

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

مهرداد امامی تبریزی\*، بهاره محمد سیدی؛

دانشگاه صنعتی سهند تبریز، دانشکده مهندسی عمران

پذیرش ۹۶/۰۳/۲۷

تاریخ: دریافت ۹۵/۰۸/۲۸

### 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 تجزیه X-Ray و نحوه 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. همین‌طور 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 هزینه مواد مصرفی، منجر به ایجاد نمونه‌ای نسبتاً همگن با مقاومت فشاری قابل قبول می‌شود.

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

## مقدمه

همه ساله بیش از ۴۰۰۰۰ پروژه به‌سازی خاک در دنیا با هزینه‌ای بالغ بر حدود ۶ میلیارد دلار بر سال انجام می‌شود. بیش‌تر تکنیک‌های به‌سازی خاک شامل اعمال انرژی مکانیکی و یا افزودن مواد ساخت بشر می‌شود که این فرایندها خود مستلزم صرف هزینه شده‌اند [۱]. سیمان‌تاسیون مصنوعی، مانند افزودن سیمان پرتلند که با افزایش بسیار خاصیت قلیایی در خاک همراه است، می‌تواند سبب آسیب زدن به ساختار خاک شود [۲]. بسیاری از گروت‌های شیمیایی سمی هستند و می‌توانند برای سلامتی انسان تأثیرات جدی داشته باشند [۳].

رسوب باکتریایی کربنات کلسیم (MICP) روش به‌سازی دوست‌دار محیط زیست است که با استفاده از فعالیت اوره‌آزی میکروارگانیسم‌ها سبب اتصال دانه‌های خاک به یک‌دیگر می‌شود [۴]. اساس روش ذکر شده بر پایه این سه گام استوار است:

۱. هیدرولیز اوره به‌وسیله فعالیت اوره‌آز میکروارگانیسم و تشکیل آمونیوم و یون کربنات:

$$\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{urease}} 2\text{NH}_4^+ + \text{CO}_3^{2-} \quad (1)$$

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

$$\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{CaCO}_3 \quad (2)$$

۳. اتصال دانه‌های ماسه به‌وسیله کربنات کلسیم.

یکی از چالش‌های اساسی در استفاده از روش MICP برای اهداف به‌سازی، استفاده از روش تزریق مناسب است. برای مثال ویفن<sup>۲</sup> و همکاران، از روش تزریقی شامل ۱/۵ برابر حجم حفرات خاک، محلول باکتری و ۱/۵ برابر حجم حفرات خاک محلول سیمان‌تاسیون استفاده کردند [۵]. نتایج تحقیقات این محققان ایجاد رسوب ناهمگن در طول نمونه را نشان داد. التاودی<sup>۳</sup> در ساخت نمونه‌های خود ۴ برابر حجم حفرات خاک محلول باکتری و ۱/۱ برابر حجم حفرات خاک، محلول سیمان‌تاسیون به نمونه‌های خود تزریق کرد. او هم‌چنین

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

اثر تزریق محلول باکتری و سیمان تاسیون را به صورت جداگانه و آمیخته بررسی کرد و به این نتیجه رسید که تزریق جداگانه محلول باکتری و سیمان تاسیون نمونه همگن تری نسبت به تزریق آمیخته ایجاد می کند [۶]. مارتینز<sup>۱</sup> و همکاران تأثیر ایجاد وقفه در تزریق محلول های باکتری و سیمان تاسیون (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 همگن تری نسبت به تزریق پیوسته می شود [۷]. همه روش های ذکر شده نیازمند تزریق حجم زیادی از محلول سیمان تاسیون و باکتری (بین ۳ تا ۵/۱ برابر حجم حفرات خاک) به خاک است. این حجم تزریق سبب افزایش هزینه به سازی می شود. همچنین یک روش تزریق کارآمد باید منجر به ساخت نمونه ای همگن شود.

