

# بررسی تأثیر هم‌زمان زمان ماند، مولاریته و غلظت محلول باکتری در مقاومت برشی خاک‌های ماسه‌ی تثبیت شده با روش سیمان‌تاسیون بیولوژیکی

مهديه شاه‌محمدی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمد آزادی\* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین

مقاوم‌سازی زیستی خاک، از جمله روش‌های در حال توسعه‌ی بهسازی خاک است، که کاهش مشکلات زیست‌محیطی از ویژگی‌های برتر آن است. مراحل بهسازی خاک در روش اخیر با تولید رسوب کلسیت در بین دانه‌های خاک به کمک باکتری با خاصیت رسوب‌زایی و استفاده از مواد شیمیایی خاص تعیین شده است. به‌منظور مدیریت میزان مصرف مواد، بهتر است مقادیر بهینه طی مطالعاتی به دست آیند. لذا در مطالعه‌ی حاضر با انجام آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی نشده‌ی تحکیم‌یافته بر نمونه‌های تثبیت شده‌ی بیولوژیکی، روند مقاومت‌گیری خاک در طول زمان با در نظر گرفتن زمان‌ماندها و مولاریته‌های مختلف مطالعه شده است. نتایج حاکی از افزایش ۵۰ درصدی مقاومت در بهینه‌ترین حالت نسبت به ماسه‌ی تمیز است. بررسی پارامتر زمان‌ماند به امر گیرش نهایی نمونه‌ها تا ۳۰ روز اشاره دارد، پس از آن روند افزایش مقاومت خاک مقدار ثابتی از خود نشان داده است.

واژگان کلیدی: سیمان‌تاسیون بیولوژیکی، مقاومت برشی، نفوذپذیری، آزمایش سه‌محوری، زمان‌ماند.

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۰ (دوره ۲ - شماره ۴/۲، ص. ۲۷-۳۷)، (پژوهشی)

mahdiye.riv2@gmail.com  
azadi.mhmm@gmail.com

## ۱. مقدمه

شده است که از سال ۱۹۹۹، در نوشتاری با عنوان «رسوب میکروبیولوژیکی کربنات کلسیم (MICP)»، پژوهش‌های پایه‌ی در این زمینه آغاز شده است، که در آن زمان از روش سیمان‌تاسیون بیولوژیکی جهت ترمیم سنگ‌های آهکی در بناهای قدیمی استفاده شده است.<sup>[۱]</sup> در سال ۲۰۰۲، نیز از مواد ذکر شده جهت تقویت مقاومت بتن و ترمیم بتن‌های آسیب دیده استفاده شده است.<sup>[۲]</sup> ایوانا وچو (۲۰۰۸) به بررسی روش‌های عملی برای بهسازی بیولوژیکی خاک در محل پرداخته‌اند.<sup>[۳]</sup> سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ نیز تعدادی از پژوهش‌گران بر روی مدل‌سازی «افزایش مقیاس» برای تزریق مواد بیولوژیکی به داخل خاک، مطالعات گسترده‌ی را انجام داده‌اند.<sup>[۴]</sup> با گسترش مطالعات در زمینه‌ی روش سیمان‌تاسیون بیولوژیکی دریافت شد که با توجه به این امر که مواد تزریقی در روش مذکور ویسکوزیته‌ی پایینی دارند، مرحله‌ی تزریق با هزینه‌ی کمتر و شعاع نفوذ بیشتری انجام می‌شود.<sup>[۵]</sup> همچنین روش سیمان‌تاسیون بیولوژیکی هیچ‌گونه آسیبی به محیط زیست وارد نمی‌کند، چرا که بسیاری از مواد و میکروارگانیسم‌های مورد نیاز به‌طور طبیعی در خاک وجود دارند و حتی موادی که به خاک اضافه می‌شوند، هیچ پیامد زیست‌محیطی مضر را به همراه ندارند.<sup>[۶]</sup> به همین علت در چند سال اخیر توجه و استقبال بیشتری به روش سیمان‌تاسیون بیولوژیکی شده است، به صورتی که عملکرد آن بر روی انواع

امروزه در پروژه‌های مهندسی با توجه به شرایط حاکم از روش‌های مختلفی، مانند: اجرای پی‌های عمیق، مسلح‌کننده‌ها، ژئوگریدها، تسمه‌ها، بولت‌ها و یا مواد افزودنی برای تقویت زمین استفاده می‌شود. با توجه به افزایش پروژه‌های عمرانی، تقاضا برای روش‌های جدید با هزینه‌های اجرایی کمتر و سازگارتر با محیط زیست برای بهسازی خاک نیز در حال افزایش هستند. یکی از روش‌هایی که به‌تازگی با پیوند رشته‌های عمران، ژئوشیمی و میکروبیولوژی به‌وجود آمده است، رسوبات میکروبیولوژیکی ناشی از کربنات کلسیم (MICP) است.<sup>[۷]</sup> اساس بهسازی خاک در روش MICP به این صورت است که بلورهای کربنات کلسیم، که حاصل واکنش اوره و کلسیم کلراید هستند، در فضا‌های خالی خاک قرار می‌گیرند و این امر باعث افزایش مقاومت خاک می‌شود.<sup>[۸]</sup> در بخش حاضر، به بررسی تعدادی از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه پرداخته شده است.

طی بررسی پیشینه‌ی بهسازی خاک به روش سیمان‌تاسیون بیولوژیکی مشاهده

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۱۱/۲۵، اصلاحیه ۱۴۰۰/۳/۲۹، پذیرش ۱۴۰۰/۴/۲۶

DOI:10.24200/J30.2021.57562.2917

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک استفاده شده در پژوهش حاضر.

جنس خاک	چگالی ( $G_s$ )	نسبت تخلخل بیشینه ( $E_{max}$ )	نسبت تخلخل کمینه ( $E_{min}$ )	وزن مخصوص بیشینه $\gamma_{max}(\frac{gr}{cm^3})$	وزن مخصوص کمینه $\gamma_{min}(\frac{gr}{cm^3})$
ماسه‌ی تمیز	۲٫۶۳	۰٫۸۷	۰٫۴۲	۱٫۵۹	۱٫۴۲

در طول زمان و با در نظر گرفتن زمان مانددهای مختلف در مولارهای مختلف مطالعه شده است. همان‌طور که گفته شد، تاکنون سنجش مقاومت نمونه‌ها بیشتر با انجام آزمون برش مستقیم صورت گرفته است، ولی در پژوهش حاضر، سنجش مقاومت با انجام آزمون سه‌محوری در شرایط زهکشی نشده‌ی تحکیم‌یافته (CU) صورت گرفته است، تا بتوان نتایج دقیقی‌تری به‌دست آورد.

## ۲. مصالح و مواد مصرفی در پژوهش

### ۱.۲. خاک مصرفی مطالعه شده

در پژوهش حاضر، از نوعی خاک ماسه‌ی بی (SP) با دانه‌بندی یکنواخت استفاده شده است، که محدوده‌ی دانه‌بندی آن بین ۰٫۱ تا ۱ میلی‌متر بوده است. چنانچه اندازه‌ی دانه‌ها خیلی بزرگ باشد، مقدار زیادی از محلول سیمان‌تاسیون برای تثبیت کردن آن نیاز است و همچنین کوچک بودن بیش از حد دانه‌های خاک نیز از نفوذ محلول سیمان‌تاسیون جلوگیری می‌کند و حتی می‌تواند سبب جدا شدن باکتری‌ها از خاک شود. [۱۵] نمودار دانه‌بندی خاک ماسه‌ی بی (SP) در شکل ۱ مشاهده می‌شود، که مطابق آن خاک SP برای پژوهش حاضر مناسب بوده و عوامل موردنیاز را داشته است. بر اساس استاندارد ASTM - D - ۲۴۸۷، ضریب یکنواختی (Cu) برابر ۱٫۷، ضریب دانه‌بندی (Cc) برابر ۱٫۵ و رطوبت بهینه برابر ۱۲٪ بوده است. وزن مخصوص ماسه در نمونه‌ها، وزن مخصوص میانگین است، که مقدار آن ۱٫۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده است. سایر مشخصات خاک نیز در جدول ۱ ارائه شده است.

