

## مطالعه‌ی آزمایشگاهی تاثیر رسوب زیستی کربنات کلسیم (MICP) بر میزان نفوذپذیری ماسه‌های کربناته

زهرا حیدری نقدعلی<sup>۱</sup>، منصور پرویزی<sup>۲\*</sup>، مسعود رابطی مقدم<sup>۳</sup> و رضا نقی‌ها<sup>۴</sup>

دریافت مقاله: ۹۷/۱۰/۲۱ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۳/۲۹

### چکیده

رسوب زیستی کربنات کلسیم (MICP) روشی سازگار با محیط زیست و مناسب برای بهسازی خاک است. در این روش، اوره توسط آنزیم اوره آز ترشح شده از باکتری، هیدورلیز شده و کربنات کلسیم در حضور یون کلسیم تشکیل می‌شود. کربنات کلسیم مانند پلی ذرات خاک را به یکدیگر متصل می‌کند و باعث بهبود مشخصه‌های خاک می‌شود. در مقاله حاضر تاثیر MICP بر میزان نفوذپذیری ماسه‌های کربناته در آزمایشگاه مطالعه شده است. عواملی نظیر غلظت محلول سیمانی، میزان تراکم خاک و مدت زمان تیمار بر میزان نفوذپذیری خاک مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان داد غلظت بالاتر محلول سیمانی باعث کاهش بیشتر در نفوذپذیری نمونه‌ها می‌شود. نمونه‌های با تراکم کمتر، کاهش نفوذپذیری بیشتری را نشان دادند. هم چنین با گذشت زمان از ۱۴ روز به ۲۸ روز، فعالیت باکتریایی بسیار اندک بوده است. بیشترین میزان کاهش نفوذپذیری در نمونه‌ی سست، با غلظت محلول سیمانی ۱ مولار و با مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روز، برابر با ۶۰ درصد بوده است.

**کلید واژه‌ها:** MICP، باکتری، کریستال کربنات کلسیم، بیوسمنتاسیون، آزمایش نفوذپذیری با بار ثابت

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران
- ۲- استادیار، دکتری ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران
- ۳- استادیار، دکتری ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران
- ۴- استادیار، دکتری میکروبیولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

\*مسئول مکاتبات: Parvizi@yu.ac.ir

## ۱. مقدمه

در بسیاری از مناطق کره‌ی زمین، خاک‌ها خصوصیات مکانیکی مورد نیاز مهندسين را تامین نمی‌کنند و به دلیل افزایش جمعیت در مناطق شهری و کاهش فزاینده‌ی مکان‌ها-ی مناسب برای ساخت و ساز، نیاز بالایی به توسعه‌ی روش‌های بهسازی در بین جامعه مهندسی ژئوتکنیک در طول دهه گذشته وجود داشته است (Dejong et al, 2010). براساس تحقیقات انجام شده، بیش از ۴۰۰۰۰ پروژه اصلاح خاک با هزینه‌ای بالغ بر ۶ میلیارد دلار در سال در سرتاسر دنیا در حال اجرا می‌باشد (Dejong et al, 2010). بروز برخی مشکلات زیست محیطی نظیر تاثیر بر روی سفره‌های آب زیرزمینی و سمی بودن برخی روش‌های بهسازی مانند روش‌های شیمیایی و نیز وجود مشکلاتی از قبیل انرژی مصرفی بالا، ملزومات دسترسی به محل، محدودیت در عمق و گستره مساحتی قابل حصول، گران بودن تجهیزات مورد استفاده در روش‌های موجود بهسازی خاک، محققان را مستلزم وادار می‌کند تا به دنبال روشی باشند که سازگار با محیط زیست بوده و قادر باشد خواسته‌ها و نیازهای آینده را به خصوص برای مهندسی عمران برآورده کند. در طول ۱۰ تا ۱۵ سال گذشته زمینه‌های جدیدی از بیورژئوتکنیک پدیدار شده است که در آن مهندس ژئوتکنیک به دنبال پیدا کردن فناوری‌های جدید برای بهبود زمین با روش‌های سازگار با محیط زیست و مقرون به صرفه-تر از سایر روش‌ها است، می‌باشد، El Mountassir et al (2018). از جمله این روش‌ها می‌توان به بهسازی بیولوژیکی خاک توسط باکتری اشاره کرد. این فرآیند از تحقیقات بین رشته‌ای میکروبیولوژی، ژئوشیمی و مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. یکی از این روش‌های بیولوژیکی که امروزه در حال رشد سریع است و موضوعی جذاب برای محققان در نظر گرفته می‌شود، رسوب کربنات کلسیم توسط میکروارگانسیم‌ها است، که به روش MICP (Microbial induced carbonate precipitation) معروف می‌باشد. در این حال، محققان دریافتند که بعضی باکتری‌ها می‌توانند در خاک بلور کربنات-کلسیم را به وجود آورند. استفاده از میکروارگانسیم‌ها برای

