناسب‌ترین غلظت محلول رسوب‌زا از بین سه غلظت انتخابی، نتایج آزمایش‌های ۲ تا ۴ و ۶ تا ۸ جدول ۴ مورد مقایسه قرار گرفته است. این آزمایش‌ها شامل آزمایش تک محوری بر حالت‌های مختلفی از نمونه‌های بهسازی شده با دو نوع باکتری و محلول رسوب‌زا با سه غلظت ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ مولار است که نتایج آن‌ها در جدول ۸ و شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌گردد.

در بهسازی بیولوژیکی با استفاده از باکتری B.124، بیشترین بهبود مقاومت فشاری در غلظت M ۰/۵ محلول رسوب‌زا مشاهده می‌شود، در حالی که بیشترین افزایش مقاومت در بهسازی با باکتری *B.megaterium* در غلظت M ۰/۲۵ محلول رسوب‌زا اتفاق افتاده است. در تحقیقات قبلی در زمینه‌ی بررسی اثر غلظت محلول رسوب‌زا بر بهسازی خاک ماسه‌ای با

جدول ۸. جزئیات و نتایج آزمایش تک محوری جهت بررسی اثر غلظت محلول رسوب‌زا

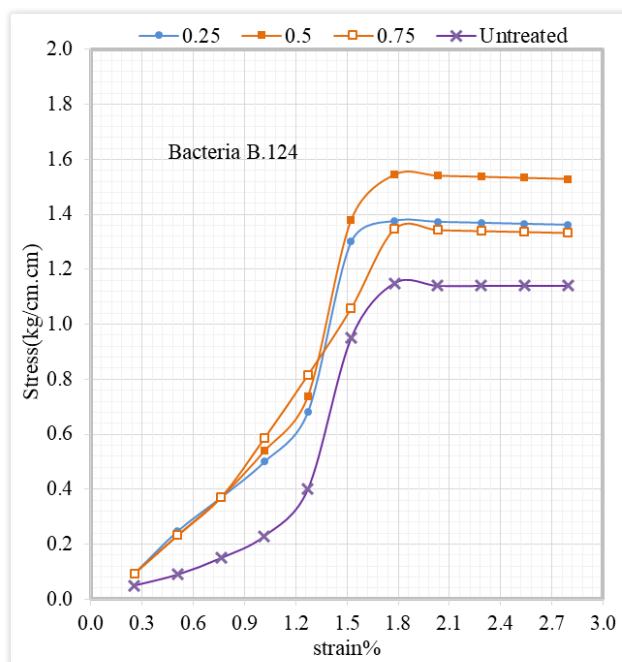
Table 8. Details and results of uniaxial test to evaluate the effect of Cementation reagent

مشخصات نمونه	رطوبت:	۲۳/۷۶ cm ²	سرعت دستگاه: mm/min	مشخصات دستگاه	۰/۵
پارامتر مورد بررسی: غلظت محلول رسوب‌زا <td>دانسیته خشک:</td> <td>۱/۲۳ gr/cm³ <td>ضریب نیروسنج:</td> <td>کرنش گسیختگی (%) <td>۰/۳۷</td> </td></td>	دانسیته خشک:	۱/۲۳ gr/cm ³ <td>ضریب نیروسنج:</td> <td>کرنش گسیختگی (%) <td>۰/۳۷</td> </td>	ضریب نیروسنج:	کرنش گسیختگی (%) <td>۰/۳۷</td>	۰/۳۷
نمونه‌ی شاهد	۱/۱۵	۱	مقاومت فشاری (kg/cm ²)	شماره آزمایش	۱/۷۸
۰/۲۵ مولار	۱/۸	۲			۲/۲۹
۰/۵ مولار	۱/۳۸	۶			۱/۵۲
۰/۷۵ مولار	۱/۵۵	۳			۱/۷۸
	۱/۶۳	۴			۲/۲۹
	۱/۴	۷			۲/۲۹
	۱/۳۵	۸			۱/۷۳



شکل ۸. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با باکتری *Bacillus.Megaterium*(B.m) در سه غلظت محلول رسوب‌زا ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ مولار در مقایسه با نمودار تنش-کرنش نمونه‌ی تثبیت نشده (مطابق با آزمایش‌های ۱، ۲، ۴ و ۷ جدول ۴)

Fig. 8. Stress-strain diagram of samples stabilized with *Bacillus.Megaterium*(B.m) and three concentrations of cementation reagent 0.25, 0.5 and 0.75 M comparison with unstabilized sample (According to experiments 1,2,4 and 7 in Table 4)



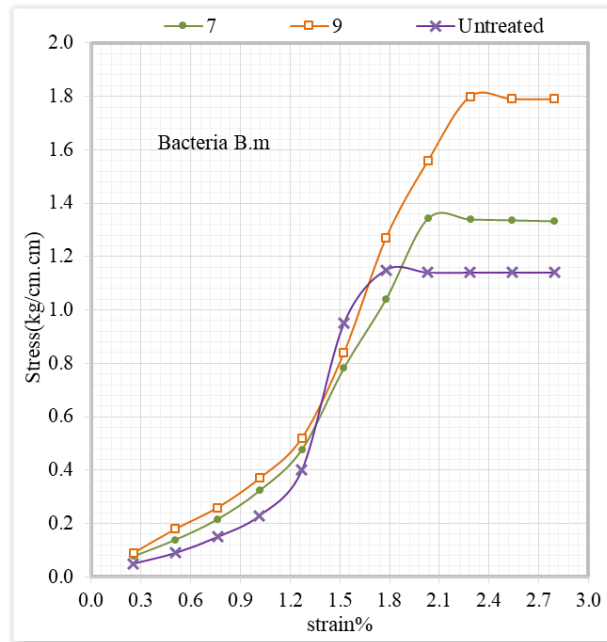
شکل ۹. نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با باکتری (*Lysinibacillus boronitolerans* (B.124) در سه غلظت محلول رسوبزا ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ مولار در مقایسه با نمودار تنش-کرنش نمونه‌ی تثبیت نشده (مطابق با تست‌های ۱، ۳، ۶ و ۸ جدول ۴)

Fig. 9. Stress-strain diagram of samples stabilized with *Lysinibacillus boronitolerans* (B.124) and three concentrations of cementation reagent 0.25, 0.5 and 0.75 M comparison with unstabilized sample (According to experiments 1,3,6 and 8 in Table 4)

