[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.2.3]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.29]

بررسی یک روش نوین تزریق برای خاک‌های ماسه‌ای به‌سازی شده به‌روش بیولوژیکی

مهرداد امامی تبریزی*، بهاره محمد سیدی؛
دانشگاه صنعتی سهند تبریز، دانشکدهٔ مهندسی عمران

تاریخ: دریافت ۹۵/۰۸/۲۸ پذیرش ۹۶/۰۳/۲۷

چکیده

از مشکلات عمده‌ای که مانع استفاده از روش به‌سازی بیولوژیکی در پروژه‌های عمرانی می‌شود، حجم وسیع مواد مصرفی و هزینه‌های زیاد ناشی از آن است. در این تحقیق کارآیی روش تزریق جدید با هدف کاهش حجم مواد مصرفی به شیوه‌ای مؤثر بررسی شده است. نمونه‌های آماده شده از لحاظ ریزساختار، رفتار مقاومتی و میزان رسوب آزمایش شده‌اند. نوع رسوب تشکیل شده بر اساس تجزیهٔ X-Ray و نحوهٔ اتصال پیوندها با استفاده از تصاویر SEM ارزیابی شده‌اند. بررسی میزان همگنی نمونه‌ها با اندازه‌گیری میزان رسوب در طول نمونه انجام شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که نمونه‌ها همگنی نسبتاً خوبی در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده با روش تزریق متداول دارند. همین طور آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) روی نمونه‌های به‌سازی شده انجام و نتایج آن با نمونه‌های ساخته شده با روش تزریق متداول مقایسه شده است. در نهایت مشخص شد که روش تزریق پیشنهادی علاوه بر کاهش حجم و هزینهٔ مواد مصرفی، منجر به ایجاد نمونه‌ای نسبتاً همگن با مقاومت فشاری قابل قبول می‌شود.

واژه‌های کلیدی: به‌سازی بیولوژیکی، روش تزریق، مقاومت فشاری تک‌محوره، تجزیهٔ X-Ray، تصاویر SEM

*نویسنده مسئول m.emami@sut.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.2.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.29]

مقدمه

همه ساله بیش از ٤٠٠٠٠ پروژه به‌سازی خاک در دنیا با هزینه‌ای بالغ بر حدود ٦ میلیارد دلار بر سال انجام می‌شود. بیش‌تر تکنیک‌های به‌سازی خاک شامل اعمال انرژی مکانیکی و یا افزودن مواد ساخت بشر می‌شود که این فرآیندها خود مستلزم صرف هزینه شده‌اند [١]. سیمانتاسیون مصنوعی، مانند افزودن سیمان پرتلند که با افزایش بسیار خاصیت قلیایی در خاک همراه است، می‌تواند سبب آسیب زدن به ساختار خاک شود [٢]. بسیاری از گروت‌های شیمیایی سمی هستند و می‌توانند برای سلامتی انسان تأثیرات جدی داشته باشند [٣].

رسوب باکتریایی کربنات کلسیم[1] (MICP) روش بهسازی دوست‌دار محیط زیست است که با استفاده از فعالیت اوره‌آزی میکروارگانیزم‌ها سبب اتصال دانه‌های خاک به یک‌دیگر می‌شود [٤]. اساس روش ذکر شده بر پایه این سه گام استوار است:

١. هیدرولیز اوره به‌وسیلهٔ فعالیت اوره‌آز میکروارگانیزم و تشکیل آمونیوم و یون کربنات:

$$CO(NH_2)_2 + H_2O \xrightarrow{\text{urease}} 2NH_4^+ + CO_3^{2-} \qquad (١)$$

٢. انجام واکنش میان یون کربنات و یون کلسیم و رسوب بلورهای کربنات کلسیم:

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3 \qquad (٢)$$

٣. اتصال دانه‌های ماسه به‌وسیلهٔ کربنات کلسیم.

یکی از چالش‌های اساسی در استفاده از روش MICP برای اهداف به‌سازی، استفاده از روش تزریق مناسب است. برای مثال ویفن[2] و همکاران، از روش تزریقی شامل ١/٥ برابر حجم حفرات خاک، محلول باکتری و١/٥ برابر حجم حفرات خاک محلول سیمانتاسیون استفاده کردند[٥]. نتایج تحقیقات این محققان ایجاد رسوب ناهمگن در طول نمونه را نشان داد. التاودی[3] در ساخت نمونه‌های خود ٤ برابر حجم حفرات خاک محلول باکتری و ١/١ برابر حجم حفرات خاک، محلول سیمانتاسیون به نمونه‌های خود تزریق کرد. او هم‌چنین

1. Microbially induced carbonate precipitation
2. whiffin
3. Al-Thawadi

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.2.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.29]

اثرتزریق محلول باکتری و سیمانتاسیون را به‌صورت جداگانه و آمیخته بررسی کرد و به این نتیجه رسید که تزریق جداگانه محلول باکتری و سیمانتاسیون نمونه همگن‌تری نسبت به تزریق آمیخته ایجاد می‌کند [٦]. مارتینز[1] و همکاران تأثیر ایجاد وقفه در تزریق محلول‌های باکتری و سیمانتاسیون (۱/۵ برابر حجم حفرات از هر کدام با وقفه ۲/۵ ساعته) را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که وقفه سبب ایجاد رسوب همگن‌تری نسبت به تزریق پیوسته می‌شود [۷]. همهٔ روش‌های ذکر شده نیازمند تزریق حجم زیادی از محلول سیمانتاسیون و باکتری (بین ۳ تا ۵/۱ برابر حجم حفرات خاک) به خاک است. این حجم تزریق سبب افزایش هزینه به‌سازی می‌شود. هم‌چنین یک روش تزریق کارآمد باید منجر به ساخت نمونه‌ای همگن شود.