کاتالیز در خاک اولین بار توسط (Whiffin, 2004) و (Mitchell and Santamarina, 2005)، پیشنهاد و طرح شد. در ادامه، با تحقیقات بیشتر سایر محققین پیشرفت‌های زیادی در این زمینه حاصل شد. روش MICP یکی از روش‌های تثبیت خاک است که به دلیل توانایی بالای آن در بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی خاک بسیار مورد استقبال محققین قرار گرفته است (Gowthaman et al, 2019). پتانسیل MICP برای کاربردهای زیادی مانند پایدارسازی خاکمورد بررسی قرار گرفته است (Dejong et al, 2006 and Whiffin et al, 2007). پارامتر نفوذپذیری به عنوان مهم‌ترین پارامتر مسئله جریان آب در خاک، در اغلب پدیده‌های ژئوتکنیکی، به ویژه پدیده‌های مرتبط با ژئوتکنیک دریایی، مانند تراوش، آب شستگی، رگاب، فشار وارده بر سازه‌های حائل، تحکیم و روانگرایی پارامتری تعیین کننده در طراحی‌ها و تصمیم‌گیری‌ها می‌باشد. با به کارگیری روش MICP می‌توان بر پدیده‌هایی نظیر نشست کنترل نشده، جلوگیری از رگاب در ماسه‌ها (کاهش نفوذپذیری و کاهش گرادیان هیدرولیکی، افزایش چسبندگی در بیندانه‌های ماسه) و آب شستگی (مقاومت در برابر فرسایش آبی) ماسه‌های ساحلی استفاده نمود. طبق نتایج مطالعات پیشین، استفاده از این روش برای بهبود وضعیت هیدرولیکی خاک‌ها موفقیت آمیز بوده است. روش MICP در آب بندی تراوش و کاهش نفوذپذیری خاک به وسیله‌ی آب-بندی زیستی نتایج بسیار مطلوبی را نشان داده است و در نتیجه محققان زیادی را به انجام و استفاده از این روش در مهندسی عمران تشویق کرده است (Whiffin et al, 2007). در سال ۲۰۰۴، از روش MICP در روتردام هلند برای کاهش نفوذپذیری خاک ماسه‌ای استفاده شد و با حفظ عملکرد طولانی مدت مناسب پس از تیمار، MICP به عنوان یک تکنیک موفق نشان داده شد. در سال ۲۰۰۵، یک خرابی ناشی از نشست آب در بستر خط راه آهن آمستردام به پاریس رخ داد. این مشکل با استفاده از روش MICP، ۹ هفته بعد از تیمار به شکل موثر و چشمگیری کنترل شد. حل مشکل نشست آب در

(2018). سرمست و همکاران (۱۳۹۳) تاثیر کلسیت زیستی بر برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های شنی را مطالعه کردند. چنین نتیجه‌گیری شد که با گذشت زمان و افزایش غلظت محلول سیمانی میزان مقاومت افزایش و نفوذپذیری کاهش می‌یابد. روشن بخت و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی فاکتورهایی شامل نوع باکتری، غلظت محلول سیمانی، دما، تراکم سلول باکتری پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تزریق مرحله‌ای باعث بهتر سیمانی شدن نمونه می‌شود. هم چنین به کمک MICP نفوذپذیری کاهش و مقاومت افزایش می‌یابد.

در مطالعه حاضر با هدف امکان سنجی استفاده از روش MICP در تثبیت خاک‌های ماسه‌ای کربناته اقدام به تیمار خاک به این روش در آزمایشگاه نموده و تاثیر MICP بر میزان نفوذپذیری ماسه کربناته بوشهر مورد مطالعه قرار گرفته است.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱. میکروارگانسیم مورد استفاده

باکتری انتخاب شده برای انجام آزمایش‌ها، باکتری اسپوروسارسینا پاستوری (*Sporosarcina pasteurii*) است که پیش‌تر توسط سایر محققین در روش MICP مورد استفاده قرار گرفته است. این باکتری مولد اندوسپور، قادر به رشد در محیط قلبایی بوده و فعالیت اویره آزی دارد. این باکتری از مرکز کلکسیون فارچها و باکتری‌های صنعتی ایران به شماره PTCC1645 خریداری و بر اساس دستورالعمل شرکت، کشت و افزایش‌سازی داده شد. نخست باکتری اسپوروسارسینا پاستوری در شرایط هوازی، در یک محیط کشت اختصاصی تکثیر یافت. سپس با روش کدورت سنجی و تهیه رقت‌های سریالی  $10^6$  cfu/ml از باکتری تهیه شد.

### ۲-۲. خاک مورد استفاده

خاک مورد استفاده در این تحقیق ماسه کربناته است که از ساحل بندر بوشهر به دست آمده است. شکل ۱ نمونه‌ای از این خاک را نشان می‌دهد. پس از انجام آزمایش تعیین مقدار

ساحلی در هلند با کاهش ۸۰ درصدی در نفوذپذیری نیز نمونه‌ای دیگر از موفقیت این روش است (Zhang, 2010).

ون پسن و همکاران (Van Paassen et al, 2010) مخزنی ۳ متر مکعبی را با سنگ‌های خرد شده پر کرد و سپس روش MICP را بر روی مخزن اجرا کرد. روی نمونه‌های اخذ شده از مخزن آزمایش‌هایی انجام داد و نتایج نشان داد که ساختار نمونه پس از تیمار بسیار پایدار است. در کانادا، نشت آب زیرزمینی بر روی توده‌ی سنگی باعث ایجاد ترکی به طول ۱۰۰ متر و عرض ۲۲۶ میکرومتر شد، که این مسئله با روش MICP با موفقیت حل شد. به همین شکل، در منطقه‌ی دانوب در اتریش مسدود کردن و جلوگیری کردن از نشت سد با این روش انجام شد (Zhang, 2010). در فرانسه، روش تزریق میکروبی برای تقویت و تعمیر برج مورد استفاده قرار گرفت (Metayer-leverl et al, 1999). چو و همکاران (Chu et al, 2012) چنین نتیجه گرفتند که برای آب بندی زیستی (Bio-clogging) خاک و کاهش نفوذپذیری آن می‌توان از روش MICP استفاده کرد. در مطالعه‌ی که توسط اسمیت و همکاران (Smith et al, 2017) انجام گرفت، از روش MICP با موفقیت برای کاهش نفوذپذیری در ماسه‌های تمیز و با چسبندگی کم استفاده شد و نتایج کاهش ۸۳ درصدی در نفوذپذیری را نشان داد. همچنین در این مطالعه از MICP برای کاهش پتانسیل اشباع شدن خاک‌های جاده‌ای در برزیل در مقابل آب باران استفاده شد. از MICP می‌توان برای سیمانی کردن ماسه‌های مرجانی و تقویت پارامترهای مهندسی این نوع خاک در جهت حفظ سازه‌های ساحلی استفاده کرد. نتایج نشان داد pH محیط کشت تاثیر کمتری نسبت به دما بر روی رشد باکتری‌ها دارد. باکتری در pH بیش از ۸ و دمای بالاتر از ۲۰ درجه سانتیگراد رشد بیشتری دارد (Deng and Wang, 2018). MICP یکی از روش‌هایی است که می‌توان از آن برای بهبود مقاومت سیکلی ماسه‌های کربناته و جلوگیری از روانگرایی در آن‌ها استفاده کرد. نتایج نشان داد که مقاومت در برابر روانگرایی در ماسه‌های کربناته با استفاده از تیمار MICP به طور چشمگیری افزایش پیدا کرده است (Xiao et al, 2018).