### ۲.۲. باکتری

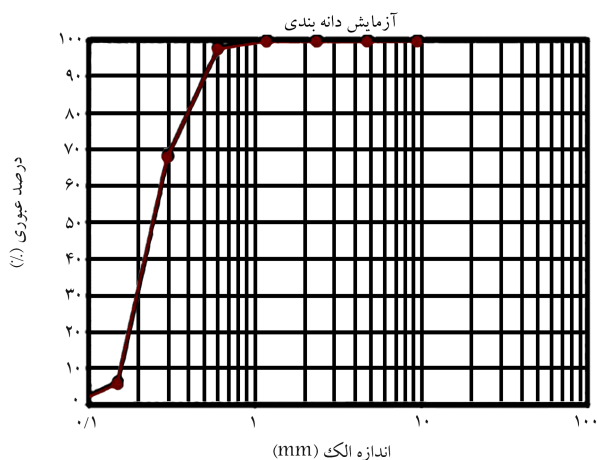
نقش باکتری در تسریع واکنش تجزیه‌ی آبی اوره و کمک به رسوب‌زایی کلسیم کربنات است. تاکنون باکتری‌های مختلفی از دسته‌ی هوازی و بی‌هوازی مطالعه گرفته‌اند، که از این میان باکتری باسیلاس پاستوری بهترین عملکرد را از خود نشان

خاک‌های ماسه‌ی و رسی بررسی شده و نتایج مطلوبی همچون کاهش تورم در خاک‌های رسی و افزایش مقاومت در هر دو نوع خاک به‌دست آمده است. [۹] با بررسی پژوهش‌های پیشین، ملاحظه شده است که باکتری‌های استفاده شده جهت رسوب کلسیت، باید خاصیت رسوب‌زایی داشته باشند، که باکتری خانواده‌ی باسیلاس خاصیت رسوب‌زایی را دارد. [۱۰] در یک مطالعه‌ی بنیادی که جهت نمایش اثر باکتری برای کنترل میزان رسوب کلسیت انجام شده است، نوع خاصی از باکتری حاوی اسپور<sup>۲</sup> با نام باسیلاس پاستوری<sup>۳</sup> به منزله‌ی بهبود روند رسوب کلسیت معرفی شده است. [۱۱] کشت باکتری باسیلاس پاستوری در محیط آزمایشگاه انجام و سپس در همان محیط آزمایشگاه به درون خاک تزریق می‌شود. پس از آن با تزریق اوره و کلسیم کلراید به خاک موردنظر طی یک فرایند شیمیایی رسوب کربنات کلسیم تولید می‌شود. [۱۲]

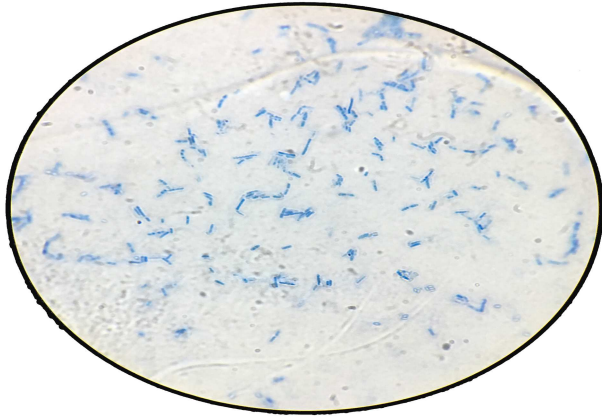
مطالعات انجام شده در ارتباط با نوع بیوسیمان استفاده شده نشان داده است که خواص کربنات کلسیم، یکی از مهم‌ترین مشخصات در سیمانی شدن خاک است. [۱۳] همچنین مطالعات پایه‌ی دیگری در زمینه‌ی بررسی اثر مولاریته‌ی مواد استفاده شده انجام شده است، که در آن‌ها، تأثیر به‌سزای پارامتر مولاریته‌ی مواد مشاهده شده است. [۱۴، ۱۵] غلظت باکتری استفاده شده از دیگر پارامترهای تأثیرگذار است، که در تعدادی از پژوهش‌هایی که تاکنون انجام شده است، یکی از متغیرهای پژوهش بوده و نقش آن در سطوح سیمان‌تاسیون تعیین شده است. [۱۶، ۱۷] حتی اخیراً در سال ۲۰۲۰، مطالعه‌ی جهت بررسی تأثیر حضور و یا عدم حضور باکتری در حین فرایند تشکیل رسوبات کلسیم کربنات و همچنین پس از پایان فرایند تشکیل رسوبات کلسیم کربنات انجام شده است. [۱۷] در خصوص رسوب کلسیت، پژوهش‌های دیگری صورت گرفته است که در آن تأثیر عوامل محیطی همچون دما ارائه شده است. [۱۸] همچنین در پژوهش دیگری، تأثیر بهبود ایجاد رسوبات کلسیت از طریق فراهم کردن شرایطی مناسب با ایجاد تغییر در دفعات و نحوه‌ی تزریق باکتری و محلول سیمان‌تاسیون به خاک در مقاومت با انجام آزمون مقاومت فشاری تک‌محوره بررسی شده است. [۱۹] مطالعات بسیاری در خصوص ارزیابی بهبود خواص مهندسی خاک‌ها، توسط پژوهش‌گران مختلف ارائه شده است. بعد از تهیه‌ی نمونه‌های تثبیت شده برای ارزیابی مقاومت آن‌ها در بیشتر مطالعات پیشین، نمونه‌ها تحت آزمون برش مستقیم قرار گرفته‌اند، [۲۰] در صورتی که در تعداد محدودی از پژوهش‌ها ارزیابی مقاومت با انجام آزمون سه‌محوری صورت گرفته است. [۲۱، ۲۲]

در مطالعه‌ی با عنوان «بررسی مقاومت برشی خاک تثبیت یافته با روش میکروبیولوژی» با متغیر قرار دادن نوع خاک، غلظت باکتری و زمان ماند با انجام آزمون برش مستقیم به ارزیابی مقاومت نمونه‌های تثبیت شده پرداخته شده است. [۲۳] کنترل میزان نفوذپذیری از دیگر موارد قابل ارزیابی بوده است که پژوهش‌گران به آن توجه داشته‌اند و در برخی مطالعات، تأثیر ایجاد رسوبات کلسیم کربنات در خاک در میزان نفوذپذیری خاک تعیین شده است. [۲۴، ۲۵] همچنین در پژوهش‌هایی، تأثیر روش تثبیت خاک ذکر شده در کاهش فرسایش و روان‌گرایی مطالعه شده است. [۲۶]

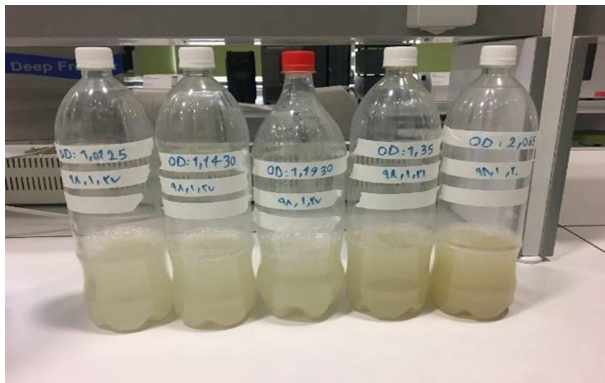
در پژوهش حاضر، روند مقاومت‌گیری خاک با روش سیمان‌تاسیون بیولوژیکی



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک ماسه‌ی بی استفاده شده در پژوهش حاضر.



شکل ۲. تصویر باکتری خالص در زیر میکروسکوپ.



شکل ۳. سوسپانسیون‌های باکتری در غلظت‌های مختلف مورد نیاز.

در انتهای ویال‌ها ته‌نشین شود. با کمک محلول رینگر، باکتری‌ها از ویال‌ها جدا شدند و به صورت سوسپانسیون در آمدند. پس از تهیه‌ی سوسپانسیون مذکور به کمک دستگاه اسپکتروفوتومتر، غلظت آن در طول موج  $600\text{ nm}$  در بازه‌های مورد نظر تنظیم شد.<sup>[۱۵]</sup> سوسپانسیون‌های نهایی که در شکل ۳ مشاهده می‌شوند، در دمای  $4^\circ\text{C}$  درجه‌ی سانتی‌گراد در یخچال قرار گرفتند، که تا  $14$  روز بدون کاهش کارایی قابل استفاده خواهند بود.

### ۲.۳. ساخت محلول سیمانتاسیون

محلول سیمانتاسیون، شامل اوره، کلسیم کلراید و مواد مغذی همانند آمونیوم کلراید، محیط کشت ناترینت برات و سدیم بی‌کربنات به صورت محلول در آب است، که با توجه به آنکه متد تزریق دو فازی در پژوهش حاضر در نظر گرفته شده است، محلول سیمانتاسیون و سوسپانسیون باکتری به صورت جداگانه به خاک اضافه شدند.

### ۳.۳. تهیه‌ی قالب‌های استفاده شده

در پژوهش حاضر، از آزمایش سه‌محوری جهت سنجش مقاومت نمونه‌های شبیه شده و همچنین از آزمایش نفوذپذیری جهت تعیین نفوذپذیری نمونه‌ها استفاده شده است. برای ساخت نمونه‌ها از قالب‌هایی از جنس لوله‌ی پلیکا با قطر  $7$  سانتی‌متر و ارتفاعی کمی بیشتر از سل دستگاه سه‌محوری ( $16$  سانتی‌متر) استفاده شده است، تا در هنگام تزریق، فضایی جهت اشباع نمونه وجود داشته باشد. در قسمت پایین قالب از پلکسی‌های طراحی شده برای پژوهش حاضر برای نگهداری خاک استفاده و روی آن توری‌هایی با بافت ریز جهت جلوگیری از خروج ریزدانه‌ها تعبیه شده است.

داده است، این باکتری از خانواده‌ی باسیل‌ها و غیربیماری‌زاست و قابلیت اوره‌ی آزی دارد. در پژوهش حاضر نیز از باکتری باسیلاس پاستوری استفاده شده است، که به صورت پودر لیوفلیزه<sup>۴</sup> با شماره‌ی (ATCC ۱۱۸۵۹) (PTCC ۱۶۴۵) از مرکز پژوهش‌های صنعتی ایران تهیه شده است.<sup>[۱۱]</sup>

### ۳.۲. اوره

اوره با جرم مولی  $60/160 \frac{gr}{mol}$  یک ترکیب سخت، بی‌رنگ و بی‌بو و بسیار محلول در آب است، که در واکنش شیمیایی تشکیل رسوبات کلسیم کربنات نقش به‌سزایی دارد.

