نشریه‌ی مکانیک سنگ
JOURNAL OF ROCK MECHANICS
دوره هشتم، شماره۲، تابستان ۱۴۰۳، صفحه ۸۹ تا ۹۹
https://doi.org/10.22034/IRSRM.2024.513131.1034

# بررسی تجربی تزریق زیستی در افزایش ظرفیت‌باربری ستون‌های سنگ‌ریزه‌ای

**فاطمه مهدوی ازناوله[۱]، علیرضا باغبانان[۲*]، هدیه کریمی گوغری[۳] و حمید هاشم الحسینی[۴]**
۱- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
۲- استاد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان،اصفهان، ایران.
۴- دانشیار مکانیک خاک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

**دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۰ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۳۱**
**(*نویسنده مسئول : bagh110@iut.ac.ir)**

**چکیده**

همواره از گذشته تا کنون احداث سازه‌ها بر روی خاک‌های سست و ضعیف مهندسان را با مشکلاتی مواجه کرده‌است که نیازمند بهبود مشخصات خاک است. در این بین پی سازه‌هایی که در معادن بر روی باطله ها و یا خاکهای سست اجرا می‌شوند، نیازمند پایدار سازی و بهبود دارند. از بین این روش‌ها می‌توان تزریق مواد شیمیایی و بیولوژیکی را نام برد. تزریق مواد شیمیایی مانند سیمان و آهک علاوه بر اثرات سمی، اغلب پرهزینه هستند. تثبیت میکروبی خاک (MICP) اخیرا به عنوان یک فناوری دوستدار محیط‌زیست به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. عوامل متعددی همچون دما، pH، نحوه تزریق و غلظت واکنش‌دهنده‌ها بر فرآیند MICP تأثیرگذار است که با توجه به مطالعات گذشته، محدود بهینه‌ای برای هریک در نظر گرفته شده‌است. در این مطالعه تأثیر فرآیند MICP بر روی ظرفیت باربری ستون‌های ماسه‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌است. این ستون‌ها به منظور تحکیم خاک‌های سست و بر روی پی‌هایی که نیاز به تحکیم دارند مانند پی سازه‌هایی که در معادن اجرا می‌شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. باکتری مورد استفاده باسیلوس پاستوری و خاک مورد مطالعه رس با پلاستیسیته بالا و ماسه ریزدانه بوده است که بهسازی بر روی ستون ماسه‌ای انجام شده است. نتایج نشان داد که استفاده از روش MICP بر افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست تأثیرگذار است . ظرفیت باربری نمونه بهسازی شده را نسبت به نمونه بهسازی نشده ۴/۳ برابر شده‌است که نشان می‌دهد رسوب کلسیت سبب چسباندن دانه‌های خاک شده و باعث افزایش مقاومت شده‌است.

**واژگان کلیدی** تثبیت میکروبی خاک ، ظرفیت باربری، محلول سمنتاسیون، تزریق زیستی، ستون ماسه‌ای

## ۱- مقدمه

فعالیت‌های معدنی مزایای اقتصادی بالقوه‌ای را برای کشورهای غنی از مواد معدنی ارائه می‌کند. اما با این حال عملیات معدن می‌تواند یک سری اثرات

ریزمحیطی[1] را داشته باشد که بخشی از آن به مدیریت باطله مربوط می‌شود. اجرای سازه‌های مهندسی نظیر سنگ‌شکن، آسیاب و یا خطوط انتقال بوسیله نوار نقاله بر روی خاک‌های سست و باطله‌های معادن نیازمند تحلیل پایداری و اطمینان از مناسب بودن خواص مکانیکی خاک با توجه به شرایط بارگذاری و شرایط محیطی می‌باشد. انتخاب روش مناسب برای پایدارسازی خاک‌های ضعیف با توجه به مسائل اقتصادی، سازگاری با محیط زیست، دسترسی مصالح و جنس خاک انتخاب می‌شود. روش‌های مختلفی برای پایدارسازی خاک‌های سست وجود دارد که از میان آن‌ها روش بیولوژیکی سازگار با محیط زیست است و درچند دهه اخیر به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌است [۱]. به منظور بهسازی خاک‌های سست و ضعیف از ستون‌های ماسه‌ای و سنگ‌ریزه‌ای استفاده می‌شود که این ستون‌ها در زیر پی‌هایی که نیاز به تحکیم دارند مانند سازه‌هایی که بر روی ابنیه‌های معدنی قرار می‌گیرند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این سازه‌ها به جای ستون‌های فولادی و بتنی از ستون‌های سنگ‌ریزه‌ای استفاده می‌شود که برای جلوگیری از شکم‌دادن این ستون‌ها می‌توان از روش تزریق زیستی استفاده کرد.

در خاک مقدار زیادی موجودات زنده از جمله باکتری و قارچ موجود است که این میکروارگانیسم‌ها می‌توانند $CO_2$، $N_2$، پلیمرهای زیستی و یا مواد معدنی زیستی تولید کنند. باکتری‌های تولیدکننده آنزیم اوره‌آز[2] نقش مهمی در فرآیند سیمانی کردن خاک دارند[۲].

