

پارامترهای موثر بر تنش انحرافی و سختی ماسه بهسازی شده تحت القاء رسوب کربنات کلسیم

سید عبدالله اکرامی راد^{1*}، محمد آزادی²، ناصر شمس کیا³ و باقر حیدرپور⁴

¹ استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد لنگرود، دانشگاه آزاد اسلامی، لنگرود، ایران

² دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

³ استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

⁴ استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد رودسر و املش، دانشگاه آزاد اسلامی، رودسر، ایران

(دریافت: 00/00/00، پذیرش: 00/00/00، نشر آنلاین: 00/00/00)

چکیده

با افزایش جمعیت و رشد شهرنشینی، یکی از چالش‌های مهندسان ژئوتکنیک دسترسی به زمین‌های با ظرفیت باربری مناسب می‌باشد. تا کنون تکنیک‌های مختلفی مثل تراکم، تزریق و غیره، جهت بهسازی خاک به کار گرفته شده است. اخیراً روش‌های نوآورانه و دوستدار محیط زیست مثل بهسازی تحت القاء رسوب کربنات کلسیم، توسعه یافته است که تحقیق در خصوص عوامل مؤثر بر بهبود، افزایش کارایی و کاهش هزینه‌های آن را ضروری می‌سازد. در این پژوهش، به بررسی تأثیر مولارته محلول سیمان‌تاسیون، چگالی اپتیکی باکتری و زمان عمل‌آوری نمونه بر رفتار تنش-کرنش و تغییرات سختی ماسه بهسازی شده بیولوژیکی، توسط آزمایش سه محوری فشاری تحکیم‌یافته زهکشی نشده پرداخته شد. خاک مورد استفاده از نوع ماسه بد دانه‌بندی شده و از منطقه کوهین استان قزوین بوده که برای بهسازی آن از باکتری اسپروسارسینا پاستوری جهت تسریع واکنش و تولید رسوب، استفاده گردید. همچنین جهت جلوگیری از مسدودشدگی و کنترل توزیع یکنواخت رسوب، از روش تزریق چهار فازی استفاده شد. منحنی‌های تغییرات تنش انحرافی در برابر کرنش محوری نشان داد که مولارته محلول سیمان‌تاسیون با افزایش 45 درصدی تنش انحرافی، بیشترین تأثیر را بر رفتار تنش-کرنش ماسه بهسازی شده داشته است و زمان عمل‌آوری نمونه و چگالی اپتیکی باکتری، دارای تأثیر کمتری در روند بهسازی بیولوژیکی بوده‌اند. از سوی دیگر، برای ماسه بهسازی شده با سطوح مولارته و چگالی اپتیکی پایین، افزایش چندان در تنش انحرافی نسبت به قبل از بهسازی حاصل نگردید. پس از بهسازی بیولوژیکی ماسه، سختی ثانویه (Esec) و سختی معادل 50 درصد تنش انحرافی حداکثر (E50)، در حدود 1/5 تا 2 برابر افزایش یافت.

کلیدواژه‌ها: بهسازی بیولوژیکی، مولارته محلول سیمان‌تاسیون، چگالی اپتیکی باکتری، زمان عمل‌آوری، تنش انحرافی، سختی.

1- مقدمه

این موارد می‌توان به استفاده از تزریق مواد شیمیایی مثل فنوپلاست‌ها¹، پلی‌اورتان‌ها²، اکریل آمیدها³ و اپوکسی‌ها⁴ به درون خلل و فرج خاک در طول سال‌های گذشته اشاره کرد (Karol, 2003). یکی از مشکلات اصلی در این زمینه، هزینه بالا و معضلات زیست‌محیطی آنها می‌باشد. جهت مقابله با موارد ذکر شده، تحقیقات برای روش‌های جدید بهسازی مثل بهسازی به روش رسوب‌گذاری میکروبی کربنات کلسیم⁵ (MICP) گسترش یافت. یکی از زمینه‌های جدید بهسازی در حوزه ژئوتکنیک، استفاده از روش‌های زیستی در مسائل مهندسی بوده و جهت مقابله با