۳-۲. محلول‌های مورد استفاده

محلول سیمانی شامل اوره و کلرید کلسیم است. محلول سیمانی در ۲ غلظت متفاوت که ترکیب آن‌ها در جدول ۲ آمده است، تهیه شده است. مقادیر کلرید کلسیم و اوره بر حسب گرم با استفاده از روابط استوکیومتری (Stoichiometry) در شیمی و با داشتن وزن مولکولی هر دو محاسبه می‌شود. پس از آنکه مقدار کلرید کلسیم و اوره مشخص شد، به همان مقدار وزن کرده و روی آن تا حجم لازم آب مقطر ریخته و با دستگاه هات پلیت مواد موجود در آب حل می‌شود. باکتری ابتدا در محیط جامد نیوترنت آگار به همراه اوره‌ی ۲۰ درصد، کشت داده شده و در دستگاه انکوباتور قرار می‌گیرد. پس از سه روز باکتری از محیط جامد به محیط مایع مولر هیتتون برات به همراه اوره ۲۰ درصد، انتقال یافت. پس از گذشت مدت زمان ۲ تا ۳ روز که باکتری در محیط مایع به مقدار کافی رشد کرد، محیط مایع به فالكون‌های ۵۰ سی‌سی منتقل شده و سانتریفیوژ می‌شود. پس از سانتریفیوژ، باکتری به صورت رسوب در کف فالكون‌ها نمایان می‌شود. محیط کشت داخل فالكون‌ها بیرون ریخته شده و مقداری از آب دریا حاوی مواد آورده شده در جدول ۳ (که از قبل در آزمایشگاه به حجم مورد نیاز برای تزریق شبیه‌سازی و ساخته شده است (Cheng et al, 2014)). درون فالكون‌ها ریخته می‌شود. باکتری و آب دریا با دستگاه ورتکس کاملاً مخلوط می‌شوند. فالكون‌های حاوی آب دریا و باکتری با ارزن‌های حاوی آب دریا مخلوط شده تا محلول همگنی از ترکیب باکتری و آب دریا به دست آید. شکل ۳ ساخت محلول آب باکتری را در آزمایشگاه نشان می‌دهد.

جدول ۲. ترکیبات محلول سیمانی مورد استفاده (اوره +

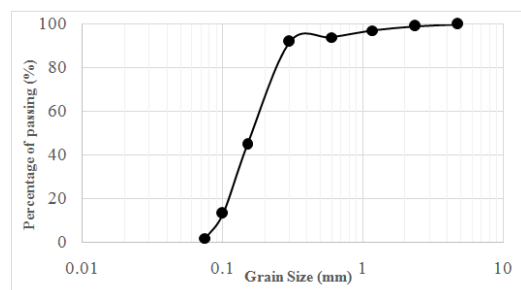
کلرید کلسیم)

Cement Solution Combination	No
0.25 M CaCl <sub>2</sub> + 0.666 M urea	1
1.0 M CaCl <sub>2</sub> + 2.66 M urea	2

کربنات کلسیم و مورد تایید قرار گرفتن کربناته بودن آن، خاک به مقدار مورد نیاز سفارش داده شد. در این پژوهش مقدار کربنات کلسیم خاک برابر ۶۰/۱۸ درصد به دست آمد. بر اساس انجام آزمایش دانه‌بندی، نوع خاک در سیستم طبقه‌بندی یونیفاید (USCS) ماسه‌ی یکنواخت بد دانه‌بندی شده (SP) می‌باشد. نمودار دانه‌بندی خاک در شکل ۲ نشان داده شده است. در جدول ۱ مقادیر ضریب انحنای (C<sub>c</sub>) و ضریب یکنواختی (C<sub>u</sub>) مشخص شده است. آزمایش تراکم بر روی نمونه‌ی خاک به روش اش تو استاندارد انجام شد و چگالی خشک بیشینه‌ی خاک ۱/۴۴ گرم بر سانتیمتر مکعب در درصد رطوبت بهینه ۱۹ درصد به دست آمد.



شکل ۱. نمونه‌ای از ماسه کربناته



شکل ۲. نمودار دانه بندی خاک مورد آزمایش (ماسه‌ی بوشهر)

جدول ۱. مقادیر محاسبه شده‌ی ضریب یکنواختی و ضریب

انحنای ماسه بوشهر

D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>30</sub> (mm)	D <sub>60</sub> (mm)	C <sub>u</sub>	C <sub>c</sub>
0.09	0.12	0.18	2	0.89