در تحقیق حاضر روشی جدید بر اساس تئوری جریان همرفتی برای تزریق محلول باکتری و سیمانتاسیون معرفی شده است. نمونه‌هایی بر اساس روش مذکور ساخته شدند و از لحاظ مقاومت و میزان همگنی بررسی شدند و با نمونه‌های ساخته شده به‌روش تزریق متداول مقایسه شدند. نهایتاً میزان موفقیت روش جدید پیشنهادی ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

باکتری و محیط کشت استفاده شده

باکتری گرم مثبت *Sporosarcina Pasteurii* با شمارهٔ 1645 (DSM 33) از مرکز منطقه‌ای قارچ‌ها و باکتری‌های صنعتی ایران (PTCC) تهیه شد. برای کشت باکتری از محیط کشت مایع شامل یست اکسترکت[2] $20\ gr\ L^{-1}$، آمونیوم کلرید[3] $10\ gr\ L^{-1}$ و نیکل کلرید[4] $10\ \mu M$ در pH برابر ۸/۵ استفاده شده است. محیط کشت مورد نظر اتوکلاو[5] شده، سپس باکتری اضافه شد و به‌مدت ۲٤ ساعت در دمای ۳۰ ℃ انکوبه شد و سپس برای استفاده در

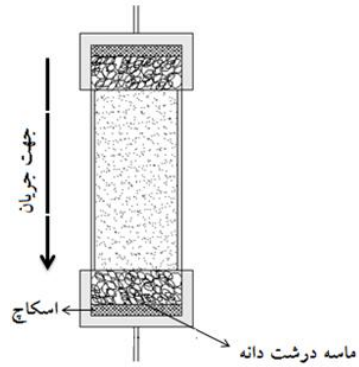
1. Martinez
2. Yeast extract
3. Ammonium chloride
4. Nickel chloride
5. Autoclave

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.2.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.29]

دمای ٤ ℃ ذخیره شد. سوسپانسیونی که از باکتری تهیه شده شاخص رشد باکتری در طول موج[1] (OD600) اندازه‌گیری شده و میزان فعالیت آنزیم باکتری با کونداک‌متر سنجیده شد.

ساخت ستون ماسه

برای ساخت ستون ماسه قالب‌هایی از لوله با جنس PVC به قطر داخلی ۵ cm و طول ۱۲ cm تهیه شد. قالب‌ها به‌ترتیب با یک لایه ۱ cm شن و یک لایه اسکاچ در پایین و بالای نمونه و یک لایه ماسه در قسمت میانی مطابق شکل شماتیک ۱ پر شد. برای جریان مطابق شکل ۱ از بالا به پایین در نظر گرفته شده است. شکل ۲ نمودار دانه‌بندی و جدول ۱ خصوصیات فیزیکی ماسه استفاده شده در این تحقیق را طبق استاندارد ASTM D 854 نشان می‌دهد. یک پمپ پراستالتیک به محل تزریق بالای قالب برای تنظیم نرخ جریان ورودی متصل شد. همهٔ آزمایش‌ها در دمای ۲±۲۰ انجام شد.



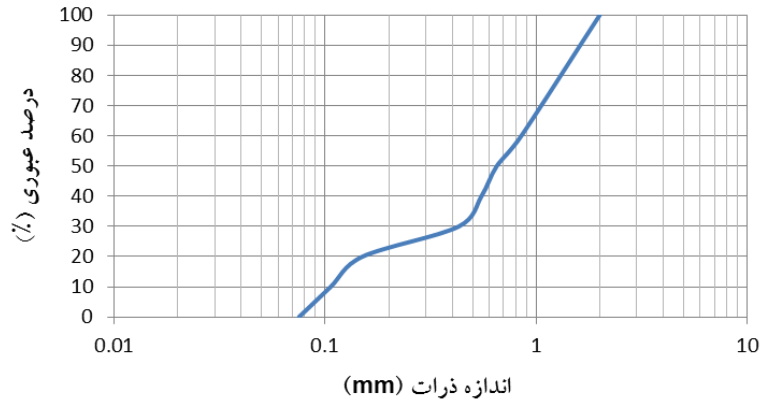
شکل ۱. شمای کلی ستون ماسه استفاده شده

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی خاک ماسه‌ای استفاده شده

نوع خاک	چگالی ویژه (Gs)	دانسیته خشک (gr cm-۳)	نسبت منافذ	D۱۰	D۳۰	D٦۰
SW	۲/٦	۱/٤۷	٪٤۱	۰/۱۱ mm	۰/٤۳ mm	۰/۸۵ mm