جدول ۹. جزئیات و نتایج آزمایش تک محوری جهت بررسی اثر pH محلول رسوبزا

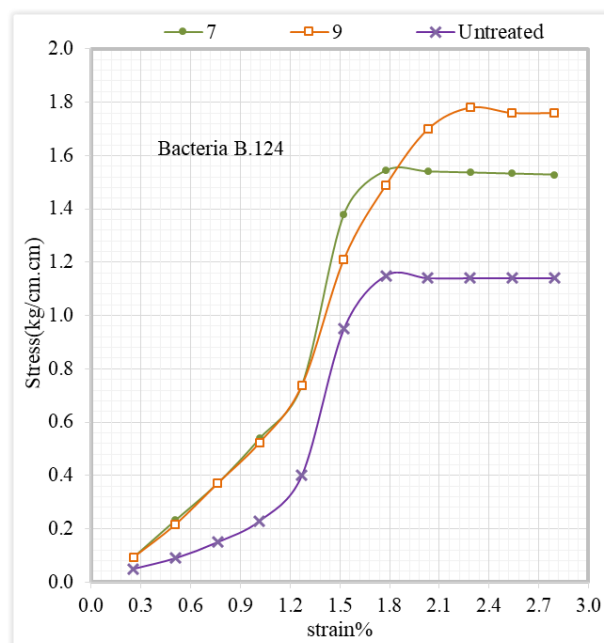
Table 9. Details and results of uniaxial test to evaluate the effect of pH of the precipitate solution

سرعت دستگاه: mm/min	مشخصات دستگاه	۲۳/۷۶ cm ²	سطح اولیه:
۰/۵	ضریب نیروسنج: ۰/۳۷	٪۱۵	رطوبت:
		۱/۲۳ gr/cm ³	دانسیتة خشک:
			پارامتر مورد بررسی:
کرنش گسیختگی (%)	مقاومت فشاری (kg/cm ²)	شماره آزمایش	pH محلول رسوبزا
۱/۷۸	۱/۱۵	۱	نمونه‌ی شاهد
۲/۰۳	۱/۳۴	۹	pH=۷
۱/۹۱	۱/۳۶	۵	
۲/۲۹	۱/۸	۲	pH=۹
۱/۷۸	۱/۵۵	۳	



شکل ۱۰. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با باکتری *Bacillus.Megaterium(B.m)* و محلول رسوب‌زا در دو مقدار $\text{pH}=7$ و $\text{pH}=9$ در مقایسه با نمودار تنش-کرنش نمونه‌ی تثبیت نشده (مطابق با آزمایش‌های ۱، ۲ و ۹ جدول ۴)

Fig. 10. Stress-strain diagram of samples stabilized with *Bacillus.Megaterium(B.m)* and two pH value of cementation reagent 7 and 9 comparison with unstabilized sample (According to experiments 1,2 and 9 in Table 4)



شکل ۱۱. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با باکتری *Lysinibacillus boronitolerans(B.124)* و محلول رسوب‌زا در دو مقدار $\text{pH}=7$ و $\text{pH}=9$ در مقایسه با نمودار تنش-کرنش نمونه‌ی تثبیت نشده (مطابق با آزمایش‌های ۱، ۳ و ۵ جدول ۴)

Fig. 11. Stress-strain diagram of samples stabilized *Lysinibacillus boronitolerans (B.124)* and two pH value of cementation reagent 7 and 9. comparison with unstabilized sample (According to experiments 1,3 and 5 in Table 4)

جدول ۱۰. جزئیات و نتایج آزمایش تک محوری جهت بررسی اثر روش ساخت نمونه

Table 10. Details and results of uniaxial test to evaluate effect of sample making method

سرعت دستگاه: mm/min	مشخصات دستگاه	۲۳/۷۶ cm ²	سطح اولیه:
۰/۵	مشخصات دستگاه	٪۱۵	رطوبت:
۰/۳۷	ضریب نیروسنج:	۱/۲۳ gr/cm ³	دانسبته خشک:
کرنش گسیختگی (%)	مقاومت فشاری (kg/cm ²)	شماره آزمایش	پارامتر مورد بررسی: روش ساخت نمونه
۱/۷۸	۱/۱۵	۱	روش اختلاط
۲/۲۹	۱/۸	۲	
۱/۷۸	۱/۵۵	۳	
۲/۲۹	۱/۰۷	۱۰	روش جذب سطحی
۲/۲۳	۲/۸۷	۱۱	
۲/۳۱	۲/۲۴	۱۲	
۲/۲۹	۱/۱۱	۱۳	روش تزریق
۲/۰۱	۱/۷۳	۱۴	
۲/۲۸	۱/۵۸	۱۵	

است که اضافه کردن محلول‌های رسوب‌ساز به خاک پس از ساخت نمونه، در جای‌گیری مناسب آن‌ها بین دانه‌های خاک، به نسبت روش اختلاط، مؤثرتر عمل می‌کند.

تحقیقات قبلی نشان داده‌اند که فقط آن دسته از رسوبات در بهسازی بیولوژیکی مؤثر واقع می‌شوند که موجب پیوند دانه‌های خاک شوند و شکل‌گیری رسوب در فضاهای خالی یا سطوح دانه‌ها تقریباً اثری بر بهبود خواص خاک ندارد. در روش‌های جذب سطحی و تزریق، در واقع به محلول‌ها اجازه داده می‌شود که بین دانه‌های خاک به سمت کنتج‌ها که محل اتصال دانه‌هاست حرکت کنند و در نتیجه منجر به تشکیل رسوب مؤثر در محل اتصال دانه‌ها شوند.

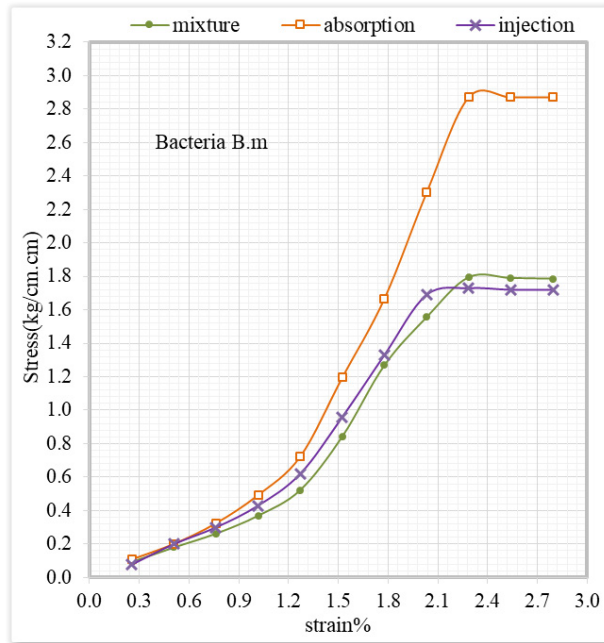
از بین روش‌های افزودن محلول‌ها پس از ساخت نمونه، روش جذب سطحی عملکرد مناسب‌تری نسبت به روش تزریق داشته است که ظاهراً به فشار تزریق بیش از حد به نسبت تراکم نمونه برمی‌گردد و در واقع نفوذ محلول به صورت جذب سطحی بر اثر گرانش، برای میزان تراکم نمونه‌های این پژوهش عملکرد مناسب‌تری داشته است. خارج شدن سریع‌تر و بیشتر محلول‌ها از ته نمونه در حین انجام تزریق تأیید کننده‌ی این موضوع بود. در

اتفاق افتاده است و در واقع باکتری‌ها در محدوده‌ی قلبیایی عملکرد بهتری داشتند.