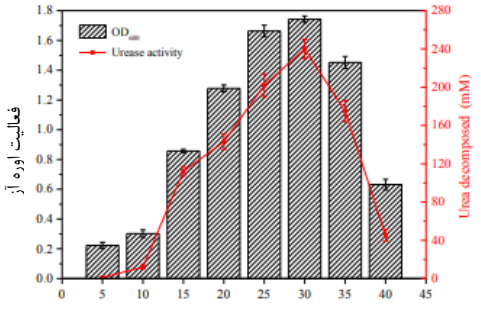
MICP[3] فرآیندی است که طی آن اوره به وسیله باکتری‌های دارای آنزیم اوره‌آز، هیدرولیز شده و منجر به تولید آمونیاک ($NH_3$) و کربن‌دی‌اکسید($CO_2$) می‌شود (۱). طی انحلال آمونیاک در آب، یون‌های هیدروکسیل ($OH^-$) و آمونیوم ($NH_4$) تولید شده که سبب افزایش pH محیط می‌شوند (۲). انحلال کربن‌دی‌اکسید نیز موجب ایجاد یون‌های هیدروژن ($H^+$) و یون‌های بی‌کربنات ($HCO3^-$) می‌شود (۳). طی افزایش pH و شرایط قلیایی یون‌های بی‌کربنات با یون‌های هیدروکسیل واکنش داده تا یون‌های کربنات ($CO_3^{2-}$) تشکیل شود (۴) و در حضور یون‌های کلسیم ($Ca^{2+}$)، کلسیت ($CaCO_3$) تشکیل شده و رسوب می‌کند تا به عنوان پل بین ذرات خاک عمل کند و آن‌ها را با یکدیگر پیوند دهد تا خواص مهندسی آن‌ها بهبود یابد(۵) [۳].

$$CO(NH)_2 + H_2O \rightarrow 2NH_3 + CO_2 \quad (۱)$$
$$2NH_3 + 2H_2O \rightarrow 2NH_4^+ + 2OH^- \quad (۲)$$
$$CO_2 + H_2O \rightarrow HCO_3^- + H^+ \quad (۳)$$
$$HCO_3^- + H^+ + 2OH^- \rightarrow CO_3^{2-} + 2H_2 \quad (۴)$$
$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3 \quad (۵)$$

عوامل متعددی بر روی فرآیند MICP تأثیر می‌گذارد ، محققان آزمایش‌های مختلفی بر روی تأثیر دما، غلظت واکنش‌دهنده، pH، نحوه تزریق و تراکم خاک انجام دادند که نتیجه‌گرفتند این عوامل در بهبود فرآیند MICP تأثیرگذار هستند [۴]. مواد مغذی منبع انرژی مورد نیاز برای رشد وفعالیت متابولیکی را فراهم می‌کنند که نشان می‌دهند که تهیه مواد مغذی مناسب و کافی برای باکتری‌های تولیدکننده کلسیت ضروری است. مواد مغذی رایج برای باکتری‌ها کربن‌دی‌اکسید[4]، منیزیم،کلسیم، فسفر، پتاسیم و آهن می‌باشد[۵، ۶]. باکتری‌هایی که در فرآیند MICP مورد استفاده قرار می‌گیرند باید قادر به هیدرولیز اوره باشند. معمولا این باکتری‌ها عبارتند از باسیلوس[5]، اسپورسارسینا[6] و لاکتوباسیلوس[7] می‌باشند که باکتری‌های هوازی با آزاد کردن کربن‌دی‌اکسید مقدار pH را افزایش می‌دهند. نتایج تحقیقات بر روی دما نشان می‌دهند که باکتری‌ها در بازه‌های دمایی مختلف، رفتارهای متفاوتی را از خود

[1] Microenvironment
[2] Urease
[3] Microbially-Induced Calcite Precipitation
[4] CO2
[5] Bacillus
[6] Sporosarcina
[7] loactobacillus

نشان می‌دهند. در دماهای پائین تا ۱۰° انجام متابولیسم طبیعی برای باکتری‌ها دشوار بوده و باکتری‌ها در حالت خفته قرار دارند که این دما برای نگهداری باکتری‌ها مناسب است. با افزایش دما تا ۳۰° فعالیت باکتری‌ها به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد و پس از این دما، باکتری اوره‌آز را به طور منفی تحت تأثیر قرار می‌گیرد و ساختار میکروبی به دلیل حرارت غیرفعال می‌شود که بر متابولیسم باکتری تأثیر می‌گذارد [۷، ۸]. شکل(۱) اثر دما بر رشد میکروبی را نشان می‌دهد که روند نزولی نمودار مربوط به بازه دمایی ۳۰° تا ۴۰° است.




شکل(۱) اثر دما بر رشد میکروبی [۸]