1. Optical density

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.2.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.29]



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی خاک ماسه‌ای استفاده شده

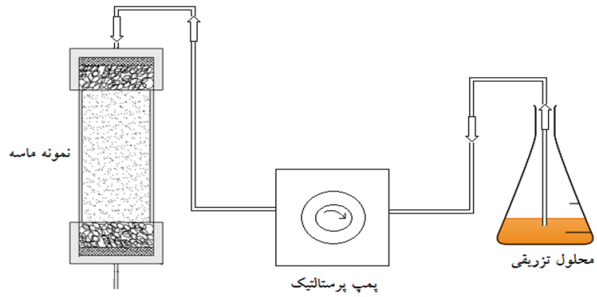
روش تزریق

در این تحقیق از روشی نوین تزریق چند مرحله‌ای برای تزریق محلول باکتری و سیمانتاسیون بهره گرفته شده است. پس از شستشوی ستون ماسه با آب مقطر تزریق محلول باکتری و سیمانتاسیون انجام شده است. در انجام فرآیند تزریق ابتدا به‌اندازه ٪۲۵ حجم حفرات خاک، محلول باکتری وارد محیط خاکی شد. پس از ایجاد وقفه‌ای ۲ ساعته در انجام فرآیند تزریق، به اندازهٔ ۲۵٪ حجم حفرات خاک، محلول سیمانتاسیون شامل محلول ۱/۵ مولار اوره و ۳ مولار کلسیم کلرید[1] به نمونه خاکی تزریق شد. مجدداً پس از ایجاد وقفه‌ای دوساعته در فرآیند تزریق، ۲۵٪ حجم حفرات خاک، محلول باکتری و ۲۵٪ حجم حفرات خاک، محلول سیمانتاسیون مشابه مراحل ذکر شده در بالا وارد نمونه شد. همه محلول‌ها با استفاده از پمپ پرستالتیک[2] با سرعت $۱۰ mL\ min^{-1}$ به محیط متخلخل خاکی تزریق شد. شکل ۳ شمای کلی تزریق و جدول ۲ خلاصه‌ای از برنامه تزریق استفاده شده در پژوهش را نشان می‌دهد. ٤٨ ساعت پس از پایان فرآیند تزریق نمونه‌ها از قالب خارج شد و پس از خشک شدن آزمایش شد.

1. Calcium chloride
2. Peristaltic Pump

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.2.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.29]

به‌منظور فراهم آمدن امکان مقایسه روش تزریق نوین ارائه شده در این تحقیق با روش‌های تزریق متداول، نمونه‌هایی با استفاده از تزریق یک مرحله‌ای محلول باکتری و سیمانتاسیون ساخته شد. در ساخت این نمونه‌ها ابتدا به‌اندازهٔ ۱/۵ برابر حجم حفرات خاک محلول باکتری و سپس به همان میزان محلول سیمانتاسیون به ستون‌های ماسه تزریق شد (جدول ۳). سایر شرایط ساخت نمونه به این روش، مشابه روش ذکر شده مذکور در نظر گرفته شد.



شکل ۳. شکل شماتیک روش تزریق استفاده شده

روش‌های بررسی

برای بررسی ریزساختار نمونه‌ها، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی[1](SEM) و تجزیه پراش اشعه ایکس[2](XRD) استفاده شد. برای تهیهٔ تصاویر SEM ابتدا لایه‌ای نازک از نمونه به‌سازی شده با روش تزریق جدید برش داده شد و سپس بررسی شد. به‌منظور شناسایی نوع رسوب تشکیل شده در ماسه به‌وسیلهٔ آزمایش XRD، ابتدا ۳ گرم از از نمونه به‌سازی شده بر اساس استاندارد ASTM D 5380-09، کوبیده شد و در معرض بمباران پرتو اشعه ایکس قرار گرفت. پس از انجام آزمایش، پیک‌های به‌دست آمده با الگوی پراش کلسیم کربنات در پژوهش‌های قبلی مقایسه شد [۸]. بررسی میزان کربنات کلسیم نمونه‌ها بر اساس تکنیک اسید شویی انجام شد [۹]. برای بررسی ویژگی‌های مقاومتی نمونه‌های

1. Scanning electron microscope
2 X-ray diffraction (XRD) analysis

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.2.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.29]

به‌سازی شده، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری[1]، بر اساس استاندارد ASTM D 2166 روی نمونه‌ها با سرعت ۱mm min^{-1} انجام گرفت.