۴-۱-۴- اثر روش ساخت نمونه

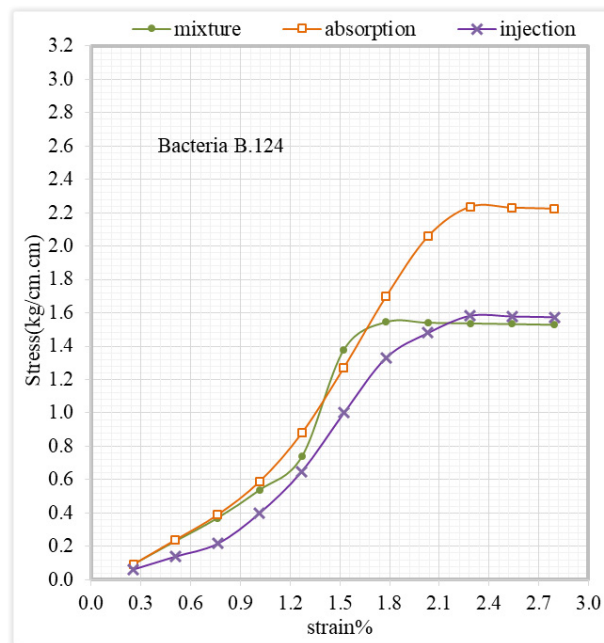
جهت بررسی اثر روش ساخت نمونه، نتایج آزمایش‌های شماره ۲ و ۳ جدول ۴ مربوط به روش اختلاط، آزمایش‌های ۱۱ و ۱۲ جدول ۴ مربوط به روش جذب سطحی و آزمایش‌های ۱۴ و ۱۵ جدول ۴ مربوط به روش تزریق مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. در هر روش نمونه‌ی شاهد با شرایط مشابه (مقدار و زمان رطوبت‌دهی مشابه با این تفاوت که در نمونه شاهد، آب جایگزین محلول‌های رسوب‌ساز شده است) طبق آزمایش‌های ۱، ۱۰ و ۱۳ جدول ۴ ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۱۰ و شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است.

نتایج حاکی از آن است که نمونه‌های بهسازی شده به روش جذب سطحی، نسبت به روش اختلاط و تزریق مقاومت بیشتری از خود نشان داده‌اند. تفسیر این نتایج بدون بررسی‌های دقیق میکروسکوپی قطعی نمی‌باشد اما آنچه از مقایسه‌ی نتایج آزمایش تک محوری واضح است این



شکل ۱۲. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با باکتری *Bacillus.Megaterium*(B.m) به سه روش اختلاط، جذب سطحی و تزریق (مطابق با آزمایش‌های ۲، ۱۱ و ۱۴ جدول ۴)

Fig. 12. Stress-strain diagram of samples stabilized with *Bacillus.Megaterium*(B.m) by three methods of mixing, adsorption, and injection (According to experiments 2,11 and 14 in Table 4)



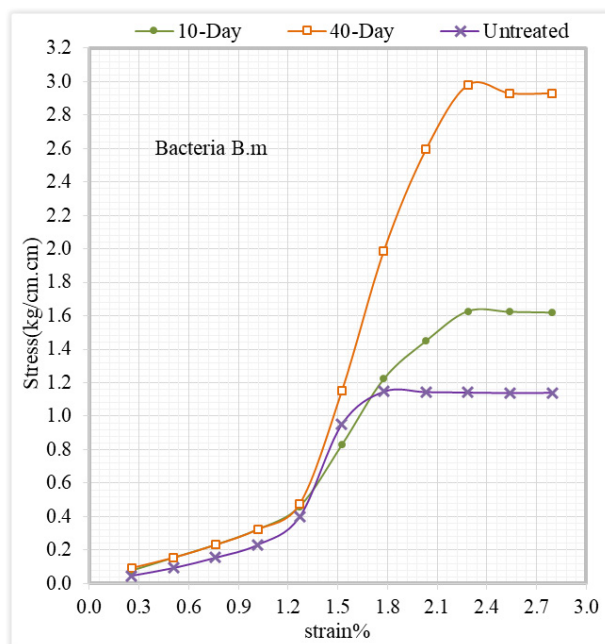
شکل ۱۳. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با باکتری *Lysinibacillus boronitolerans*(B.124) به سه روش اختلاط، جذب سطحی و تزریق (مطابق با آزمایش‌های ۳، ۱۲ و ۱۵ جدول ۴)

Fig. 13. Stress-strain diagram of samples stabilized with *Lysinibacillus boronitolerans* (B.124) by three methods of mixing, adsorption, and injection (According to experiments 3,12 and 15 in Table 4)

جدول ۱۱. جزئیات و نتایج آزمایش تک محوری جهت بررسی اثر زمان

Table 11. Details and results of uniaxial test to evaluate effect of of treatment duration

سرعت دستگاه: mm/min	مشخصات دستگاه	۲۳/۷۶ cm ²	سطح اولیه: cm ²	مشخصات نمونه
۰/۵	مشخصات دستگاه	%۱۵	رطوبت:	مشخصات نمونه
۰/۳۷	ضریب نیروسنج: Kg/n	۱/۲۳	دانسبته خشک: gr/cm ³	مشخصات نمونه
کرنش گسیختگی (%)	مقاومت فشاری (kg/cm ²)	شماره تست	پارامتر مورد بررسی: زمان	
۱/۷۸	۱/۱۵	۱	۱۰ روز	
۲/۲۹	۱/۸۰	۲	۴۰ روز	
۲/۳۷	۲/۹۸	۱۶		



شکل ۱۴. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با باکتری Bacillus.Megaterium(B.m) در دو زمان ۱۰ و ۴۰ روز (مطابق با آزمایش‌های ۲، ۱، و ۱۶ جدول ۴)

Fig. 14. Stress-strain diagram of samples stabilized with Bacillus.Megaterium(B.m) in 10 and 40 days (According to experiments 1,2 and16 in Table 4)

B.megaterium در دو زمان ده و چهل روز می‌باشد. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در جدول ۱۱ و شکل ۱۴ ارائه شده است.