### ۴.۲. کلسیم کلراید

کلسیم کلراید با جرم مولی  $147 \frac{gr}{mol}$ ، یک ماده‌ی بلورین سفید رنگ است، که شکل ظاهری آن به صورت دانه دانه، کلوخه یا پرک و در آب بسیار محلول است. کلسیم کلراید به عنوان یکی از پایه‌های اصلی در واکنش تشکیل کلسیم کربنات و منبع کلسیم است.

در مراحل مختلف کشت باکتری از موادی همچون محیط کشت ناترینت برات<sup>۵</sup> و ناترینت آگار<sup>۶</sup> و همچنین در مرحله‌ی آماده‌سازی نمونه‌ها از سدیم بی‌کربنات و آمونیوم کلراید استفاده شده است. مواد مذکور به عنوان بافر<sup>۷</sup> جهت بهبود شرایط محیطی برای فعالیت باکتری‌ها و همچنین بهبود تشکیل رسوبات کلسیم کربنات استفاده شده‌اند.

### ۳. روش آماده‌سازی نمونه‌ها

#### ۱.۳. تهیه‌ی سوسپانسیون<sup>۸</sup> باکتری

از محیط کشت مایع جهت نگهداری کوتاه‌مدت از باکتری و نیز تهیه‌ی سوسپانسیون باکتری استفاده می‌شود. محیط کشت مایع ناترینت برات به همراه اوره از جمله محیط کشت‌های استاندارد و مورد تأیید مؤسسات تحقیقات قارچ و باکتری است. برای تهیه‌ی محیط کشت استاندارد، ابتدا به مقدار مورد نظر آب مقطر در داخل یک فائل یا بشر ریخته شده و مطابق دستورالعمل شرکت سازنده (QUELAB) معادل  $13/61 \frac{lit}{gr}$ ، ناترینت برات به آن اضافه شده است. سپس فائل داخل اتوکلاو در دمای  $120^\circ\text{C}$  درجه‌ی سانتی‌گراد و به مدت  $15$  دقیقه قرار گرفت تا کاملاً استریل شود. پس از آن به میزان  $2\%$  محیط کشت، اوره به آن اضافه شده است. بعد از این مرحله، باکتری به محلول اضافه و سپس فائل در انکوباتور، در دمای  $30^\circ\text{C}$  درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت  $24$  الی  $48$  ساعت قرار داده شده است.<sup>[۱۵]</sup>

از محیط کشت جامد ناترینت آگار جهت کشت باکتری و نگهداری بلندمدت از باکتری استفاده شده است. به منظور تهیه‌ی محیط کشت ذکر شده، مراحل مشابه مراحل تهیه‌ی محیط کشت مایع طی شده و در آخر محیط کشت حاوی باکتری در داخل یخچال با دمای  $4^\circ\text{C}$  درجه‌ی سانتی‌گراد قرار گرفته است. همچنین جهت سنجش خلوص باکتری‌های کشت داده شده، از روش رنگ‌آمیزی گرم استفاده شده است، که در آن مشاهده‌ی میکروسکوپی، خلوص باکتری تأیید و در شکل ۲، باکتری‌های خالص استفاده شده در پژوهش حاضر، در زیر میکروسکوپ نشان داده شده است.

به منظور جداسازی باکتری از محیط کشت مایع، از دستگاه سانتریفوژ با دور  $4000\text{ rpm}$  و به مدت  $20$  دقیقه استفاده شده است، تا باکتری به صورت لخته

### ۴.۳. تهیه‌ی نمونه‌های تثبیت شده

با توجه به وزن مخصوص خاک، مقدار مشخصی خاک در داخل قالب‌ها ریخته و پس از آن در ابتدا ۲۵۰ cc سوسپانسیون باکتری به خاک اضافه شده و بعد از گذشت ۱ ساعت، ۲۵۰ cc محلول تثبیت، که حاوی مقداری کلسیم کلراید بوده است، به خاک تزریق شده است. سپس ۲۵۰ cc محلول سیمان‌تاسیون بعد از گذشت ۶ ساعت به خاک اضافه شد و بعد از ۱۲ ساعت مجدداً ۲۵۰ cc محلول سیمان‌تاسیون به خاک تزریق و بعد از گذشت ۱۲ ساعت تمامی این مراحل دوباره تکرار شده است.<sup>[۱۵]</sup> در شکل ۴، نمونه‌های تثبیت شده بعد از پایان مرحله‌ی تزریق مشاهده می‌شوند. تهیه‌ی نمونه‌های استفاده شده در SEM همانند نمونه‌های دیگر است، با این تفاوت که آن‌ها در قالب‌هایی با ابعاد ۲ × ۲ × ۴ ساخته شده‌اند، که در شکل ۵ مشاهده می‌شود. علت این امر آن است که برای تهیه‌ی تصاویر SEM، نمونه‌هایی با ابعاد مذکور پاسخگو بوده است.

### ۴. طراحی آزمایش

در پژوهش حاضر، از ۳ غلظت مختلف برای مواد واکنش‌دهنده (اوره و کلسیم کلراید) با مقادیر ۰/۳، ۰/۵ و ۱ مولار و همچنین ۳ بازه‌ی مختلف برای OD (غلظت سوسپانسیون باکتری)، با بازه‌های (۰/۸-۱/۲)، (۱/۲-۲) و (۲-۴) استفاده و با در نظر گرفتن تأثیر زمان ماند، با انجام آزمایش بعد از گذشت ۱۵، ۳۰ و ۶۰ روز پژوهش تکمیل شده است. انتخاب غلظت‌های مختلف مواد واکنش‌دهنده و سوسپانسیون باکتری و زمان‌ماندها در پژوهش حاضر به صورتی انجام شده است که بتوان در

پایان کار، بیشترین مقاومت را با کمترین هزینه و صرف کمترین انرژی در نمونه‌ها مشاهده کرد. غلظت مواد و سوسپانسیون باکتری براساس بررسی مطالعات پیشین تعیین شده است.<sup>[۱۵]</sup> مقادیر ذکر شده بدین دلیل انتخاب شده‌اند که مقادیر کمتر از ۰/۳ مولار برای غلظت مواد واکنش‌دهنده و بازه‌ی کمتر از (۰/۸-۱/۲) برای غلظت سوسپانسیون باکتری، کمینه‌ی مقاومت موردنظر را تأمین نمی‌کنند و مقادیر بیشتر از ۱ مولار برای غلظت مواد واکنش‌دهنده و بازه‌ی بیشتر از (۲-۴) برای غلظت سوسپانسیون باکتری از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. همچنین در بیشتر پژوهش‌های انجام شده، نمونه‌ها بعد از گذشت ۲۸ روز آزمایش شده‌اند.<sup>[۲۷]</sup> بر این اساس در مطالعه‌ی حاضر، شکستن نمونه ۳۰ روز بعد از تزریق به‌عنوان معیار قرار گرفته و شکستن نمونه ۱۵ و ۶۰ روز بعد از تزریق برای کنترل دقیق‌تر انجام شده است. در پژوهش حاضر، برای تجزیه‌ی آماری داده‌ها از نرم‌افزار Minitab با الگوریتم ناگوجی استفاده شده است. با استفاده از روش ناگوجی می‌توان تابع‌های گوناگون پاسخ را برحسب عوامل مشخص شده تخمین زد. نتایج تخمین زده شده، ما را در به دست آوردن عواملی که به‌بهبودترین نتایج برای آزمایش مدنظر منجر می‌شود، یاری می‌کنند. روش ناگوجی با داشتن مرابایی چون کمتر بودن تعداد آزمایش‌ها و در نتیجه کمتر بودن هزینه و زمان آزمایش، قابلیت بررسی اثرهای متقابل و انجام دادن آزمایش‌ها به‌صورت موازی و در نهایت پیش‌بینی پاسخ بهینه را دارد. به‌طور کلی، روش ناگوجی، تعداد آزمایش‌های لازم برای بهینه‌سازی را کاهش می‌دهد و بر دقت نتایج می‌افزاید. بنابراین با کمک نرم‌افزار Minitab، طرح آزمایشی با ۹ نمونه‌ی تثبیت شده به‌دست آمده است، که در جدول ۲ مشخصات آنها ارائه شده است.

### ۵. ارزیابی نتایج

در پژوهش حاضر، جهت بررسی تأثیر متغیرهای ذکر شده در نمونه‌های بهسازی شده به روش سیمان‌تاسیون بیولوژیکی، نمونه‌های تهیه شده تحت آزمایش سه‌محوری تحکیم یافته‌ی زهکشی نشده و آزمایش نفوذپذیری قرار گرفته‌اند. همچنین آزمایش SEM جهت تأیید و اطمینان از نتایج آزمایش‌های سه‌محوری و نفوذپذیری صورت گرفته است.

#### ۱.۵. ارزیابی نتایج آزمایش‌های سه‌محوری

در پژوهش حاضر، آزمایش‌های سه‌محوری به‌صورت کنترل کرنش (اعمال تغییرشکل محوری با سرعت ثابت به وسیله‌ی یک پرس هیدرولیک تا لحظه‌ی گسیختگی نمونه)

جدول ۲. مشخصات نمونه‌های تثبیت شده.