با توجه به رشد جمعیت، می‌توان گفت که یکی از چالش‌های پیش روی مهندسان در حوزه ساخت و ساز، دسترسی به زمین‌های با ظرفیت باربری مناسب می‌باشد. لذا عدم دستیابی به زمین‌های با کیفیت مناسب، مهندسان ژئوتکنیک را مجاب به ارتقاء کیفی پارامترهای مکانیکی خاک با استفاده از روش‌های مختلف بهسازی می‌نماید. از دیرباز تکنیک‌های مختلفی همچون تراکم، تزریق و روش‌های مکانیکی جهت بهسازی خاک مورد استفاده قرار می‌گرفت که هر کدام مزایا و معایب خود را در پی داشت. از جمله

⁴ Epoxy

⁵ Microbial Induced Calcite Precipitation (MICP)

¹ Phenoplasts

² Polyurethane

³ Acrylamide

مختلف از جمله دما بر فعالیت اوره‌آزی و استراتژی‌های تزریق (Wang et al., 2024)، ترمیم ترک بتن (Zhang et al., 2024)، تأثیر مسیر تنش بر ماسه بهسازی شده بیولوژیکی (Nafisi et al., 2021)، کاهش شکنندگی ماسه ریز سمنته شده (Wang et al., 2022)، بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی سنگدانه‌های بازیافتی اصلاح شده (Tang et al., 2023)، مقاومت در برابر فرسایش بادی ماسه بادی (Qu et al., 2024) و اثرات بهسازی بیولوژیکی بر رفتار روانگرایی معادن باطله (Behzadipour et al., 2024) اشاره نمود. شکل 1، نحوه رسوب بیولوژیکی کلسیت به وسیله هیدرولیز اوره را نشان می‌دهد (Ekramirad et al., 2023).

بررسی پارامترهای مختلف مؤثر بر بهسازی بیولوژیکی، بیشتر تحت آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده انجام یافته و پارامترهای مرتبط با نشست خاک کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از آنجایی که توجه به پارامترهای مقاومت و تغییر شکلی در سازه‌های ژئوتکنیکی ضرورت دارد، در این پژوهش به بررسی تأثیر همزمان مولارینه محلول سیمان‌تاسیون، چگالی اپتیکی باکتری و زمان عمل‌آوری نمونه بر رفتار تنش-کرنش و پارامترهای سختی ثانویه (E_{sec}) و سختی معادل 50 درصد تنش انحرافی حداکثر (E_{50}) ماسه بهسازی شده توسط رسوب میکروبی کرنات کلسیم پرداخته خواهد شد. برای هر کدام از پارامترهای تأثیرگذار بر فرایند بهسازی با سه سطح تغییرات، 17 نمونه بر اساس طراحی آزمایش با استفاده از نرم‌افزار Design Expert ver. 11.0.3.0 به دست آمد. پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها تحت آزمایش سه محوری فشاری تحکیم‌یافته زهکشی نشده¹ (CU) قرار گرفته‌اند و در ادامه نتایج حاصل از آزمایشات سه محوری توسط منحنی تغییرات تنش-کرنش و سختی بررسی شده است.

2- مصالح مورد استفاده

2-1- مشخصات خاک

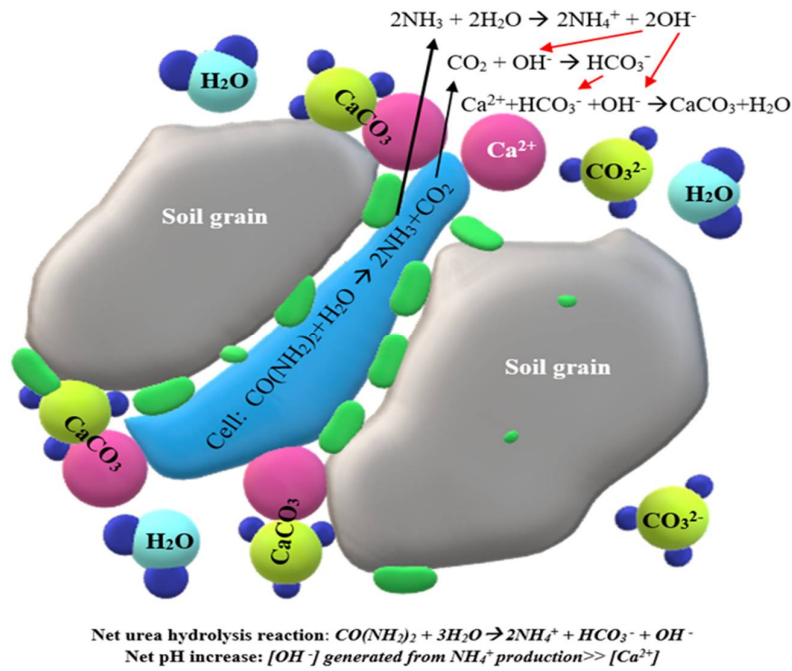
خاک مورد استفاده در این پژوهش از منطقه کوهین واقع در استان قزوین بوده است. جهت تعیین مشخصات مکانیکی خاک از آزمایشات دانه‌بندی مطابق استاندارد ASTM 175 D422، چگالی دانه‌های جامد، جرم مخصوص خشک، تخلخل و تراکم نسبی استفاده شد. طبق آزمایش دانه‌بندی، خاک مورد نظر از نوع ماسه بد دانه‌بندی (SP) شده بوده (شکل 2)، و سایر مشخصات خاک در جدول 1 ارائه شده است.