با گذشت زمان درمان از ده روز به چهل روز، افزایش قابل ملاحظه در مقاومت فشاری محصور نشده مشاهده می‌شود که نشان دهنده‌ی ادامه‌ی روند رسوب‌زایی توسط باکتری در حضور مواد واکنش تا چهل روز پس از افزودن مواد رسوب‌زا به نمونه خاک است. مقاومت ده روزه‌ی نمونه چیزی حدود ۱/۵۶ برابر و مقاومت چهل روزه‌ی آن حدود ۲/۶ برابر بهبود یافته است

واقع محلول فرصت کمتری برای جای‌گیری بین خاک داشته است و شاید تعداد دفعات تزریق بیشتری مورد نیاز بوده است.

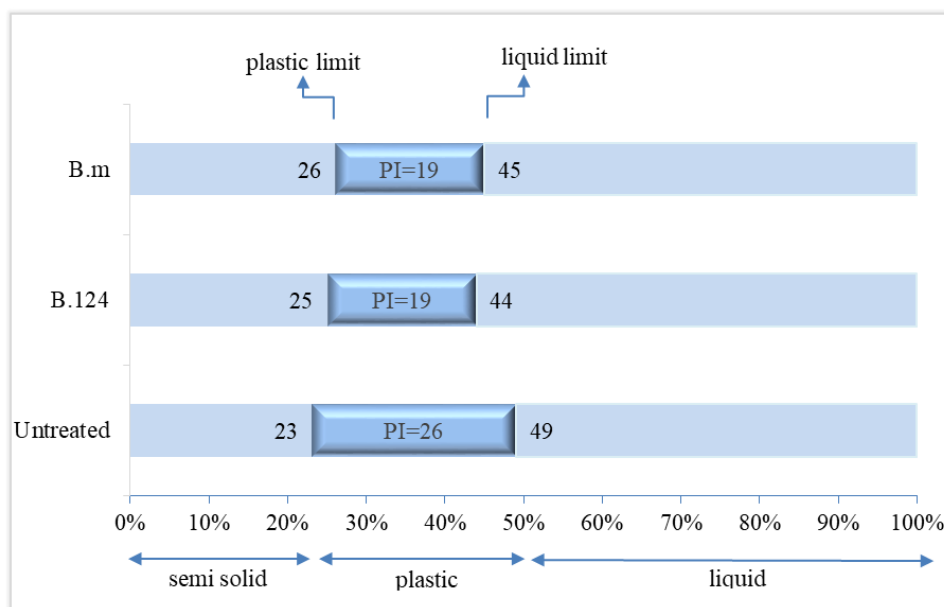
۴-۱-۵- اثر زمان عمل‌آوری

جهت بررسی اثر زمان بر بهبود مقاومت فشاری خاک، نتایج آزمایش‌های ۱، ۲ و ۱۶ جدول ۴ مورد مقایسه قرار گرفته است. این آزمایش‌ها شامل آزمایش تک محوری بر خاک بهسازی نشده و بهسازی شده با باکتری

جدول ۱۲. نتایج آزمایش حدود اتبرگ مطابق با آزمایش‌های جدول ۵

Table 12. Test results of the Atterberg Limit (According to Table 5)

نوع باکتری	شماره آزمایش	حد خمیری	حد روانی	شاخص خمیری
نمونه‌ی شاهد	۱۷	۲۳	۴۹	۲۶
B.m	۱۸	۲۶	۴۵	۱۹
B.124	۱۹	۲۵	۴۴	۱۹



شکل ۱۵. شاخص خمیری نمونه‌های حاوی محلول‌های رسوب‌ساز با دو باکتری (*Bacillus.Megaterium*(B.m) و *Lysinibacillus boronitolerans*(B.124) و نمونه‌ی شاهد

Fig. 15. Plasticity index of samples containing biocementation solution with two bacteria *Bacillus. Megaterium*(B.m) and *Lysinibacillus boronitolerans* (B.124)

آزمایش‌ها به صورت میانگین دو تکرار، در جدول ۱۲ و نمودار شماتیک شکل ۱۵ ارائه شده است.

مشاهده می‌شود حضور مواد رسوب‌ساز و باکتری، موجب کاهش شاخص خمیری از ۲۶ به ۱۹ شده است.

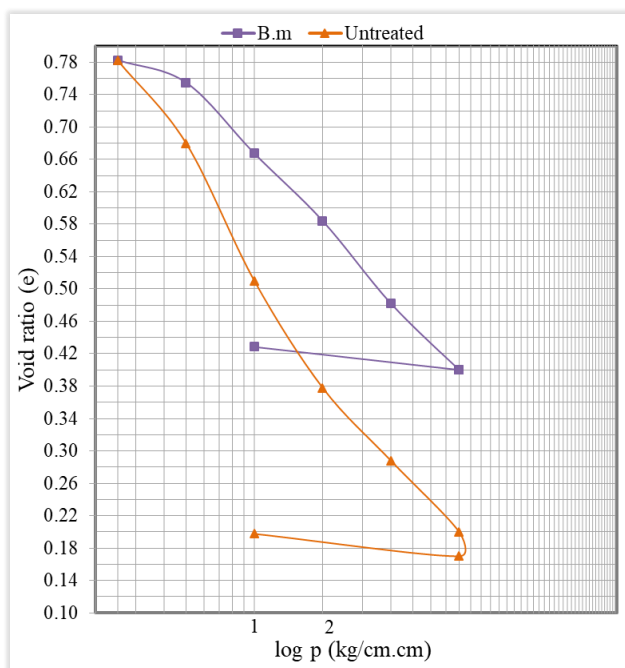
۳-۴- تحکیم

جهت بررسی اثر محلول‌های رسوب‌ساز بر نسبت منافذ خاک، آزمایش تحکیم با تنش یکسان مطابق آزمایش‌های جدول ۶ بر نمونه‌های بهسازی

و در واقع تا روز دهم درمان تقریباً ۶۰ درصد از بهبود چهل روزه‌ی نمونه اتفاق افتاده است.

۴-۲- حدود اتبرگ

جهت بررسی اثر محلول‌های رسوب‌ساز بر حدود اتبرگ خاک، نتایج آزمایش‌های جدول ۵ مورد مقایسه قرار گرفته است. این آزمایش‌ها شامل آزمایش حدود اتبرگ بر نمونه خاک بدون تثبیت و نمونه‌های حاوی محلول رسوب‌ساز با باکتری‌های *B.124* و *B.megaterium* می‌باشد. نتایج این



شکل ۱۶. نمودار "نسبت تخلخل-لگاریتم فشار" حاصل از آزمایش تحکیم نمونه‌ی بهسازی نشده مطابق آزمایش شماره ۲۰ جدول ۶ و نمونه بهسازی شده با باکتری *Bacillus.Megaterium*(B.m) مطابق آزمایش شماره ۲۱ جدول ۶

Fig. 16. Void ratio-logarithm of pressure" diagram obtained from the consolidation test of an untreated sample and sample treated with *Bacillus.Megaterium*(B.m) (According to experiments 21 in Table 6).