شکل ۴. دستگاه ساخته شده برای انجام آزمایش نفوذپذیری با بار ثابت

#### ۲-۵. آماده سازی نمونه‌های خاک برای تیمار با MICP

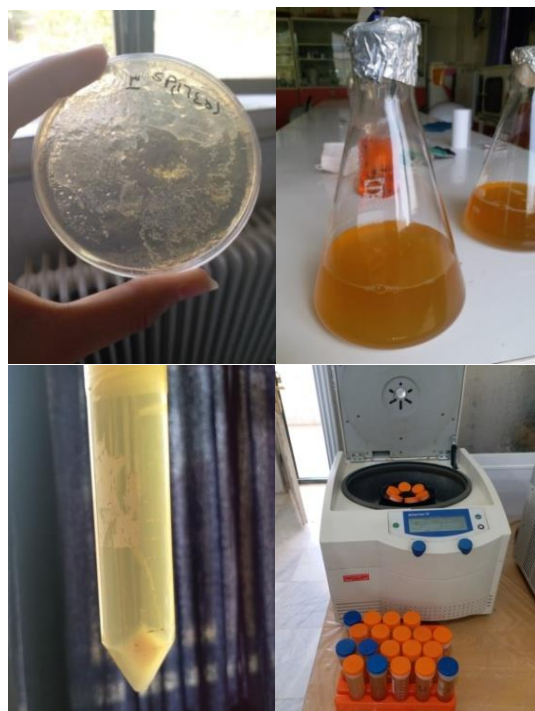
خاک در دو حالت سست و متراکم ساخته شد. جهت ساخت نمونه‌های خاک سست، خاک به وسیله قیف از ارتفاع مشخص داخل لوله‌ی پلیکا ریخته می‌شود. برای ساخت نمونه‌های متراکم نیز خاک برای ۲۴ ساعت در گرم کن قرار گرفته تا خاک به طور کامل خشک شود. خاک را با توجه به درصد رطوبت بهینه با آب مخلوط کرده و سپس آن را در ۳ لایه ریخته و هر لایه را با ۲۵ ضربه متراکم کرده و نمونه‌ها ساخته می‌شوند.

#### ۲-۶. تزریق نمونه‌ها و عمل آوری

آب باکتری و محلول سیمانی در طی سه مرحله به نمونه‌های خاک تزریق شدند. تزریق محلول سیمانی و آب باکتری به نمونه‌ها از طریق سیستم سرم و سوزن تزریق انجام می‌شود. روش انتخاب شده برای تزریق بدین صورت است که ابتدا محلول آب باکتری با نرخ  $1 \text{ Litr/hr}$  به خاک تزریق می‌شود. ۲۴ ساعت بعد تزریق محلول سیمانی مرحله‌ی اول با همان نرخ قبلی انجام می‌شود. بعد از آن نیز با گذشت ۲۴ ساعت دیگر، تزریق محلول سیمانی مرحله‌ی دوم انجام می‌شود. شکل ۵ تزریق نمونه‌ها را نشان می‌دهد. نمونه‌هایی که محلول آب باکتری و محلول سیمانی به آن‌ها تزریق شده در دمای اتاق ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتیگراد قرار گرفته و پس از ۱۴ و ۲۸ روز آزمایش نفوذپذیری بر روی آن‌ها انجام شده است. در شکل ۶ نمودار فرآیند MICP مشاهده می‌شود.

#### جدول ۳. مواد مورد نیاز برای ساخت آب دریا

Material name	Amount of material (gr/lit)
NaCl	23.9
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4
CaCl <sub>2</sub> . 2H <sub>2</sub> O	1.5
MgCl <sub>2</sub> . 6H <sub>2</sub> O	10.8
KCl	0.7
NaHCO <sub>3</sub>	0.2
KBr	0.1
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.03



شکل ۳. ساخت محلول آب باکتری

#### ۲-۴. دستگاه نفوذپذیری

۲۴ عدد دستگاه نفوذپذیری با بار ثابت به منظور اندازه‌گیری نفوذپذیری نمونه‌های تیمار شده با MICP ساخته شد. بدنه‌ی دستگاه از جنس پلیکا و سری بالا و پایینی آن از آلومینیوم ساخته شدند. بدنه‌ی اصلی دستگاه که از جنس پلیکا بوده و نمونه‌ی خاک در آن قرار گرفته است با ارتفاع ۱۳ سانتی‌متر و قطر  $5/04$  سانتی‌متر ساخته شد. در شکل ۴ می‌توان دستگاه ساخته شده را مشاهده کرد.

### ۳. نتایج و بحث

پس از انجام آزمایش نفوذپذیری با بار ثابت روی نمونه‌های تیمار نشده، نفوذپذیری نمونه‌ی سست برابر با ۰/۰۹۹ سانتی متر بر ثانیه و نفوذپذیری نمونه‌ی متراکم برابر با ۰/۰۶۷ سانتی متر بر ثانیه به دست آمد. در این بخش بر اساس نتایج حاصله به تاثیر پارامترهای مختلف بر نفوذپذیری نمونه‌های تثبیت شده با MICP پرداخته شده است.

#### ۳-۱. بررسی اثر غلظت محلول سیمانی بر میزان نفوذپذیری

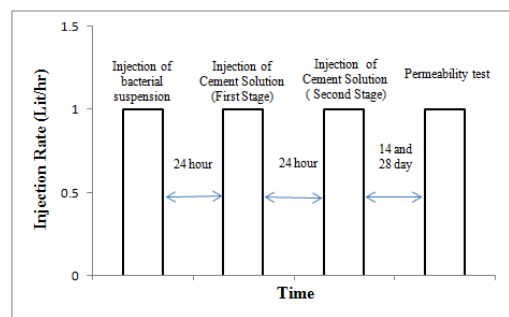
جدول ۵ نتایج مربوط به نمونه‌ی متراکم، ۰/۲۵ مولار، ۲۸ روزه و نمونه‌ی متراکم، ۱ مولار، ۲۸ روزه را نشان می‌دهد. کاهش نفوذپذیری در نمونه‌های ۰/۲۵ مولار حدود ۳۲ تا ۴۶ درصد و در نمونه‌های ۱ مولار ۴۰ تا ۴۹ درصد است. از نتایج دریافت می‌شود که کاهش نفوذپذیری در نمونه‌های با غلظت ۱ مولار کلریدکلسیم در محلول سیمانی بیشتر از نمونه‌های ۰/۲۵ مولار است. این نتیجه با مطالعات گذشته مطابقت دارد. ون پسن (VanPaassen, 2009) به کاهش ۶۰ درصدی نفوذپذیری در نمونه‌ای تیمار شده با محلول ۱ مولار محلول سیمانی دست یافت. القبانی و سوگا (AlQabanyandsoga, 2013) بیان کردند که نرخ کاهش نفوذپذیری در نمونه‌هایی با غلظت بالاتر محلول سیمانی بیشتر از نمونه‌هایی است که با غلظت کمتر محلول سیمانی تیمار شده‌اند.