در تحقیق حاضر روشی جدید بر اساس تئوری جریان همرفتی برای تزریق محلول باکتری و سیمان تاسیون معرفی شده است. نمونه هایی بر اساس روش مذکور ساخته شدند و از لحاظ مقاومت و میزان همگنی بررسی شدند و با نمونه های ساخته شده به روش تزریق متداول مقایسه شدند. نهایتاً میزان موفقیت روش جدید پیشنهادی ارزیابی شد.

## مواد و روش ها

### باکتری و محیط کشت استفاده شده

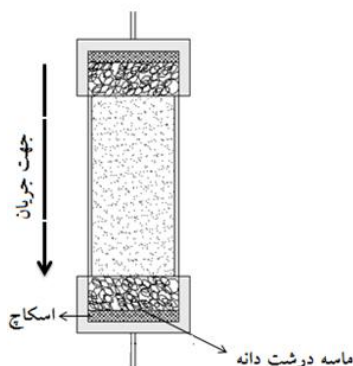
باکتری گرم مثبت *Sporosarcina Pasteurii* با شماره 1645 (DSM 33) از مرکز منطقه ای قارچ ها و باکتری های صنعتی ایران (PTCC) تهیه شد. برای کشت باکتری از محیط کشت مایع شامل یست اکسترکت<sup>۲</sup> ۲۰ gr L<sup>-1</sup>، آمونیوم کلرید<sup>۳</sup> ۱۰ gr L<sup>-1</sup> و نیکل کلرید<sup>۴</sup> ۱۰ μM در pH برابر ۸/۵ استفاده شده است. محیط کشت مورد نظر اتوکلاو<sup>۵</sup> شده، سپس باکتری اضافه شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۰°C انکوبه شد و سپس برای استفاده در

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

دمای  $4^{\circ}\text{C}$  ذخیره شد. سوسپانسیونی که از باکتری تهیه شده شاخص رشد باکتری در طول موج<sup>۱</sup> (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 به ترتیب با یک لایه ۱ cm شن و یک لایه اسکاج 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. همه آزمایش‌ها در دمای  $20 \pm 2$  انجام شد.

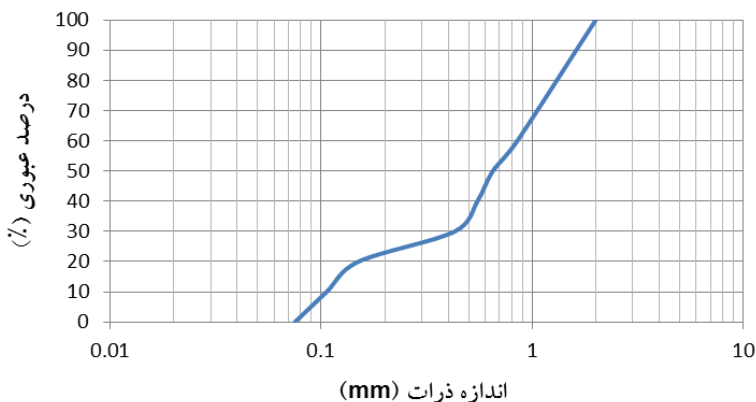


شکل ۱. شمای کلی ستون ماسه استفاده شده

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی خاک ماسه‌ای استفاده شده

| نوع خاک | چگالی ویژه (Gs) | دانسیته خشک (gr cm <sup>-۳</sup> ) | نسبت منافذ | D <sub>۱۰</sub> | D <sub>۳۰</sub> | D <sub>۶۰</sub> |
|---------|-----------------|------------------------------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| SW      | ۲/۶             | ۱/۴۷                               | ٪۴۱        | ۰/۱۱ mm         | ۰/۴۳ mm         | ۰/۸۵ mm         |