از دیگر عوامل تأثیرگذار، روش تزریق می‌باشد که محققین بیان کردند که هرچه تعداد لایه های خاک در هنگام تزریق بیشتر باشد، کلسیت به طور یکنواخت‌تر در سراسر نمونه توزیع می‌شود. تزریق محلول باکتری و محلول سمنتاسیون[8] نیز به روش‌های مختلف انجام می‌شود که در خاک‌های درشت‌دانه این دو محلول ابتدا ترکیب و سپس تزریق می‌شوند اما در خاک‌های ریزدانه ترکیب این دو محلول سبب ایجاد رسوب کلسیت و گرفتگی در سطح نمونه می‌شود که با تنظیم pH می‌توان ایجاد رسوب کلسیت را به تأخیر انداخت [۹، ۱۰]. زمان یکی از عوامل مهم در فرآیند MICP است. هر چه زمان بیشتری برای رشد باکتری‌ها و تشکیل رسوبات کلسیت در نظر گرفته شود، میزان تولید کلسیت و تقویت خاک افزایش می‌یابد. باکتری‌ها به مرور زمان قادر به تولید کلسیت در خاک خواهند بود، اما باید توجه داشت که در زمان‌های طولانی، ممکن است مصرف مواد مغذی تمام شود و فعالیت باکتری‌ها کاهش یابد [۱۱]. به عنوان یک فناوری دوست‌دار محیط‌زیست، رسوب کلسیت ناشی از فناوری میکروبی (MICP) به سرعت به عنوان یک تکنیک نوآورانه در دهه اخیر توسعه یافته‌است. فرآیند MICP به منظور کاهش روانگرایی [۱۲]، کاهش نفوذپذیری [۱۳]، کنترل گرد و غبار و فرسایش [۱۴، ۱۵]، جلوگیری از حرکات فلزات سنگین در خاک[۱۶]، تثبیت مواد زائد معادن و برای بهبود خواص مکانیکی خاک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش می‌تواند در خاک‌های مستعد زلزله و ارتعاشات از جمله خاک‌های ماسه‌ای و سیلتی برای افزایش مقاومت خاک در برابر لرزش‌های زلزله مؤثر باشند.

## ۲-مروری بر تحقیقات انجام‌شده

بهزادی‌پور و همکاران[9] (۲۰۲۴) اثر رسوب کلسیت را بر استحکام برشی، تولید فشار منفذی و روانگرایی باطله‌های شن و ماسه سیلتی معادن با یک سری آزمایش‌های برش مستقیم مورد بررسی قراردادند. آن‌ها نتیجه‌گرفتند که استفاده از این روش سبب کاهش روانگرایی شن و ماسه سیلتی می‌شود. زاویه اصطکاک نمونه تحت فرآیند MICP از ۲۷° به ۳۲/۵° افزایش می‌یابد که منجر به افزایش قابل توجه مقاومت برشی و کاهش انقباض حجمی نمونه‌ها می‌شود [۱۷]. محققان به منظور بهبود اثر رسوب کلسیت در تقویت باطله‌های معادن به آن سیترات سدیم اضافه کردند. عملکرد این ماده بر ظاهر کریستال و توزیع کلسیت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن مقدار مناسبی از سیترات سدیم می‌تواند منجر به افزایش بازده کلسیت بشود. نرخ رشد کلسیت تحت مقدار بهینه سیترات

[8] Cementation Solution

[9] Behzadipour et al

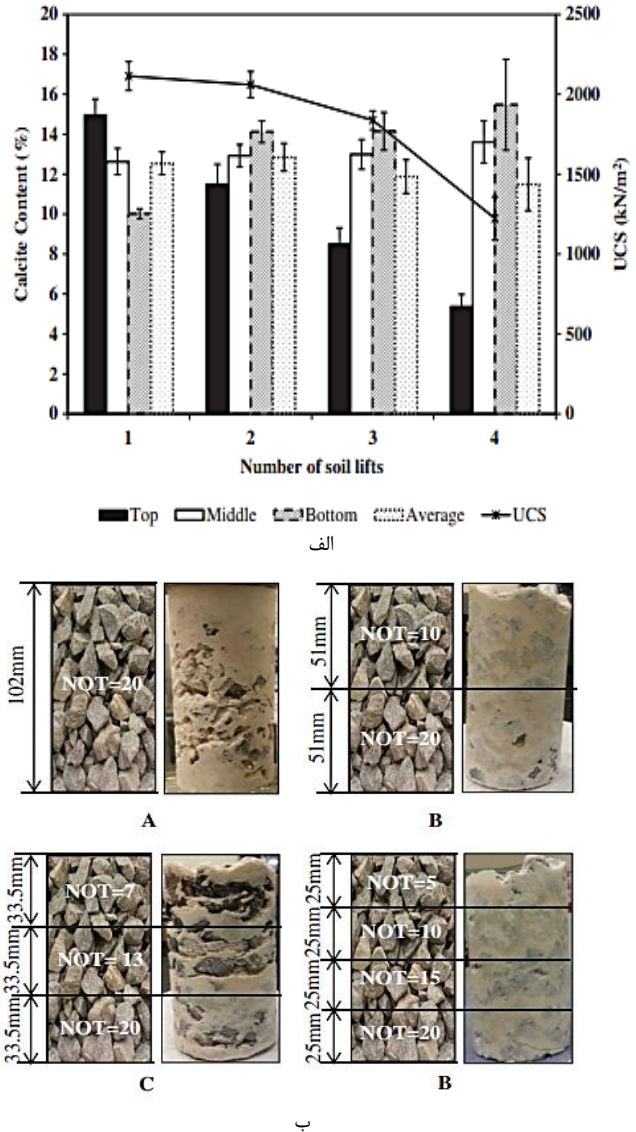
سدیم به ۲۲/۶ درصد رسید و تجزیه و تحلیل میکروسکوپی نشان داد که کریستال‌های کلسیت به طور یکنواخت میان باطله‌ها توزیع شد و تخلخل نمونه‌ها را کاهش داد. نتایج آزمایش‌های برشی و سه محوری نشان داد که افزودن سیترات سدیم به طورمؤثری چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و تنش ماکزیمم باطله‌های تقویت شده را افزایش داد [۱۸]. همچنین به منظور تثبیت و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از باطله‌های معدنی نیز روش MICP مورد استفاده قرار گرفته‌است که به کاهش آلودگی‌های ناشی از این باطله‌ها می‌پردازد. این روش با به‌کارگیری فعالیت باکتری خاص با ایجاد رسوبات کلسیت باعث تثبیت فلزات سنگین، کاهش تولید اسید، بهبود ساختار فیزیکی باطله‌های معادن و ایجاد لایه‌ای محافظ بر سطح آن‌ها می‌شود [۱۹]. محققان بیان کردند که اسپری کردن[10] محلول بر روی سطح، بهترین نتیجه را به‌دنبال داشت و باعث افزایش استحکام سطح مواد با حداقل اختلال در مواد شد و بیان‌کردند که این روش می‌تواند به طور گسترده برای کاربردهای مختلف مورد استفاده قرارگیرد [۲۰]. سونگ و همکاران[11] (۲۰۲۲) چندین مرحله تزریق زیستی را بر روی ماسه سنگ انجام دادند. آن‌ها بیان کردند که روش MICP سبب افزایش ۲/۲۹ برابری مقاومت فشاری تک‌محوری، ۱/۷۹ برابری مدول الاستیک و ۱/۷۷ برابری شاخص شکنندگی[12] شد. خواص مکانیکی کلی و نفوذپذیری ماسه‌سنگ عمدتا تحت تأثیر مواد معدنی سیمانی است که بر توزیع کلسیت اثر می‌گذارد و کارایی سیمان‌شدگی در ماسه‌سنگ را تقویت می‌کند [۲۱]. تحقیقات حاضر بر روی تنظیم باکتری‌ها بر افزایش کارایی فناوری MICP متمرکز شده‌است.