نتایج مربوط به نمونه‌های سست، ۰/۲۵ مولار، ۲۸ روزه و نمونه‌ی سست، ۱ مولار، ۲۸ روزه در جدول ۶ آورده شده است. با توجه به جدول کاهش نفوذپذیری در نمونه‌های با غلظت ۰/۲۵ مولار کمتر از کاهش نفوذپذیری در نمونه‌هایی با غلظت ۱ مولار محلول سیمانی است. از مقایسه‌ی نتایج این نمونه‌ها می‌توان مانند قبل به این نتیجه رسید که استفاده از محلول سیمانی با غلظت بالاتر باعث کاهش بیشتری در نفوذپذیری نمونه‌ی خاک می‌شود. تشکیل کریستال‌های  $CaCO_3$  در غلظت پایین‌تر محلول سیمانی در فرآیند MICP تاثیرگذارتر است زیرا باعث بهبود مقاومت خاک با کمترین

برنامه‌ی آزمایش تیمار نمونه‌ها با MICP در جدول ۴ آمده است. برای بالا بردن دقت و رسیدن به نتیجه‌ی دقیق‌تر هر نمونه با ۳ تکرار ساخته شده است.



شکل ۵. تزریق نمونه‌ها با سیستم سرم و سوزن تزریق



شکل ۶. نمودار فرآیند تیمار MICP

جدول ۴. برنامه‌ی آزمایش‌ها

Number of Samples with 3 repetition	States	Number of States	Variable Parameter
24	0.25 and 1 Molar	2	Concentration of Cement Solution
	Loose and Dense	2	Density
	14 and 28 Days	2	Day
	-	3	Repeat

#### ۲-۷. آزمایش نفوذپذیری

برای اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری ماسه‌ی کربناته قبل و پس از تیمار با MICP از آزمایش نفوذپذیری با بار ثابت استفاده شد.

در جدول ۷ نتایج نمونه‌های متراکم، ۰/۲۵ مولار، ۱۴ روزه و نمونه‌ی متراکم، ۱ مولار، ۱۴ روزه آورده شده است. کاهش نفوذپذیری در نمونه‌های با غلظت ۱ مولار محلول سیمانی از ۴۱ درصد تا ۵۰ درصد است و در نمونه‌های با غلظت ۰/۲۵ مولار محلول سیمانی از ۳۰ درصد تا ۴۳ درصد است، بدین ترتیب از نتایج این نمونه‌ها نیز چنین نتیجه می‌شود که محلول سیمانی با غلظت پایین‌تر، موجب کاهش کمتری در نفوذپذیری نمونه می‌شود. مطابق با مطالعات پیشین محلول سیمانی با غلظت پایین‌تر منجر به توزیع همگن کریستال‌های  $\text{CaCO}_3$  شده است در حالیکه در نمونه‌های خاک با غلظت بیشتر محلول سیمانی (به دلیل سرعت بالاتر تشکیل کریستال-های  $\text{CaCO}_3$ ) کریستال‌ها به صورت تصادفی بین ذرات خاک تشکیل می‌شوند (Okwadha and Li, 2010).

جدول ۷. نتایج مربوط به نمونه‌های متراکم ۰/۲۵ و ۱ مولار،

۱۴ روزه

Sample	Dense, 0.25 Molar, 14 Days	Dense, 1 Molar, 14 Days	
Permeability of the treated sample (cm/s)	First Repeat	0.0042	0.0039
	Second Repeat	0.0047	0.0033
	Third Repeat	0.0038	0.0037
The permeability of a dense, untreated sample (cm/s)		0.0067	
Permeability reduction percentage	First Repeat	37.3	41.8
	Second Repeat	29.9	50.7
	Third Repeat	43.3	44.8
Average percentage reduction		36.82	44.77

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که کاهش نفوذپذیری در نمونه‌هایی که با غلظت بالاتر محلول سیمانی تیمار شده‌اند، کاهش نفوذپذیری بیشتر است.

اختلال و کاهش نفوذپذیری در خاک می‌شود (Mujah et al, 2016).

جدول ۵. نتایج مربوط به نمونه‌های متراکم ۰/۲۵ و ۱ مولار،

۲۸ روزه

Sample	Dense, 0.25 Molar, 28 Days	Dense, 1 Molar, 28 Days	
Permeability of the treated sample (cm/s)	First Repeat	0.0041	0.0034
	Second Repeat	0.0036	0.004
	Third Repeat	0.0045	0.0039
The permeability of a dense, untreated sample (cm/s)		0.0067	
Permeability reduction percentage	First Repeat	28.8	49.3
	Second Repeat	46.3	40.3
	Third Repeat	32.8	41.8
Average percentage reduction		39.3	43.78

جدول ۶. نتایج مربوط به نمونه‌های سست ۰/۲۵ و ۱ مولار،

۲۸ روزه

Sample	Dense, 0.25 Molar, 28 Days	Dense, 1 Molar, 28 Days	
Permeability of the treated sample (cm/s)	First Repeat	0.0042	0.0044
	Second Repeat	0.0047	0.0039
	Third Repeat	0.0049	0.0041
The permeability of a loose, untreated sample (cm/s)		0.0099	
Permeability reduction percentage	First Repeat	57.6	55.6
	Second Repeat	52.5	60.6
	Third Repeat	50.5	58.6
Average percentage reduction		53.54	58.25

۳-۲. بررسی اثر میزان تراکم بر میزان نفوذپذیری

در جدول ۸ نتایج مربوط به نمونه‌ی متراکم، ۱ مولار، ۱۴ روزه و نمونه‌ی سست، ۱ مولار، ۱۴ روزه آورده شده است. با توجه به جدول کاهش نفوذپذیری در نمونه‌های متراکم در بازه‌ی ۴۱ تا ۵۰ درصد است و در نمونه‌های سست نیز از ۵۲ تا ۵۹ درصد است. کاهش نفوذپذیری در نمونه‌های سست بیشتر از نمونه‌های متراکم است. با توجه به نتایج حاصل از مطالعات پیشین در نمونه‌های با تراکم بیشتر به دلیل اینکه راه‌ها و منفذها برای حرکت باکتری و واکنش با محلول سیمانی و در نهایت تشکیل  $\text{CaCO}_3$  کمتر بوده و عبور مواد نیز سخت‌تر است، پروسه‌ی MICP تاثیر کمتری نسبت به نمونه‌های سست دارد. القبانی و سوگا (AlQabanyand Soga, 2013) به این نتیجه دست یافتند که کاهش نفوذپذیری در هر نمونه‌ی سست و متراکم دیده می‌شود با این تفاوت که کاهش نفوذپذیری در نمونه‌های سست‌تر بیشتر از نمونه‌های متراکم است. سون و همکاران (Soon et al, 2013) بیان کردند که نرخ کاهش در نفوذپذیری خاک‌های ماسه‌ای با افزایش تراکم کمتر می‌شود.