جدول ۱۳. شاخص فشردگی و تورم دو نمونه‌ی تثبیت نشده و تثبیت شده با باکتری *Bacillus.Megaterium*(B.m)

Table 13. Cc and Cs Index of an untreated sample and a sample treated with *Bacillus.Megaterium*(B.m)

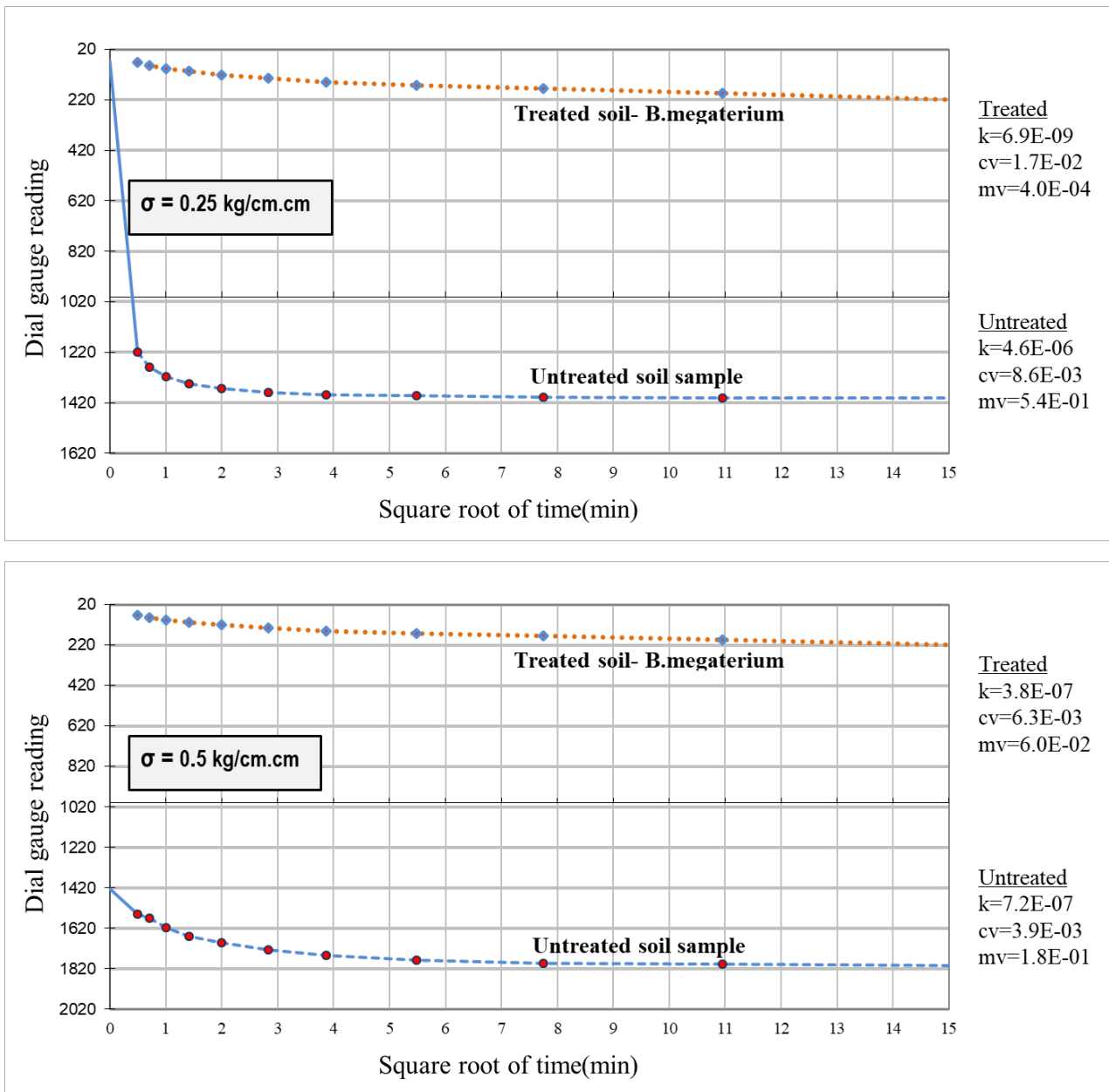
شاخص تورم (C_s)	شاخص فشردگی (C_c)	وضعیت بهسازی
۰/۰۰۴۷	۰/۰۷۷	تثبیت نشده
۰/۰۰۴	۰/۰۳۸	تثبیت شده با باکتری B.m

مقادیر ضرایب C_c و C_s قبل و بعد از تثبیت در جدول ۱۳ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد شاخص فشردگی خاک پس از تثبیت به نصف کاهش یافته است. این بدان معنی است که نمونه خاک بهسازی شده از نظر نشست‌پذیری، مشابه خاک پیش تحکیم یافته عمل می‌کند. بنابراین وجود محلول‌های رسوب‌زا و در نتیجه رسوب‌زایی زیستی بین دانه‌های خاک، موجب بهبود شرایط خاک و افزایش مقاومت آن در برابر نشست‌پذیری گردیده است.

شکل ۱۷ منحنی نشست - جذر زمان را در تنش‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع برای دو حالت تثبیت نشده و تثبیت شده با