فرسایش خاک، کنترل جریان آب در خاک و پایداری شیروانی‌ها از کاشت درختان و پوشش گیاهی استفاده می‌شد. با توجه به فعالیت میکروارگانیسم‌ها در خاک، از آنها بیشتر در پاکسازی، انسداد زیستی و سمنته‌شدن خاک به کار گرفته شد (DeJong, et al., 2006). با کنترل و مدیریت صحیح فرایند شیمیایی باکتری‌های موجود در عمق زمین، می‌توان با افزودن برخی مواد مثل تزریق آهک، پارامترهای مکانیکی خاک را نیز بهبود بخشید (DeJong et al., 2010). بهره‌گیری از باکتری‌های موجود در خاک و ایجاد رسوب بین منافذ خاک در مهندسی ژئوتکنیک، به روش بهسازی بیولوژیکی معروف بوده، که ضمن سازگاری مناسب با محیط اطراف ما، با رسوخ بیشتر رسوب کرنات کلسیم در منافذ خاک برخی از معضلات ذکر شده در روش‌های تزریق شیمیایی را مرتفع می‌سازد.

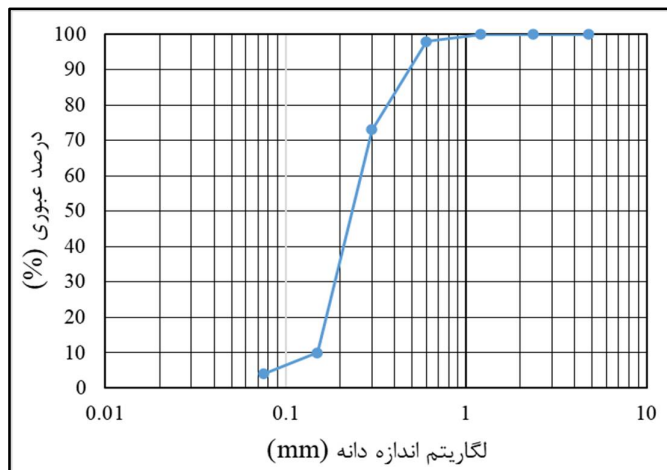
نظارت حین بهسازی و بررسی پارامترهای مؤثر بر عمر مفید خاک بهسازی شده ضروری است. لذا جهت به حداقل رساندن محصولات جانبی حاصل متابولیسم میکروبی و ایجاد رسوب یکنواخت‌تر درون منافذ خاک باید سازگاری مناسبی بین اندازه میکروبی و قطر منافذ خاک وجود داشته و ضمن جلوگیری از مسدود شدگی نقطه تزریق توسط تجمع میکروبی، مدت زمان بهسازی را مدیریت کرد. از آنجایی که اندازه میکروبی نسبتاً کوچک و بین 0/5 تا 3 (μm) می‌باشد، محدودیت عمده انتقال میکروبی بین منافذ خاک، قطر گلوگاه ارتباطی بین حفرات است (Madigan et al., 2006).

