

# بررسی اثر تزریق نزولی در شکل‌گیری بلورهای کلسیت در سیمان‌تاسیون بیولوژیکی خاک‌های ماسه‌یی

مآنده کشاورز باحقیقت (کارشناس ارشد)

محمد آزادی\* (دانشیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۴۰۱)  
دوری ۲ - ۳۸، شماره ۱/۱، ص. ۹۸-۸۷، (پژوهشی)

روش سیمان‌تاسیون بیولوژیکی، روشی نوین برای اصلاح خاک بر مبنای رسوب کلسیم‌کربنات است. تا به امروز پژوهش‌های بسیاری در مورد آن صورت گرفته است که در آن‌ها توجه کمتری به تأثیر تزریق نزولی در شکل‌گیری بلورهای کلسیت در سیمان‌تاسیون بیولوژیکی خاک‌های ماسه‌یی شده است. در پژوهش حاضر، از باکتری حاوی اسپور استفاده شده است تا به کمک آن، تأثیر مولاریته و نوع تزریق (ثابت و نزولی) در مقاومت نفوذپذیری خاک بررسی شود. لذا نمونه‌های سیمانته شده، تحت آزمایش‌های سه‌محوری، نفوذپذیری و SEM قرار گرفتند تا با استفاده از نتایج حاصل، به بررسی مورد اخیر پرداخته شود. نتایج نشان می‌دهند که نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت ثابت ۱/۵ مولار، بهترین عملکرد را داشته و در تنش بیشینه‌ی ۱۵۱۹ کیلوپاسکال نسبت به ماسه‌ی تمیز، ۶۱/۰٪ افزایش مقاومت داشته است. همچنین ضریب نفوذپذیری نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت ثابت ۱/۵ مولار برابر ۴۷/۰٪ سانتی‌متر بر ثانیه بوده است که افزایش ۴۱/۲۵٪ نسبت به ماسه‌ی تمیز را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: سیمان‌تاسیون بیولوژیکی، غلظت نزولی، غلظت ثابت، سه‌محوری، باسیلوس پاستوری.

maede.bahaghighat@gmail.com  
azadi.mhmm@gmail.com

## ۱. مقدمه

افزایش روزافزون جمعیت جهان سبب افزایش نیاز به گسترش ساخت و سازهای شهری شده است. این ساخت و سازها مستلزم وجود بستر خاکی مناسب است؛ بنابراین، بهبود خاک بستر، اهمیت بسیاری دارد. روش‌های مختلفی برای این منظور وجود دارد، به‌طور مثال: تزریق سیمان پرتلند که به دلیل مصرف انرژی بالا، آلودگی‌های زیست‌محیطی جدی به همراه دارد و روش‌های دیگری که صرفه‌ی اقتصادی ندارند؛ به همین دلیل در چند دهه‌ی اخیر، پژوهشگران بسیاری تلاش کرده‌اند تا روشی سازگار با محیط‌زیست و با صرفه‌ی اقتصادی پیدا کنند. روش سیمان‌تاسیون بیولوژیکی، روشی سازگار با محیط‌زیست و اقتصادی است که امروزه در سراسر جهان به آن توجه شده است. روش سیمان‌تاسیون بیولوژیکی که از ادغام علوم مهندسی عمران، ژئوشیمی و میکروبیولوژی ایجاد شده است، مبتنی بر تشکیل رسوب‌های کربنات کلسیم است که از واکنش اوره و یک منبع کلسیم در خاک ایجاد می‌شود و فرایند مذکور به صورت طبیعی در داخل خاک صورت می‌گیرد. فرایند تشکیل رسوب‌های کربنات کلسیم در مدت زمان طولانی در خاک انجام می‌شود، بنابراین از باکتری‌ها جهت افزایش

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۳/۲۹، اصلاحیه ۱۳/۰۶/۱۴۰۰، پذیرش ۱۷/۰۸/۱۴۰۰.

DOI:10.24200/J30.2021.58397.2975

در پژوهش حاضر، از روش دوم جهت بهسازی خاک ماسه‌یی استفاده شده است. باکتری‌هایی که برای ایجاد رسوب کلسیت استفاده می‌شوند، باید خاصیت رسوب‌زایی داشته باشند. این‌گونه از باکتری‌ها به ۲ دسته تقسیم می‌شوند: دسته‌ی اول، باکتری‌های خانوادگی باسیلاس<sup>۳</sup> هستند که باکتری‌های هوازی‌اند و سبب تولید رسوب کلسیت می‌شوند. روش MICP<sup>۴</sup> نیز بر پایه‌ی استفاده از باکتری‌های خانوادگی باسیلاس طراحی شده است. دسته‌ی دوم، باکتری‌های نیتروژن‌زا هستند

که در طی انجام واکنش در خاک، گاز نیتروژن آزاد می‌کنند و بی‌هوازی هستند و در شرایط خاک اشباع نیز قابلیت ایجاد رسوب دارند.<sup>[۱]</sup> در پژوهش حاضر، از باکتری‌های دسته‌ی اول استفاده شده است. عوامل مختلفی، همچون: نوع باکتری، غلظت باکتری، دما، PH و مشخصات خاک در روند MICP و نوع کریستال‌ها و مقدار کلسیت ایجاد شده تأثیر دارند، که همین امر سبب شده است تا در دو دهه‌ی اخیر، پژوهشگران اقدام به مطالعه بر روی روش مذکور کنند و پژوهش‌های بسیاری به منظور بررسی فرایند در محیط آزمایشگاهی برای اصلاح خاک صورت گیرد.<sup>[۲]</sup> فرایند کلسیت شدن، نتایج آزمایشگاهی خوبی در افزایش مقاومت برشی خاک، بازسازی ترک بتن و کنترل فرسایش خاک در مناطق ساحلی و رودخانه‌ها، کاهش نشست، افزایش سختی و صلبیت و همچنین کاهش نفوذپذیری خاک داشته است.<sup>[۳]</sup> عده‌ی از پژوهشگران با استفاده از فرایند کلسیت شدن، به اصلاح آلودگی‌های خاک پرداخته‌اند.<sup>[۴-۶]</sup> برخی دیگر نیز از مواد ذکر شده جهت تقویت مقاومت بتن و ترمیم بتن‌های آسیب‌دیده استفاده کرده‌اند.<sup>[۷-۸]</sup> همچنین، پژوهش‌هایی با هدف بررسی اثر رسوب کربنات کلسیم در بهبود خواص مهندسی خاک‌ها صورت گرفته است. در این خصوص، فیشر<sup>۵</sup> و همکاران (۱۹۹۹)، مطالعاتی با عنوان رسوب میکروبیولوژیکی کربنات کلسیم انجام داده‌اند که به نحوه‌ی ایجاد رسوب‌های کربنات کلسیم توسط باکتری باسیلوس پاستوری و نیز اثر آن در خاک ماسه‌ی و مقاومت خاک در برابر موج برشی توسط اشعه‌ی ایکس پرداخته‌اند که از مهم‌ترین نتایج آن می‌توان به افزایش مقاومت در نمونه‌های سیمانته شده اشاره کرد.<sup>[۹]</sup> مطالعات بسیاری نیز به منظور بررسی آثار روش MICP در مشخصات مقاومتی خاک با استفاده از آزمایش برش مستقیم انجام شده است که نتایج به دست آمده نشانگر افزایش مقاومت خاک سیمانته شده با روش MICP بوده است.<sup>[۱۰-۱۱]</sup> در سال ۲۰۱۰، پژوهشگران به طور گسترده‌تر مطالعات خود را حول روش MICP آغاز کردند که نتایج حاصل به اهمیت روش نوین تزریق میکروبیولوژی در تثبیت و بهبود خواص خاک اشاره داشته است.<sup>[۱۲]</sup> مطالعات و پژوهش‌های صورت گرفته در رابطه با روش MICP تا به امروز ادامه داشته است که از این بین می‌توان به مطالعات شارکی<sup>۶</sup> (۲۰۱۸) اشاره کرد، که پژوهشی با عنوان استفاده از تکنولوژی میکروبیولوژی برای بهبود خواص فیزیکی و دینامیکی خاک ماسه‌ی انجام داده است. ایشان با استفاده از خاک نرم اطراف رود نیل در مصر و باکتری باسیلوس پاستوری به بررسی بهبود خواص خاک توسط روش‌های درمان مختلف، شامل تزریق همراه با تثبیت و بدون تثبیت پرداخته و دریافته است که تزریق باکتری با روش محلول تثبیت نسبت به روش بدون محلول تثبیت در شرایط مشابه، مؤثرتر است. علاوه بر این، استفاده از محیط رشد بدون پروسه‌ی ساترئیفیوژ و آنکوباسیون در ۱۲ ساعت به صرفه‌تر است.<sup>[۱۳]</sup> شیاو<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۸) نیز در بررسی مقاومت روانگرایی ماسه‌ی آهکی سیمانته شده‌ی بیولوژیکی با استفاده از آزمایش سه‌محوری سیکنی دریافته‌اند که مقاومت روانگرایی ماسه‌ی آهکی در نمونه‌های سیمانته شده بهبود یافته است.<sup>[۱۴]</sup> چنگ<sup>۸</sup> و شاهین (۲۰۱۹)، نیز در بررسی تأثیر روش MICP در پایدارسازی خاک دریافته‌اند که رسوب‌های کلسیت سبب پر شدن فضای خالی بین دانه‌ها و نیز سخت شدن و پایداری خاک می‌شوند. همچنین علاوه بر بهبود خاک، MICP می‌تواند در بسیاری دیگر از مسائل مهندسی عمران (کنترل فرسایش بادی و گرد و غبار، تجمع زیستی برای کاهش نفوذپذیری صخره‌ی شکسته و کنترل فرسایش داخلی) استفاده شود.<sup>[۱۵]</sup> نشأت آب در خاک‌های دانه‌ی ناپایدار، باعث حرکت ذرات می‌شود که یکی از دلایل شکست زیرساخت‌های زمین است. حائوزی<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۱۸)، در ارزیابی توانایی روش MICP در جلوگیری از تفکیک‌پذیری در خاک ناپایدار دریافته‌اند که روش MICP، خاک ناپایدار را تثبیت می‌کند.<sup>[۱۶]</sup> کاردوسو<sup>۱۰</sup> و همکاران