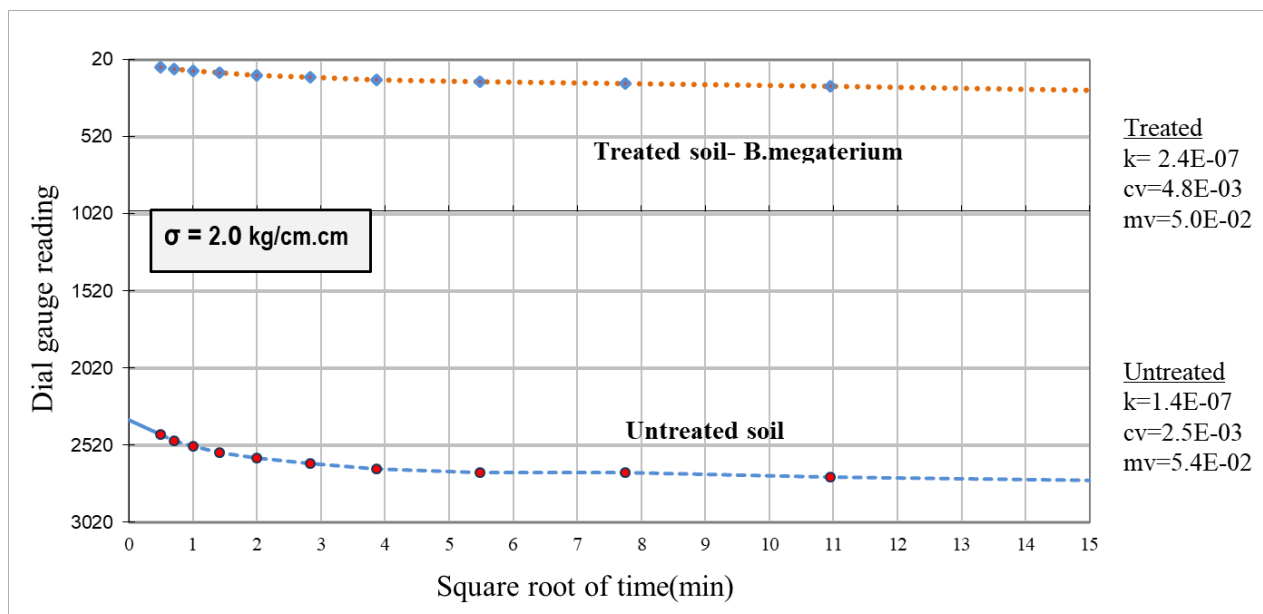
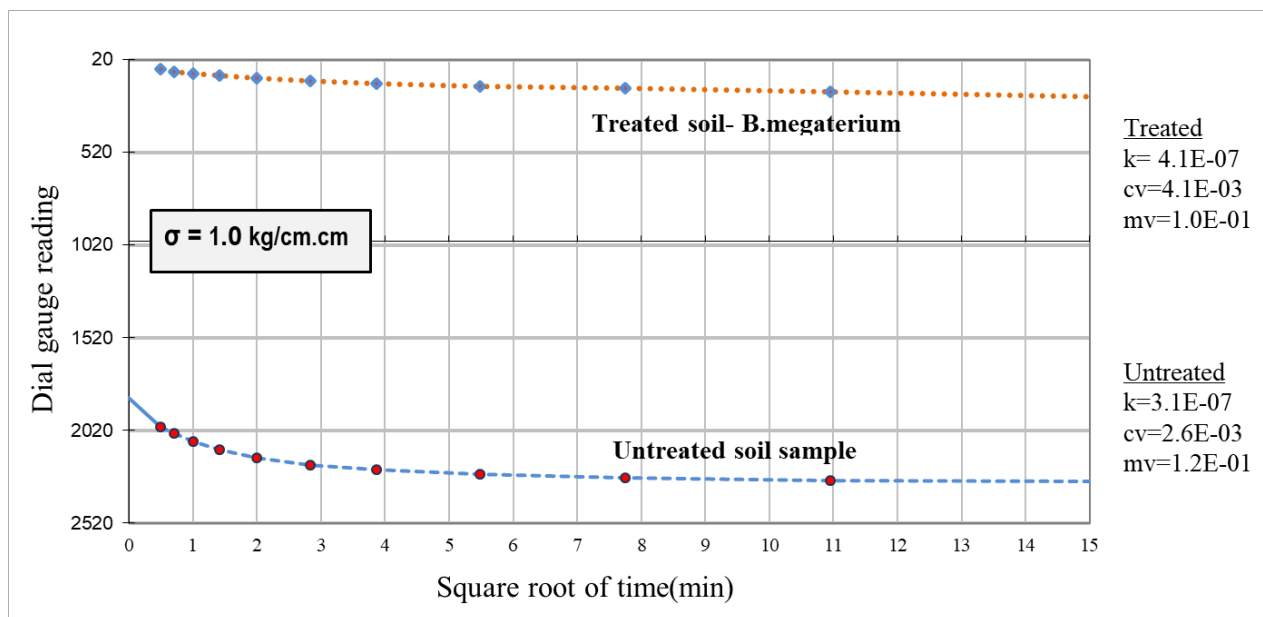
نشده و بهسازی شده با باکتری *B.megaterium* انجام گرفت. در شکل ۱۶ نمودار نسبت تخلخل-لگاریتم فشار برای خاک بهسازی شده در مقایسه با نمونه طبیعی قابل مشاهده است.

در نمونه‌ی بهسازی نشده، تغییرات نسبت منافذ در ابتدا و انتهای آزمایش بسیار زیاد است در نتیجه نمونه نشست زیادی داشته است (در حدود C_m ۰/۶۶)، به طوری که رفتار خاک عادی تحکیم یافته است. اما در نمونه‌ی بهسازی شده، این اختلاف بسیار کمتر است (در حدود C_m ۰/۴) و رفتار خاک تا حدود فشار ۰/۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع پیش تحکیم یافته و با افزایش فشار، رفتار عادی تحکیم می‌شود.