جدول ۸ نتایج مربوط به نمونه‌های سست و متراکم، ۱ مولار، ۱۴ روزه

Sample	Loose, 1 Molar, 14 Days	Dense, 1 Molar, 14 Days	
Permeability of the treated sample(cm/s)	First Repeat	0.004	0.0039
	Second Repeat	0.0043	0.0033
	Third Repeat	0.0047	0.0037
The permeability of the untreated samples (cm/s)	0.0099	0.0067	
Permeability reduction percentage	First Repeat	59.6	41.8
	Second Repeat	56.6	50.7
	Third Repeat	52.5	44.8
Average percentage reduction	56.23	45.77	

نتایج مربوط به نمونه‌ی متراکم، ۰/۲۵ مولار، ۲۸ روزه و نمونه‌ی سست، ۰/۲۵ مولار، ۲۸ روزه در جدول ۹ آمده است. با توجه به نتایج می‌توان دریافت که کاهش نفوذپذیری مانند نتایج قبلی در نمونه‌های سست بیشتر از نمونه‌های متراکم است.

از مقایسه‌ی مابقی نمونه‌ها نیز دریافت شد که کاهش نفوذپذیری در نمونه‌های با تراکم بیشتر، کمتر از سایر نمونه‌ها است.

جدول ۹. نتایج مربوط به نمونه‌های سست و متراکم، ۰/۲۵

Sample	مولار، ۲۸ روزه		
	Loose, 0.25 Molar, 28 Days	Dense, 0.25 Molar, 28 Days	
Permeability of the treated sample(cm/s)	First Repeat	0.0042	0.0041
	Second Repeat	0.0047	0.0036
	Third Repeat	0.0049	0.0045
The permeability of the untreated samples (cm/s)	0.0099	0.0067	
Permeability reduction percentage	First Repeat	57.6	38.8
	Second Repeat	52.5	46.3
	Third Repeat	50.5	32.8
Average percentage reduction	53.54	39.3	

۳-۳. بررسی اثر زمان عمل‌آوری بر نتایج MICP

جدول ۱۰ نتایج به دست آمده از نمونه‌ی متراکم، ۰/۲۵ مولار، ۲۸ روزه و نمونه‌ی متراکم، ۰/۲۵ مولار، ۱۴ روزه را نشان می‌دهد. کاهش نفوذپذیری در نمونه‌های ۱۴ روزه از ۳۰ درصد تا ۳۹ درصد است و در نمونه‌های ۲۸ روزه از ۳۴ تا ۴۰ درصد است. کاهش نفوذپذیری در نمونه‌های ۱۴ روزه و ۲۸ روزه تقریباً یکسان بوده و پس از ۱۴ روز تغییر چشمگیری در کاهش نفوذپذیری نمونه‌ها دیده نشده است. مطالعه‌ی ربتا-لاندا (Rebata-Landa, 2007) نشان داد که فعالیت باکتریایی در نمونه‌ها بعد از گذشت ۱۶ روز شروع به



۳-۴. تصاویر ماکروسکوپی و میکروسکوپی نمونه‌های تیمار شده با MICP

همانطور که در سایر مطالعات پیشین نیز بیان شده بود، در روش MICP در برخی موارد توزیع و تشکیل  $\text{CaCO}_3$  در نمونه ناهمگن بوده است به این صورت که در بخش‌هایی از خاک تمرکز  $\text{CaCO}_3$  بیشتر و در بخش‌هایی  $\text{CaCO}_3$  به مقدار کمتری تشکیل شده است.

برای رسیدن به کاهش نفوذپذیری یکنواخت‌تری در MICP، می‌توان از محلول سیمانی با غلظت پایین‌تر استفاده کرد (AlQabanyand Soga, 2013).

جدول ۱۱. نتایج مربوط به نمونه‌های سست، ۱ مولار، ۱۴ و

۲۸ روزه

Sample	۲۸ روزه		
	Loose, 1 Molar, 28 Days	Loose, 1 Molar, 14 Days	
Permeability of the treated sample (cm/s)	First Repeat	0.0044	0.004
	Second Repeat	0.0039	0.0043
	Third Repeat	0.0041	0.0047
The permeability of a loose untreated sample (cm/s)		0.0099	
Permeability reduction percentage	First Repeat	55.6	59.6
	Second Repeat	60.6	56.6
	Third Repeat	58.6	52.5
Average percentage reduction		58.25	56.23

در شکل‌های ۷ و ۸ نمونه‌هایی از خاک کلوخه شده که از نمونه‌ی اصلی جدا شده است، مشاهده می‌شود.  $\text{CaCO}_3$  در بین ذرات خاک کاملاً تشکیل شده، خاک به صورت توده‌ای محکم در آمده است برای اطمینان از تشکیل، از تعدادی نمونه‌ها تصاویر SEM گرفته شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) به دلیل قابلیت بزرگنمایی زیاد جهت مشاهده رسوب  $\text{CaCO}_3$  در بین ذرات خاک گرفته می‌شود (Soon et al, 2013). با توجه به وجود دستگاه لازم برای گرفتن تصاویر SEM در دانشگاه شیراز، تصاویر SEM

کاهش کرد. ون پسن (VanPaassen, 2009) کاهش فعالیت باکتریایی بعد از ۲۰ روز را گزارش کرد.