(۲۰۲۰)، نیز مطالعات مرتبط با MICP را ادامه دادند و به بررسی اثر اندازه‌ی ذرات خاک در روش MICP پرداختند. ایشان از دو نوع خاک SP و SM استفاده کردند و با انجام آزمایش‌های مقاومتی روی هر دو خاک دریافته‌اند که مقاومت خاک فقط وابسته به مقدار کلسیت ایجاد شده نیست، بلکه به ساختار خاک نیز بستگی دارد. تأثیر ساختار در مقاومت، نتیجه‌ی شناخته شده‌ی در خاک‌های ماسه‌ی است و لزوم توجه به دانه‌بندی خاک در روش MICP را توجیه می‌کند.<sup>[۱۷]</sup> در ادامه‌ی پژوهش‌های صورت گرفته در سال ۲۰۲۰، می‌توان به مطالعات چو<sup>۱۱</sup> و همکاران اشاره کرد که به بررسی نمونه‌های سیمانته شده با استفاده از آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته‌ی زهکشی شده در فشار همه‌جانبه‌ی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال پرداخته و دریافته‌اند که با افزایش سطح سیماناسیون، مقاومت در نمونه‌ها افزایش می‌یابد.<sup>[۱۸]</sup> پژوهش‌ها حول موضوع اخیر تا به امروز ادامه داشته است، مانند پژوهش تیواری و همکاران (۲۰۲۱)، که عملکرد روش MICP بر روی انواع خاک‌های ماسه‌ی و رسی را بررسی کرده و نتایج مطلوبی، همچون: کاهش تورم در خاک‌های رسی و افزایش مقاومت در هر دو نوع خاک رسی و ماسه‌ی به دست آورده‌اند.<sup>[۱۹]</sup> وانی و میر<sup>۱۲</sup> (۲۰۲۱)، نیز پژوهشی جهت تقویت خاک ضعیف اطراف رودخانه‌ی دود گانگا<sup>۱۳</sup> در هند انجام دادند و از باکتری *Bacillus Subtilis* با غلظت‌های ۱/۳، ۱/۵ و ۱/۱۰ و محلول سیماناسیون با مولاریته‌های ۵/۰ و ۱/۰ استفاده کردند و بعد از گذشت ۷ و ۱۴ روز، نمونه‌های تیمار شده را جهت انجام آزمایش‌های مرتبط در دستگاه برش مستقیم قرار دادند. نتایج مطالعه‌ی ایشان نشان داد که ضریب چسبندگی در نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت باکتری ۱ و غلظت مواد ۱ مولار از  $(kN/m^2)$  ۳۸ به  $(kN/m^2)$  ۵۷ و ضریب اصطکاک خاک از ۳۵ درجه به ۴۱ درجه رسیده است. همچنین با بررسی نتایج حاصل از آزمایش SEM و XRD بر روی نمونه‌ها مشاهده کردند که کلسیت ایجاد شده در نمونه‌ها سبب پر شدن خلل و فرج موجود در خاک و افزایش چسبندگی دانه‌های خاک شده و در نتیجه مقاومت نمونه‌ها افزایش یافته است که این امر نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم را تأیید می‌کند.<sup>[۲۰]</sup>

ایشان در مطالعه‌ی دیگری در همان سال (۲۰۲۱) به بررسی اثر سیماناسیون بیولوژیکی در بهبود خاک‌های لایروبی با استفاده از باکتری اسپورسارسینا پاستوری<sup>۱۴</sup> با غلظت ۱/۵ و غلظت ۰/۱، ۰/۵ و ۱ مولار پرداختند و نمونه‌های تیمار شده را به مدت ۷ تا ۱۴ روز در دو دمای متفاوت ۱۰-۵ و ۲۳-۱۸ درجه قرار دادند. همچنین جهت بررسی مقاومت نمونه‌ها از آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده استفاده کردند و دریافته‌اند که مقدار مقاومت فشاری محدود نشده در نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت مواد ۰/۵ مولار و در مدت عمل‌آوری ۷ روزه، ۳۱ درصد افزایش یافته است و نیز مشاهده کردند که با افزایش مولاریته و دوره‌ی درمان، نفوذپذیری کاهش یافته است. در پژوهش اخیر، دمای ۲۳-۱۸ درجه، دمای بهینه بوده است، چرا که در دمای پایین، فعالیت باکتری کم می‌شود.<sup>[۲۱]</sup> با بررسی مطالعات انجام شده می‌توان دریافت که در بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته به ارزیابی نحوه‌ی تولید رسوب کلسیم کربنات و تأثیر چسبندگی ناشی از آن در اتصال بین ذرات پرداخته شده است، اما مطالعات محدودی در رابطه با تأثیر تزریق نزولی در شکل‌گیری باورهای کلسیت در سیماناسیون بیولوژیکی خاک‌های ماسه‌ی صورت گرفته است. به همین جهت در پژوهش حاضر به بررسی مورد اخیر پرداخته شده است. هدف اصلی در پژوهش حاضر، مقایسه‌ی دو روش تزریق ثابت و نزولی و بررسی اثر مولاریته در کلسیت ایجاد شده و مقاومت و نفوذپذیری نمونه‌ها بوده است. روش غلظت نزولی به این معناست که مولاریته‌ی مواد موجود در محلول سیماناسیون در دفعات مختلف تزریق یکسان نیست و روند آن نزولی است؛ مثلاً، در نوشتار

نیز از چگالی ویژه و حجم کل ظرف و وزن دانه‌های جامد استفاده شده است (مطابق رابطه‌های:  $G_s = \frac{w_s}{\gamma_w v_s}$  و  $e_{max} = \frac{v_t - v_s}{v_s}$ ).

## ۲.۲. باکتری

نقش باکتری در تسریع واکنش هیدرولیز اوره و کمک به رسوب‌زایی کلسیم‌کربنات است. تاکنون در مورد باکتری‌های مختلفی از دسته‌های هوازی و بی‌هوازی مطالعه شده است. مثلاً در پژوهش آمارکون<sup>۱۵</sup> (۲۰۱۹)، از باکتری Pararhodobacter sp.<sup>[۲۵]</sup> و در پژوهش ربانا<sup>۱۶</sup> (۲۰۰۷)، از باکتری Pseudomonas fluorescens که یک باکتری Mesophilic است و از خانواده‌ی اسپروها نیست<sup>[۲۳]</sup>، استفاده شده است؛ اما با بررسی‌های بیشتر مشاهده شده است که در اغلب پژوهش‌ها، از باکتری باسیلاس پاستوری<sup>۱۷</sup> که بهترین عملکرد را از خود نشان داده است، استفاده شده است.<sup>[۲۶]</sup> باکتری باسیلاس پاستوری از خانواده‌ی باسیل‌ها و با ساختاری بیضوی‌شکل و غیربیماری‌زاست و با نام اسپورسارسینا پاستوری نیز شناخته می‌شود و قابلیت اوره‌آزی دارد و در طبیعت به وفور یافت می‌شود و همچنین مقاومت بالایی در برابر عوامل فیزیکی و شیمیایی محیط دارد، به همین علت برای استفاده در محیط‌های آزاد مناسب است.<sup>[۲۶]</sup> باکتری باسیلاس پاستوری در شرایط هوازی و دمای ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد رشد می‌کند.<sup>[۲۷]</sup> در پژوهش حاضر نیز از باکتری باسیلاس پاستوری استفاده شده است.

## ۳.۲. کلسیم کلراید

کلسیم کلراید با نماد شیمیایی CaCl<sub>2</sub> یک ترکیب شیمیایی است که به شدت رطوبت را جذب می‌کند و انحلال‌پذیری بسیار بالایی دارد. بنابراین به عنوان منبعی مناسب که حاوی کلسیم است، در واکنش‌های جانشینی استفاده و به آسانی جایگزین کاتیون دیگر می‌شود. در پژوهش حاضر، از کلسیم کلراید دی‌هیدراته با جرم مولی  $(gr/mol)$  ۱۴۷ و چگالی  $(gr/cm^3)$  ۱/۸۵ استفاده شده است.

## ۴.۲. اوره

اوره یا کاربامید یک ترکیب آلی با نماد شیمیایی CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> است که در پژوهش حاضر به عنوان یکی از مواد واکنش‌دهنده با جرم مولی  $(gr/mol)$  ۶۰/۰۶ و چگالی  $(gr/cm^3)$  ۱/۳۲ استفاده شده است.

## ۵.۲. محیط کشت ناترینت برات

محیط کشت مایع ناترینت برات<sup>۱۸</sup> به همراه اوره از جمله محیط‌های کشت استاندارد و مورد تأیید مؤسسات پژوهش‌های قارچ و باکتری از جمله مرکز تحقیقات صنعتی برای باکتری باسیلوس پاستوری است. از محیط کشت مایع جهت نگهداری کوتاه‌مدت از باکتری باسیلوس پاستوری استفاده می‌شود.

## ۶.۲. محیط کشت ناترینت آگار

یکی دیگر از محیط‌های کشت مورد تأیید جهت کشت باکتری باسیلوس پاستوری، محیط کشت ناترینت آگار<sup>۱۹</sup> همراه با اوره است. محیط کشت جامد جهت نگهداری میان‌مدت از باکتری استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر از مواد دیگری نیز مانند آمونیوم کلراید و سدیم‌پی‌کربنات به عنوان بافر جهت بهتر انجام شدن واکنش و همچنین تنظیم PH محیط استفاده شده است.

آلکبانی (۲۰۱۲)<sup>[۲۲]</sup> در تزریق ثابت با مولاریته‌ی ۰/۵، در هر ۴ مرحله‌ی تزریق محلول سیمان‌تاسیون از غلظت یکسان ۰/۵ مولار استفاده شده است؛ ولی در پژوهش حاضر برای تزریق نزولی با مولاریته‌ی ۰/۵، غلظت محلول سیمان‌تاسیون در مرحله‌ی اول برابر ۱ مولار، در تزریق دوم برابر ۰/۶ مولار، در تزریق سوم برابر ۰/۳ مولار و در آخرین مرحله‌ی تزریق برابر ۰/۱ مولار بوده است. همچنین در هر دو روش ثابت و نزولی، مجموع مولاریته در ۴ مرحله با هم برابر بوده است (تزریق ثابت:  $2 = 4 \times 0.5$  مولار و تزریق نزولی:  $2 = 1 + 0.3 + 0.6 + 0.1$  مولار). به منظور بررسی اثر مولاریته در کلسیت ایجاد شده و مقاومت و نفوذپذیری نمونه‌ها از آزمایش‌های سه‌محوری، نفوذپذیری و SEM در پژوهش حاضر استفاده شده است.