1. Optical density



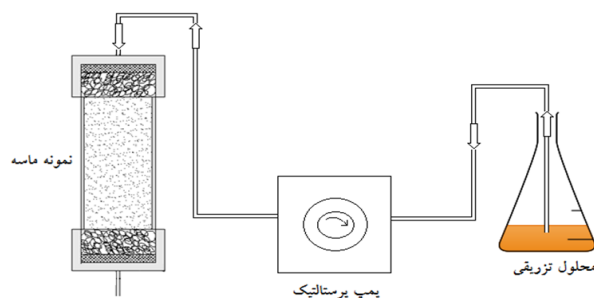
شکل ۲. نمودار دانه بندی خاک ماسه ای استفاده شده

### روش تزریق

در این تحقیق از روشی نوین تزریق چند مرحله ای برای تزریق محلول باکتری و سیمان تاسیون بهره گرفته شده است. پس از شستشوی ستون ماسه با آب مقطر تزریق محلول باکتری و سیمان تاسیون انجام شده است. در انجام فرآیند تزریق ابتدا به اندازه ۲۵٪ حجم حفرات خاک، محلول باکتری وارد محیط خاکی شد. پس از ایجاد وقفه ای ۲ ساعته در انجام فرآیند تزریق، به اندازه ۲۵٪ حجم حفرات خاک، محلول سیمان تاسیون شامل محلول ۱/۵ مولار اوره و ۳ مولار کلسیم کلرید<sup>۱</sup> به نمونه خاکی تزریق شد. مجدداً پس از ایجاد وقفه ای دوساعته در فرآیند تزریق، ۲۵٪ حجم حفرات خاک، محلول باکتری و ۲۵٪ حجم حفرات خاک، محلول سیمان تاسیون مشابه مراحل ذکر شده در بالا وارد نمونه شد. همه محلول ها با استفاده از پمپ پرستالتیک<sup>۲</sup> با سرعت  $10 \text{ mL min}^{-1}$  به محیط متخلخل خاکی تزریق شد. شکل ۳ شمای کلی تزریق و جدول ۲ خلاصه ای از برنامه تزریق استفاده شده در پژوهش را نشان می دهد. ۴۸ ساعت پس از پایان فرآیند تزریق نمونه ها از قالب خارج شد و پس از خشک شدن آزمایش شد.

1. Calcium chloride  
2. Peristaltic Pump

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 به‌اندازه  $1/5$  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<sup>۱</sup> (SEM) و تجزیه پراش اشعه ایکس<sup>۲</sup> (XRD) استفاده شد. برای تهیه 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 به‌وسیله آزمایش XRD، ابتدا ۳ گرم 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

بهسازی شده، آزمایش مقاومت فشاری تک محوری<sup>۱</sup>، بر اساس استاندارد ASTM D 2166 روی نمونه ها با سرعت  $1 \text{ mm min}^{-1}$  انجام گرفت.

جدول ۲. جزئیات برنامه تزریق جدید استفاده شده در تحقیق

| مرحله   | نام محلول   | حجم تزریق<br>(درصدی از حجم<br>حفرات خاک) | میزان تزریق<br>برای هر<br>نمونه (mL) | سرعت<br>جریان<br>( $\text{mL min}^{-1}$ ) | جزئیات محلول                               |
|---------|-------------|------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|
| مرحله ۱ | باکتری      | ٪۲۵                                      | ۲۰ mL                                | ۱۰                                        | فعالیت*<br>mM Urea<br>$3 \text{ min}^{-1}$ |
| مرحله ۲ | سیمانتاسیون | ٪۲۵                                      | ۲۰ mL                                | ۱۰                                        | اوره ۱/۵ مولار+کلسیم کلرید<br>۳ مولار      |
| مرحله ۳ | باکتری      | ٪۲۵                                      | ۲۰ mL                                | ۱۰                                        | فعالیت*<br>mM Urea<br>$3 \text{ min}^{-1}$ |
| مرحله ۴ | سیمانتاسیون | ٪۲۵                                      | ۲۰ mL                                | ۱۰                                        | اوره ۱/۵ مولار+کلسیم کلرید<br>۳ مولار      |