محققان کنترل pH، دمای کشت، انواع باکتری و غلظت را بررسی کردند. کریمی‌نیا و همکاران[13] (۲۰۲۳) به بررسی استفاده از ویناس که یک پلیمرم ضایعاتی و در دسترس است، پرداختند. این ماده اثربخشی و کارایی رسوب کلسیت ناشی از روش MICP را بر پایداری خاک افزایش می‌دهد.

در این راستا یک سری آزمایش برای بررسی رفتار رشد باکتری و میزان فعالیت اوره‌آز باکتری اسپورسارسینا انجام دادند. نتایج نشان داد که محیط کشت ویناس[14] و اوره بهترین جایگزین کشت معمولی شناخته شده‌است و باعث کاهش ۹۱ برابری محیط کشت با کشت معمولی نوترینت براث[15] و در عین حال بهبود پارامترهای مقاومت برشی خاک می‌شود [۲۲]. ون و همکاران[16] (۲۰۱۹) از نظارت بر فعالیت اوره‌آز از طریق تغییرات در رسانایی و مقادیر pH قبل از واکنش MICP بر حفظ کاربرد این واکنش استفاده کردند. نتایج نشان داد که رسانایی و مقدار pH پس از مخلوط کردن باکتری و محلول اوره‌آز به سرعت افزایش یافت، محدوده بهینه برای pH بین ۸/۸۲-۹/۰۲ به دست‌آمد [۲۳]. وانگ[17] نیز در مطالعه خود در مورد اثرات غلظت و فعالیت باکتری بر فرآیند MICP در دماهای مختلف نشان داد که فعالیت اوره‌آز در دماهای پائین کاهش نمی‌یابد، اما مقدار آن محدود است. دمای پائین سبب کاهش رشد باکتری‌ها و میزان رسوب کلسیت می‌شود. دماهای بالا اوره‌آز را غیرفعال کرده، اما تزریق مکرر مقدار کلسیت را افزایش داد [۲۴]. ماهاویش و همکاران[18] (۲۰۱۸) با استفاده از تزریق زیستی مقاومت سنگدانه‌های خردشده را که معمولا برای ستون سنگی مورد استفاده قرار می‌گیرد، مورد بررسی قرار دادند. برای انجام این آزمایش خاک را به چهاردسته یک لایه،

[10] spray
[11] Song et al
[12] Brittleness index
[13] Kariminia et al
[14] Vinasse
[15] Nutrient Broth
[16] Wen et al
[17] Wang
[18] Mahawish et al

دولایه، سه لایه و چهار لایه تقسیم کردند. محلول سمنتاسیون به هر دسته خاک ۲۰ مرحله تزریق شد. نتایج نشان داد که هرچه میزان لایه های خاک بیشتر شد، کلسیت به صورت ناهمگنی در سراسر نمونه توزیع شد و در قسمت‌های زیرین نمونه مقدار بیشتری کلسیت رسوب کرد که این نمونه‌ها مقاومت فشاری کمتری از خود نشان دادند. شکل(۲) مقاومت فشاری تک‌محوره در سه قسمت ستون و نحوه رسوب کلسیت در سراسر نمونه را نشان می‌دهد. نحوه توزیع اندازه ذرات نیز بر استحکام نمونه تأثیر دارد و محققان بیان کردند که درشت‌دانه‌هایی که حاوی درصد کمی ریزدانه(حدودا ۲۵ درصد) هستند توزیع یکنواخت‌تری از کلسیت دارند و در نتیجه مقاومت بیشتری نیز دارند [۹، ۲۵].




شکل(۲) الف) مقاومت فشاری تک‌محوری در سه قسمت ستون ب) نحوه رسوب کلسیت در سراسر نمونه [۹]

محققان مکانیزم استحکام ماسه بهسازی‌شده به روش MICP را با افزودن مواد مختلفی از جمله الیاف، پوزولان وبنتونیت بررسی کرد. نتایج نشان می‌دهد که این مواد به طور مؤثری رسوب کلسیت را افزایش می‌دهند، باعث

کاهش نفوذپذیری می‌شـــوند و اســـتحکام را افزایش می‌دهند، اما اســـتفاده بیش از حد از این مواد می‌تولند تأثیرمنفی داشته باشند [۲۶–۲۸].