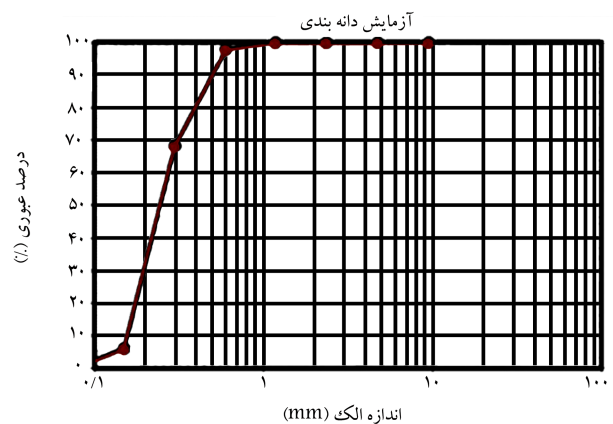
## ۲. مواد و مصالح مصرفی

### ۱.۲. خاک مطالعه شده

در پژوهش حاضر، از یک نوع خاک ماسه‌یی SP (با دانه‌بندی یکنواخت) استفاده شده است که دارای دانه‌بندی بین ۰/۱ تا ۱ میلی‌متر بوده است. نمودار دانه‌بندی خاک در شکل ۱ مشاهده می‌شود، که با توجه به مطالعات صورت گرفته‌ی پیشین<sup>[۲۳،۲۴]</sup> برای استفاده در پژوهش حاضر مناسب بوده است. چنانچه اندازه‌ی دانه‌ها خیلی بزرگ باشد، مقدار زیادی از محلول سیمان‌تاسیون برای سیمانته کردن آن نیاز است و همچنین کوچک بودن بیش از حد دانه‌های خاک نیز از نفوذ محلول سیمان‌تاسیون جلوگیری می‌کند و حتی می‌تواند سبب فیلتر شدن باکتری‌ها شود. مشخصات خاک در جدول ۱ ارائه شده است. به منظور تعیین وزن مخصوص خشک خاک از آزمایش تراکم با استاندارد ASTM D۶۹۸<sup>[۲۴]</sup> و جهت تعیین چگالی ویژه ( $G_s$ ) از استاندارد ASTM D۸۵۴<sup>[۲۴]</sup> استفاده شده است. برای تعیین نسبت تخلخل

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

نوع خاک مطابق استاندارد ASTM D <sup>[۲۴]</sup> ۲۴۸۷	جنس خاک	$G_s$	$e_{max}$
SP	ماسه	۲/۶۳	۰/۸۷
$e_{min}$	$\gamma_{max}$	$\gamma_{min}$	
۰/۴۲	۱/۵۹	$(gr/cm^3)$	$(gr/cm^3)$
		۱/۴۲	



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک ماسه‌یی استفاده شده در پژوهش حاضر.



شکل ۲. تصویر میکروسکوپی باکتری.

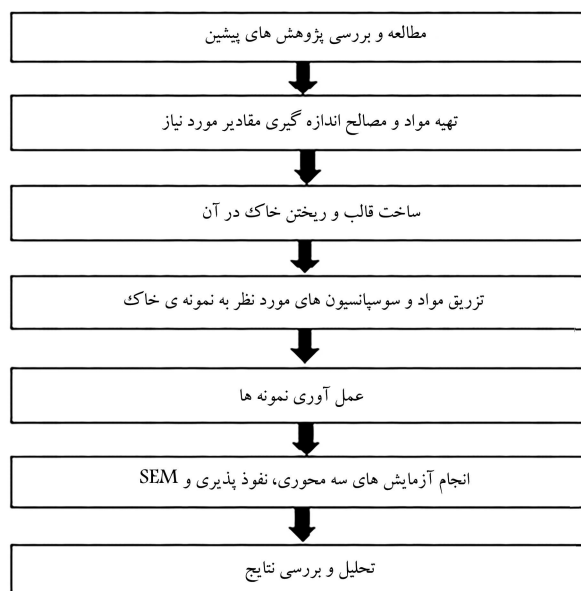
متیلن‌بلو استفاده شده است. برای این کار، یک قطره آب مقطر روی لام تمیز ریخته شد. سپس در شرایط استریل، مقداری از باکتری برداشته و در یک قطره آب حل شد، به طوری که بر روی سطح لام پخش شود. بعد از خشک شدن، لام چند بار از روی حرارت شعله عبور داده شد تا گسترش میکروبی روی لام تثبیت شود و در جریان رنگ‌آمیزی از روی لام جدا نشود.<sup>[۲۲]</sup> چند قطره از محلول رنگی متیلن‌بلو روی گسترش میکروبی ریخته و حدود ۳ دقیقه زمان داده شد تا رنگ با گسترش میکروبی واکنش دهد. سپس لام به حالت مورب نگه داشته شد و در همین حالت رنگ‌های اضافی با آب مقطر شسته شدند. لام به آرامی با کاغذ خشک‌کن پاک شد تا آب آن گرفته شود. بعد لام در زیر میکروسکوپ قرار گرفت و باکتری‌های آن که به رنگ آبی و به شکل میله‌یی (باسیل) بودند، ملاحظه شده است (شکل ۲).

#### ۴.۳. تهیه‌ی سوسپانسیون باکتری

به منظور تهیه‌ی سوسپانسیون باکتری، ابتدا باید محیط کشت مایع را از باکتری جدا کرد. براساس مطالعات صورت‌گرفته‌ی پیشین،<sup>[۲۷]</sup> بهترین زمان ۲۴ الی ۴۸ ساعت بعد از کشت باکتری است. بعد از گذشت مدت زمان مذکور، لوله‌های داخل دستگاه سانتریفیوژ پر شدند، و در دور (rpm) ۴۰۰۰ و به مدت ۲۰ دقیقه، سانتریفیوژ صورت گرفت، تا باکتری به صورت لخته در انتهای ویال‌ها ته‌نشین و از محیط کشت جدا شود. محیط کشت مایع، دور ریخته و به آن محلول رینگر اضافه شد. سپس برای تعیین سوسپانسیون باکتری از دستگاه اسپکتروفتومتر با طول موج (nm) ۶۰۰ استفاده و غلظت آن در بازه‌ی ۰/۸ تا ۱/۲ تنظیم شد. محلول نهایی در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد و در یخچال به مدت ۱۴ روز بدون کاهش فعالیت اوره‌آزی قابل نگهداری است.

#### ۵.۳. ساخت محلول سیمان‌تاسیون

برای ساخت محلول سیمان‌تاسیون با توجه به روش تزریقی استفاده شده، روش‌های مختلفی وجود دارد. در صورتی که تزریق تک‌فازی باشد، کلیه‌ی مواد شامل: اوره، کلسیم‌کلراید، باکتری و مواد مغذی با هم در آب حل و به نمونه تزریق می‌شوند. روش تزریق تک‌فازی در نمونه‌های با ارتفاع زیاد سبب انسداد مسیر حرکت محلول در خاک می‌شود، لذا در موارد اخیر، روش تزریق دوفازی استفاده می‌شود که در آن در فاز اول، محلول فاقد کلسیم‌کلراید و در فاز دوم، حاوی کلسیم‌کلراید است.<sup>[۲۲]</sup> در پژوهش حاضر، با توجه به ارتفاع نمونه‌های ساخته شده از تزریق دوفازی استفاده شده است. بدین منظور محلول‌های سیمان‌تاسیون با غلظت‌های مختلف مواد واکنش‌دهنده (اوره، آمونیوم کلراید، سدیم‌بی‌کربنات، کلسیم‌کلراید و محیط کشت) و باکتری ساخته



نمودار ۱. مدل کلی انجام پژوهش.

#### ۷.۲. آزمایش‌های انجام شده

در پژوهش حاضر از آزمایش سه‌محوری به منظور محاسبه و بررسی مقاومت نمونه‌های سیمانته شده و از آزمایش نفوذپذیری جهت محاسبه‌ی ضریب نفوذپذیری نمونه‌های سیمانته شده و همچنین از آزمایش SEM جهت مشاهده‌ی نحوه‌ی اتصال ذرات خاک در نمونه‌ها استفاده شده است. در نمودار ۱ مراحل انجام پژوهش ارائه شده است.

#### ۳. آماده‌سازی نمونه‌ها

##### ۱.۳. ساخت محیط کشت مایع

به منظور تهیه‌ی محیط کشت مایع، مقدار مشخصی آب مقطر و نائزینت برات (مطابق دستورالعمل شرکت سازنده‌ی Merck) داخل فائل ریخته و کاملاً هم زده شد تا در آن حل شود. نکته‌ی حائز اهمیت این است که باید دقت شود تا آب مقطر ریخته شده در ظرف فقط ۲۰٪ حجم آن را پر کند تا اکسیژن کافی جهت رشد و کشت باکتری فراهم شود.<sup>[۲۲]</sup> به منظور استریل کردن محلول، از اتوکلاو با دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه استفاده شد. پس از استریل شدن محلول به آن زمان داده شد تا خنک شود، سپس به میزان ۲٪ محیط کشت، اوره با آب مقطر مخلوط شد تا محلول ۲۰٪ تهیه شود و بعد از آن به کمک فیلتر مخصوص و در شرایط استریل در زیر هود لامینار به داخل محیط کشت اضافه شده است.

##### ۲.۳. ساخت محیط کشت جامد

برای تهیه‌ی محیط کشت جامد، مطابق آنچه برای نائزینت برات بیان شد، عمل شده است؛ با این تفاوت که به منظور شفاف شدن محلول، قبل از استریل کردن در اتوکلاو، محلول روی شعله گرفته و تکان داده شد تا به جوش آید و محیط کاملاً شفاف شود.

##### ۳.۳. رنگ‌آمیزی و سنجش خلوص باکتری

در پژوهش حاضر، به منظور سنجش خلوص از روش رنگ‌آمیزی ساده به کمک

جدول ۲. طراحی آزمایش با استفاده از الگوریتم تاگوچی.

مولاریمتهی ۴	تزریق			
	نوع	اول	دوم	سوم
۰/۳	ثابت	۰/۳	۰/۳	۰/۳
۰/۳	نزولی	۰/۶	۰/۳	۰/۱
۰/۵	ثابت	۰/۵	۰/۵	۰/۵
۰/۵	نزولی	۱	۰/۶	۰/۱
۱	ثابت	۱	۱	۱
۱	نزولی	۲	۱	۰/۴
۱/۵	ثابت	۱/۵	۱/۵	۱/۵
۱/۵	نزولی	۲/۵	۱/۷	۱/۶



الف) نمونه قبل از اتمام عمل آوری؛



ب) نمونه بعد از اتمام عمل آوری.

شکل ۳. نمونه‌های ساخته شده.

بعد از ۱ ساعت، سوسپانسیون باکتری خارج و محلول تثبیت (کلسیم کلراید) به نمونه تزریق شد و به مدت ۶ ساعت در حالت اشباع قرار گرفت و سپس محلول از داخل نمونه خارج شد. در مرحله‌ی بعد، محلول سیمان‌تاسیون (اوره، کلسیم کلراید، سدیم بی‌کربنات، محیط کشت و آمونیوم کلراید) به نمونه تزریق شد و ۱۲ ساعت در حالت اشباع قرار گرفت. بعد از گذشت ۱۲ ساعت و تخلیه‌ی محلول سیمان‌تاسیون، مجدداً محلول سیمان‌تاسیون بعدی تزریق شد و ۱۲ ساعت در حالت اشباع باقی ماند. بعد از اتمام ۱۲ ساعت، محلول سیمان‌تاسیون خارج و سوسپانسیون باکتری تزریق شد و تمامی مراحل اخیر شامل تزریق محلول تثبیت و محلول سیمان‌تاسیون با همان مدت زمان‌های گفته شده تکرار شده است. بعد از تزریق آخرین (چهارمین) محلول سیمان‌تاسیون، نمونه به مدت ۳۰ روز<sup>[۲۳]</sup> در دمای محیط جهت عمل‌آوری قرار گرفت. مقدار سدیم بی‌کربنات، آمونیوم کلراید و محیط کشت موجود در محلول سیمان‌تاسیون و مقدار کلسیم کلراید در محلول تثبیت در هر دو روش تزریق ثابت و نزولی، یکسان و در تمامی نمونه‌ها ثابت بوده و وابسته به مولار نبوده است. نکته‌ی قابل توجه، مقدار اوره و کلسیم کلراید است که مطابق جدول ۲ وابسته به مولار در نمونه‌ها تغییر کرده است. در شکل ۳، نمونه‌های ساخته شده مشاهده می‌شوند.