جدول ۲. جزئیات برنامه تزریق جدید استفاده شده در تحقیق

مراحل تزریق	نام محلول	حجم تزریق (درصدی از حجم حفرات خاک)	میزان تزریق برای هر نمونه (mL)	سرعت جریان (mL min^{-1})	جزئیات محلول
مرحلهٔ ۱	باکتری	٪۲۵	۲۰ mL	۱۰	فعالیت* mM Urea ۳min^{-1}
مرحلهٔ ۲	سیمانتاسیون	٪۲۵	۲۰mL	۱۰	اوره ۱/۵ مولار+کلسیم‌کلرید ۳ مولار
مرحلهٔ ۳	باکتری	٪۲۵	۲۰mL	۱۰	فعالیت mM Urea ۳min^{-1}
مرحلهٔ ٤	سیمانتاسیون	٪۲۵	۲۰mL	۱۰	اوره ۱/۵ مولار+کلسیم‌کلرید ۳ مولار

***فعالیت اوره‌آزی باکتری**

جدول ۳. جزئیات برنامه تزریق متداول

مراحل تزریق	نام محلول	حجم تزریق (درصدی از حجم حفرات خاک)	میزان تزریق برای هر نمونه (mL)	سرعت جریان (mL min^{-1})	جزئیات محلول
مرحلهٔ ۱	باکتری	٪۱۵۰	۱۲۰ mL	۱۰	فعالیت* mM Urea min^{-1} ۳
مرحلهٔ ۲	سیمانتاسیون	٪۱۵۰	۱۲۰mL	۱۰	اوره ۱/۵ مولار+کلسیم‌کلرید ۳ مولار

نتایج و بحث

تجزیهٔ XRD و SEM

شکل ٤ نتایج تجزیه XRD نمونه خاک ماسه‌ای را قبل و بعد از به‌سازی نشان مدهد. بر اساس نتایج XRD، مقدار فراوانی نسبی کریستال‌های $CaCO_3$، با مقایسه نقاط پیک حداکثر، با نقاط پیک یک نمونه با ترکیب مشخص (کلسیت) انجم می‌شود [۱۰]. شکل ٤

1 Uniaxial compressive strength

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.2.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.29]

نتایج آزمایش XRD را روی ماسه قبل از به‌سازی (شکل ٤ الف) و بعد از به‌سازی (شکل ٤ ب) نشان می‌دهد. در شکل ٤ ج نقاط پیک ماسه قبل و بعد از به‌سازی استخراج شده و با الگوی پراش کلسیت مقایسه شده است. چنان‌که از شکل ٤ ج مشخص است قبل از به‌سازی مقدار کمی کلسیت در نمونه ماسه‌ای وجود داشته است(علامت‌های آبی‌رنگ). پس از انجام به‌سازی پیک‌های مربوط به کلسیت به‌شدت افزایش یافته است(داایره‌های سبزرنگ) که این مسئله نشان می‌دهد رسوبات تشکیل یافته در اثر به‌سازی بیولوژیکی بین دانه‌های خاک از نوع رسوب کربنات کلسیم (کلسیت) است.

شکل ۵ تصاویر SEM تهیه شده از ماسه به‌سازی شده را نشان می‌دهد. در فرآیند ایجاد رسوب کربنات کلسیم، تشکیل بیوفیلم و فوق اشباعیت محلی نقش کلیدی دارد. تشکیل بیوفیلم روی سطوح ذرات حاصل فعالیت آنزیمی باکتری‌ها در طی فرآیند بیولوژیک است [۱۱]. از سوی دیگر فعالیت آنزیمی باکتری‌ها منجر به فوق اشباعیت کربنات در فاز مایع می‌شود [۱۲]. این فوق اشباعیت در حضور یون کلسیم، نهایتاً منجر به ایجاد رسوب کربنات کلسیم در داخل بیوفیلم می‌شود. علاوه بر این رسوب کریستال‌های کربنات کلسیم در منافذی که در آن بیوفیلم تشکیل نشده نیز امکان‌پذیر است [۱۰]. چنان‌که در شکل‌های ۵ الف تا ۵ د مشاهده می‌شود، رسوب تشکیل شده ابتدا به‌صورت لایه‌ای سطح دانه‌ها را پوشانده است و سپس به‌صورت پلی دانه‌ها را به‌یک‌دیگر متصل کرده است (شکل ۵ ه). هم‌چنین تصاویر ۵ و و ۵ ز تجمع توده‌ای شکل رسوبات را روی سطوح دانه‌ها نشان می‌دهد. مطابق شکل ۵ ح بخش بزرگی از رسوبات تشکیل شده به‌صورت لوزی است که از نوع پایدار رسوب کربنات کلسیم یعنی کلسیت است.