\*فعالیت اوره آزی باکتری

جدول ۳. جزئیات برنامه تزریق متداول

| مرحله   | نام محلول   | حجم تزریق<br>(درصدی از حجم<br>حفرات خاک) | میزان تزریق<br>برای هر نمونه<br>(mL) | سرعت<br>جریان<br>( $\text{mL min}^{-1}$ ) | جزئیات محلول                                  |
|---------|-------------|------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| مرحله ۱ | باکتری      | ٪۱۵۰                                     | ۱۲۰ mL                               | ۱۰                                        | فعالیت*<br>mM Urea $\text{min}^{-1}$<br>$3^1$ |
| مرحله ۲ | سیمانتاسیون | ٪۱۵۰                                     | ۱۲۰ mL                               | ۱۰                                        | اوره ۱/۵ مولار+کلسیم کلرید<br>۳ مولار         |

## نتایج و بحث

### تجزیه XRD و SEM

شکل ۴ نتایج تجزیه XRD نمونه خاک ماسه ای را قبل و بعد از بهسازی نشان مدهد. بر اساس نتایج XRD، مقدار فراوانی نسبی کریستال های  $\text{CaCO}_3$ ، با مقایسه نقاط پیک حداکثر، با نقاط پیک یک نمونه با ترکیب مشخص (کلسیت) انجام می شود [۱۰]. شکل ۴

1 Uniaxial compressive strength

نتایج آزمایش XRD را روی ماسه قبل از به‌سازی (شکل ۴ الف) و بعد از به‌سازی (شکل ۴ ب) نشان می‌دهد. در شکل ۴ ج نقاط پیک ماسه قبل و بعد از به‌سازی استخراج شده و با الگوی پراش کلسیت مقایسه شده است. چنان‌که از شکل ۴ 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 (دایره‌های سبز رنگ) 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 به یک‌دیگر متصل کرده است (شکل ۵ ه). هم‌چنین تصاویر ۵ 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

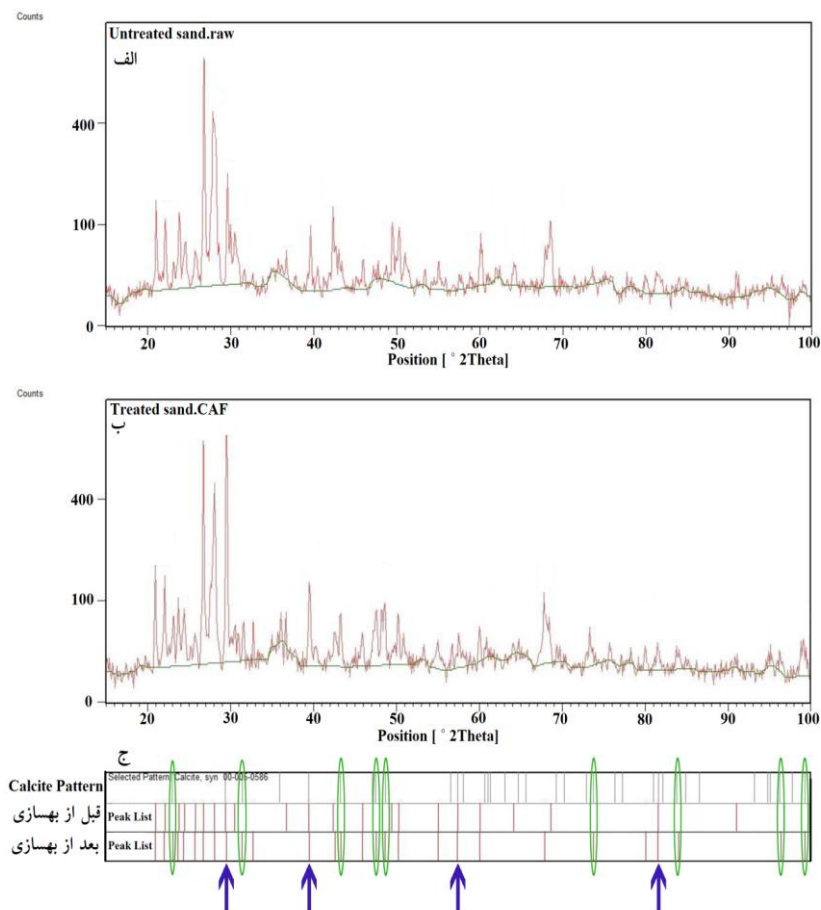
برای بررسی میزان همگنی ایجاد شده در ستون‌های ماسه به‌سازی شده به‌روش بیولوژیکی پس از تقسیم نمونه‌ها به ۶ قسمت مساوی در ارتفاع، میزان رسوب کربنات کلسیم در نقاط مختلف نمونه‌ها اندازه‌گیری شد (شکل ۶). برای انجام این کار پس از تهیه محلول ۵ مولار اسید هیدروکلریک، نمونه‌های به‌سازی شده روی الک ۲۰۰ با استفاده از این اسید شستشو