#### ۴. ارائه‌ی نتایج

##### ۴.۱. نتایج حاصل از آزمایش سه‌محوری

در پژوهش حاضر، به منظور بررسی مقاومت نمونه‌های سیمان‌ته شده از آزمایش سه‌محوری با استاندارد ASTM D4767<sup>[۲۴]</sup> استفاده شده است. نمونه‌ها در شرایط تحکیم‌یافته‌ی زهکشی نشده (CU)<sup>۲۱</sup> به منظور محاسبه‌ی فشار آب حفره‌یی و تنش مؤثر و تحت فشار همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ کیلوپاسکال و با سرعت بارگذاری (mm/min) ۰/۵ آزمایش شده‌اند. تنش همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ کیلوپاسکال معادل حدود ۵ متر خاک است و از آنجایی که روش سیمان‌تاسیون بیولوژیکی عموماً در سطح خاک بررسی می‌شود و تثبیت خاک در سطح مدنظر است، در پژوهش حاضر، ۵ متر انتخاب شده است. برای اشباع نمونه در دستگاه سه‌محوری، روش‌های متفاوتی وجود دارد که در پژوهش حاضر با استفاده از روش back pressure و پمپ خلأ و گاز CO<sub>2</sub>، نمونه‌ها اشباع شده‌اند. نتایج

و استفاده شده‌اند. محلول سیمان‌تاسیون را می‌توان به صورت ثقلی، به کمک پمپ پرستالتیک و یا با استفاده از شیر تخلیه در پایین قالب تزریق کرد. استفاده از پمپ یا شیر تخلیه به منظور کنترل دبی محلول در داخل خاک و دادن زمان کافی جهت فراگرفتن دانه‌ها و اتصال با آن‌ها و نیز تکمیل واکنش سیمان‌تاسیون برای تمام محلول تزریقی است؛ در حالی که در تزریق ثقلی، با توجه به نوع خاک (ماسه)، سرعت حرکت سیال در خاک بالاست و عملاً بخشی از محلول پیش از آنکه واکنش دهد و کلسیم کربنات تولید کند، از انتهای قالب خارج می‌شود. در پژوهش حاضر، روش تزریق ثقلی استفاده شده است.

##### ۶.۳. طراحی آزمایش

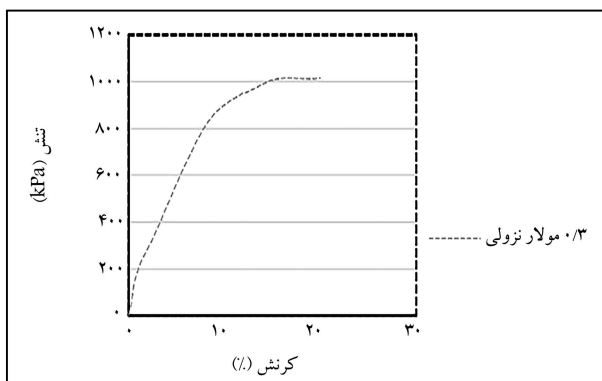
در پژوهش حاضر، از ۴ غلظت مختلف اوره و کلسیم کلراید به میزان ۰/۳، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ مولار برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است (جدول ۲). طراحی آزمایش توسط نرم‌افزار میننی تب<sup>۲۰</sup> با استفاده از الگوریتم تاگوچی انجام شده است.

##### ۷.۳. ساخت قالب

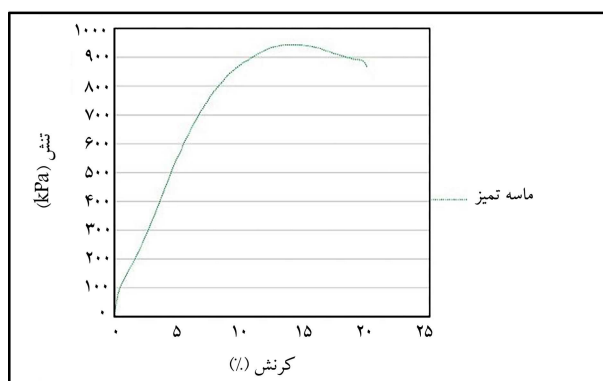
با توجه به سلول دستگاه سه‌محوری و نفوذپذیری (۱۴×۷ سانتی‌متر) جهت ساخت قالب از لوله‌ی پلیکا به قطر ۷ سانتی‌متر استفاده شده است. لوله‌ها به صورت دقیق با ارتفاع ۱۶ سانتی‌متر برش داده شده‌اند تا در ۲ سانتی‌متر اضافی، نمونه در حالت اشباع قرار گیرد. در انتهای قالب، ورق پلکسی که میان آن سوراخی جهت زهکشی تعبیه شده است، قرار گرفته و از آن بادکنکی عبور داده شده است تا خروجی محلول‌ها به توسط آن کنترل شود. در قسمت داخلی و انتهایی لوله، از پلکسی استفاده شده است که تمام سطح آن سوراخ‌های ریز زده شده و روی آن توری فلزی با بافت بسیار ریز قرار گرفته است، تا ریزدانه‌ی موجود در ماسه شسته نشود. تمامی مراحل اخیر برای ساخت نمونه‌های SEM نیز تکرار شده است، با این تفاوت که ابعاد قالب در نمونه‌های ۴ × ۲ × ۲ SEM سانتی‌متر بوده است.<sup>[۲۸]</sup>

##### ۸.۳. ساخت نمونه‌های سیمان‌ته شده

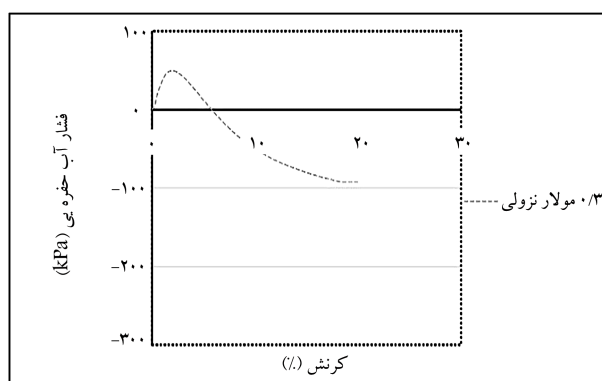
خاک در داخل قالب‌ها براساس دستیابی به وزن مخصوص میانگین  $15(kN/m^3)$ ، برای قالب‌های سه‌محوری و نفوذپذیری حدوداً ۸۰۸ گرم و برای قالب‌های SEM، حدوداً ۱۲ گرم ریخته و متراکم شده است. پس از ریختن و متراکم کردن خاک درون قالب‌ها، ۲۵۰ سی‌سی سوسپانسیون باکتری با OD تنظیم شده در بازه‌ی ۰/۸ تا ۱/۲، به خاک تزریق شد و به مدت ۱ ساعت در حالت اشباع قرار گرفت.



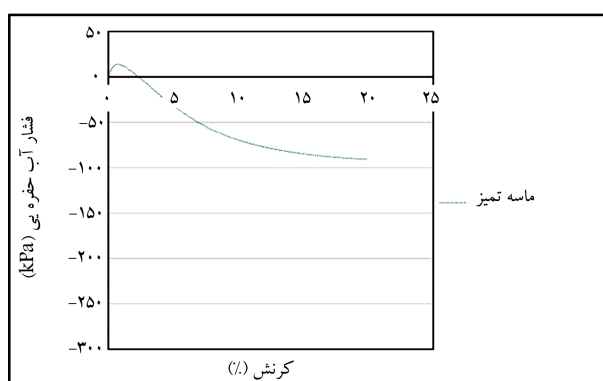
شکل ۶. منحنی تنش - کرنش نمونه‌ی ۰/۳ مولار نزولی و ثابت.



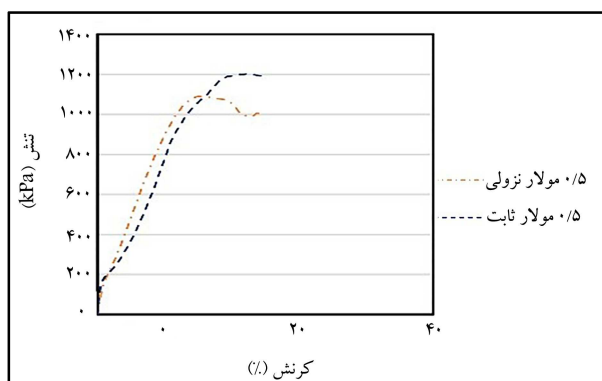
شکل ۴. منحنی تنش - کرنش نمونه‌ی ماسه‌ی تمیز.



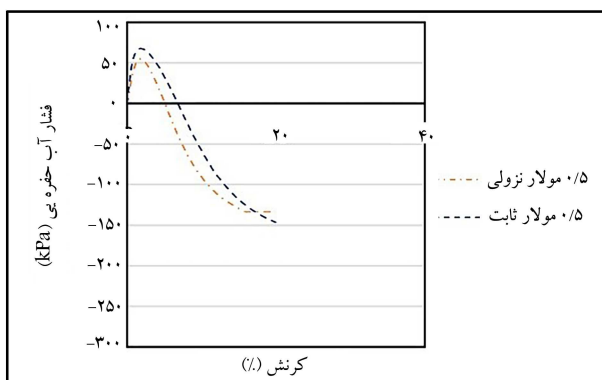
شکل ۷. منحنی فشار آب حفره‌یی - کرنش ۰/۳ مولار نزولی و ثابت.



شکل ۵. منحنی فشار آب حفره‌یی - کرنش نمونه‌ی ماسه‌ی تمیز.



شکل ۸. منحنی تنش - کرنش نمونه‌ی ۰/۵ مولار نزولی و ثابت.



شکل ۹. منحنی فشار آب حفره‌یی - کرنش نمونه‌ی ۰/۵ مولار نزولی و ثابت.

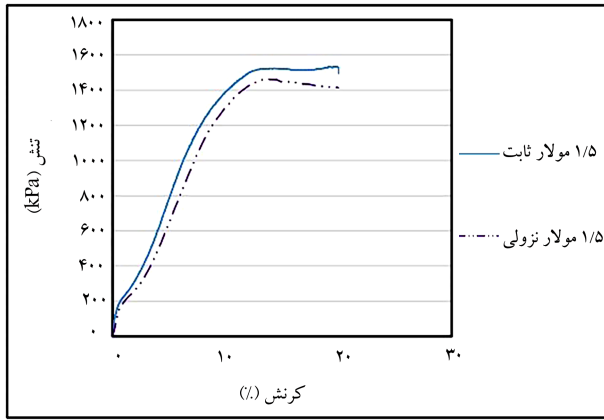
حاصل از آزمایش اخیر، تحلیل و بررسی شده است که در ادامه به آن پرداخته شده است.