میزان رسوب کربنات کلسیم

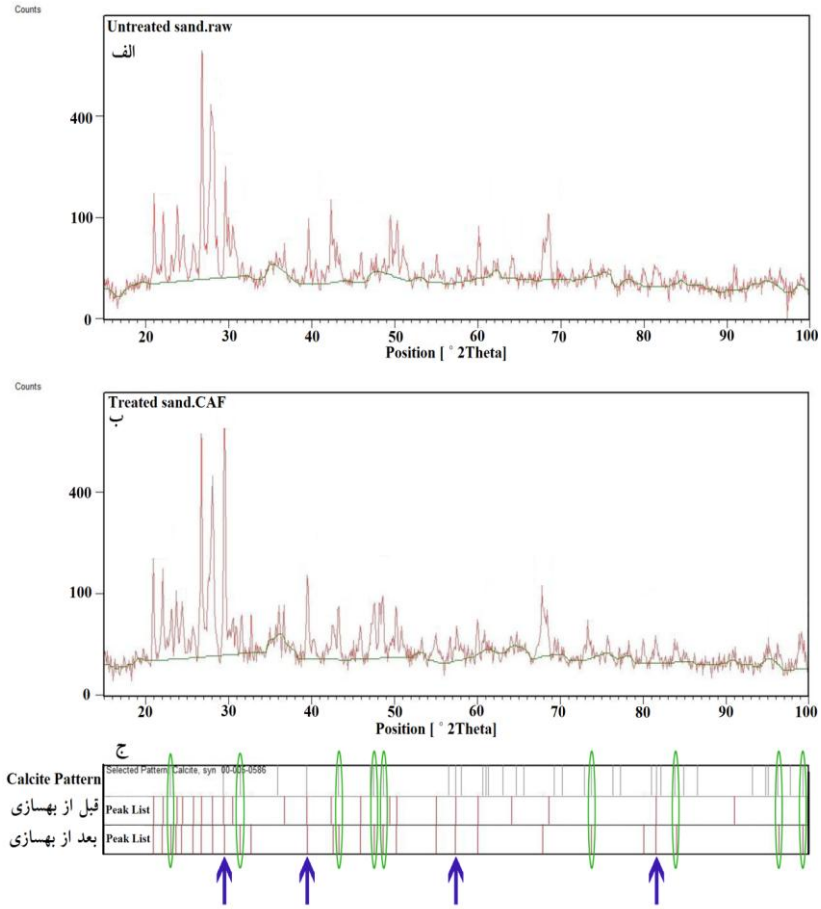
برای بررسی میزان همگنی ایجاد شده در ستون‌های ماسه به‌سازی شده به‌روش بیولوژیکی پس از تقسیم نمونه‌ها به ٦ قسمت مساوی در ارتفاع، میزان رسوب کربنات کلسیم در نقاط مختلف نمونه‌ها اندازه‌گیری شد (شکل ٦). برای انجام این کار پس از تهیهٔ محلول ۵ مولار اسید هیدروکلریک، نمونه‌های به‌سازی شده روی الک ۲۰۰ با استفاده از این اسید شستشو

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.2.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.29]

داده شد. دانه‌های خاک پس از اسیدشویی جمع‌آوری شد و داخل آون خشک شد. درصد وزنی کربنات کلسیم ایجاد شده در نمونه برابر نسبت اختلاف وزن خاک قبل و بعد از اسید شویی به وزن خاک بدون رسوب در نظر گرفته شد. از بررسی نتایج مشخص شد که رسوب ایجاد شده در طول نمونه‌های به‌سازی شده با روش تزریق جدید (نمونه‌های ۱ تا ۳)، تقریباً به‌صورت یک‌نواخت در سراسر نمونه پراکنده شده است در حالی که نمونه‌های به‌سازی شده به‌روش متداول (نمونه‌های ٤ تا ٦) همگن نیستند . روش نوین استفاده شده در این تحقیق برای تزریق، بر مبنای تئوری جریان همرفتی [۱۳] در محلول باکتری و سمنتاسیون است. از آن‌جاکه وزن مخصوص محلول سیمانتاسیون استفاده شده (محلول ۳ مولار اوره و ۱/۵ مولار کلسیم‌کلرید) برابر با ۱/۱۲۰gr cm^{-3} و وزن مخصوص محلول آمونیوم‌کلرید (که از واکنش یون آمونیوم حاصل از واکنش ۱ با یون کلر موجود در محلول سیمانتاسیون ایجاد شده است) برابر با ۱/۰۳۱gr cm^{-3} است، بنا براین یک جریان همرفتی در محلول سیمانتاسیون پس از واکنش اوره آز (واکنش ۱) به‌علت اختلاف موجود در وزن مخصوص دو محلول به‌وجود می‌آید (شکل ۷). این جریان همرفتی منجر به تماس پایدار محلول سیمانتاسیون و محلول باکتری در تمام طول نمونه و نهایتاً مصرف تمامی محلول سمنتاسیون می‌شود. در نتیجه مقادیر زیادی رسوب کربنات کلسیم با توزیع نسبتاً همگن بین دانه‌های خاک تشکیل شده و سبب اتصال دانه‌ها به‌یک‌دیگر می‌شود. چنان‌که از نمودار شکل ٦ مشخص است، در کل میزان رسوب در طول نمونه به‌سازی شده به‌روش پیشنهادی بیش‌تر از روش متداول است (به‌طور متوسط ۷/۵ درصد وزنی خاک). در نمونه‌های به‌سازی شده به‌روش متداول میزان رسوب کربنات کلسیم در قسمت بالای نمونه بیش‌تر از پایین آن است.