لیو و همکاران[19](۲۰۲۳) منابع مختلف کلســـیم و اثرات یون‌های منیزیم را بر روی بهسازی ماسه آهکی با اســتفاده از روش MICP بررســی کردند. نتایج نشـان داد که اســتات کلسـیم دارای بالاترین میزان کلسـیت بوده و اســـتحکام تحت منابع مختلف کلســـیم پس از افزودن ۰/۰۵ مولار منیزیم افزایش یافت. آن‌ها بیان کردند که هنگامی که غلظت یون منیزیم به ۰/۰۵ مولار رســـید، استفاده از کلرید کلسیم به عنوان منبع کلسیم، بالاترین استحکام و محتوای کلسیت را نشان می‌دهد [۲۹].

## ۳- مواد و روش‌ها

### ۳-۱ سویه باکتری مورد استفاده

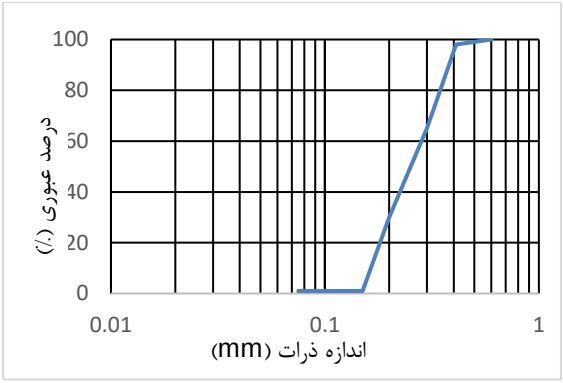
باکتری مورد استفاده در این تحقیق، از نوع اوره‌آز مثبت(از جنس باسیلوس پاستوری) است محققان از آن مکررا برای افزایش مقاومت در بهسازی بیولوژیک استفاده کرده‌اند. این باکتری از مرکز کلکسیون قارچ و باکتری ایران به صورت لیوفیلیزه تهیه شده‌است.

### ۳-۲ محلول سمنتاسیون

اوره و کلسـیم کلراید به عنوان مواد سـیمانی‌کننده که با اوره هیدرولیز شـــده، واکنش می‌دهد و ســـبب تشـکیل رسـوب کلسـیت می‌شـود. اوره و کلسـیم کلراید مواد اصلی برای تشـکیل رسـوب کلسـیت هسـتند و تأثیر مستقیمی بر رسوب کلسیت و سرعت واکنش‌ها دارد که باید به اندازه کافی در محیط وجود داشـــته‌باشـــند تا واکنش‌های لازم جهت ایجاد کلسیت انجام شود. در این مطالعه، غلظت هر یک از مواد با توجه به مطالعات پیشـین برابر یک مولار در نظر گرفته‌شد و برای ساخت محلول ســمنتاســیون مقدار وزنی هریک از این مواد با توجه به وزن مولی آن‌ها محاسـبه شـده‌اسـت. اوره یک ترکیب آلی با فرمول شـیمیایی$(CO(NH2)2$ اســت که نخسـتین بار در سـال ۱۷۷۳ میلادی توسـط شـیمیدان فرانسوی به نام هیلاری رائول کشف شد. کلرید کلسیم در فرآیند رسوب کلسیت ناشی از فعالیت میکروبی برای تأمین یون‌های کلســـیم مورد نیـاز برای انجام واکنش استفاده می‌شود.

### ۳-۳ خاک مورد استفاده

خاک مورد اســـتفاده در این تحقیق از نوع ماســـه بددانه بندی شـــده و رس با حد روانی بالا می‌باشـــد که شـکل(۳) منحنی دانه بندی ماســه اســتفاده شـــده در سـتون‌سـنگی را نشـان می‌دهد. مشـخصات مصالح مورد استفاده نیز در جدول (۱) ارائه شده‌است.




شکل(۳)منحنی دانه‌بندی مصالح استفاده‌شده در ستون سنگی

جدول(۱)مشخصات مصالح مورد استفاده

| نوع خاک | SP | CH |
|---|---|---|
| حد خمیری | – | ۵۳/۳ |
| حد روانی | – | ۲۵/۹ |
| وزن‌مخصوص $g/cm^3$ | ۱/۷ | ۱/۶ |
| چگالی | ۲/۷ | ۲/۶ |

### ۳-۴ روش انجام آزمایش

همانطور که از مطالعات پیشـــین مشـــاهده شـــد، تحقیقاتی در زمینه بهســـازی خاک‌ها به روش MICP انجام شـــده‌اســـت. محققین بیان کردند که این روش اقتصـادی، مقرون‌به‌صـرفه و دوسـت‌دار محیط‌زیسـت می‌باشـــد. عواملی چون دما، pH، نوع باکتری و نحوه