در طول دو دهه گذشته تحقیقات زیادی در ارتباط با بهسازی بیولوژیکی صورت گرفته است که می‌توان به تقویت پارامترهای مکانیکی خاک (Whiffin, 2004)، افزایش مقاومت و سختی (Van Paassen, 2009; Rong, 2012)، تثبیت خاک (Prajapati et al., 2023)، استفاده از روش غوطه‌وری (Wen, et al., 2019) و تولید آجر بیولوژیکی (Cheng et al., 2020) اشاره کرد. تحقیقات در راستای پارامترهای تأثیرگذار بر کارایی روش و همچنین توسعه روش‌های مختلف بهسازی بیولوژیکی ادامه یافت، به طوری که هارکس و همکاران (2010)، به بررسی تزریق دو فازی جهت جلوگیری از تجمع و انباشته شدن رسوب در نقطه شروع تزریق پرداختند (Harkes et al., 2010). الکووانی و همکاران (2012) اثر غلظت محلول سیمان‌تاسیون و زمان ماند را بر کارایی روش بهسازی بیولوژیکی در شرایط چگالی اپتیکی ثابت ارزیابی نمودند (Al Qabany et al., 2012). همچنین اثر درجه سمنته شدن بر رفتار تنش-کرنش ماسه در آزمایش سه محوری CU بررسی گردید (DeJong و Montoya, 2015). از دیگر تحقیقات صورت گرفته در این زمینه می‌توان به بررسی اثر عوامل

¹ Consolidated Undrained Triaxial Compression Test



شکل 1 - نحوه رسوب بیولوژیکی کلسیت به وسیله هیدرولیز اوره (Ekramirad et.al, 2023).



شکل 2 - منحنی دانه بندی خاک.

جدول 1 - مشخصات خاک

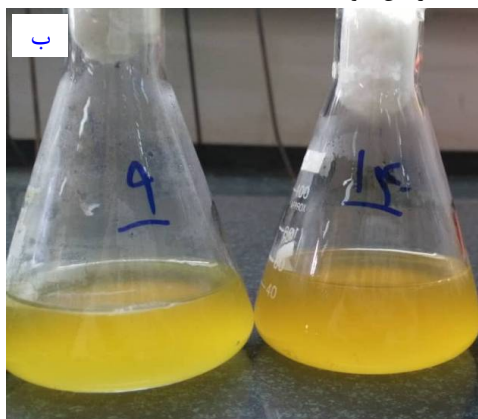
مقدار	مشخصات
ماسه بد دانه بندی شده	طبقه بندی خاک
1/73	ضریب یکنواختی
1/026	ضریب خمیدگی
2/63	چگالی دانه‌های جامد
1/59g/cm ³	چگالی خشک
0/37	تراکم نسبی

2-2- باکتری و محیط کشت

نقش باکتری در تسریع واکنش هیدرولیز اوره و کمک به رسوب‌زایی کربنات کلسیم می‌باشد. تاکنون باکتری‌های مختلفی از دسته هوازی و بی‌هوازی مورد مطالعه قرار گرفته است. باکتری اسپروساسینای پاستوری¹ مورد استفاده در این پژوهش، از خانواده باسیلاس با ساختار بیضی شکل و دارای فعالیت اوره‌آزی مثبت بالایی می‌باشد. باکتری‌ها از مرکز تحقیقات علمی و صنعتی ایران به شماره PTCC 1645 (DSM33) به صورت لیوفلیزه² تهیه گردید. هنگامی که باکتری‌ها در شرایط مناسب قرار می‌گیرند، قادر به رشد و تکثیر خواهند بود. شرایط مناسب یعنی محیط کشت مغذی، که حاوی کلیه احتیاجات میکروب اعم از مواد غذایی و آلی باشد. کشت باکتری می‌تواند در محیط کشت مایع (براث³) یا محیط کشت جامد (آگار⁴) صورت گیرد، که در این پژوهش از محیط کشت مایع (شکل 3) جهت نگهداری کوتاه مدت و فعال سازی سویه لیوفلیزه و تهیه سوسپانسیون باکتری استفاده شده است. جهت تهیه آن، ابتدا به مقدار مورد نظر آب مقطر در داخل

یک ارلن ریخته و مطابق دستورالعمل شرکت سازنده (مرک⁵ آلمان) معادل 8 gr/lit از پودر براث به آن افزوده شده تا کاملاً همگن شود. نکته قابل توجه این است که حجم ظرف باید طوری تعیین گردد تا محلول داخل آن حداکثر 20% حجم ظرف را پر کند. این کار باعث می‌شود تا پس از کشت باکتری، اکسیژن کافی در اختیار آن قرار گیرد (Al Qabany et al., 2012). پس از حل شدن کامل براث، محلول داخل اتوکلاو در دمای 121 درجه سانتی‌گراد و به مدت 15 دقیقه قرار داده شد، تا استریل گردد. پس از استریل و خنک شدن محلول، اوره را به میزان دو درصد محیط کشت، وزن نموده و به کمک آب مقطر، محلول 20% آن تهیه گردید. در ادامه، محلول حاصل به کمک فیلتر 0/22 میکرون، در شرایط استریل به داخل محیط کشت اضافه شد.