#### ۱.۱.۴. نتایج حاصل از آزمایش سه‌محوری بر روی ماسه‌ی تمیز

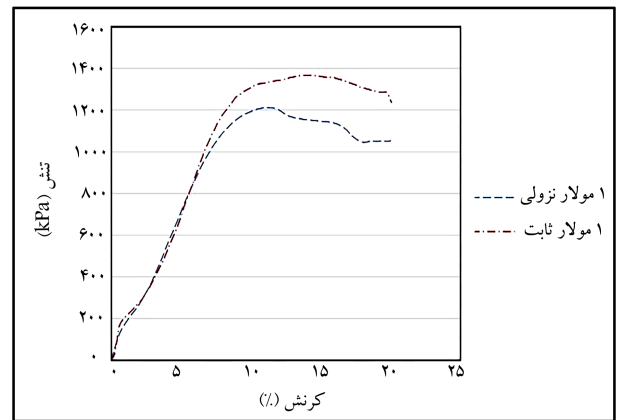
مطابق شکل ۴، بیشینه‌ی تنش‌ی که ماسه‌ی تمیز متحمل شده است، حدود ۹۴۳ کیلوپاسکال در کرنش ۱۳٪ بوده است. در پژوهش حاضر، نمونه‌ها در شرایط تحکیم‌یافته‌ی زهکشی نشده در دستگاه سه‌محوری آزمایش شده‌اند که هدف اصلی از ایجاد شرایط زهکشی نشده، محاسبه‌ی فشار آب حفره‌یی و تنش مؤثر بوده است. بیشینه‌ی فشار آب حفره‌یی در نمونه‌ی ماسه‌ی تمیز برابر ۹۰/۸۸ کیلوپاسکال در کرنش ۱۹/۸۸٪ بوده است (شکل ۵). منفی بودن عدد بیشینه‌ی فشار آب حفره‌یی، نشان‌دهنده‌ی رفتار انساعی خاک است.

#### ۲.۱.۴. نتایج حاصل از آزمایش سه‌محوری بر روی نمونه‌های سیمانته شده

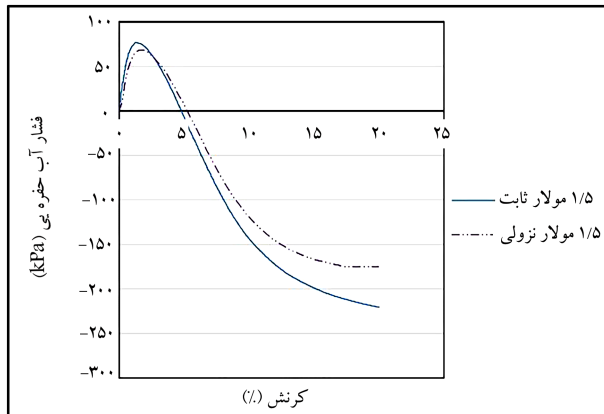
همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در تزریق نزولی نمونه‌ی ۰/۳ مولار، بیشینه‌ی تنش برابر ۱۰۱۱ کیلوپاسکال در کرنش ۱۶/۱۸٪ است. در نمونه‌ی اخیر به دلیل غلظت کم مواد واکنش‌دهنده و نزولی بودن تزریق، تفاوت چندانی در مقاومت نمونه نسبت به ماسه‌ی تمیز مشاهده نمی‌شود. به همین علت نمونه‌ی ۰/۳ مولار ثابت مورد آزمایش در دستگاه سه‌محوری قرار داده نشد. با توجه به شکل ۷، بیشینه‌ی فشار آب حفره‌یی نمونه‌ی ۰/۳ مولار نزولی، برابر ۹۱/۵ کیلوپاسکال در کرنش ۱۸٪ است. همچنین مطابق شکل ۸، مقدار تنش بیشینه در نمونه‌ی ۰/۵ مولار نزولی، برابر ۱۰۸۶ کیلوپاسکال در کرنش ۱۱/۷۶٪ و در نمونه‌ی ۰/۵ مولار ثابت، مقدار تنش بیشینه برابر ۱۱۹۸ کیلوپاسکال در کرنش ۱۶/۸۱٪ است. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، مقدار بیشینه‌ی فشار آب حفره‌یی در نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت نزولی ۰/۵ مولار، برابر ۱۳۳/۵ کیلوپاسکال در کرنش ۱۹/۷۷٪



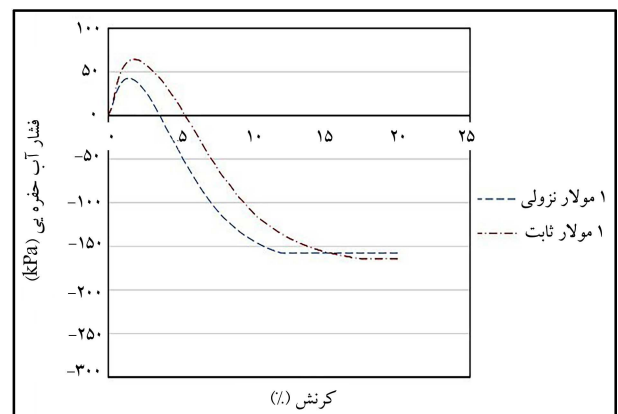
شکل ۱۲. منحنی تنش - کرنش نمونه ۱/۵ مولار نزولی و ثابت.



شکل ۱۰. منحنی تنش - کرنش نمونه ۱ مولار نزولی و ثابت.



شکل ۱۳. منحنی فشار آب حفره‌یی - کرنش نمونه ۱/۵ مولار نزولی و ثابت.



شکل ۱۱. منحنی فشار آب حفره‌یی - کرنش نمونه ۱ مولار نزولی و ثابت.

جدول ۳. بیشینه‌ی تنش مؤثر نمونه‌ها.

نمونه‌ی آزمایش شده	تنش (kPa)	اضافه فشار آب حفره‌یی (kPa)	تنش مؤثر (kPa)
ماسه‌ی تمیز	۹۴۳	-۹۰/۸۸	۱۰۳۳/۸۸
۰/۳ مولار نزولی	۱۰۱۱	-۹۱/۵	۱۱۰۲/۵
۰/۵ مولار ثابت	۱۱۹۸	-۱۴۶/۲۹	۱۳۴۴/۲۹
۰/۵ مولار نزولی	۱۰۸۶	-۱۳۳/۵	۱۲۱۹/۵
۱ مولار ثابت	۱۳۶۵	-۱۶۴/۴۳	۱۵۲۹/۴۳
۱ مولار نزولی	۱۲۱۲	-۱۵۷/۹	۱۳۶۹/۹
۱/۵ مولار ثابت	۱۵۱۹	-۲۲۰/۶۲	۱۷۳۹/۶۲
۱/۵ مولار نزولی	۱۴۶۰	-۱۷۴/۹۲	۱۶۳۴/۹۲

با مقدار بیشینه‌ی تنش مؤثر ۱۰۳۳/۸۸ کیلوپاسکال، کمترین تنش مؤثر و نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت ثابت ۱/۵ مولار با مقدار بیشینه‌ی تنش مؤثر ۱۷۳۹/۶۲ کیلوپاسکال، بیشترین تنش مؤثر را داشته‌اند.

#### ۲.۴. نتایج حاصل از آزمایش نفوذپذیری

در پژوهش حاضر، به علت ماسه‌یی بودن خاک از آزمایش نفوذپذیری با بار ثابت با دستورالعمل استاندارد ASTM D۲۴۳۴ [۲۴] استفاده شده است. نمونه‌ی ماسه‌ی تمیز و نمونه‌های سیمانته شده با غلظت ثابت و نزولی آزمایش شده‌اند. ضریب نفوذپذیری مطابق رابطه‌ی ۱ در زمان‌های ۲، ۴ و ۶ دقیقه محاسبه و میانگین آن‌ها به

و در نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت ثابت ۰/۵ مولار، برابر ۱۴۶/۲۹ کیلوپاسکال در کرنش ۱۹/۲۴٪ است. به علاوه در شکل ۱۰، نمودار تنش - کرنش مربوط به نمونه‌های ۱ مولار ثابت و نزولی مشاهده می‌شود که مطابق آن در غلظت نزولی، مقدار بیشینه‌ی تنش برابر ۱۲۱۲ کیلوپاسکال در کرنش ۱۱/۱۲٪ و مقدار بیشینه‌ی تنش در غلظت ثابت برابر ۱۳۶۵ کیلوپاسکال در کرنش ۱۴/۳۱٪ به دست آمده است. مقدار بیشینه‌ی اضافه فشار آب حفره‌یی در نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت ثابت ۱ مولار، ۱۶۴/۴۳ کیلوپاسکال در کرنش ۲۰٪ و در نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت نزولی ۱ مولار، ۱۵۷/۹ کیلوپاسکال در کرنش ۱۹/۹۴٪ بوده است (شکل ۱۱). همان‌طور که مشاهده می‌شود، طبق نمودار شکل ۱۲، نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت نزولی ۱/۵ مولار، دارای بیشینه‌ی تنش ۱۴۶۰ کیلوپاسکال در کرنش ۱۳/۶۲٪ مولار ثابت، دارای بیشینه‌ی تنش ۱۵۱۹ کیلوپاسکال در کرنش ۱۳٪ است. همچنین بیشینه‌ی فشار آب حفره‌یی در نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت نزولی ۱/۵ مولار، ۱۷۴/۹۲٪ کیلوپاسکال در کرنش ۱۹/۹۱٪ و در نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت ثابت ۱/۵ مولار، ۲۲۰/۶۲ کیلوپاسکال در کرنش ۲۰٪ است که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود.

با توجه به اینکه نمونه‌ها در شرایط CU، آزمایش سه‌محوری شده‌اند، امکان محاسبه‌ی فشار آب حفره‌یی در نمونه‌ها میسر شده است. حال با داشتن مقدار بیشینه‌ی تنش و مقدار بیشینه‌ی اضافه فشار آب حفره‌یی می‌توان مقدار بیشینه‌ی تنش مؤثر تمامی نمونه‌های سیمانته شده را از فرمول  $\sigma = \sigma' + u$  محاسبه کرد. نتایج در جدول ۳ ارائه شده است. نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت نزولی ۰/۳ مولار

جدول ۴. ضرایب نفوذپذیری ماسه‌ی تمیز و نمونه‌های سیمانته شده.