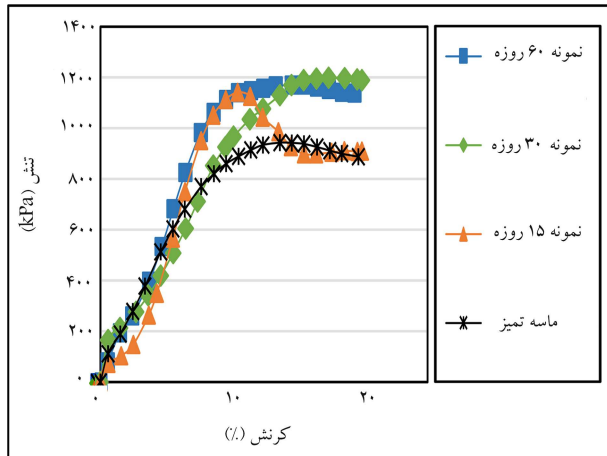
شماره نمونه	مولاریته	OD (غلظت باکتری)	زمان شکستن نمونه (روز)
۱	۰/۳	۰/۸ تا ۱/۲	۱۵
۲	۰/۳	۱/۲ تا ۲	۳۰
۳	۰/۳	۲ تا ۴	۶۰
۴	۰/۵	۰/۸ تا ۱/۲	۳۰
۵	۰/۵	۱/۲ تا ۲	۶۰
۶	۰/۵	۲ تا ۴	۱۵
۷	۱	۰/۸ تا ۱/۲	۶۰
۸	۱	۱/۲ تا ۲	۱۵
۹	۱	۲ تا ۴	۳۰



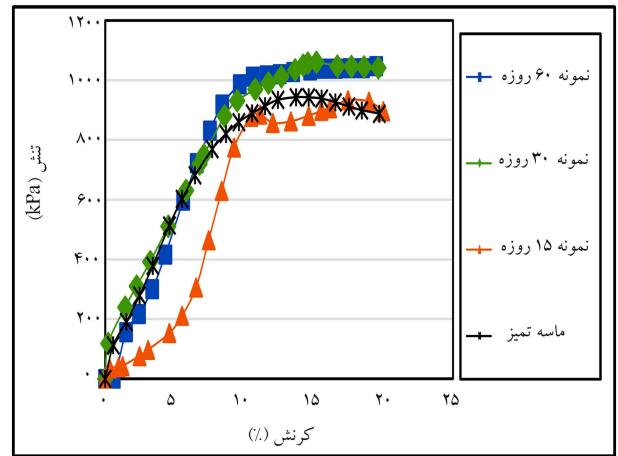
شکل ۴. نمونه‌ها در پایان مرحله‌ی تزریق محلول‌ها.



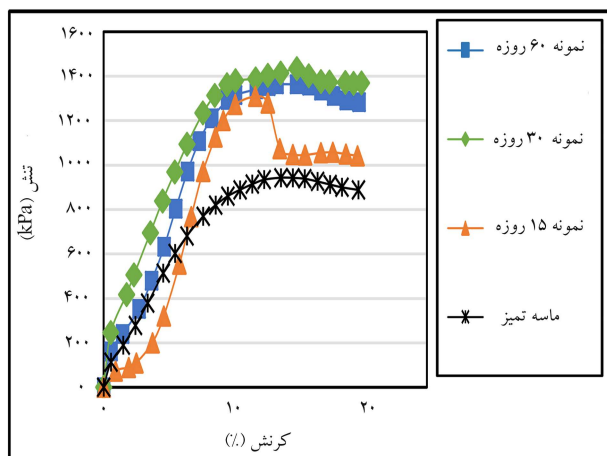
شکل ۵. نمونه‌های تهیه شده برای آزمایش SEM.



شکل ۷. منحنی های تنش - کرنش نمونه ها با مولار ثابت ۰٫۵ با زمان ماند های ۱۵، ۳۰ و ۶۰ روز



شکل ۶. منحنی های تنش - کرنش نمونه ها با مولار ثابت ۰٫۳ با زمان ماند های ۱۵، ۳۰ و ۶۰ روز



شکل ۸. منحنی های تنش - کرنش نمونه ها با مولار ثابت ۱ با زمان ماند های ۱۵، ۳۰ و ۶۰ روز

بیشینه‌ی تنش در نمونه‌ی شکسته شده پس از ۶۰ روز، در نمونه با مولار ثابت ۰٫۵، به میزان ۲۴/۱۸٪ و در نمونه با مولار ثابت ۱، به میزان ۵۰/۳۷٪ بوده است. با در نظر گرفتن شکل‌های ۶ الی ۸ و درصد های محاسبه شده می‌توان نتیجه گرفت که در غلظت ثابت، زمان بهینه برای شکستن نمونه‌های تثبیت شده ۳۰ روز بوده و گیرش نهایی نمونه‌ها در ۳۰ روز صورت گرفته است، که نشان می‌دهد فعالیت باکتری‌ها و عمل سیماناسیون در دوره‌ی مذکور متوقف نشده است. مقاومت نامطلوب نمونه‌های ۱۵ روزه بیان‌گر این است که نمونه در ۱۵ روز به گیرش نهایی نمی‌رسد و رسوبات کلسیم کربنات کاملاً شکل نمی‌گیرند. در نمونه‌های ۶۰ روزه نسبت به نمونه‌های ۳۰ روزه، مقاومت تغییر چندانی نداشته و حدود ۱ تا ۲ درصد بوده است، که این اختلاف مقاومت می‌تواند به علت شرایط دمایی متفاوت و تغییرات فصلی در حین ساخت نمونه‌ها ایجاد شده باشد. عدم تغییر مقاومت بعد از گذشت ۳۰ روز ناشی از این است که فعالیت باکتری‌ها در نمونه‌ها بعد از ۳۰ روز متوقف می‌شود و دیگر افزایش مقاومت ادامه پیدا نمی‌کند و ثابت باقی می‌ماند.

در شکل ۹ و جدول ۳، که مشخصات سطوح متغیرها در آن ارائه شده است، در نمودارهای به دست آمده در نرم‌افزار Minitab، می‌توان تأثیر هر یک از متغیرهای مولاریته، OD و زمان شکستن نمونه را به طور جداگانه بر نمونه‌های تثبیت شده مشاهده کرد. نمودارها بر اساس بیشینه‌ی مقاومت به دست آمده از آزمایش‌های

صورت گرفته است. نمونه پس از آن که در داخل دستگاه قرار گرفت، اشباع شد که این کار با استفاده از پس فشار (Back pressure)، پمپ خلاء و گاز صورت گرفته است. در مرحله‌ی بعد، تحکیم با فشار تحکیمی ۱۰۰ کیلو پاسکال صورت گرفت و در انتها، بارگذاری با سرعت ثابت ۰٫۵ میلی‌متر بر دقیقه بر روی نمونه اعمال شد و پس از اتمام بارگذاری، آزمون سه‌محوری به پایان رسید.

#### ۱.۱.۵. مقایسه‌ی نتایج با استفاده از نمودارهای تنش - کرنش

همان‌طور که گفته شد، در پژوهش حاضر ۹ نمونه‌ی تثبیت شده بر اساس طرح آزمایش تهیه شده به کمک الگوریتم تاگوجی ساخته شده است. هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی زمان ماند نمونه‌ی تثبیت شده است، که با توجه به نمودارهای شکل ۶ مشاهده می‌شود که بیشینه‌ی تنش نمونه‌ی شکسته شده پس از ۱۵ روز نسبت به بیشینه‌ی تنش ماسه‌ی تمیز، ۱/۰۶٪ کاهش یافته است. نمونه‌ی اخیر با کمترین میزان مواد و کمترین غلظت باکتری ساخته شده و بعد از گذشت ۱۵ روز از پایان تزریق شکسته شده است. در این مدت هنوز رسوبات کلسیت کاملاً ایجاد نشده‌اند و این امر باعث شده است که در نمونه، ناپوستگی ایجاد و کاهش مقاومت مشاهده شود. منحنی تنش - کرنش نمونه‌ی ۳۰ روزه در شکل ۶ نشان می‌دهد که بیشینه‌ی تنش نمونه‌ی شکسته شده پس از ۳۰ روز نسبت به بیشینه‌ی تنش ماسه‌ی تمیز، به میزان ۱۲/۵۱٪ افزایش یافته است. همچنین منحنی تنش - کرنش نمونه‌ی ۶۰ روزه، افزایش بیشینه‌ی تنش را در نمونه‌ی شکسته شده پس از ۶۰ روز، ۹/۹۶٪ نشان می‌دهد. طبق محاسبات انجام شده، بیشینه‌ی تنش نمونه‌ی ۳۰ روزه نسبت به نمونه‌ی ۱۵ روزه، افزایش ۱۳/۷ درصدی داشته و نمونه‌ی ۶۰ روزه نسبت به نمونه‌ی ۳۰ روزه، کاهش ۲/۲۶ درصدی را نشان داده است. با توجه به ارقام به دست آمده مشاهده می‌شود که گیرش نمونه پس از ۳۰ روز، کامل و بعد از آن تقریباً ثابت شده است.