جهت ارزیابی فعالیت اوره‌آزی باکتری از روش پیشنهادی ویفین (2004) بر اساس اندازه‌گیری تغییرات هدایت الکتریکی بهره گرفته شد. بدین صورت که هیدرولیز اوره منجر به تولید آمونیاک و دی اکسید کربن شده و هدایت الکتریکی متعاقباً افزایش خواهد یافت (Whiffin, 2004).



شکل 3 - الف) محیط کشت مایع (ناترینت براث و اوره) قبل و ب) پس از کشت باکتری.

3- روش کار

3-1- تهیه نمونه

برای ساخت نمونه از روش بارش خشک برای قرارگیری خاک در داخل قالب استفاده شد. قالب‌ها از جنس لوله PVC با قطر و ارتفاع به ترتیب 7 و 14 سانتی‌متر مطابق با شرایط دستگاه آزمایش سه محوری ساخته شد. از آنجایی که جهت جلوگیری از مسدودشدگی نقطه شروع تزریق و یکنواختی فرایند بهسازی از تزریق چهار فازی استفاده گردید، لذا نیاز به تعبیه دریچه خروجی در انتهای تحتانی قالب با امکان باز و بسته شدن می‌باشد. همچنین قبل از دریچه خروجی، فیلتر گذاشته شد تا در حین تخلیه محلول

در انتهای هر فاز تزریق، خروج و حذف دانه‌های خاک اتفاق نیفتد. قبل از تزریق جهت بهسازی، برای تهیه محلول سیمنتاسیون، ابتدا باکتری کشت داده شده در محیط کشت مایع جداسازی می‌گردد، که بهترین زمان بین 24 تا 48 ساعت پس از کشت باکتری می‌باشد. به منظور جداسازی آن، ابتدا سوسپانسیون به دستگاه سانتریفیوژ انتقال یافته تا با سرعت 400 rpm در مدت زمان 20 دقیقه، رسوب باکتری تهیه گردد. چگالی اپتیکی باکتری نیز بر اساس طول موج 600 nm توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر اندازه‌گیری می‌شود.

⁴ Nutrient agar

⁵ Merck

¹ *Sporosarcina pasteurii*

² Lyophilized

³ Nutrient broth

باکتری، تزریق محلول سیمانانتاسیون آغاز گردید (شکل 4 الف). با توجه به سطوح مختلف مولاریته محلول، زمان‌های انتظار متفاوتی بین فازهای تزریق وجود خواهد داشت. از سوی دیگر، بعد از تزریق فازهای اول و دوم جهت بهبود فرایند شکل‌گیری رسوب بین منافذ، تزریق مجدد باکتری به انضمام بافرها و سپس تثبیت آنها صورت می‌گیرد. ضمناً مقدار زمان انتظار بین فازهای مختلف بر اساس رسیدن به کارایی ماکزیمم و سرعت تزریق به دست آمده توسط آکوبانی و همکاران (2012) محاسبه گردید. سپس با توجه به زمان عمل‌آوری مورد بررسی در این پژوهش مطابق جدول 2، نمونه‌های تزریق شده در آزمایشگاه در شرایط مناسب و دمایی بین 27 تا 30 درجه نگهداری شده تا پروسه رسوب‌گذاری بیولوژیکی بین منافذ صورت گیرد. سپس نمونه بهسازی شده تحت آزمایش سه محوری فشاری تحکیم‌یافته زهکشی نشده قرار خواهد گرفت. شکل 4 ب)، نمونه سمنت‌شده بر روی دستگاه سه محوری را نشان می‌دهد. برنامه زمان‌بندی ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایشات در جدول 3 آمده است.