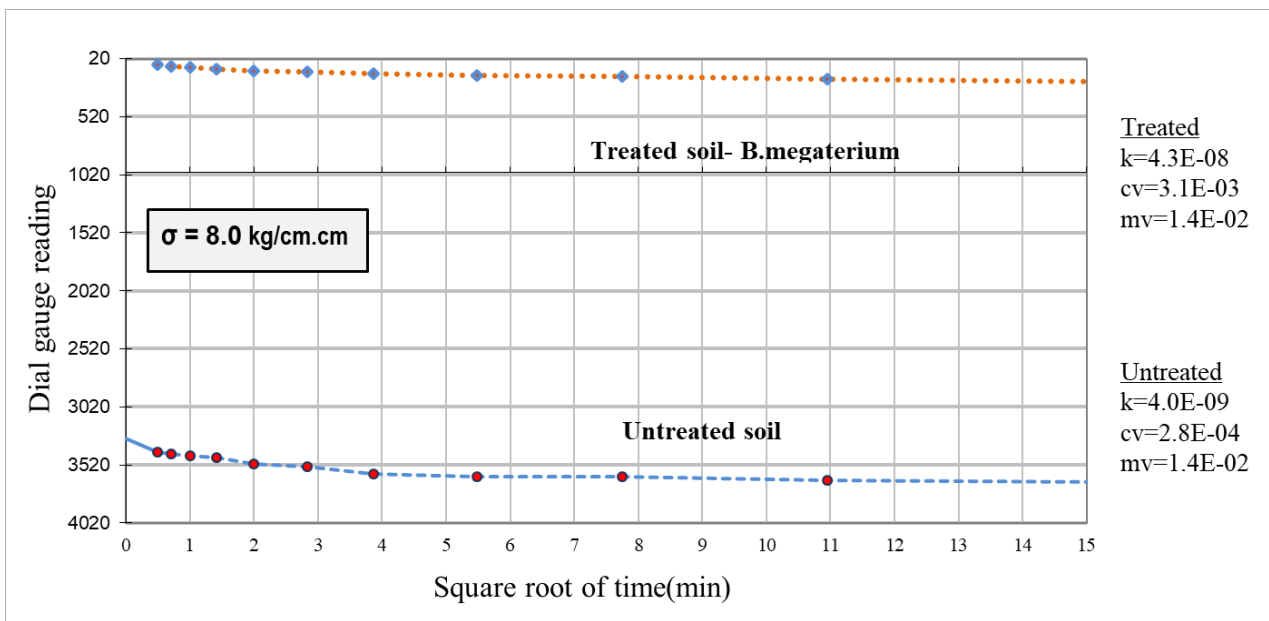
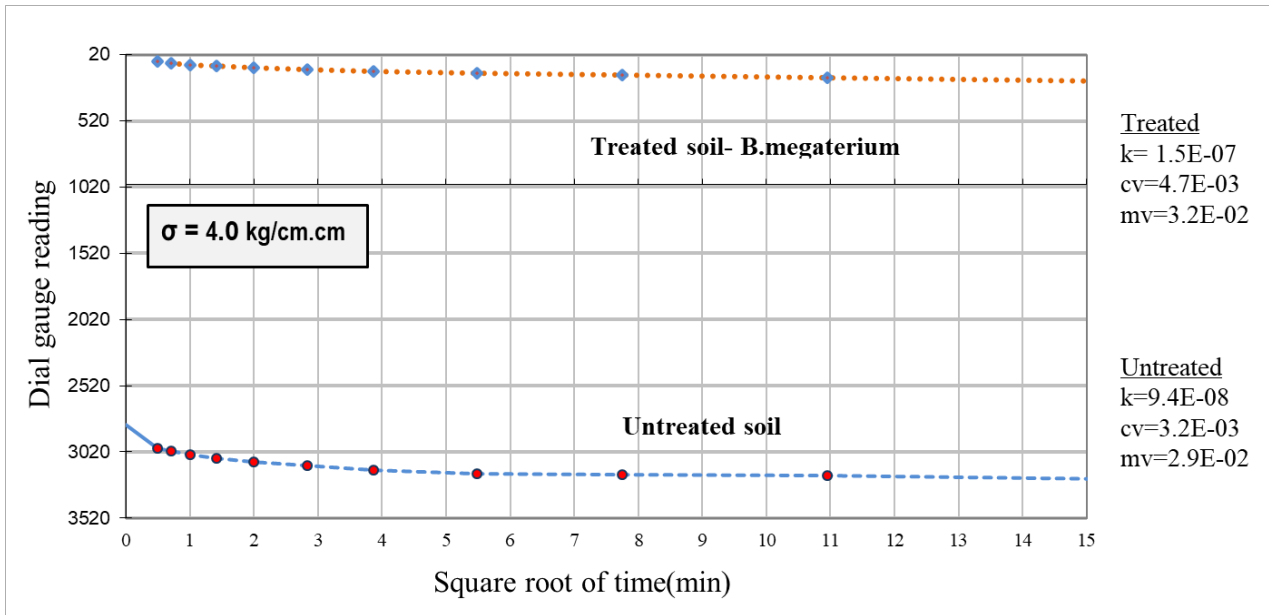
شکل ۱۷. منحنی تغییرات گیبج قائم نسبت به جذر زمان در تنش‌های مختلف (ادامه دارد)

Fig. 17. Dial gauge reading / Square root of time (min) curve at different stresses (Continude)



شکل ۱۷. منحنی تغییرات گنج قائم نسبت به جذر زمان در تنش‌های مختلف (ادامه دارد)

Fig. 17. Dial gauge reading / Square root of time (min) curve at different stresses (Continude)



شکل ۱۷. منحنی تغییرات گنج قائم نسبت به جذر زمان در تنش‌های مختلف

Fig. 17. Dial gauge reading / Square root of time (min) curve at different stresses.

که محل اتصال دانه‌هاست حرکت کنند و در نتیجه منجر به تشکیل رسوب مؤثر در محل اتصال دانه‌ها شوند. عملکرد نه چندان مناسب روش تزریق به نسبت روش جذب سطحی به فشار تزریق بیش از حد محلول‌ها نسبت به تراکم نمونه برمی‌گردد و در واقع نفوذ محلول به صورت جذب سطحی بر اثر گرانش، برای میزان تراکم نمونه‌های این پژوهش عملکرد مناسب‌تری داشته است.

- جهت بررسی پارامتر زمان در روند بهسازی خاک مورد مطالعه در این پژوهش، مقاومت فشاری نمونه‌های بهسازی شده با باکتری *B. megaterium* در ۱۰ روز و ۴۰ روز پس از ساخت مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاکی از افزایش قابل ملاحظه مقاومت فشاری با گذشت زمان بود. مقاومت ده روزهی نمونه چیزی حدود ۱/۵۶ برابر و مقاومت چهل روزهی آن حدود ۲/۶ برابر بهبود یافته است و در واقع تا روز دهم درمان تقریباً ۶۰ درصد از بهبود چهل روزهی نمونه اتفاق افتاده است.
- تثبیت بیولوژیکی نمونه‌ی آزمایش تحکیم، تغییرات نسبت منافذ خاک را از ۰/۵۸۴ به ۰/۳۵۴ و شاخص فشردگی را از ۰/۰۷۷ به ۰/۰۳۸ کاهش داده است در نتیجه وضعیت نشست‌پذیری خاک بهبود یافته است.
- افزودن مواد رسوب‌زا به نمونه‌ی آزمایش حدود اتربرگ موجب کاهش شاخص خمیری را از ۲۶ به ۱۹ شده است.

تقدیر و تشکر

عمده آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق در آزمایشگاه مکانیک خاک و مقاومت مصالح شرکت مهندسی مشاور جاهد انجام شده است. همچنین لازم است از همکاری صمیمانه جناب آقای دکتر فاضل مدیر شرکت و سرکار خانم مصطفی‌خانی کارشناس آزمایشگاه تقدیر و تشکر گردد.

منابع

- [1] R.H. Karol, Chemical grouting and soil stabilization, revised and expanded, Crc Press, 2003.
- [2] B. Krajewska, Urease-aided calcium carbonate mineralization for engineering applications: A review, Journal of advanced research, 13 (2018) 59-67.
- [3] J.T. DeJong, M.B. Fritzges, K. Nu'sslein, Microbial induced cementation to control sand response to

باکتری *B. megaterium* نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد بهسازی و تثبیت خاک به روش MICP باعث کاهش ضریب نفوذپذیری و افزایش ضریب تحکیم می‌گردد. همچنین کاهش قابل ملاحظه‌ای در شیب منحنی نشست- جذر زمان به خصوص در بخش ابتدای نمودار مشاهده می‌شود.