نتایج مربوط به نمونه‌های سست، ۱ مولار، ۲۸ روزه و نمونه‌های سست، ۱ مولار، ۱۴ روزه در جدول ۱۱ آمده است. درصد کاهش نفوذپذیری دو نمونه‌ی ۱۴ و ۲۸ روزه تفاوت بسیار کمی با یکدیگر داشته و به معنای آن است که کاهش در نفوذپذیری پس از ۱۴ روز تغییر چندانی نکرده و در واقع فعالیت باکتریایی پس از ۱۴ روز کاهش یافته است.

جدول ۱۰. نتایج مربوط به نمونه‌های متراکم، ۰/۲۵ مولار، ۱۴

و ۲۸ روزه

Sample	۲۸ روزه		
	Dense, 0.25 Molar, 14 Days	Dense, 0.25 Molar, 28 Days	
Permeability of the treated sample (cm/s)	First Repeat	0.0042	0.0041
	Second Repeat	0.0047	0.0036
	Third Repeat	0.0038	0.0046
The permeability of a dense untreated sample (cm/s)		0.0067	
Permeability reduction percentage	First Repeat	37.3	38.8
	Second Repeat	29.9	46.3
	Third Repeat	43.3	32.8
Average percentage reduction		36.82	39.3

به طور کلی با گذشت زمان، کاهش در نفوذپذیری نمونه به دلیل افزایش تشکیل کریستال‌ها  $\text{CaCO}_3$  بیشتر می‌شود، اما پس از گذشت زمانی معین فعالیت باکتریایی کم شده و کاهش در نفوذپذیری نیز کمتر می‌شود.

با توجه به نتایج حاصل شده از نمونه‌های تیمار شده، کاهش نفوذپذیری از ۱۴ روز تا ۲۸ روز تغییر چندانی نداشته است و فعالیت باکتریایی نیز از ۱۴ روز تا ۲۸ روز کاهش یافته است.

کریستال‌های تشکیل شده ریزتر و یکنواخت‌تر بین ذرات تشکیل می‌شود. شکل ۱۰ تصاویر SEM نمونه‌ی متراکم، ۰/۲۵ مولار، ۲۸ روزه را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است  $\text{CaCO}_3$  کمتری نسبت به نمونه‌ی قبل تشکیل شده است.

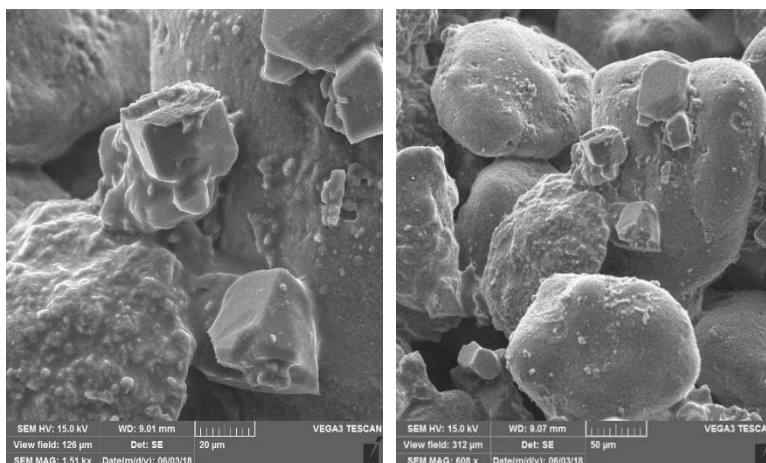
برخی نمونه‌ها در این دانشگاه گرفته شد. تصویر SEM نمونه‌ی سست، ۱ مولار، ۲۸ روزه در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به شکل به دلیل تزریق محلول سیمانی با غلظت بالا، کریستال‌های  $\text{CaCO}_3$  درشت‌تر و به صورت تصادفی روی سطح ذرات و یا بین ذرات خاک تشکیل شده، در صورتیکه در نمونه با غلظت پایین محلول سیمانی،



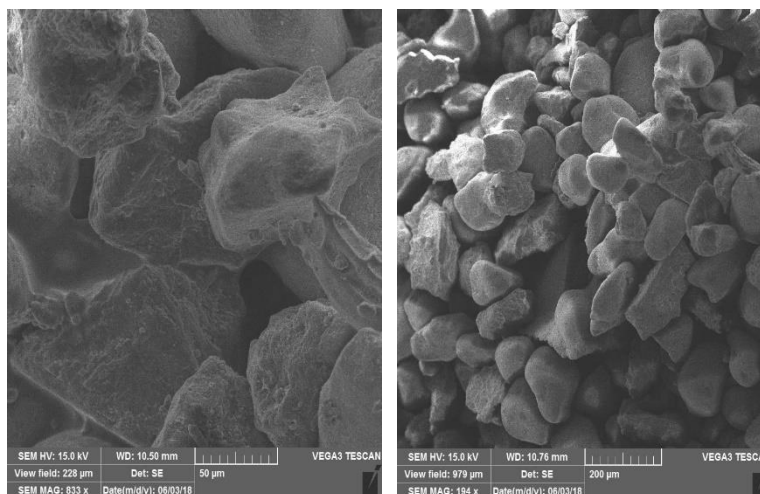
شکل ۷. نمونه‌ی کلوخه شده خاک پس از تیمار با روش MICP



شکل ۸. نمونه‌ی کلوخه شده خاک پس از تیمار به روش MICP



شکل ۹. تصاویر SEM نمونه‌ی سست، ۱ مولار، ۲۸ روزه؛ سمت راست: بزرگنمایی ۶۰۸ برابر، سمت چپ: بزرگنمایی ۱۵۱۰ برابر



شکل ۱۰. تصاویر نمونه‌ی تراکم، ۰/۲۵ مولار، ۲۸ روزه؛ سمت راست: بزرگنمایی ۱۹۴ برابر، سمت چپ: بزرگنمایی ۸۳۳ برابر

#### ۴. نتیجه‌گیری

۲۴ نمونه‌ی خاک ماسه‌ی کربناته با روش MICP تیمار شده و سپس آزمایش نفوذپذیری با بار ثابت بر روی آن‌ها انجام گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- به طور کلی MICP باعث کاهش متوسط بین ۳۶ تا ۵۸ درصد در نفوذپذیری خاک ماسه کربناته شده است.
- ۲- غلظت بالاتر محلول سیمانی در نمونه‌ها باعث کاهش بیشتری در نفوذپذیری نمونه‌ها می‌شود.
- ۳- نمونه‌های با تراکم کمتر، کاهش نفوذپذیری بیشتری را نشان دادند.
- ۴- فعالیت باکتریایی و کاهش نفوذپذیری در نمونه‌ها از ۱۴ روز به بعد کاهش یافته و تا روز ۲۸ تغییر بسیار کمی نموده است.