در شکل‌های ۷ و ۸، به ترتیب منحنی‌های تنش - کرنش نمونه‌هایی با مولار ثابت ۰٫۵ و ۱ با زمان ماند های ۱۵، ۳۰ و ۶۰ روز مشاهده می‌شود، که مطابق آن‌ها بیشینه‌ی تنش نمونه‌ی شکسته شده پس از ۱۵ روز نسبت به بیشینه‌ی تنش ماسه‌ی تمیز، در نمونه با مولار ثابت ۰٫۵، به میزان ۲۰/۸۹٪ و در نمونه با مولار ثابت ۱، به میزان ۳۸/۶۰٪ افزایش یافته و همچنین بیشینه‌ی تنش نمونه‌ی شکسته شده پس از ۳۰ روز نسبت به بیشینه‌ی تنش ماسه‌ی تمیز در نمونه با مولار ثابت ۰٫۵، به میزان ۲۶/۰۸٪ و در نمونه با مولار ثابت ۱، به میزان ۵۱/۹۶٪ افزایش یافته و افزایش

پیدا کرده است، که می‌توان آن را با شکل ۹ کاملاً توجیه کرد. مطابق شکل ۹، مقاوم‌ترین نمونه، نمونه‌ی است که در شرایط بهینه، یعنی غلظت ۱ مولار و زمان شکست ۳۰ روز و OD (۲-۴) آزمایش شود، که نمونه‌ی ۹ هر سه شرط را دارد. نکته‌ی قابل توجه دیگری که از نمودار اخیر می‌توان برداشت کرد این است که تمامی نمونه‌ها در کرنش ۱۰ تا ۱۸ درصد گسیخته شده‌اند. کرنش نمونه‌های شکسته شده بعد از ۱۵ روز تقریباً در هر ۳ نمونه‌ی ۱۵ روزه، ۱۰٪ بوده است. کرنش نمونه‌های شکسته شده بعد از ۳۰ روز تقریباً در هر ۳ نمونه‌ی ۳۰ روزه، به میزان ۱۸٪ و در نمونه‌های ۶۰ روزه نیز تقریباً با نمونه‌های ۳۰ روزه یکسان بوده است. درصد‌های به دست آمده نشان می‌دهد هر چه رسوبات کلسیم کربنات در نمونه‌ها بیشتر شده است، تغییرشکل‌های بزرگ‌تری در نمونه‌ها در زمان شکست آن‌ها مشاهده شده است. به عبارتی فرایند اخیر، شکل‌پذیری بیشتر نمونه‌ها را به دنبال دارد و می‌تواند تأثیر به‌سزایی در رفتار تنش - کرنش خاک‌های تثبیت شده با روش سیمان‌تاسیون بیولوژیکی داشته باشد.

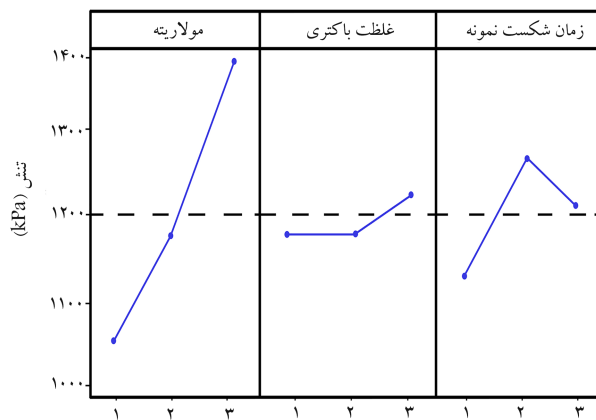
زمان بهینه برای شکستن نمونه‌ها در نوشتارهای مختلف متفاوت بوده و هنوز در این مورد پژوهش‌گران به اتفاق نظر نرسیده‌اند. در برخی از مطالعات، ۷ روز به‌عنوان زمان بهینه معرفی شده است،<sup>[۲۷]</sup> در یک سری از مطالعات، ۱۴ روز را زمان مناسب برای انجام آزمایش‌های مقاومتی معرفی کرده‌اند،<sup>[۲۰]</sup> که نتایج قابل توجهی در مطالعات اخیر به دست آمده است. اما در بیشتر پژوهش‌های انجام شده، نمونه‌ها بعد از گذشت ۲۸ روز آزمایش شده‌اند.<sup>[۲۸]</sup> بر این اساس در مطالعه‌ی حاضر شکست نمونه ۳۰ روز بعد از تزریق به‌عنوان معیار قرار گرفته و شکست نمونه بعد از ۱۵ و ۶۰ روز برای کنترل دقیق‌تر انجام شده است. برای اطمینان از نتایج حاصل، تعداد قابل توجهی نمونه تهیه شده و تحت آزمایش سه‌محوری قرار گرفته‌اند. همچنین برای آنکه نتیجه‌ی مطلوبی حاصل شود، از الگوریتم تاکوجی استفاده شده است. اختلاف نظرهای موجود در این زمینه می‌تواند با دلایل متعددی توجیه شود. عوامل بسیاری در تشکیل درست و ایده‌آل رسوبات کلسیم کربنات تأثیرگذار است؛ عواملی، همچون: دما، مولاریته، غلظت باکتری، نحوه‌ی تزریق محلول سیمان‌تاسیون، دفعات تزریق محلول سیمان‌تاسیون، جنس و نوع قالب استفاده شده و ... که در نوشتارهای مختلف، متفاوت هستند. در پژوهش حاضر سعی شده است که متغیرها به صورتی انتخاب شوند که نتایج به دست آمده به راحتی با یکدیگر مقایسه شوند و بهترین نتیجه حاصل و ارائه شود.

#### ۲.۱.۵. مقایسه‌ی نتایج با استفاده از نمودارهای اضافه فشار آب حفره‌یی - کرنش

از آنجایی که در پژوهش حاضر آزمایش‌های سه‌محوری در شرایط CU (تحکیم‌یافته‌ی زهکشی نشده) انجام شده است، با اندازه‌گیری فشار آب حفره‌یی می‌توان آن را نیز بررسی کرد.

در شکل ۱۱، منحنی اضافه فشار آب حفره‌یی - کرنش تمامی نمونه‌ها مشاهده می‌شود، که مطابق آن در مولار ثابت ۰/۳، نمونه‌ی ۳۰ روزه دارای اضافه فشار آب حفره‌یی ۱۱۸- کیلوپاسکال در نقطه‌ی گسیختگی است.

همچنین نمونه‌یی که پس از ۶۰ روز شکسته شده است، اضافه فشار آب حفره‌یی ۱۰۲- کیلوپاسکال در نقطه‌ی گسیختگی دارد. اضافه فشار آب حفره‌یی نمونه‌ی شکسته شده پس از ۳۰ روز نسبت به اضافه فشار آب حفره‌یی ماسه‌ی تمیز ۳۱٪ افزایش یافته است، که میزان مذکور در نمونه‌ی شکسته شده پس از ۶۰ روز، ۱۳٪ بوده است. همچنین در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که در مولار ثابت ۰/۵، نمونه‌ی ۱۵ روزه، اضافه فشار آب حفره‌یی ۱۲۸- کیلوپاسکال و نمونه‌هایی که پس از ۳۰



شکل ۹. تأثیر هر یک از متغیرهای مولاریته، OD و زمان شکستن نمونه به‌طور مجزا.

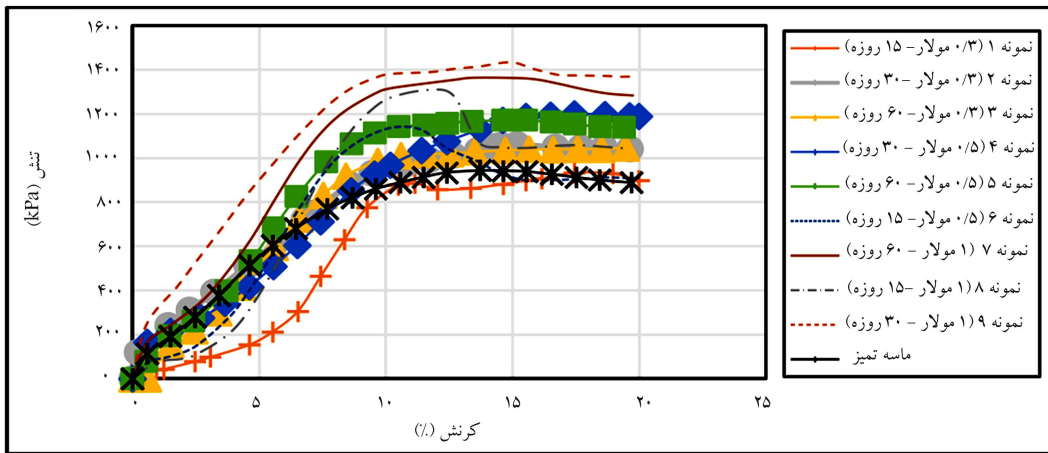
جدول ۳. مشخصات سطوح آزمایش در نرم‌افزار Minitab.