نمونه‌ی آزمایش شده	ضریب نفوذپذیری (cm/sec)
ماسه‌ی تمیز	۰/۰۸
۰/۳ مولار ثابت	۰/۰۷۴
۰/۳ مولار نرولی	۰/۰۷۷
۰/۵ مولار ثابت	۰/۰۶۷
۰/۵ مولار نرولی	۰/۰۷۱
۱ مولار ثابت	۰/۰۵۴
۱ مولار نرولی	۰/۰۵۸
۱/۵ مولار ثابت	۰/۰۴۷
۱/۵ مولار نرولی	۰/۰۵۲

درصدی در نمونه‌ی ۱ مولار ثابت، نشان‌دهنده‌ی مقاومت بالاتر نمونه‌ی اخیر نسبت به نمونه‌ی ۱ مولار نرولی است. همان‌طور که در جدول ۲ ارائه شده است، در نمونه‌ی سیمانته شده با تزریق نرولی، در تزریق‌های اولیه در نمونه، گرفتگی ایجاد و باعث شده است تا تزریق‌های بعدی به خوبی صورت نگیرد و مقاومت نسبت به نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت ثابت کمتر شود. همچنین افزایش ۴/۱۳ درصدی اضافه فشار آب حفره‌ی در نمونه‌ی ۱ مولار ثابت، نمایانگر عملکرد بهتر نمونه‌ی تزریق شده با غلظت ثابت و نشان‌دهنده‌ی افزایش میزان رسوب کلسیت در نمونه‌ی اخیر است (شکل ۱۱). نتایج به‌دست آمده از شکل ۱۲، افزایش ۴ درصدی مقاومت در نمونه‌ی ۱/۵ مولار ثابت را نشان می‌دهد که حاکی از عملکرد بهتر نمونه‌ی سیمانته شده با تزریق ثابت است. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، بیشینه‌ی فشار آب حفره‌ی در نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت ثابت ۱/۵ مولار نسبت به نمونه‌ی سیمانته‌شده با غلظت نرولی ۱/۵ مولار، ۲۶/۱۲٪ افزایش یافته است.

عنوان ضریب نفوذپذیری نمونه در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل در جدول ۴ ارائه شده است.

$$K = Q/Ai \quad (1)$$

که در آن،  $K$  ضریب نفوذپذیری ( $cm/sec$ )،  $Q$  دبی جریان ( $cm^3/sec$ )،  $A$  سطح مقطع نمونه ( $cm^2$ ) و  $i$  شیب هیدرولیکی (بدون واحد) هستند.

### ۳.۴. نتایج حاصل از آزمون SEM

به منظور مشاهده‌ی پیوند بین ذرات و دانه‌های خاک از آزمایش SEM استفاده شده است. نتایج حاصل از آزمایش SEM بر روی نمونه‌های سیمانته‌شده در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود.

## ۵. تحلیل و بررسی نتایج

### ۱.۵. تحلیل و بررسی نتایج حاصل از آزمایش سه‌محوری بر روی

نمونه‌های سیمانته شده

نتایج حاصل از آزمایش به دو صورت قابل تحلیل هستند:

#### ۱.۱.۵. مقایسه‌ی تزریق‌های ثابت و نرولی در غلظت‌های یکسان

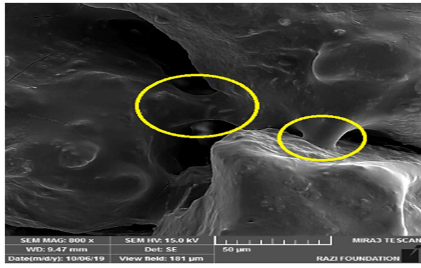
مطابق شکل ۶، در نمونه‌ی ۰/۳ مولار نرولی، به دلیل غلظت کم مواد واکنش‌دهنده و نرولی بودن تزریق، تفاوت چندانی در مقاومت نسبت به ماسه‌ی تمیز مشاهده نمی‌شود. به همین علت نمونه‌ی ۰/۳ مولار ثابت در دستگاه سه‌محوری آزمایش نشده است. با توجه به شکل ۷، بیشینه‌ی فشار آب حفره‌ی نمونه‌ی ۰/۳ مولار نرولی، حدود ۶۸٪ نسبت به ماسه‌ی تمیز افزایش یافته است. همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است، مقاومت در نمونه‌ی سیمانته‌شده با غلظت ثابت ۰/۵ مولار نسبت به نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت نرولی ۰/۵ مولار، حدود ۳۱٪ افزایش یافته است که نشان‌دهنده‌ی عملکرد بهتر نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت ثابت است. همچنین اضافه فشار آب حفره‌ی در نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت ثابت ۰/۵ مولار نسبت به نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت نرولی ۰/۵ مولار، ۹/۶۶٪ افزایش یافته است. کلسیت ایجادشده در نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت ثابت، سبب تشکیل پیوندی محکم‌تر بین ذرات خاک شده است که این امر افزایش فشار آب حفره‌ی در این نمونه را به دنبال داشته است (شکل ۹). مطابق شکل ۱۰، افزایش ۱۲/۶۲

### ۲.۱.۵. مقایسه‌ی نمونه‌های با غلظت‌های متفاوت در تزریق‌های ثابت و

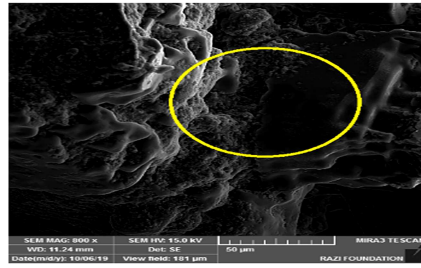
نرولی و مقایسه با ماسه‌ی تمیز

همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، مقاومت نمونه‌ی ۰/۵ مولار ثابت نسبت به مقاومت ماسه‌ی تمیز حدود ۴٪/۲۷٪ افزایش یافته است که این افزایش مقاومت در نمونه‌های با مولار ۱ و ۱/۵ ثابت به ترتیب ۴۴/۷۵ و ۶۱/۰۸ درصد به‌دست آمده است. همچنین مقاومت نمونه‌ی ۱/۵ مولار ثابت، حدود ۱۱/۲۸٪ بیشتر از نمونه‌ی ۱ مولار ثابت؛ مقاومت نمونه‌ی ۱ مولار ثابت، ۱۲/۲۳٪ بیشتر از مقاومت نمونه‌ی ۰/۵ مولار ثابت است. در نتیجه، نمونه‌های سیمانته شده مقاومت بالاتری نسبت به نمونه‌ی ماسه‌ی تمیز دارند. علاوه بر این، با افزایش غلظت اوره و کلسیم‌کلراید، کلسیت بیشتری در نمونه ایجاد می‌شود و مقاومت نمونه‌های سیمانته شده نیز افزایش می‌یابد. به طور مثال، در نمونه‌ی ۱ مولار، کلسیت با سرعت و مقدار بیشتری تولید شده است. همچنین بیشترین میزان بازده کلسیت تشکیل شده در نمونه‌ی ۰/۳ مولار برابر ۹۸/۷٪، در نمونه‌ی ۰/۵ مولار برابر ۹۹/۸۶٪ و در نمونه‌ی ۱ مولار برابر ۹۹/۹۲٪ بوده است که این مقادیر به‌طور کامل تری در نوشتار آزادی و دفتری (۲۰۲۱)<sup>[۲۹]</sup> ارائه شده است. به طور خلاصه، مقدار عملی کلسیت ایجاد شده در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود<sup>[۲۹]</sup>، که مطابق آن، کلسیت در همان ساعت‌های اولیه‌ی تزریق نمونه‌ها تشکیل شده و با توجه به متفاوت بودن غلظت مواد استفاده شده، زمان‌های مختلفی در نظر گرفته شده است که نتایج نشان می‌دهد در نمونه‌های با غلظت بالاتر به زمان بیشتری برای تکمیل واکنش نیاز است تا کلسیت به مقدار ثابتی برسد. همان‌طور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، بیشینه‌ی اضافه فشار آب حفره‌ی در نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت ثابت ۰/۵ مولار نسبت به ماسه‌ی تمیز، ۶۱/۰۹٪ افزایش یافته است که این افزایش در نمونه‌های ۱ و ۱/۵ مولار به ترتیب برابر ۹۳/۸۰ و ۱۴۲/۷۵ درصد بوده است. همچنین نمودار تنش- کرنش مربوط به نمونه‌های سیمانته شده با تزریق نرولی و غلظت‌های متفاوت اوره و کلسیم‌کلراید و ماسه‌ی تمیز در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، که مطابق آن مقاومت نمونه‌ی ۱/۵ مولار نرولی، حدود ۵۴/۸۲٪ نسبت به مقاومت ماسه‌ی تمیز افزایش یافته است. افزایش مقاومت نسبت به ماسه‌ی تمیز در نمونه‌ی ۱ مولار نرولی برابر ۲۸/۵۳٪، در نمونه‌ی ۰/۵ مولار نرولی برابر ۱۵/۱۶٪ و در نمونه‌ی ۰/۳ مولار نرولی برابر ۷/۲۱٪ بوده است. همچنین، مقاومت نمونه‌ی ۱/۵ مولار نرولی نسبت به مقاومت نمونه‌ی ۱ مولار نرولی برابر ۴۶/۲۰٪، مقاومت نمونه‌ی ۱ مولار نرولی نسبت به مقاومت ۰/۵ مولار نرولی برابر ۱۱/۶٪ و مقاومت نمونه‌ی ۰/۵ مولار نرولی نسبت به نمونه‌ی ۰/۳ مولار نرولی برابر ۷/۴۲٪ افزایش یافته است. افزایش اخیر در نمونه‌ها نشان

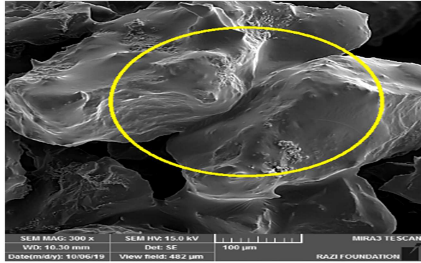




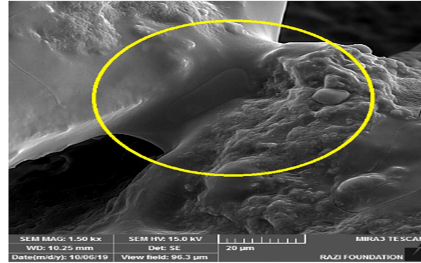
ب) نمونه ی سیمانه شده با غلظت ثابت ۳۰ مولار؛



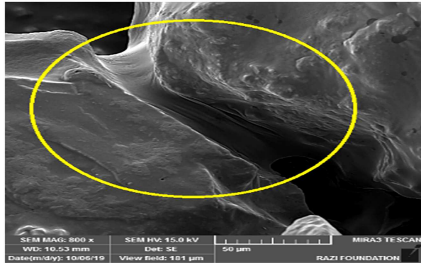
الف) نمونه ی سیمانه شده با غلظت نزولی ۳۰ مولار؛