[19] Lv et al

تزریق بر روند آزمایش تأثیر می‌گذارد. با توجه به مطالعات بررسی‌شده، رشد باکتری در دمای ۲۵-۳۰ درجه سانتی‌گراد و pH حدودا ۷-۸ در بهینه‌ترین مقدار خود قرار دارد. روش MICP برای درشت‌دانه کاربرد بیشتری دارد. باکتری مورد استفاده در اکثر مطالعات باسیلوس پاستوری و اسپورسارسینا پاستوری بوده‌است. در این مطالعه با توجه به بازده کم ریزدانه‌ها به بهسازی سطح بستر با استفاده از ستون ماسه‌ای تثبیت‌شده به روش MICP با استفاده از باکتری باسیلوس پاستوری پرداخته شده‌است. خاک رس مورد استفاده شده با تراکم ۸۰ درصد به صورت لایه‌های ۵ سانتی‌متری پر شد و سپس محل ستون بیولوژیک به قطر ۵ سانتی‌متر خالی‌شد و با استفاده از فیلم رادیوگرافی و خاک ماسه‌ای، ستون با دانسیته ۵۵ درصد پرشد. در این تحقیق، نسبت ارتفاع به قطر ستون ۲ درنظر گرفته‌شده است. ابتدا محلول باکتری و محلول سمنتاسیون ۱/۵ مولاربه نمونه تزریق شدند و پس از ۱۶ ساعت محلول تثبیت کلسیم کلرید ۰/۰۵ درصد تزریق شد. یک ساعت پس از تزریق، فیلم رادیوگرافی خارج‌شد و به نمونه‌ها ۷ روز فرصت عمل‌آوری داده‌شد. در مرحله آخر بارگذاری تا ثبت نشست ۳ سانتی‌متر ثبت شد. لازم به توضیح است که مقدار نشست نمونه دو ثبات (گیج) اندازه گیری شده است. یک گیج فشار را ثبت کرده و گیج دیگر اندازه گیری میزان نشست، بر روی نمونه تحت بار قرار داده شد تا میزان نشست خاک را مورد ارزیابی قرار دهد. شکل(۴) روند انجام این تحقیق را نشان می‌دهد.

(الف)

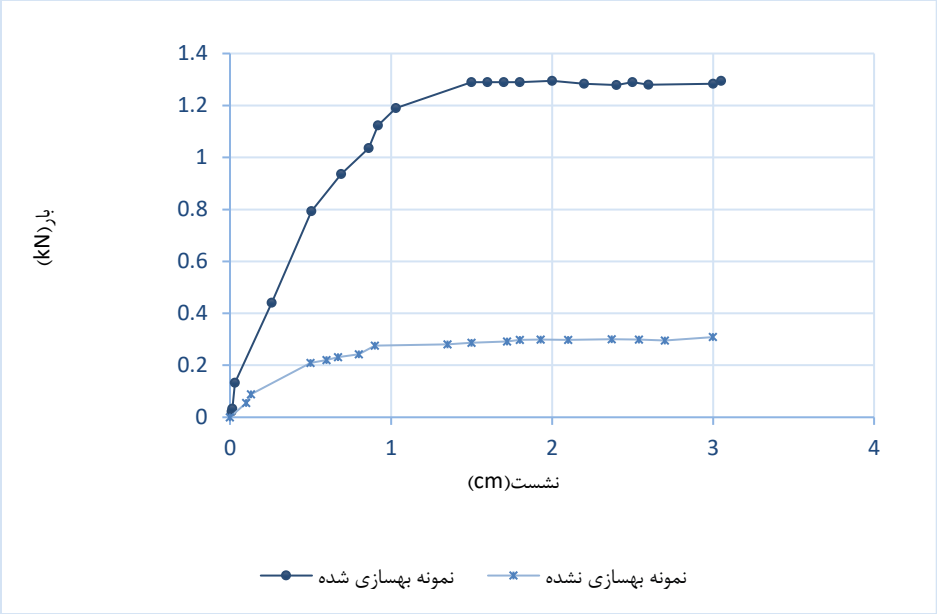
(ب)

(ج)

شکل(۴) الف) جعبه آزمایش ب) دستگاه بارگذاری ج) ستون ماسه‌ای بهسازی‌شده پس از بارگذاری

از مقایسه نتایج آزمایش نمونه بهسازی‌شده بیولوژیک با نمونه بهسازی‌نشده می‌توان نتیجه‌گرفت که روش MICP به مقدار قابل توجهی ظرفیت باربری خاک را افزایش داده‌است. همچنین در کاهش نشست نیز تأثیرگذار است. این امر به علت رسوب کلسیت ناشی از فعالیت باکتری‌های اوره‌آز بوده‌است که سبب چسباندن دانه‌های خاک می‌گردد. این آزمایش‌ها در یک نسبت طول به قطر یکسان انجام شده‌است. ظرفیت باربری نمونه بهسازی‌شده نسبت به نمونه بهسازی‌نشده ۴/۳ برابر شده که نشان‌دهنده تأثیر این روش بر افزایش مقاومت می‌باشد. شکل(۵) نتایج حاصل از بارگذاری تا نشست ۳ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. باید توجه داشت که به منظور مقایسه دقیق اثر سیمان زیستی بر باربری خاک، میزان ظرفیت باربری اندازه گیری شده در نمونه‌های مورد آزمایش تا یک نشست یکسان مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت که در این مشاهدات

بیشـــترین تغییر در شـــیب در زمان های اولیه بارگذاری می‌باشد.