بیش‌تر بودن میزان رسوب در نزدیکی نقطه تزریق می‌تواند در اثر مسدود شدن تدریجی حفرات بالای نمونه با تزریق حجم زیادی محلول سیمانتاسیون در یک مرحله و در نتیجه به تله افتادن کریستال‌ها و باکتری‌ها در نقاط نزدیک ورودی باشد. کم‌تر بودن میزان رسوب در نزدیکی نقطه خروجی نیز می‌تواند به‌علت خارج شدن باکتری و کریستال‌های تشکیل شده از انتهای نمونه (زمانی که هنوز بسیار کوچک هستند) باشد. زیاد بودن حجم محلول‌های

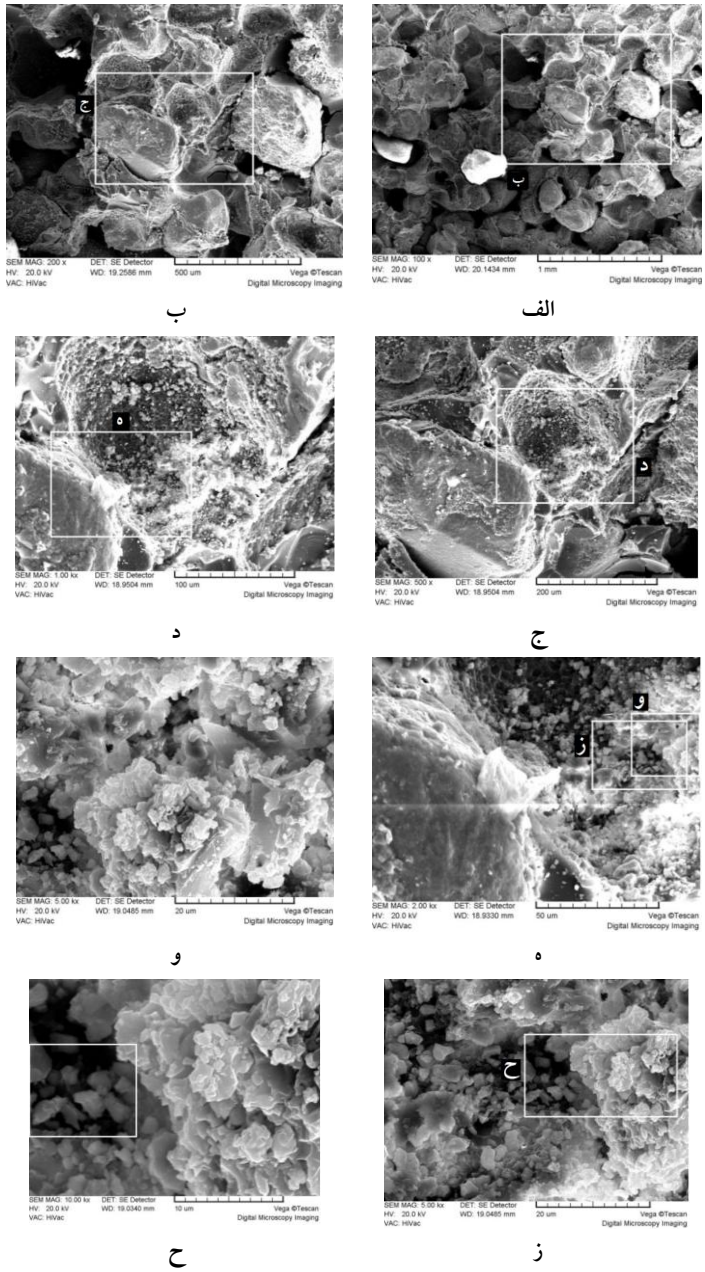
باکتری و سیمانتاسیون (۳ برابر حجم حفرات خاک) منجر به خروج باکتری و کریستال‌های کوچک از انتهای نمونه می‌شود و نهایتاً رسوب کم‌تری در انتهای نمونه در روش تزریق متداول ایجاد می‌شود. درحالی که در روش تزریق جدید پیشنهادی، به‌علت این‌که حجم کلی محلول‌های تزریقی برابر حجم حفرات خاک در نظر گرفته می‌شود، مسئله از دسترس خارج شدن باکتری‌ها و رسوبات کوچک‌تر، کم‌تر اتفاق می‌افتد و پراکندگی رسوب در ارتفاع نمونه یک‌نواخت است.



شکل ٤. نتایج XRD نمونه ماسه‌ای، الف) قبل از به‌سازی بیولوژیکی، ب) بعد از به‌سازی بیولوژیکی

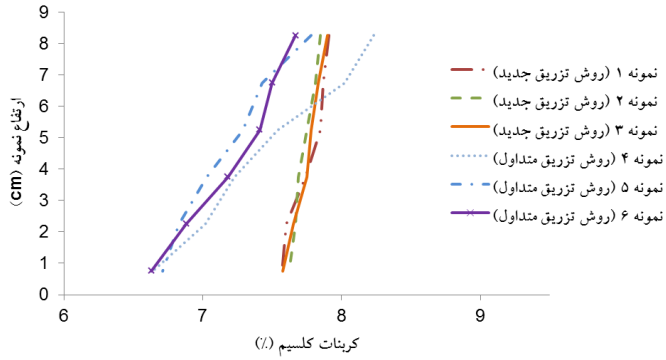
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.2.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.29]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.2.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.29]