سطوح آزمایش	مولاریته	غلظت باکتری (OD)	زمان شکستن نمونه
۱	۰/۳	(۱/۲-۰/۸)	۱۵
۲	۰/۵	(۲-۱/۲)	۳۰
۳	۱	(۴-۲)	۶۰

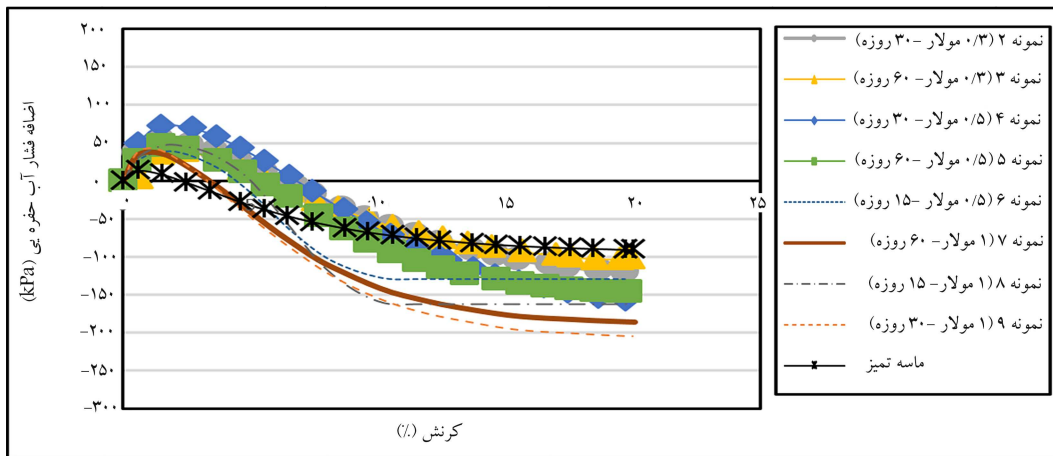
سه‌محوری رسم شده‌اند، که در آن‌ها مشاهده می‌شود افزایش مولاریته‌ی مواد استفاده شده در نمونه‌های تثبیت شده در بین متغیرهای اعمال شده، بیشترین تأثیر را در مقاومت نمونه‌ها داشته است. روند تغییر ایجاد شده به این صورت است که هر چه مولاریته‌ی مواد استفاده شده در نمونه‌های تثبیت شده بیشتر می‌شود، مقاومت نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد. نمونه‌های ساخته شده با غلظت ۱ مولار بالاترین مقاومت را داشته‌اند، چرا که مقدار کلسیت ایجاد شده در نمونه‌های اخیر افزایش یافته است، که باعث پُر شدن کامل خلل و فرج موجود در خاک و مقاومت بیشتر شده است. بنابراین غلظت ۱ مولار به‌عنوان غلظت بهینه در پژوهش حاضر تعیین شده است. همان‌طور که پیشتر گفته شد، مطابق شکل ۹، زمان بهینه برای شکستن نمونه‌ها، ۳۰ روز بعد از پایان تزریق و دومین عامل مؤثر در مقاومت نمونه‌ها، زمان شکستن آن‌هاست.

غلظت باکتری استفاده شده در نمونه‌های تثبیت شده نسبت به دو متغیر دیگر تأثیر کمتری در مقاومت نمونه‌های تثبیت شده داشته است. غلظت بهینه‌ی باکتری (OD) استفاده شده در نمونه‌های تثبیت شده در بازه‌ی (۲-۴) بوده و نمونه بیشترین مقاومت را در بازه‌ی اخیر داشته است. کاهش غلظت باکتری باعث کاهش نرخ رسوب کلسیت می‌شود، چرا که در این حالت باکتری کافی برای انجام فرایند رسوب کلسیت وجود نخواهد داشت. افزایش تعداد سلول‌های باکتری در نمونه باعث می‌شود که اوره‌ی موجود در محیط به مقدار بیشتری تجزیه شود، که منجر به رسوب کلسیت بیشتر می‌شود. البته باید توجه شود که با افزایش OD باکتری، برای انجام فعالیت متابولیک نیاز به شرایط محیطی و مواد مغذی بیشتری وجود دارد.

در شکل ۱۰، منحنی تنش - کرنش تمامی نمونه‌ها مشاهده می‌شود، که مطابق آن نمونه‌ی ۱ با OD (۱/۲-۰/۸)، غلظت ۰/۳ مولار و زمان ماند ۱۵ روز، کمترین میزان مقاومت، معادل ۹۳۳ کیلوپاسکال و نمونه‌ی ۹ با OD (۲-۴)، غلظت ۱ مولار و زمان ماند ۳۰ روز، بیشترین مقاومت، معادل ۱۴۳۳ کیلوپاسکال را داشته‌اند. بیشینه‌ی تنش نمونه‌ی ۹ نسبت به بیشینه‌ی تنش نمونه‌ی ۱، به میزان ۵۳٪ افزایش



شکل ۱۰. نمودار تنش - کرنش ۹ نمونه‌ی تثبیت شده و مقایسه‌ی آن‌ها با نمونه‌ی ماسه‌ی تمیز.



شکل ۱۱. نمودار اضافه فشار آب حفره بی - کرنش ۹ نمونه‌ی تثبیت شده.

و فرج در نمونه‌های مقاوم‌تر بوده و نفوذ آب حفره‌یی به داخل نمونه، فشار بیشتری لازم داشته است.

با استفاده از نتایج ذکر شده و رابطه‌ی ۱، تنش مؤثر تمامی نمونه‌ها محاسبه و در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به ارقام به دست آمده، می‌توان دریافت که تنش مؤثر نمونه‌های تثبیت شده نسبت به نمونه‌ی ماسه‌ی تمیز درصد قابل توجهی افزایش پیدا کرده است:

$$\sigma = \sigma' + \Delta u \quad (1)$$

که در آن،  $\sigma$  تنش کل،  $\sigma'$  تنش مؤثر و  $\Delta u$  اضافه فشار آب حفره‌یی هستند. در شکل (۱۲ - الف)، نمونه‌ی تثبیت شده‌ی ۹ (مولاریته‌ی ۱، OD (۴ - ۲) و زمان‌ماند ۳۰ روز (قبل از انجام آزمایش سه‌محوری)) و در شکل (۱۲ - ب)، نمونه‌ی تثبیت شده پس از بارگذاری و اتمام آزمایش سه‌محوری مشاهده می‌شود و گسیختگی نمونه در تصویر کاملاً مشخص است.

### ۲.۵. نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری بر روی نمونه‌های تثبیت شده و ماسه‌ی تمیز

در پژوهش حاضر، برای تعیین ضریب نفوذپذیری، آزمایش نفوذپذیری با بار ثابت انجام شده است. در این حالت، خاک موردنظر و یا نمونه‌ی تثبیت شده در داخل

و ۶۰ روز شکسته شده‌اند، به ترتیب اضافه فشار آب حفره‌یی ۱۵۸- و ۱۴۶- کیلوپاسکال در نقطه‌ی گسیختگی داشته‌اند. اضافه فشار آب حفره‌یی پس از ۱۵ روز نسبت به اضافه فشار آب حفره‌یی ماسه‌ی تمیز، ۴۲٪ افزایش و اضافه فشار آب حفره‌یی نمونه‌ی شکسته شده پس از ۳۰ روز نسبت به ماسه‌ی تمیز ۷۵٪ افزایش یافته و در نمونه‌ی شکسته شده پس از ۶۰ روز، ۶۲٪ بوده است. در سه نمونه‌ی مذکور نیز همانند نمونه‌های ۰/۳ مولار مشاهده می‌شود که هر چه مقاومت نمونه افزایش یافته است، اضافه فشار آب حفره‌یی نیز افزایش یافته است. منحنی‌های اضافه فشار آب حفره‌یی - کرنش نمونه‌هایی با مولار ثابت ۱ با زمان‌ماندهای ۱۵، ۳۰ و ۶۰ روز در شکل ۱۱ نشان می‌دهند که نمونه‌ی ۱۵ روزه، اضافه فشار آب حفره‌یی ۱۶۲- کیلوپاسکال دارد. همچنین نمونه‌هایی که پس از ۳۰ و ۶۰ روز شکسته شده‌اند، به ترتیب اضافه فشار آب حفره‌یی ۲۰۴- و ۱۸۶- کیلوپاسکال در نقطه‌ی گسیختگی داشته‌اند. با توجه به نمودار اخیر مشاهده می‌شود که اضافه فشار آب حفره‌یی پس از ۱۵ روز نسبت به اضافه فشار آب حفره‌یی ماسه‌ی تمیز، ۸۰٪ افزایش و اضافه فشار آب حفره‌یی نمونه‌ی شکسته شده نیز پس از ۳۰ روز نسبت به ماسه‌ی تمیز، ۱۲۶٪ و در نمونه‌ی شکسته شده پس از ۶۰ روز، ۱۰۶٪ افزایش یافته است. به طور کلی، با توجه به منحنی‌های اضافه فشار آب حفره‌یی - کرنش و منحنی‌های تنش - کرنش می‌توان دریافت که هر چه مقاومت نمونه افزایش یافته است، اضافه فشار آب حفره‌یی نیز افزایش یافته است، که به دلیل کمتر شدن خلل

جدول ۴. تنش‌های مؤثر به دست آمده در تمامی نمونه‌ها.