شکل(۵) منحنی بار- نشست حاصل از بارگذاری بر روی نمونه بهسازی‌شده و بهسازی نشده

## ۴- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

هدف از انجام این تحقیق، بررســی ظرفیت باربری ستون ماسه‌ای بهسازی‌شده به روش زیستی درون خاک رسی می‌باشد. خاک مورد مطالعه ماسه ریزدانه و رس با پلاســتیســیته بالا بوده‌اســت. تزریق زیســتی به علت اقتصــادی بودن و ســازگار بودن با محیط زیســت برای بهســازی ســتون‌های ماســه‌ای، مورد اســتفاده قرار گرفته‌اســت. عوامل مختلفی همچون دما، pH، غلظت واکنش‌دهنده‌ها و نحوه تزریق و تراکم خاک بر روی این فرآیند، تأثیرگذار هستند که با توجه به مطالعات گذشته محدوده مناســب برای دما بین ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمده‌است. pH نیز در محدوده ۷-۸ بیشــترین تأثیر را بر رسوب کلسیت دارد. محققان بیان کردند که روش MICP بر روی خاک‌های درشــت‌دانه نسـبت به ریزدانه‌ها تأثیر بیشــتری دارد. به علت بازده پایین این روش بر روی ریزدانه‌ها، تزریق زیستی بر روی ستون ماسه‌ای انجام شد. ابتدا محلول باکتری و سپس محلول سمنتاسیون به نمونه تزریق شدند و پس از ۱۶ ســاعت محلول تثبیت نیز به نمونه تزریق شــد. نتایج بارگذاری بر نمونه پس از ۷ روز عمل‌آوری، نشان داد که ظرفیت باربری ۴/۳ برابر شد و نشست متناظر با مقدار بار یکسـان کاهش پیدا کرد. رسـوب کلسـیت ناشـی از فعالیت باکتری‌های اوره‌از باعث چســباندن دانه‌های خاک شده و فضای بین دانه‌ها را پرکرده‌است که سبب افزایش مقاومت خاک و کاهش نشســت در بار یکسـان نسبت به نمونه بهسازی نشده می‌شود.

## ۵- منابع


[1] Xiang, J., Liu, H., Chu, J., "Strength and permeability of bentonite-assisted biocemented coarse sand", No. July, 2021.

[2] Van Paassen, L.A., Daza, C.M., Staal, M., Sorokin, D.Y., van der Zon, W., van Loosdrecht, M.C.M., "Potential soil reinforcement by biological denitrification", *Ecological Engineering*, Vol. 36, No. 2, pp. 168–175, 2010.

[3] Mukherjee, S., Sahu, R.B., Mukherjee, J., Sadhu, S., "Application of microbial-induced carbonate precipitation for soil improvement via ureolysis", *Ground Improvement Techniques and Geosynthetics: IGC 2016 Volume 2*, pp. 85–94, 2019.

[4] Ng, W.-S., Lee, M.-L., Hii, S.-L., "An overview of the factors affecting microbial-induced calcite precipitation and its potential application in soil improvement", *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 188–194, 2012.

[5] Seifan, M., Berenjian, A., "Application of microbially induced calcium carbonate precipitation in designing bio self-healing concrete", *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, Vol. 34, pp. 1–15, 2018.

[6] Mitchell, J.K., Santamarina, J.C., "Biological considerations in geotechnical engineering", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol. 131, No. 10, pp. 1222–1233, 2005.

[7] Yi, H., Zheng, T., Jia, Z., Su, T., Wang, C., "Study on the influencing factors and mechanism of calcium carbonate precipitation induced by urease bacteria", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 564, No. February, pp. 126113, 2021.

[8] Xiao, Y., Wang, Y., Wang, S., Evans, T.M., Stuedlein, A.W., Chu, J., Nh, Þ., "Homogeneity and mechanical behaviors of sands improved by a temperature-controlled one-phase MICP method", *Acta Geotechnica*, Vol. 16, No. 5, pp. 1417–1427, 2021.

[9] Journal, A.I., Mahawish, A., Bouazza, A., Gates, W.P., "Strengthening crushed coarse aggregates using", *Geomechanics and Geoengineering*, Vol. 00, No. 00, pp. 1–12, 2018.

[10] Wu, C., Ph, D., Chu, J., Ph, D., Cheng, L., Ph, D., Wu, S., Ph, D., "Biogrouting of Aggregates Using Premixed Injection Method with or without pH Adjustment", Vol. 31, No. 9, pp. 1–6, 2019.

[11] Al Qabany, A., Soga, K., Santamarina, C., "Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 138, No. 8, pp. 992–1001, 2012.

[12] Donnell, S.T.O., Asce, M., Jr, E.K., Asce, F., Rittmann, B.E., Asce, M., "MIDP : Liquefaction Mitigation via Microbial Denitrification as a Two-Stage Process . II : MICP", Vol. 143, No. 12, pp. 1–12, 2018.

[13] Zamani, A., Montoya, B.M., *Permeability reduction due to microbial induced calcite precipitation in sand*, 2016.

[14] Meng, H., Gao, Y., He, J., Qi, Y., Hang, L., "Microbially induced carbonate precipitation for wind erosion control of desert soil: Field-scale tests", *Geoderma*, Vol. 383, pp. 114723, 2021.

[15] Salifu, E., MacLachlan, E., Iyer, K.R., Knapp, C.W., Tarantino, A., "Application of microbially induced calcite precipitation in erosion mitigation and stabilisation of sandy soil foreshore slopes: A preliminary investigation", *Engineering Geology*, Vol. 201, pp. 96–105, 2016.