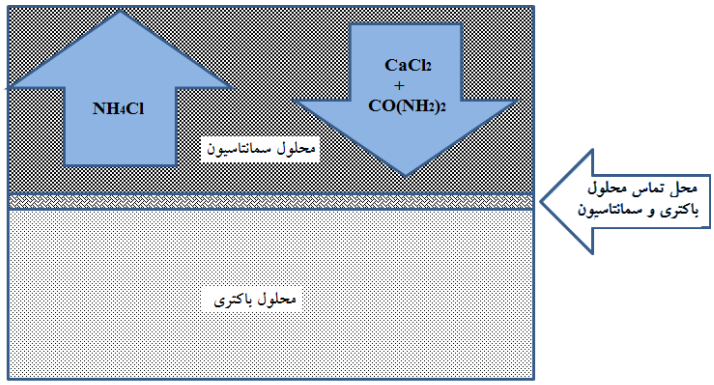


شکل ۵. تصاویر SEM تهیه شده از نمونه به‌سازی شده به‌روش بیولوژیکی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.2.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.29]



شکل ٦. میزان رسوب کربنات کلسیم در طول نمونه‌های به‌سازی شده به‌روش بیولوژیکی با استفاده از روش تزریق جدید پیشنهادی و روش تزریق متداول



شکل ۷. نحوهٔ ایجاد جریان همرفتی در محلول سمنتاسیون درون نمونه خاک

آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری

برای بررسی میزان کارآیی روش تزریق استفاده شده در این تحقیق، تست مقاومت فشاری تک‌محوره[1] (UCS) روی نمونه‌های به‌سازی شده انجام شد. شکل ۸ الف نحوهٔ شکست یک نمونهٔ به‌سازی شده به‌روش متداول و شکل ۸ ب نحوهٔ شکست یک نمونهٔ به‌سازی شده با روش تزریق جدید پیشنهادی را نشان می‌دهد. چنان‌که از شکل مشخص

1. Uniaxial compressive strength

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

الف ب

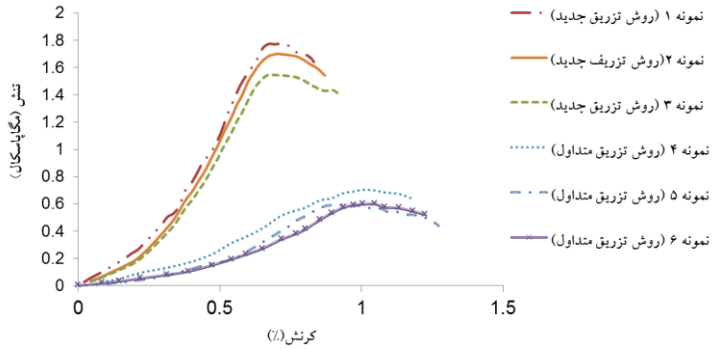
شکل ۸. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS)، الف) نحوۀ شکست نمونۀ به‌سازی شده به روش تزریق متداول، ب) نحوۀ شکست نمونۀ به‌سازی شده به‌روش تزریق جدید پیشنهادی

است در نمونه به‌سازی شده با روش تزریق متداول شکست نمونه از نوع موضعی اتفاق افتاده است. این مسئله به‌علت ناهمگنی رسوب ایجاد شده در طول نمونه و به‌وجود آمدن سطوح ضعف در نمونه رخ داده است. این در حالی است که در نمونۀ به‌سازی شده با روش تزریق جدید پیشنهادی شکست نمونه به‌صورت کلی در سرتاسر نمونه اتفاق افتاده است که این مسئله نیز وقوع رسوب همگن در طول نمونه را نشان می‌دهد. شکل ۹ نمودارهای تنش-کرنش حاصل را نشان می‌دهد. چنان‌که از شکل ۹ مشخص است، مقاومت فشاری پیک نمونه‌های ماسه به‌سازی شده با روش تزریق متداول در حدود MPa ۰/۷ به‌دست آمده است. این در حالی است که بیش‌ترین مقاومت فشاری برای نمونه‌های به‌سازی شده با روش جدید پیشنهادی در حدود MPa۱/٦ به‌دست آمده است. اختلاف به‌وجود آمده را به این علت می‌توان ذکر کرد که زمانی که حجم محلول باکتری بیش‌تر از حجم حفرات خاک باشد، بخشی از محلول شامل باکتری، در همان مرحلۀ اول تزریق از نمونه خارج می‌شود و در عمل از کل حجم باکتری تزریقی استفاده بهینه نمی‌شود. در ادامه با تزریق محلول سیمانتاسیون مقدار بیش‌تری از باکتری‌ها، قبل از این‌که فرصت کافی برای قرارگیری مناسب بین دانه‌های خاک را پیدا کنند، از نمونه خارج می‌شوند. این در حالی است که در روش نوین پیشنهادی در این تحقیق، کل حجم محلول‌های تزریقی (شامل محلول باکتری و سیمانتاسیون)، برابر حجم حفرات خاک است و این مسئله مانع خروج و هدرروی محلول

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.2.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.29]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.2.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.29]

باکتری از محیط متخلخل خاکی می‌شود. تزریق مرحله‌ای محلول باکتری و سیمانتاسیون به نمونهٔ خاکی سبب تشکیل رسوب بیش‌تر و مقاومتر و همگن‌تری در طول نمونه می‌شود و همین مسئله می‌تواند عامل ایجاد مقاومت فشاری بیش‌تر طی یک برنامه تزریق در نمونهٔ به‌سازی شده شود. جدول ٤ مقایسهٔ کلی روش تزریق پیشنهادی و روش تزریق متداول را به‌طور خلاصه نشان می‌دهد.