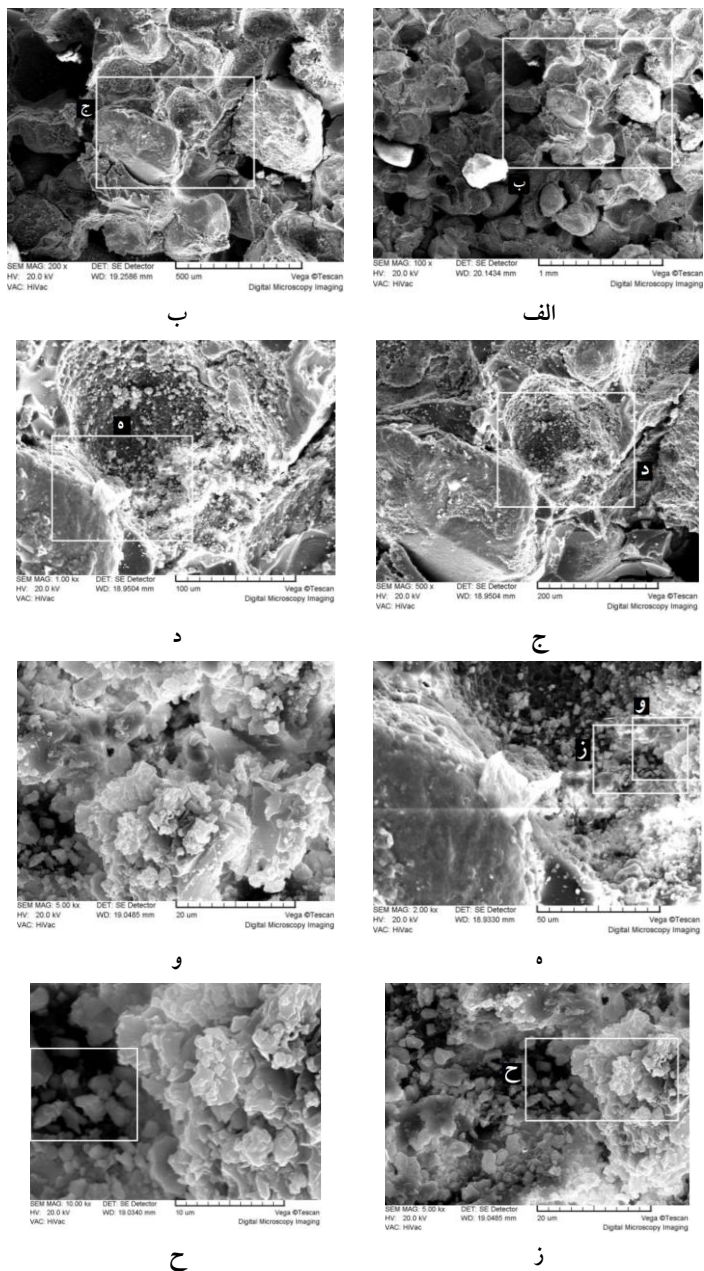
داده شد. دانه های خاک پس از اسیدشویی جمع آوری شد و داخل آون خشک شد. درصد وزنی کربنات کلسیم ایجاد شده در نمونه برابر نسبت اختلاف وزن خاک قبل و بعد از اسید شویی به وزن خاک بدون رسوب در نظر گرفته شد. از بررسی نتایج مشخص شد که رسوب ایجاد شده در طول نمونه های بهسازی شده با روش تزریق جدید (نمونه های ۱ تا ۳)، تقریباً به صورت یک نواخت در سراسر نمونه پراکنده شده است در حالی که نمونه های بهسازی شده به روش متداول (نمونه های ۴ تا ۶) همگن نیستند. روش نوین استفاده شده در این تحقیق برای تزریق، بر مبنای تئوری جریان همرفتی [۱۳] در محلول باکتری و سممتاسیون است. از آنجاکه وزن مخصوص محلول سیمانتاسیون استفاده شده (محلول ۳ مولار اوره و ۱/۵ مولار کلسیم کلرید) برابر با  $1.12 \text{ gr cm}^{-3}$  و وزن مخصوص محلول آمونیوم کلرید (که از واکنش یون آمونیوم حاصل از واکنش ۱ با یون کلر موجود در محلول سیمانتاسیون ایجاد شده است) برابر با  $1.031 \text{ gr cm}^{-3}$  است، بنا براین یک جریان همرفتی در محلول سیمانتاسیون پس از واکنش اوره از (واکنش ۱) به علت اختلاف موجود در وزن مخصوص دو محلول به وجود می آید (شکل ۷). این جریان همرفتی منجر به تماس پایدار محلول سیمانتاسیون و محلول باکتری در تمام طول نمونه و نهایتاً مصرف تمامی محلول سممتاسیون می شود. در نتیجه مقادیر زیادی رسوب کربنات کلسیم با توزیع نسبتاً همگن بین دانه های خاک تشکیل شده و سبب اتصال دانه ها به یکدیگر می شود. چنان که از نمودار شکل ۶ مشخص است، در کل میزان رسوب در طول نمونه بهسازی شده به روش پیشنهادی بیش تر از روش متداول است (به طور متوسط ۷/۵ درصد وزنی خاک). در نمونه های بهسازی شده به روش متداول میزان رسوب کربنات کلسیم در قسمت بالای نمونه بیش تر از پایین آن است.