۵- جمع‌بندی

در این پژوهش جهت مطالعه‌ی برخی از پارامترهای مؤثر بر بهسازی بیولوژیکی خاک ریزدانه رسی کرمانشاه از دو باکتری *B. megaterium* و *B.124* استفاده شد و عملکرد این باکتری‌ها برای تمام پارامترها مورد مقایسه قرار گرفت. برخی از نتایج حاصله عبارتند از:

- نتایج آزمایش‌های تک محوری بر نمونه‌های بهسازی شده با هر دو باکتری به کار رفته در شرایط یکسان، حاکی از افزایش مقاومت فشاری ۱۰ روزهی نمونه‌ها بود. این افزایش برای باکتری *B. megaterium* چیزی حدود ۱/۵۶ برابر و برای باکتری *B.124* حدود ۱/۳۴ برابر بود.
- در این پژوهش جهت بهینه‌سازی اختصاصی غلظت و pH محلول رسوب‌زا در خاک ریزدانه رسی، سه غلظت ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ مولار در دو pH، ۷ و ۹ مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج این مطالعات بیشترین بهبود در مقاومت فشاری نمونه‌های بهسازی شده با باکتری *B.124*، در غلظت ۰/۵ مولار محلول رسوب‌زا و در pH=۹ اتفاق افتاد اما بیشترین مقاومت فشاری نمونه‌ی تثبیت شده با باکتری *B. megaterium* در غلظت ۰/۲۵ مولار و در pH=۹ اتفاق افتاد. تحقیقات قبلی در زمینه‌ی بررسی اثر غلظت محلول رسوب‌زا بر بهسازی خاک ماسه‌ای با باکتری *B. megaterium*، بهترین عملکرد رسوب‌زایی را در غلظت ۰/۵ مولار محلول رسوب‌زا گزارش کردند، این تمایز نشان دهنده‌ی تأثیر نوع خاک و شرایط واکنش بر عملکرد باکتری مشخص است. مطلب دیگر آن که افزایش غلظت محلول رسوب‌زا تا ۰/۷۵ مولار بر خلاف انتظار، اثر مثبتی بر رسوب‌زایی بیولوژیکی نداشت و حتی عاملی محدود کننده بود.

- نمونه‌های بهسازی شده به روش جذب سطحی، نسبت به روش اختلاط و تزریق مقاومت بیشتری از خود نشان دادند. در واقع اضافه کردن محلول‌های رسوب‌زا به خاک پس از ساخت نمونه در جای‌گیری مناسب آن‌ها بین دانه‌های خاک، به نسبت روش اختلاط، مؤثرتر عمل کرده است و در واقع به محلول‌ها اجازه داده شده که بین دانه‌های خاک به سمت کنتج‌ها

- (2016) 1301-1308.
- [14] K. Chiet, K. Kassim, K. Chen, U. Martula, C. Yah, A. Arefnia, Effect of reagents concentration on biocementation of tropical residual soil, in: IOP conference series: materials science and engineering, 2016.
- [15] N.W. Soon, L.M. Lee, T.C. Khun, H.S. Ling, Improvements in engineering properties of soils through microbial-induced calcite precipitation, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17(4) (2013) 718-728.
- [16] N.W. Soon, L.M. Lee, T.C. Khun, H.S. Ling, Factors affecting improvement in engineering properties of residual soil through microbial-induced calcite precipitation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(5) (2014) 04014006.
- [17] L. Cheng, R. Cord-Ruwisch, M.A. Shahin, Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation, *Canadian Geotechnical Journal*, 50(1) (2013) 81-90.
- [18] K. Wen, Y. Li, S. Liu, C. Bu, L. Li, Development of an improved immersing method to enhance microbial induced calcite precipitation treated sandy soil through multiple treatments in low cementation media concentration, *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(2) (2019) 1015-1027.
- [19] H. Katebi, A. Fahmi, A. Ouria, A. Babaeian Amini, H.S. Kafil, Microbial Surface Treatment of Sand with *Sporosarcina pasteurii* to Improve the Wind Erosion Resistance in Urmia Lake, *Applied and Environmental Soil Science* 2021 (2021).
- [20] S. Babakhani, A. Fahmi, H. Katebi, A. Ouria, A. Majnouni-Toutakhane, K. Ganbarov, H.S. Kafil, Non-sterile corn steep liquor a novel, cost effective and powerful culture media for *Sporosarcina pasteurii* cultivation for sand improvement, *Journal of Applied Microbiology*, 130(4) (2021) 1232-1244.
- undrained shear, 132 (11) (2006) 1381-1392.
- [4] J.T. DeJong, B.M. Mortensen, B.C. Martinez, D.C. Nelson, Bio-mediated soil improvement, *Ecological Engineering*, 36(2) (2010) 197-210.
- [5] V. Ivanov, J. Chu, Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 7(2) (2008) 139-153.
- [6] A.J. Phillips, R. Gerlach, E. Lauchnor, A.C. Mitchell, A.B. Cunningham, L. Spangler, Engineered applications of ureolytic biomineralization: a review, *Biofouling*, 29(6) (2013) 715-733.
- [7] M.S. Reddy, Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications: a review, *Frontiers in microbiology*, 4 (2013) 314.
- [8] N. Hataf, A. Baharifard, Reducing Soil Permeability Using Microbial Induced Carbonate Precipitation (MICP) Method: A Case Study of Shiraz Landfill Soil, *Geomicrobiology Journal*, 37(2) (2020) 147-158.
- [9] W. De Muynck, K. Verbeken, N. De Belie, W. Verstraete, Influence of urea and calcium dosage on the effectiveness of bacterially induced carbonate precipitation on limestone, *Ecological Engineering*, 36(2) (2010) 99-111.
- [10] G.D. Okwadha, J. Li, Optimum conditions for microbial carbonate precipitation, *Chemosphere*, 81(9) (2010) 1143-1148.
- [11] S.-S. Park, S.-G. Choi, I.-H. Nam, Effect of plant-induced calcite precipitation on the strength of sand, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(8) (2014) 06014017.
- [12] X. Sun, L. Miao, T. Tong, C. Wang, Study of the effect of temperature on microbially induced carbonate precipitation, *Acta Geotechnica*, 14(3) (2019) 627-638.
- [13] J.P. Carmona, P.J.V. Oliveira, L.J. Lemos, Biostabilization of a sandy soil using enzymatic calcium carbonate precipitation, *Procedia engineering*, 143

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Karami, J. Khazaei, M. Sharifipour, R. Sharifi, Improvement and stabilization of soft and loose fine-grained soils by Microbial Induced Calcite Precipitation (MICP) method (Case study: fine-grained soil of Kermanshah Faculty of Agriculture), Amirkabir J. Civil Eng., 54(9) (2022) 3217-3242.

DOI: [10.22060/ceej.2022.18917.6997](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.18917.6997)