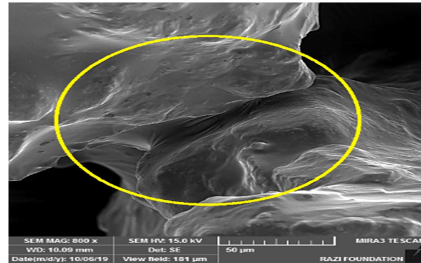
ت) نمونه ی سیمانه شده با غلظت ثابت ۵۰ مولار؛



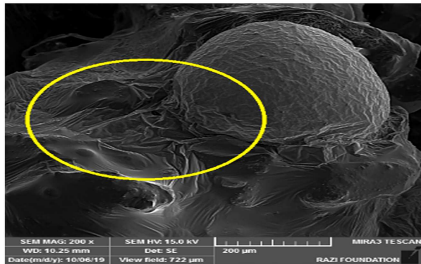
پ) نمونه ی سیمانه شده با غلظت نزولی ۵۰ مولار؛



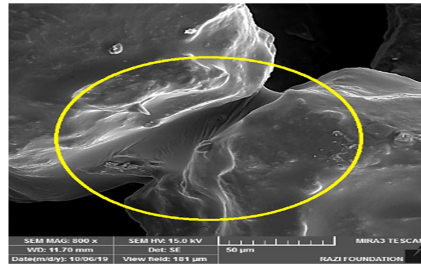
ج) نمونه ی سیمانه شده با غلظت ثابت ۱ مولار؛



ث) نمونه ی سیمانه شده با غلظت نزولی ۱ مولار؛

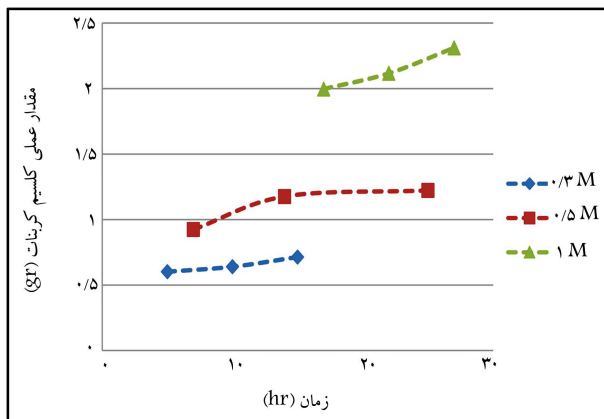


ح) نمونه ی سیمانه شده با غلظت ثابت ۵۰ مولار.

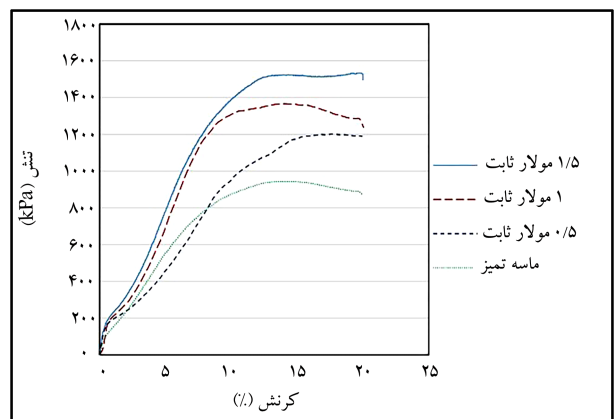


چ) نمونه ی سیمانه شده با غلظت نزولی ۵۰ مولار؛

شکل ۱۴. نتایج حاصل از آزمون SEM.



شکل ۱۶. منحنی مقدار عملی کلسیم کربنات بر حسب زمان انجام واکنش. [۲۹]



شکل ۱۵. منحنی تنش - کرنش نمونه‌های با غلظت‌های متفاوت ثابت.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳ می‌توان دریافت که با افزایش غلظت مواد، کلسیت بیشتری در نمونه‌ها ایجاد شده و تنش مؤثر نیز افزایش یافته است، که افزایش اخیر در نمونه‌های تزریق شده با غلظت‌های ثابت بیشتر بوده است. همچنین تنش مؤثر نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت نزولی ۳/۰° مولار نسبت به تنش مؤثر نمونه‌ی ماسه‌ی تمیز، برابر ۶/۶۴٪ و نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت ثابت ۱/۵ مولار نسبت به ماسه‌ی تمیز، برابر ۶۸/۲۶٪ افزایش یافته است.

### ۲.۵. تحلیل و بررسی نتایج حاصل از آزمایش نفوذپذیری

اطلاعات موجود در جدول ۴، به دو صورت قابل تحلیل است:

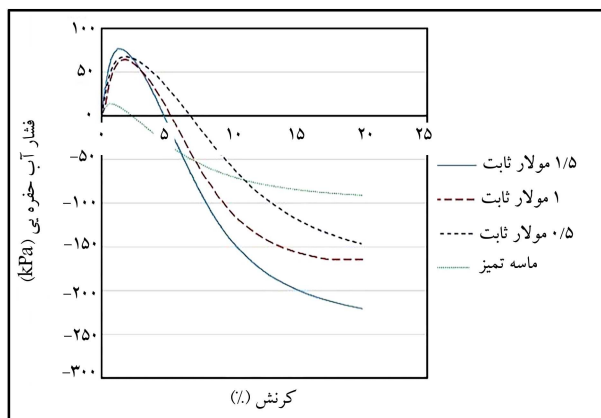
۱.۲.۵. مقایسه‌ی ضریب نفوذپذیری ماسه‌ی تمیز و نمونه‌های سیمانته شده مطابق جدول ۴، ضریب نفوذپذیری نمونه‌های سیمانته شده کمتر از ضریب نفوذپذیری نمونه‌ی ماسه‌ی تمیز است. نفوذپذیری در نمونه‌ی تزریق شده با غلظت ثابت ۳/۰° مولار حدود ۷/۵٪ و در نمونه‌ی تزریق شده با غلظت نزولی ۲۲/۳° مولار، حدود ۳/۷۵٪ کاهش یافته است. کاهش نفوذپذیری اخیر در نمونه‌ی تزریق شده با غلظت ثابت ۵/۰° مولار، حدود ۱۶/۲۵٪ و در نمونه‌ی تزریق شده با غلظت نزولی ۵/۰° مولار، حدود ۱۱/۱۲۵٪ بوده است. همچنین نفوذپذیری نمونه‌ی تزریق شده با غلظت ثابت ۱ مولار، حدود ۳۲/۵٪ و نمونه‌ی تزریق شده با غلظت نزولی ۱ مولار، حدود ۲۷/۵٪ کمتر از نفوذپذیری ماسه‌ی تمیز بوده است. در نمونه‌ی تزریق شده با غلظت ثابت ۱/۵ مولار، کاهش ۴۱/۲۵٪ و در نمونه‌ی تزریق شده با غلظت نزولی ۱/۵ مولار، کاهش ۳۵٪ بوده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین میزان کاهش نفوذپذیری، حدود ۴۱/۲۵٪ بوده است که عددی قابل قبول است. همچنین عدد ذکر شده نشان می‌دهد که بدون برهم زدن ساختار خاک، مقاومت خاک افزایش یافته است. در صورتی که کاهش نفوذپذیری بیشتر از مقدار مجاز ذکر شده باشد، باعث برهم زدن مسیر جریان‌های درون خاک می‌شود.

### ۲.۲.۵. مقایسه‌ی ضریب نفوذپذیری نمونه‌های تزریق شده‌ی ثابت و نزولی با غلظت یکسان

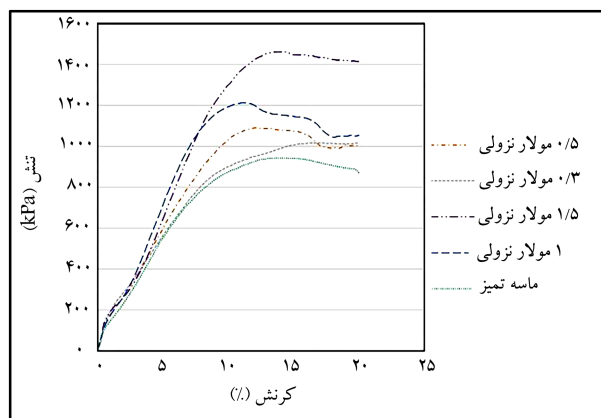
نفوذپذیری در نمونه‌ی ۳/۰° مولار ثابت نسبت به نمونه‌ی ۳/۰° مولار نزولی، حدود ۳/۸۹٪ کاهش یافته است. کاهش نفوذپذیری در نمونه‌ی ۵/۰° مولار ثابت نسبت به نمونه‌ی ۵/۰° مولار نزولی، حدود ۵/۶۳٪ به‌دست آمده است. همچنین نفوذپذیری در نمونه‌ی ۱ مولار ثابت نسبت به نمونه‌ی ۱ مولار نزولی و در نمونه‌ی ۱/۵ مولار ثابت نسبت به نمونه‌ی ۱/۵ مولار نزولی به ترتیب ۶/۸۹ و ۹/۶۱ درصد کاهش یافته است. با افزایش مولار اوره و کلسیم‌کلراید در نمونه‌ها، این اختلاف نیز افزایش یافته است، به طوری که اختلاف ضریب نفوذپذیری در نمونه‌ی ۳/۰° مولار ثابت و نزولی، برابر ۳/۸۹٪ و در نمونه‌ی ۱/۵ مولار ثابت و نزولی برابر ۹/۶۱٪ بوده است. علت این امر وجود کلسیت بیشتر در نمونه‌های با مولار بالاتر است، که با پرشدن خلل و فرج خاک و ایجاد محیطی پیوسته، نفوذپذیری کاهش یافته است.

### ۳.۵. تحلیل و بررسی نتایج حاصل از آزمایش SEM

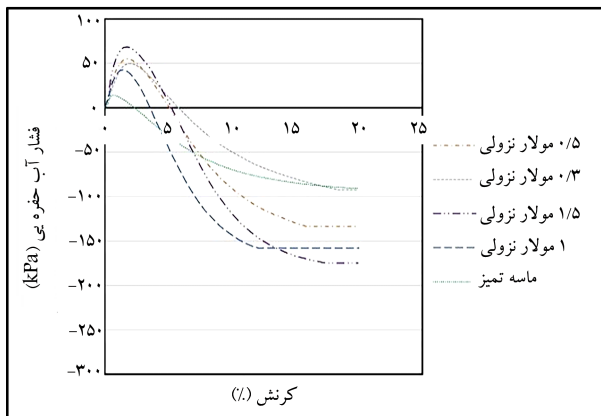
همان‌طور که در شکل‌های ۱۴ (الف و ب) مشاهده می‌شود، کلسیت ایجاد شده در نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت ثابت ۳/۰° مولار به مقدار بیشتری در اطراف دانه‌های خاک تشکیل شده است. همچنین مطابق شکل‌های ۱۴ (پ و ت)، پیوند بین ذرات و دانه‌های خاک در نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت ثابت ۵/۰° مولار بهتر از نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت نزولی ۵/۰° مولار است. با توجه به شکل‌های ۱۴ (ث، ج، چ و ح)، در نمونه‌های تزریق شده با غلظت ثابت ۱ مولار و نمونه‌های تزریق شده با



شکل ۱۷. منحنی فشار آب حفره‌ای - کرنش نمونه‌های با غلظت‌های متفاوت ثابت.