شکل ۹. نمودار تنش کرنش نمونه‌های به‌سازی شده به‌روش بیولوژیکی

جدول ٤: مقایسهٔ کلی روش تزریق پیشنهادی و روش تزریق متداول

مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)	بررسی همگنی	حجم محلول سیمانتاسیون	حجم محلول باکتری (حفرات خاک)	تعداد مراحل عملیات تزریق	روش تزریق
۱/٦ MPa	نسبتاً همگن	۰/۵ برابر	۰/۵ برابر	٤	روش تزریق جدید پیشنهادی
۰/۷MPa	ناهمگن	۱/۵ برابر	۱/۵ برابر	۲	روش تزریق متداول

نتیجه‌گیری

در این تحقیق امکان‌سنجی استفاده از روش تزریق جدیدی برای به‌سازی خاک به‌روش بیولوژیکی، بر مبنای تئوری جریان همرفتی و با هدف کاهش حجم محلول باکتری و سیمانتاسیون بررسی شد. در این روش حجم نهایی محلول باکتری و سیمانتاسیون برابر حجم حفرات خاک و به‌صورت روش تزریق ٤ مرحله‌ای در نظر گرفته شد. برای بررسی کارآیی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.2.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.29]

روش پیشنهادی، نمونه‌هایی به این روش ساخته شد. هم‌چنین برای فراهم آمدن امکان مقایسه، نمونه‌هایی با روش تزریق متداول نیز تهیه و آزمایش شد. بررسی رسوب کربنات کلسیم در طول نمونه‌ها نشان داد که نمونه‌های ماسه‌ای به‌سازی شده به‌روش پیشنهادی درجه همگنی مناسبی در ارتفاع دارند در حالی که نمونه‌های به‌سازی شده به‌روش متداول ناهمگن هستند. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری نیز نشان داد که روش تزریق پیشنهادی در نمونه‌ها منجر به مقاومت فشاری بیش‌تری (۱/٦ MPa) نسبت به نمونه‌های به‌سازی شده به روش تزریق متداول (حدود ۰/۷ MPa) می‌شود. از نتایج این تحقیق مشخص شد که رسوبات تشکیل شده از نوع پایدار رسوب کربنات کلسیم (کلسیت) است. نتایج تصاویر SEM نشان داد که بخشی از رسوبات سطح دانه‌های ماسه را می‌پوشاند و بخشی دیگر با قرار گرفتن به‌صورت پلی در فضای بین دانه‌ای سبب اتصال دانه‌ها به یک‌دیگر می‌شود. در نهایت روش تزریق پیشنهادی در این تحقیق نسبت به‌روش‌های متداول تزریق، مقدار باکتری و محلول سیمانتاسیون کم‌تری را به‌شیوه‌ای کارآتر و موثرتر برای اتصال دانه‌های خاک به یک‌دیگر به‌کار می‌گیرد و نمونه‌های همگن تر را با مقاومت بیش‌تر ایجاد می‌کند.

منابع

1. DeJong J. T., Mortensen B. M., Martinez B. C., Nelson D. C., "Bio-mediated soil improvement", Ecological Engineering, Vol. 36 (2010).
2. Ferris F., Phoenix V., Fujita Y., Smith R., "Kinetics of calcite precipitation induced by ureolytic bacteria at 10 to 20 C in artificial groundwater", Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 68 (2004).
3. Karol R. H., "Chemical grouting and soil stabilization", revised and expanded, CRC Press Vol. 12 (2003).
4. Cheng L., Cord-Ruwisch R., "In situ soil cementation with ureolytic bacteria by surface percolation", Ecological Engineering, Vol. 42 (2012).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.2.3]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.29]

5. Whiffin V. S., van Paassen L. A., Harkes M.P., "Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique", Geomicrobiology Journal, Vol. 24 (2007).
6. Al-Thawadi S., "High strength in-situ biocementation of soil by calcite precipitating locally isolated ureolytic bacteria", Murdoch University, Ph.D Thesis (2008).
7. Martinez B., Barkouki T., DeJong J., Ginn T. "Upscaling Microbial Induced Calcite Precipitation in 0.5 m Columns: Experimental and Modeling Results", Geo-Frontiers, ASCE (2011).
8. Kontoyannis C. G., Vagenas N. V., "Calcium carbonate phase analysis using XRD and FT-Raman spectroscopy", Analyst, Vol. 125 (2000).
9. Mortensen B., Haber M ,.DeJong J., Caslake L., Nelson, D., "Effects of environmental factors on microbial induced calcium carbonate precipitation", Journal of applied microbiology, Vol. 111 (2011).
10. Lian B., Hu Q., Chen J., Ji, J., Teng H. H., "Carbonate biomineralization induced by soil bacterium Bacillus megaterium", Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 70 (2006).
11. Hammes F., Verstraete W., "Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation", Reviews in environmental science and biotechnology, Vol. 1 (2002).
12. De Muynck W., Debrouwer D., De Belie N., Verstraete W., "Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials", Cement and concrete Research, Vol. 38 (2008).
13. Bergman T. L., Incropera F. P., DeWitt D. P., Lavine A. S., "Fundamentals of heat and mass transfer", John Wiley & Sons (2011).