شماره‌ی نمونه	تنش (کیلوپاسکال)	اضافه فشار آب حفزه‌یی (کیلوپاسکال)	تنش مؤثر (کیلوپاسکال)
ماسه‌ی تمیز	۹۴۳	-۹۰	۱۱۳۳
نمونه‌ی ۲	۱۰۶۱	-۱۱۸	۱۱۷۹
نمونه‌ی ۳	۱۳۰۷	-۱۰۲	۱۱۳۹
نمونه‌ی ۴	۱۱۸۹	-۱۵۸	۱۳۴۷
نمونه‌ی ۵	۱۱۷۱	-۱۴۶	۱۳۱۷
نمونه‌ی ۶	۱۱۴۰	-۱۲۸	۱۲۶۸
نمونه‌ی ۷	۱۴۱۸	-۱۸۶	۱۶۰۴
نمونه‌ی ۸	۱۳۰۷	-۱۶۲	۱۴۶۹
نمونه‌ی ۹	۱۴۳۳	-۲۰۴	۱۶۳۷



شکل ۱۳. نمونه‌ی تثبیت شده در داخل سل نفوذپذیری.

جدول ۵. ضرایب نفوذپذیری نمونه‌های آزمایش شده.

نمونه‌های آزمایش شده	ضریب نفوذپذیری (سانتی‌متر بر ثانیه)
ماسه‌ی تمیز	۰/۰۸
۰/۳ مولار	۰/۰۷۴
۰/۵ مولار	۰/۰۶۷
۱ مولار	۰/۰۵۴



الف) نمونه‌ی تثبیت شده قبل از انجام آزمون سه محوری؟



ب) نمونه‌ی تثبیت شده بعد از گسیختگی.

شکل ۱۲. تغییرات ایجاد شده بر روی نمونه تثبیت شده‌ی تحت بارگذاری قرار گرفته.

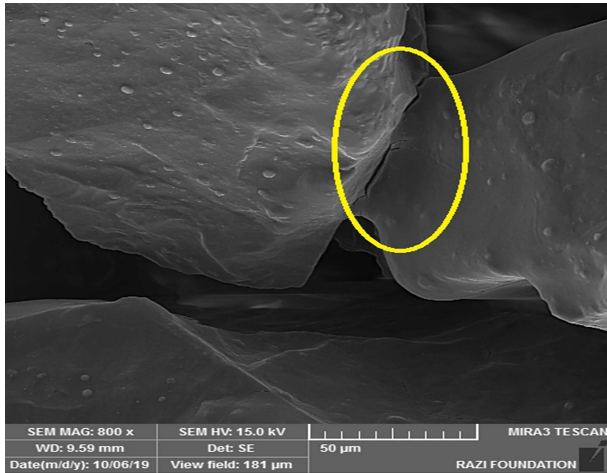
استوانه‌ی مخصوص، که سطح مقطع معینی دارد و زیر آن یک صفحه‌ی مشبک است، قرار گرفته است (شکل ۱۳). نمونه‌ی مورد آزمایش تحت جریان یکنواخت قائمی، که فشار ثابت داشت، قرار گرفت و به این صورت حجم آب جریان یافته و از خاک رد شده در واحد زمان تعریف شده است. با اندازه‌گیری اختلاف ارتفاع سطح آب در لوله‌هایی که به جدار استوانه متصل هستند، می‌توان شیب آب را به دست آورد و با استفاده از رابطه‌ی ۲، که بر اساس قانون دارسی به دست آمده است، ضریب نفوذپذیری را محاسبه کرد.

$$K = \frac{Q}{A i} \quad (2)$$

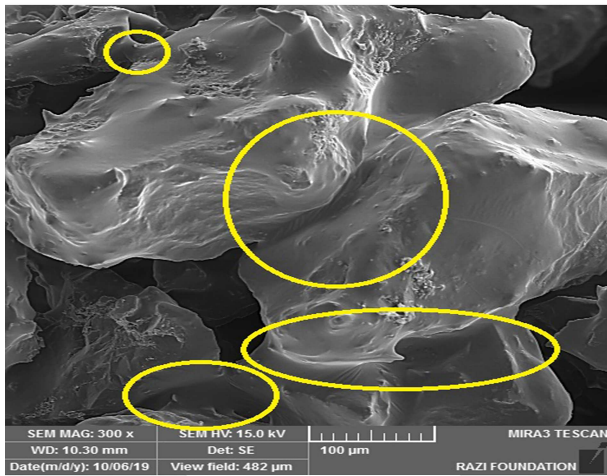
که در آن،  $K$  ضریب نفوذپذیری،  $Q$  دبی آب عبوری از نمونه‌ی داخل سل در زمان مشخص،  $A$  سطح مقطع نمونه و  $i$  شیب هیدرولیکی هستند.

برای بررسی نفوذپذیری در پژوهش حاضر، ۳ نمونه‌ی تثبیت شده با مولاریته‌های مختلف ۰/۳، ۰/۵ و ۱ OD ثابت (۰/۸-۱/۲) و زمان ماند ۳۰ روز ساخته شده و آزمون‌های نفوذپذیری بر روی آن‌ها صورت گرفته است. طبق جدول ۵، ضریب نفوذپذیری نمونه‌ی تثبیت شده با غلظت ۰/۳ مولار نسبت به ضریب نفوذپذیری ماسه‌ی تمیز حدود ۷/۵٪ و همچنین ضریب نفوذپذیری در نمونه‌های ۰/۵ و ۱ مولار نسبت به ماسه‌ی تمیز به ترتیب ۱۶/۲۵٪ و ۳۲/۵٪ کاهش یافته است. درصد‌های به دست آمده، نشان‌دهنده‌ی روند کاهشی ضریب نفوذپذیری با افزایش مولاریته‌ی مواد استفاده شده در نمونه‌های تثبیت شده هستند.

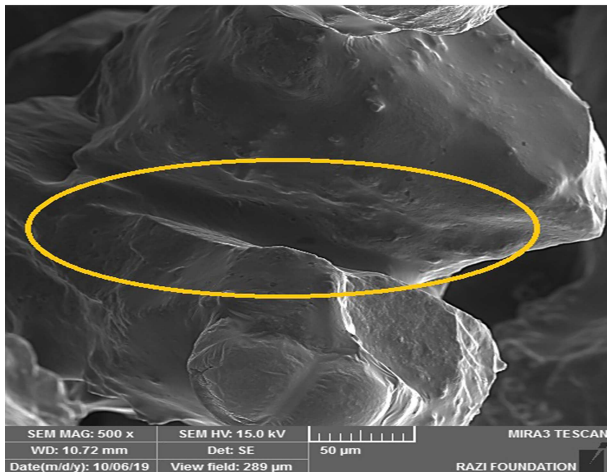




الف) نمونه ی تثبیت شده ی ۰/۳ مولار؛



ب) نمونه ی تثبیت شده ی ۰/۵ مولار؛



ج) نمونه ی تثبیت شده ی ۱ مولار.

شکل ۱۴. تصاویر SEM، نمایش پیوندهای کلسیت ایجاد شده در بین دانه‌های خاک.

۵. با افزایش مولاریته‌ی مواد استفاده شده در نمونه‌های تثبیت شده، ضریب نفوذپذیری کاهش یافته است، چرا که رسوبات کلسیت بیشتری تشکیل و خلل و فرج بیشتری پُر شده است. در پژوهش حاضر، کاهش ۳۲ درصدی در ضریب نفوذپذیری مشهود بوده است؛

۳.۵. نتایج آزمایش‌های SEM بر روی نمونه‌های تثبیت شده  
سه نمونه‌ی تثبیت شده با مولاریته‌های ۰/۳، ۰/۵ و ۱ و OD ثابت (۰/۸-۱/۲) و زمان‌ماند ۳۰ روز ساخته شدند و در دستگاه SEM قرار گرفتند. تصاویر به دست آمده از این آزمایش نشان می‌دهد که در هر ۳ نمونه، اطراف دانه‌های ماسه با رسوبات کلسیت کاملاً پوشیده و در نمونه‌ی تثبیت شده با مولاریته‌ی ۰/۳، کمترین طول پیوند بین دانه‌های ماسه ایجاد شده است. در نمونه‌های ۰/۵ و ۱ مولار پیوندهای قوی‌تر با طول پیوند بیشتری بین دانه‌های ماسه ایجاد شده است. به‌طورکلی، هر چه مولاریته‌ی مواد استفاده شده در نمونه‌ها افزایش یافته است، طول پیوند بین دانه‌های ماسه نیز افزایش یافته است. چرا که افزایش مولاریته‌ی مواد استفاده شده در نمونه باعث ایجاد رسوبات کلسیت بیشتری می‌شود. در شکل (۱۴ - الف)، مشاهده می‌شود که در نمونه‌ی ۰/۳ مولار، پیوند ضعیف و تردی بین دانه‌های ماسه ایجاد شده و پیوستگی کاملاً رخ نداده است. در شکل‌های (۱۴ - ب) و (۱۴ - ج)، که در آن‌ها به ترتیب نمونه‌های با مولاریته‌ی ۰/۵ و ۱ مشاهده می‌شود، در هر دو نمونه پیوند بین دانه‌های خاک با رسوبات کلسیت کاملاً شکل گرفته و طول پیوند در نمونه‌ی ۱ مولار بیشتر بوده و همین افزایش پیوستگی بین دانه‌های خاک و افزایش رسوبات کلسیت باعث افزایش مقاومت شده است، که تصاویر مذکور به خوبی نتایج به دست آمده در آزمایش سه‌محوری را توجیه و تأیید می‌کند.

## ۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به بررسی تأثیر مولاریته، زمان‌ماند و غلظت باکتری در مقاومت نمونه‌ی خاک تثبیت شده به روش سیماناسیون بیولوژیکی پرداخته شده است. برای این منظور، ابتدا یک نمونه ماسه‌ی سُست با دانه‌بندی یکنواخت بررسی و سپس نمونه‌های تثبیت شده به روش بیولوژیکی ارزیابی شده‌اند. نتایج به دست آمده در آزمایش‌های پژوهش حاضر به این شرح است:

۱. افزایش مولاریته‌ی مواد استفاده شده در نمونه‌های تثبیت شده، بیشترین تأثیر را در مقاومت نمونه‌ها داشته است. افزایش مقاومت ۵۳ درصدی در نمونه‌ی بهینه با مولاریته‌ی ۱ صورت گرفته است، که علت آن تشکیل رسوبات کلسیت بیشتر در فضاهای خالی نمونه بوده است. بنابراین غلظت ۱ مولار به‌عنوان غلظت بهینه در پژوهش حاضر تعیین شده است؛
۲. زمان بهینه برای شکستن نمونه‌ها، ۳۰ روز بعد از پایان تزریق بوده است. که در زمان اخیر، نمونه‌ها بیشترین مقاومت را داشته‌اند، بدین معنی که گیرش نهایی نمونه‌ها پس از گذشت ۳۰ روز تکمیل شده است. در نمونه‌های ۶۰ روزه، مقاومت نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های ۳۰ روزه تغییر چندانی نداشته و این تغییر حدود ۱ تا ۲ درصد بوده است؛

۳. غلظت باکتری استفاده شده در نمونه‌های تثبیت شده تأثیر تقریباً ۱ درصدی در مقاومت نمونه‌های تثبیت شده داشته و غلظت بهینه برای باکتری استفاده شده در بازه‌ی (۲-۴) تعیین شده است؛

۴. در نمونه‌های تثبیت شده، اضافه فشار آب حفره‌ی افزایش پیدا کرده است، چرا که هر چه نمونه مقاوم‌تر باشد، خلل و فرج کمتری دارد و نفوذ آب حفره‌ی به داخل آن نیازمند فشار بیشتری است. با افزایش مقاومت نمونه‌های تثبیت شده، تنش مؤثر نیز افزایش پیدا کرده است، که در پژوهش حاضر، افزایش ۴۴ درصدی در تنش مؤثر مشاهده شده است؛

آمده نشان می‌دهند که هر چه رسوبات کلسیم کربنات در نمونه‌ها بیشتر شده است، تغییرشکل‌های بزرگ‌تری در نمونه‌ها در زمان شکست آن‌ها مشاهده شده است. به عبارتی، فرایند مذکور، شکل‌پذیری بیشتر نمونه‌ها را به دنبال داشته است، که می‌تواند تأثیر به‌سزایی در رفتار تنش - کرنش خاک‌های تثبیت شده با روش سیمان‌تاسیون بیولوژیکی داشته باشد.

۶. در تصاویر SEM مشاهده شده است که با افزایش مولاریته‌ی مواد استفاده شده در نمونه‌ی تثبیت شده، پیوندهای کلسیت قوی‌تر با طول پیوند بیشتری ایجاد شده است، که این امر افزایش مقاومت نمونه‌های تثبیت شده را به همراه دارد؛  
۷. تمامی نمونه‌ها در کرنش ۱۰ تا ۱۸ درصد گسیخته شده‌اند. درصد‌های به دست

### پانوشتها

1. microbiologically induced CaCO precipitation
2. Spore
3. Bacillus Pasteurii
4. lyophilized
5. nutrient broth
6. nutrient agar
7. Buffer
8. suspension

### منابع (References)

1. Sharaky, A.M., Mohamed, N.S., Elmashad, M.E. and et al. "Application of microbial biocementation to improve the properties of sandy soil", *Construction and Physico-Mechanical Building Materials*, **190**, pp. 861-869 (2018).
2. Azadi, M., Shams Kia, N. and Kalantari, H. "Evaluation of the effects of tampering on the structure and temperature changes in the strength of biologically cemented soil samples", *Civil Engineering Sharif Journal*, **2-33(1.2)**, pp. 91-97, (In Persian) (2017).
3. Stocks-Fischer, S., Galinat, J.K. and Bang, S.S. "Microbiological precipitation of  $CaCO_3$ ", *Soil Biology and Biochemistry*, **31(11)**, pp. 1563-1571 (1999).
4. Bachmeier, K.L., Williams, A.E., Warmington, J.R. and et al. "Urease activity in microbiologically-induced calcite precipitation", *J. Biotechnol*, **93(2)**, pp. 171-181 (2002).
5. Ivanov, V. and Chu, J. "Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ", *Rev. Environ. Sci. Biotechnol*, **7**, pp. 139-153 (2008).
6. DeJong, Jason. T. "Bio-mediate soil improvement", *Ecological Engineering*, **36(2)**, pp. 197-210 (2010).
7. Whiffin, V.S., Van Paassen, L.A. and Harkes, M.P. "Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique", *Geomicrobiology Journal*, **24(5)**, pp. 417-423 (2007).
8. Azadi, M. and Pouri, S. "Evaluation of change in the behavior of sands under biological cementation", *Civil Engineering Sharif Magazine*, **2-23(1.2)**, pp. 71-77 (In Persian) (2017).
9. Tiwari, N., Satyam, N. and Sharma, M. "Micro-mechanical performance evaluation of expansive soil biotreated with indigenous bacteria using MICP method", *Scientific Reports*, **11**, 10324 (2021).
10. Paassen, L. "Biogrout: ground improvement by microbially induced carbonate precipitation", Delft University of Technology (2009).
11. Kalantary, F. and Kahani, M. "Evaluation of the ability to control biological precipitation to improve sandy soils", *Procedia Earth and Planetary Science*, **15**, pp. 278-284 (2015).
12. Dick, J., De Windt, W., De Graef, B. and et al. "Bio-deposition of a calcium carbonate layer on degraded limestone by Bacillus species", *Biodegradation*, **17(4)**, pp. 357-367 (2006).
13. Qian, C., Yu, X. and Wang, X. "A Study on the cementation interface of biocement", *Materials Characterization*, **136**, pp. 122-127 (2018).
14. Carmona, J.P., Oliveira, V. and Lemos, L.J. "Biostabilization of a sandy soil using enzymatic calcium carbonate precipitation", *Procedia Engineering*, **143**, pp. 1301-1308 (2016).
15. Al Qabany, A., Soga K. and Santamarina, C. "Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **138(8)**, pp. 992-1001 (2012).
16. Estrade, N., Carignan, J., Sonke, J.E. and et al. "Measuring hg isotopes in bio-geo-environmental reference materials", *Geostandards and Geoanalytical Research*, **34(1)**, pp. 79-93 (2010).
17. Cardoso, R., Pedreirab, R., Duarte, S.O. and et al. "About calcium carbonate precipitation on sand biocementation", *Engineering Geology*, **271**, 105612 (2020).
18. Nemati, M. and Voordouw, G. "Modification of porous media permeability using calcium carbonate produced enzymatically in situ", *Enzyme and Microbial Technology*, **33(5)**, pp. 635-642 (2003).
19. Amarakoon, G. and Kawasaki, S. "Utilization of microbially induced calcite precipitation for sand solidification using pararrhodobacter SP", *Springer*, **59(1)**, pp. 69-91 (2019).
20. Kahani, M., Kalantari, F., Bazzazadeh, R. and et al. "Bioclogging of calcium carbonate in sandy soils and its

- effect on increasing soil resistance”, *Environmental Periodical*, **52** (In Persian) (2012).
21. Xiao, P., Liu, H., Xiao, Y. and et al. “Liquefaction resistance of bio-cemented calcareous sand”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **107**, pp. 9-19 (2018).
  22. Riveros, G.A. and Sadrekarimi, A. “Liquefaction resistance of fraser river sand improved by a microbially-induced cementation”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **131**, pp.106034 (2020).
  23. Ghaffari, H. and Zomordian, S.M.A. “Study of shear strength of soil stabilized by microbiological method, Iranian soil and water research”, **48**(4), pp. 737-748 (In Persian) (2017).
  24. Cardoso, R., Pires, L., Duarte, S.O. and et al. “Effects of clay’s chemical interactions on biocementation”, *Applied Clay Science*, **156**, pp. 96-103 (2018).
  25. Cui, M.J., Zheng, J.J., Zhang, R.J. and et al. “Influence of cementation level on the strength behavior of biocemented sand”, *Acta Geotechnica*, **12**(5), pp. 971-986 (2017).
  26. Amin, M. and Zomordian, S. “The effect of bacterial injection in reducing the rate of sand erosion”, *Civil Engineering Sharif Journal*, **2-32**(2.2), pp. 13-19 (In Persian) (2016).
  27. Kejun, W., Yang, L., Shihui, L. and et al. “Development of an improved immersing method to enhance microbial induced calcite precipitation treated sandy soil through multiple treatments in low cementation media concentration”, *Geotechnical and Geological Engineering*, **37**, pp. 1015-1027 (2019).
  28. Chang, L. and Shahin, M.A. “Microbially induced calcit precipitation for stabilization”, *Ecological Wisdom Inspired Restoration Engineering*, pp. 47-68 (2019).