بیش تر بودن میزان رسوب در نزدیکی نقطه تزریق می تواند در اثر مسدود شدن تدریجی حفرات بالای نمونه با تزریق حجم زیادی محلول سیمانتاسیون در یک مرحله و در نتیجه به تله افتادن کریستال ها و باکتری ها در نقاط نزدیک ورودی باشد. کم تر بودن میزان رسوب در نزدیکی نقطه خروجی نیز می تواند به علت خارج شدن باکتری و کریستال های تشکیل شده از انتهای نمونه (زمانی که هنوز بسیار کوچک هستند) باشد. زیاد بودن حجم محلول های

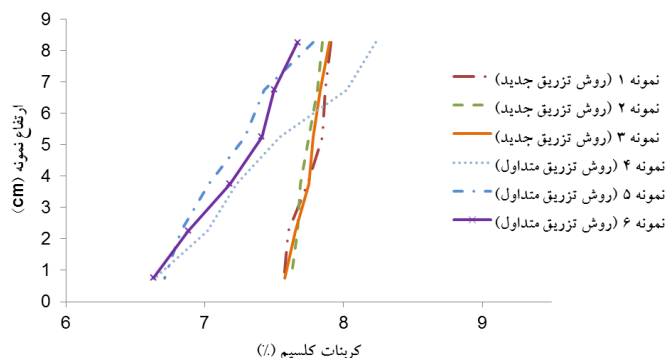
باکتری و سیمان‌تاسیون (۳ برابر حجم حفرات خاک) منجر به خروج باکتری و کریستال‌های کوچک از انتهای نمونه می‌شود و نهایتاً رسوب کم‌تری در انتهای نمونه در روش تزریق متداول ایجاد می‌شود. درحالی که در روش تزریق جدید پیشنهادی، به علت این که حجم کلی محلول‌های تزریقی برابر حجم حفرات خاک در نظر گرفته می‌شود، مسئله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



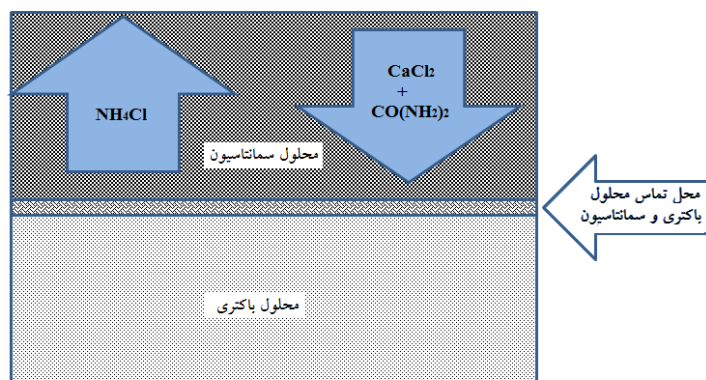
شکل ۴. نتایج XRD نمونه ماسه‌ای، الف) قبل از بهسازی بیولوژیکی، ب) بعد از بهسازی بیولوژیکی



شکل ۵. تصاویر SEM تهیه شده از نمونه بهسازی شده به روش بیولوژیکی



شکل ۶. میزان رسوب کربنات کلسیم در طول نمونه‌های به‌سازی شده به‌روش بیولوژیکی با استفاده از روش تزریق جدید پیشنهادی و روش تزریق متداول



شکل ۷. نحوه ایجاد جریان همرفتی در محلول سم‌تاسیون درون نمونه خاک

## آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری

برای بررسی میزان کارایی روش تزریق استفاده شده در این تحقیق، تست مقاومت فشاری تک‌محوره<sup>۱</sup> (UCS) روی نمونه‌های به‌سازی شده انجام شد. شکل ۸ الف نحوه شکست یک نمونه به‌سازی شده به‌روش متداول و شکل ۸ ب نحوه شکست یک نمونه به‌سازی شده با روش تزریق جدید پیشنهادی را نشان می‌دهد. چنان‌که از شکل مشخص

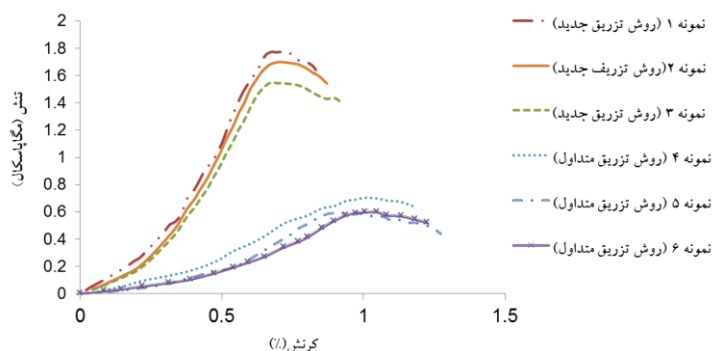
1. Uniaxial compressive strength



شکل ۸. آزمایش مقاومت فشاری تک محوره (UCS)، الف) نحوه شکست نمونه بهسازی شده به روش تزریق متداول، ب) نحوه شکست نمونه بهسازی شده به روش تزریق جدید پیشنهادی