#### تشکر و قدردانی

مقاله حاضر حاصل پژوهش‌های انجام گرفته در پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد سرکار خانم زهرا حیدری نقدعلی دانشجوی کارشناسی ارشد رشته عمران-ژئوتکنیک دانشگاه یاسوج می‌باشد. نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر و قدردانی خود را از تمامی عزیزانی که در انجام این تحقیق همکاری نمودند (به ویژه سرکار خانم بهنام از آزمایشگاه علوم دام دانشکده کشاورزی دانشگاه یاسوج)، اعلام دارند.

## منابع

- روشن بخت، ک.، خامه چیان، م.، ساجدی، ر.، نیکودل، م.، ۱۳۹۴. بهسازی خاک‌های ماسه‌ای با رسوب زیستی کربنات کلسیم و فاکتورهای موثر بر آن: مجله علمی- پژوهشی انجمن زمین شناسی ایران، جلد هشتم، شماره ۱ و ۲.
- سرمست، م.، فرپور، م.، سرچشمه پور، م.، کریمیان اقبال، م.، ۱۳۹۳. تاثیر کلسیت زیستی بر برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های شنی: مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال هجدهم، شماره شصت و هشتم.
- Al Qabany, A., and Soga, K., 2013. Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils: *Géotechnique*, 63(4): 331–339.
- Cheng, L., Shahin, M. A., and Cord-Ruwisch, R., 2014. Bio-cementation of sandy soil using microbially induced carbonate precipitation for marine environments: *Géotechnique*, 64(12): 1010–1013.
- Chu, J., Stabnikov, V., Ivanov, V., 2012. Microbially induced calcium carbonate precipitation on surface or in the bulk of soil: *Geomicrobiology Journal*, 29(6):544-549.
- DeJong, J. T., M. B. Fritzges, and K. Nusslein. 2006. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132 (11): 1381–1392.
- DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C. & Nelson, D. C. 2010. Bio-mediated soil improvement. *Ecol. Engng* 36, No. 2, 197–210.
- Deng, W., Wang, Y., 2018. Investigating the factors affecting the properties of coral sand treated with microbially induced calcite precipitation: *Advances in civil Engineering*(8):1-6
- El Mountassir, G., Minto, J. M., Van Paassen, L. A., Salifu, E., Lunn, R. J., 2018. Chapter Two - Applications of Microbial Processes in Geotechnical Engineering: *Advances in Applied Microbiology*, 104: 39-91.
- Gowthaman, S., Mitsuyama, Sh., Nakashima, K., Komatsu, M., Kawasaki, S., 2019. Biogeotechnical approach for slope soil stabilization using locally isolated bacteria and inexpensive low-grade chemicals: A feasibility study on Hokkaido expressway soil, Japan: *Soils and Foundations*, Available online 6 March 2019.
- Metayer-Leverl, G. L., Castanier, S., Oriol, G., Loubière, J. F., Perthuisot, & J. P., 1999. Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestone in buildings and historic patrimony: *Sedimentary Geology*, 126 (1–4): 25–34.
- Mitchell, J. K. and Santamarina, J. C., 2005. Biological considerations in geotechnical engineering: *J Geotech GeoenvironEng*, 131(10): 1222-1233.
- Mujah, D., Shahin, M. A., and Cheng, L., 2016. State-of-the-art review of bio-cementation by microbially induced calcite precipitation (MICP) for soil stabilization: *Geomicrobiology Journal*. 34 (6): 524-537.
- Okwadha, G. D. & Li, J., 2010. Optimum conditions for microbial carbonate precipitation: *Chemosphere* 81, No. 9: 1143–1148.
- Rebata-Landa, V., 2007. Microbial activity in sediments: Effects on soil behavior: Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.
- Smith, A., Pritchard, M., Edmondson, A., Bashir, Sh., 2017. The reduction of the permeability of a lateritic soil through the application of microbially induced calcite precipitation: *Natural Resources* (8): 337-352
- Soon, N. W., Lee, L. M., Khun, T. C., and Ling, H. S., 2013. Improvements in engineering properties of soils through microbial-induced calcite precipitation: *KSCE Journal of Civil Engineering* 17 (4): 718–728.
- Van Paassen, L. A., 2009. Biogrout (ground improvement by microbially induced carbonate precipitation): Doctoral dissertation, Delft Univ. of Technology, Delft, The Netherlands.
- Van Paassen, L. A., Ghose, R., van der Linden, T. J. M., van der Star, W. R.L., and van Loosdrecht, M. C. M., 2010. Quantifying biomediated ground by improvement ureolysis: Large-scale biogrout experiment: *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 10.1061: 1721–1728.
- Whiffin, V. S., 2004. Microbial CaCO<sub>3</sub> precipitation for the production of biocement: PhD Thesis, Murdoch University, Australia p. 162.
- Whiffin, V. S., Van Paassen, L. A., and Harkes, M. P., 2007. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique: *Geomicrobiol. J.*, 24(5): 417–423.

- 
- Xiao, P., Liu, H., Xiao, Y., Stuedlein, A. W., Evans, T. M., 2018. Liquefaction resistance of biocemented calcareous sand: Soil Dynamic and Earthquake Engineering: 9-19
- Zhang, H. C., 2010. Experimental research of microbial-induced clogging in sands (in Chinese). Dissertation for the Master Degree. Beijing: Tsinghua University.