شکل ۱۸. منحنی تنش - کرنش نمونه‌های با غلظت‌های متفاوت نزولی.



شکل ۱۹. منحنی فشار آب حفره‌ای - کرنش نمونه‌های با غلظت‌های متفاوت نزولی.

می‌دهد که نمونه‌های سیمانته شده، مقاومت بالاتری نسبت به نمونه‌ی ماسه‌ی تمیز از خود نشان داده‌اند. علاوه بر این، با افزایش غلظت (مولار) اوره و کلسیم‌کلراید در نمونه‌های سیمانته شده، مقاومت نمونه‌ها نیز بهبود یافته است. مطابق شکل ۱۹، پیشینه‌ی اضافه فشار آب حفره‌ی در نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت نزولی ۳/۰° مولار نسبت به ماسه‌ی تمیز، افزایش ۶۸/۰٪ درصدی و در نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت نزولی ۵/۰° مولار نسبت به نمونه‌ی ماسه‌ی تمیز، افزایش ۴۶/۸۹٪ درصدی داشته است. در نمونه‌های تزریق شده با غلظت نزولی ۱ و ۱/۵ مولار نیز افزایش مذکور به ترتیب ۷۳/۷۴ و ۹۲/۴۷ درصد بوده است.

۱. با افزایش غلظت در نمونه‌های سیمانته شده‌ی ثابت و نزولی، کلسیت تشکیل شده در نمونه‌ها نیز افزایش یافته و خلل و فرج موجود در خاک بهتر پر شده است، که این امر سبب افزایش ۷ تا ۶۱ درصدی مقاومت و کاهش ۳ تا ۴۱ درصدی نفوذپذیری در نمونه‌های سیمانته شده‌ی بیولوژیکی شده است.
۲. در نمونه‌های تزریق شده با غلظت ثابت، تمامی مراحل تزریق محلول سیماناسیون و محلول تثبیت به طور کامل و به خوبی صورت گرفته و کلسیت به خوبی در نمونه‌ها ایجاد شده است، که همین عامل سبب شده است تا نمونه‌های تزریق شده با غلظت ثابت مقاومت بالاتر (به طور متوسط  $10\%$ ) و نفوذپذیری پایین‌تری (به طور متوسط  $6\%$ ) نسبت به نمونه‌های تزریق شده با غلظت نزولی داشته باشند.
۳. پیک نمودار تنش - کرنش تمامی نمونه‌های سیمانته شده در کرنش (۱۰ تا ۱۵ درصد) مشاهده می‌شود که نزدیک به کرنش خرابی است و همان‌طور که در نمودارها نیز نمایان است، در کرنش‌های بالاتر، مقاومت نمونه‌ها کاهش یافته است.
۴. نتایج حاصل از آزمایش SEM نشان می‌دهد که در نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت نزولی  $3/0\%$  مولار، کلسیت ایجاد شده بسیار ناچیز بوده و در نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت ثابت  $5/1\%$  مولار، کلسیت به خوبی اطراف دانه‌های خاک تشکیل شده است که نتایج مذکور توجیه بسیار مناسبی برای نتایج حاصل از آزمایش‌های سه‌محوری و نفوذپذیری است.
۵. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت ثابت  $5/1\%$  مولار، بالاترین مقاومت (افزایش  $8/61\%$  درصدی نسبت به ماسه‌ی تمیز) و پایین‌ترین نفوذپذیری (کاهش  $25/41\%$  درصدی نسبت به ماسه‌ی تمیز) و همچنین نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت نزولی  $3/0\%$  مولار، پایین‌ترین مقاومت (افزایش  $7\%$  درصدی نسبت به ماسه‌ی تمیز) و بالاترین نفوذپذیری (کاهش  $75/3\%$  درصدی نسبت به ماسه‌ی تمیز) را داشته‌اند.

#### ۴.۵. مقایسه‌ی نتایج با مطالعات پیشین

به نظر می‌رسد که نوشتار مشابهی در زمینه‌ی تزریق نزولی وجود ندارد و بررسی اثر تزریق نزولی برای اولین بار در پژوهش حاضر صورت گرفته و نتایج آن ارائه شده است.

#### ۶. نتیجه‌گیری

روش سیماناسیون بیولوژیکی، روشی نوین، سازگار با محیط زیست و با صرفه‌ی اقتصادی است که در پژوهش حاضر از آن به منظور بررسی تأثیر نوع تزریق (نزولی یا ثابت) و غلظت مواد در نمونه‌های سیمانته شده، بر روی مقاومت نمونه‌ها با استفاده از آزمایش سه‌محوری و همچنین مقایسه‌ی نفوذپذیری نمونه‌ها با استفاده از آزمایش نفوذپذیری با بار ثابت پرداخته شده است. نتایج به دست آمده، نشان‌دهنده‌ی افزایش  $8/61\%$  درصدی مقاومت و کاهش  $25/41\%$  درصدی نفوذپذیری در نمونه‌ی سیمانته شده با غلظت ثابت  $5/1\%$  مولار است. به‌طور کلی، خلاصه‌ی نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های سه‌محوری، نفوذپذیری و SEM به این صورت ارائه شده است:

#### پانویس‌ها

1. Bio-stimulation
2. Bio-augmentation
3. Bacillus
4. microbial induced calcite precipitation (MICP)
5. Fischer
6. Sharaky
7. Xiao
8. Cheng
9. Haouzi
10. Cardoso
11. Cui
12. Wani & Mir
13. Doodh Ganga
14. Sprosarsina Pasteurii
15. Amarakoon
16. Rebata
17. Bacillus Pasteurii
18. Nutrient broth

19. Nutrient agar
20. Mini Tab
21. consolidated undrained (CU)
22. descending concentration

#### منابع (References)

1. DeJong, J.T., Mortensen, B.M., Martinez, B.C. and Nelson, D.C. "Bio-mediated soil improvement", *Ecological Engineering*, **36**(2), pp. 197-210 (2010).
2. Azadi, M. and Pouri, S. "Effect of biological cementation on sandy soil behavior", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **33**(2), pp. 71-77 (in Persian) (2017).
3. Tang, C.S., Yin, L.Y., Jiang, N.J. and et al. "Factors affecting the performance of microbial-induced carbonate precipitation (MICP) treated soil: a review", *Environmental Earth Sciences*, **79**(5), pp. 1-23 (2020).

4. Cheng, L., Shahin, M.A. and Mujah, D. "Influence of key environmental conditions on microbially induced cementation for soil stabilization", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **143**(1), pp.04016083 (2017).
5. Ferris, F.G. and Stehmeier, L.G. "Bacteriogenic mineral plugging", U.S.A Patent 5, U.S Patent Office, Washington D.C, pp. 143-155 (1992).
6. 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).
7. Bachmeier, K.L., Williams, A.E., Warmington, J.R. and et al. "Urease activity in microbiologically-induced calcite precipitation", *Journal of Biotechnology*, **93**(2), pp. 171-181 (2002).
8. Ramachandran, S.K., Ramakrishnan, V. and Bang, S.S. "Remediation of concrete using micro-organisms", *ACI Materials Journal-American Concrete Institute*, **98**(1), pp. 3-9 (2001).
9. Stocks-Fischer, S., Galinat, J.K. and Bang, S.S. "Microbiological precipitation of CaCO<sub>3</sub>", *Soil Biology and Biochemistry*, **31**(11), pp. 1563-1571 (1999).
10. DeJong, J.T., Fritzges, M.B., Nusslein, K. "Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, **132**, pp. 1381-1392 (2006).
11. Ivanov, V. and Chu, J. "Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ", *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, **7**(2), pp. 139-153 (2008).
12. Harkes, M.P., Van Paassen, L.A.; Booster, J.L. and et al. "Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement", *Ecological Engineering*, **36**(2), pp. 112-117 (2010).
13. Sharaky, A.M., Mohamed, N.S., Elmashad, M.E. and et al. "Application of microbial biocementation to improve the physico-mechanical properties of sandy soil", *Construction and Building Materials*, **190**, pp. 861-869 (2018).
14. 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).
15. Cheng, L. and Shahin, M.A. "Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) for Soil Stabilization", in: *Ecological Wisdom Inspired Restoration Engineering*, Springer, pp. 47-68 (2019).
16. Haouzi, F.Z., Esnault-Filet, A. and Courcelles, B. "Performance studies of microbial induced calcite precipitation to prevent the erosion of internally unstable granular soils", in: *Civil Infrastructures Confronting Severe Weathers and Climate Changes Conference*, Springer, pp. 37-49 (2018).
17. Cardoso, R., Pedreira, R., Duarte, S.O. and et al. "About calcium carbonate precipitation on sand biocementation", *Engineering Geology*, **271**, p. 10612 (2020).
18. Cui, M.J.; Zheng, J.J.; Chu, J. and et al. "Bio-mediated calcium carbonate precipitation and its effect on the shear behaviour of calcareous sand", Springer (2020).
19. Tiwari, N., Satyam, N. and Sharma, M. "Micro-mechanical performance evaluation of expansive soil biotreated with indigenous bacteria using MICP method", *Scientific Reports*, **11**, pp. 10324 (2021).
20. Wani, K.M.N.S. and Mir, B.A. "A Laboratory-Scale study on the Bio-cementation potential of distinct river sediments infused with microbes", Springer (2021).
21. Wani, K.M.N.S. and Mir, B.A. "An Experimental study on the Bio-cementation and Bio-clogging effect of bacteria in improving weak dredged soils", Springer (2021).
22. 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).
23. Rebata-Landa, V. "Microbial activity in sediments: Effects on soil behavior", Georgia Institute of Technology (2007).
24. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 04.09 (2004).
25. Amarakoon, G. and Kawasaki, S. "Utilization of microbially induced calcite precipitation for sand solidification using pararhodobacter SP. Springer, **59**(1), pp. 69-91 (2019).
26. Amin, M. and Zomordian, S.M.A. "Effect of bacterial injection in reducing the erosion rate of sand", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **32**(2), pp. 13-19 (in Persian) (2016).
27. Lin, H., Suleiman, M.T., Brown, D.G. and et al. "Mechanical behavior of sands treated by microbially induced carbonate precipitation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **142**(2), pp. 04015066 (2016).
28. Azadi, M. and Attarzade, M.A. "Investigation of the effect of soil stabilization and increase of bearing capacity using MICP method in soils with low strength using cyclic triaxial experiment", Qazvin Islamic Azad University, (in persian) (2019).
29. Azadi, M. and Daftari, GH. "Determination of retention time (R.T) under different temprature conditions in the improvement of sandy soils by bio-cementation", Sharif Journal of Civil Engineering, Published Electronically (in Persian) (2021).