[16] Qiao, S., Zeng, G., Wang, X., Dai, C., Sheng, M., Chen, Q., Xu, F., Xu, H., "Multiple heavy metals immobilization based on microbially induced carbonate precipitation by ureolytic bacteria and the precipitation patterns exploration", *Chemosphere*, Vol. 274, pp. 129661, 2021.

[17] Behzadipour, H., Sadrekarimi, A., "Effects of microbially induced calcite precipitation on static liquefaction behavior of a gold tailings sand", *Biogeotechnics*, Vol. 2, No. 4, pp. 100097, 2024.

[18] Hu, L., Zheng, H., Wu, L., Zhang, Z., Yu, Q., Tian, Y., He, G., "Experimental Study on the Effect of an Organic Matrix on Improving the Strength of Tailings Strengthened by MICP", 2023.

[19] Proudfoot, D., Brooks, L., Gammons, C.H., Barth, E., Bless, D., Nagisetty, R.M., Lauchnor, E.G., "Investigating the potential for microbially induced carbonate precipitation to treat mine waste", *Journal of hazardous materials*, Vol. 424, pp. 127490, 2022.

[20] Rodin, S., Champagne, P., Mann, V., "Pilot-scale feasibility study for the stabilization of coal

tailings via microbially induced calcite precipitation", *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 30, No. 4, pp. 8868–8882, 2023.

[21] Song, C., Elsworth, D., Jia, Y., Lin, J., "Permeable rock matrix sealed with microbially-induced calcium carbonate precipitation: Evolutions of mechanical behaviors and associated microstructure", *Engineering Geology*, Vol. 304, pp. 106697, 2022.

[22] Kariminia, T., "Soil microbial improvement using enriched vinasse as a new abundant waste", 2023.

[23] Wen, K., Li, Y., Liu, S., Bu, C., Li, L., "Evaluation of MICP treatment through EC and pH tests in urea hydrolysis process", *Environmental Geotechnics*, Vol. 8, No. 4, pp. 274–281, 2019.

[24] Wang, Y., Wang, Y., Soga, K., DeJong, J.T., Kabla, A.J., "Microscale investigations of temperature-dependent microbially induced carbonate precipitation (MICP) in the temperature range 4–50 C", *Acta Geotechnica*, Vol. 18, No. 4, pp. 2239–2261, 2023.

[25] Mahawish, A., Bouazza, A., Gates, W.P., "Effect of particle size distribution on the bio-cementation of coarse aggregates", *Acta Geotechnica*, 2017.

[26] XIONG, Y., DENG, H., LI, J., CHENG, L., ZHU, W., "Experimental study of MICP-treated sand enhanced by pozzolan", *Rock and Soil Mechanics*, Vol. 43, No. 12, pp. 8, 2023.

[27] Liang, S., Xiao, X., Wang, J., Wang, Y., Feng, D., Zhu, C., "Influence of fiber type and length on mechanical properties of MICP-treated sand", *Materials*, Vol. 15, No. 11, pp. 4017, 2022.

[28] Ma, G., He, X., Jiang, X., Liu, H., Chu, J., Xiao, Y., "Strength and permeability of bentonite-assisted biocemented coarse sand", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 58, No. 7, pp. 969–981, 2021.

[29] Lv, C., Tang, C.-S., Zhang, J.-Z., Pan, X.-H., Liu, H., "Effects of calcium sources and magnesium ions on the mechanical behavior of MICP-treated calcareous sand: experimental evidence and precipitated crystal insights", *Acta Geotechnica*, Vol. 18, No. 5, pp. 2703–2717, 2023.

JOURNAL OF ROCK MECHANICS

# Experimental Investigation of Biological Injection for Enhancing Bearing Capacity of Gravel Columns

**F. Mahdavi Aznavele[1]; A. Baghbanan[2*]; H. Karimi Googheri [3]; H. Hashemolhosseini[4]**
**1- PhD Student, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.**
**2- Prof. of Rock Mechanics, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.**
**3- MSc Student, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.**
**4- Assoc. Professor of Geotechnique, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.**

**Received: 10. July. 2024 Accepted: 21. September. 2024**
**(*Corresponding author: bagh110@iut.ac.ir)**

***Keywords***

**Soil Microbial stabilization, bio-injection, Cementation solution, bearing capacity, sandstone**

***Final English Extended Abstract***

From the past to the present, the construction of structures on soft and weak soils has consistently posed challenges for geotechnical engineers, requiring the improvement of soil properties. Specifically, foundations for structures built on tailings or weak soils in mining areas require stabilization and improvement. Among various methods for soil improvement, the injection of chemical and biological materials stands out. The injection of chemicals like cement and lime, while effective, is often costly and can have toxic effects. Recently, the process of microbial-induced calcite precipitation (MICP) has emerged as a widely used, environmentally friendly technology for soil stabilization. Several factors, including temperature, pH, injection method, and reactant concentration, influence the MICP process. Based on previous studies, optimal limits for each of these factors have been established to achieve the best results. This study specifically investigates the effect of the MICP process on the bearing capacity of sand columns. These columns are commonly used to stabilize soft soils, particularly for foundations that require reinforcement, such as those used in mining operations. In this study, *Bacillus pasteurii* was used as the bacterium for the MICP process, and the soil investigated consisted of high-plasticity clay and fine sand. The treatment was applied to the sand columns. The results indicated that the MICP process significantly increased the bearing capacity and reduced settlement. The bearing capacity of the treated sample was 4.3 times greater than that of the untreated sample, indicating that calcite precipitation helps bind soil particles together, thereby increasing the soil's overall resistance.