است در نمونه بهسازی شده با روش تزریق متداول شکست نمونه از نوع موضعی اتفاق افتاده است. این مسئله به علت ناهمگنی رسوب ایجاد شده در طول نمونه و به وجود آمدن سطوح ضعیف در نمونه رخ داده است. این در حالی است که در نمونه بهسازی شده با روش تزریق جدید پیشنهادی شکست نمونه به صورت کلی در سرتاسر نمونه اتفاق افتاده است که این مسئله نیز وقوع رسوب همگن در طول نمونه را نشان می دهد. شکل ۹ نمودارهای تنش- کرنش حاصل را نشان می دهد. چنان که از شکل ۹ مشخص است، مقاومت فشاری پیک نمونه های ماسه بهسازی شده با روش تزریق متداول در حدود  $0.7 \text{ MPa}$  به دست آمده است. این در حالی است که بیشترین مقاومت فشاری برای نمونه های بهسازی شده با روش جدید پیشنهادی در حدود  $1.6 \text{ MPa}$  به دست آمده است. اختلاف به وجود آمده را به این علت می توان ذکر کرد که زمانی که حجم محلول باکتری بیش تر از حجم حفرات خاک باشد، بخشی از محلول شامل باکتری، در همان مرحله اول تزریق از نمونه خارج می شود و در عمل از کل حجم باکتری تزریقی استفاده بهینه نمی شود. در ادامه با تزریق محلول سیمان تاسیون مقدار بیشتری از باکتری ها، قبل از این که فرصت کافی برای قرارگیری مناسب بین دانه های خاک را پیدا کنند، از نمونه خارج می شوند. این در حالی است که در روش نوین پیشنهادی در این تحقیق، کل حجم محلول های تزریقی (شامل محلول باکتری و سیمان تاسیون)، برابر حجم حفرات خاک است و این مسئله مانع خروج و هدرروی محلول

باکتری از محیط متخلخل خاکی می‌شود. تزریق مرحله‌ای محلول باکتری و سیمانتاسیون به نمونه 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 نمونه به‌سازی شده شود. جدول ۴ مقایسه کلی روش تزریق پیشنهادی و روش تزریق متداول را به‌طور خلاصه نشان می‌دهد.



شکل ۹. نمودار تنش کرنش نمونه‌های به‌سازی شده به‌روش بیولوژیکی  
جدول ۴: مقایسه کلی روش تزریق پیشنهادی و روش تزریق متداول

| روش تزریق                  | تعداد مراحل<br>عملیات<br>تزریق | حجم محلول<br>باکتری (حفرات<br>خاک) | حجم محلول<br>سیمانتاسیون | بررسی<br>همگنی | مقاومت فشاری<br>تک‌محوری<br>(UCS) |
|----------------------------|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------|----------------|-----------------------------------|
| روش تزریق جدید<br>پیشنهادی | ۴                              | ۰/۵ برابر                          | ۰/۵ برابر                | نسبتاً همگن    | ۱/۶ MPa                           |
| روش تزریق متداول           | ۲                              | ۱/۵ برابر                          | ۱/۵ برابر                | ناهمگن         | ۰/۷ MPa                           |

### 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 ۴ مرحله‌ای در نظر گرفته شد. برای بررسی کارایی

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 به روش پیشنهادی درجه همگنی مناسبی در ارتفاع دارند در حالی که نمونه‌های به‌سازی شده به روش متداول ناهمگن هستند. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری نیز نشان داد که روش تزریق پیشنهادی در نمونه‌ها منجر به مقاومت فشاری بیش‌تری ( $1/6 \text{ MPa}$ ) نسبت به نمونه‌های به‌سازی شده به روش تزریق متداول (حدود  $0/7 \text{ MPa}$ ) 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 به روش‌های 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).

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).