در مرحله بعد جهت بهسازی نمونه، ابتدا محلول سیمانانتاسیون را بر اساس مولاریته‌های مورد نظر مطابق جدول 2 و با توجه به حجم مولی اوره و کلرید کلسیم دو آبه به ترتیب برابر 60 و 147 (گرم بر مول) آماده می‌کنیم. جهت توزیع یکنواخت رسوب کربنات کلسیم، محلول سیمانانتاسیون به روش ثقیلی به داخل منافذ خاک تزریق می‌گردد. قبل از انجام تزریق، خاک در سه لایه در درون قالب PVC جای گرفته و توسط آب مقطر به طور کامل شستشو داده می‌شود (Lin et al., 2016). گام بعد، مرحله تزریق سوسپانسیون باکتری‌های رقیق شده به انضمام محیط کشت و بافر بوده که با توجه به تحقیقات هان و همکاران (2010)، با حجم معادل 1/2 برابر حجم خلل فرج خاک انجام می‌گیرد (Al, Han, et al., 2016). جهت جلوگیری از هدر رفتن و انجام واکنش باکتری‌ها، نیاز به تثبیت آنها توسط محلول کلرید کلسیم در داخل حفرات خاک بوده، تا پس از افزودن محلول سیمانانتاسیون رسوب-گذاری شکل گیرد (Harkes et al., 2010). در اینجا، از تزریق چهار فازی استفاده شد، که با فاصله زمانی 6 ساعته پس از تثبیت



شکل 4 - الف) تزریق محلول سیمانانتاسیون ب) نمونه پس از بهسازی در دستگاه آزمایش سه محوری.

جدول 2 - سطوح تغییرات پارامترهای مؤثر بر بهسازی بیولوژیکی.

نمونه	متغیرهای مستقل	سطح تغییرات		
A	مولاریته سیمانانتاسیون (mol/L)	1/0	0/5	1/5
B	چگالی اپتیکی باکتری (OD ₆₀₀)	1/5-2/0	0/8-1/2	2/0-4/0
C	زمان عمل‌آوری (day)	30	15	45

جدول 3 - برنامه زمان بندی ساخت نمونه ها و انجام آزمایشات بر اساس طرح آزمایش به روش سطح پاسخ.

شماره نمونه	مولاریته (mol/L)	چگالی اپتیکی باکتری (OD ₆₀₀)	زمان آزمایش (روز)	زمان ساخت نمونه	مدت زمان بهسازی (روز)	زمان آزمایش
1	0/5	0/8 - 1/2	30	1400/06/27	2	1400/07/28
2	1/5	0/8 - 1/2	30	1400/08/15	6	1400/09/22
3	0/5	2/0 - 4/0	30	1400/06/27	2	1400/07/28
4	1/5	2/0 - 4/0	30	1400/08/15	6	1400/09/22
5	0/5	1/5 - 2/0	15	1400/08/19	2	1400/09/06
6	1/5	1/5 - 2/0	15	1400/08/15	6	1400/09/06
7	0/5	1/5 - 2/0	45	1400/08/19	2	1400/10/06
8	1/5	1/5 - 2/0	45	1400/08/15	6	1400/10/06
9	1	0/8 - 1/2	15	1400/08/08	4	1400/08/27
10	1	2/0 - 4/0	15	1400/08/08	4	1400/08/27
11	1	0/8 - 1/2	45	1400/08/08	4	1400/09/27
12	1	2/0 - 4/0	45	1400/08/08	4	1400/09/27
13	1	1/5 - 2/0	30	1400/07/20	4	1400/08/25
14	1	1/5 - 2/0	30	1400/07/20	4	1400/08/25
15	1	1/5 - 2/0	30	1400/08/03	4	1400/09/09
16	1	1/5 - 2/0	30	1400/08/03	4	1400/09/09
17	1	1/5 - 2/0	30	1400/06/21	4	1400/07/25

3-2- آزمایش سه محوری CU

جهت مقایسه رفتار تنش-کرنش و سختی نمونه ها در حالات قبل و بعد از بهسازی، نمونه ها پس از خروج از قالب تحت آزمایش سه محوری CU مطابق استاندارد ASTM D4767-CU قرار می گیرند. قبل از جایگذاری آزمونه، ابتدا غشاء لاستیکی از نظر سوراخ و نشت مورد بازبینی قرار می گیرد. نمونه را با غشای لاستیکی پوشانده و پس از قرارگیری بر روی دستگاه سه محوری، توسط حلقه های لاستیکی آب بند می گردد. هوای محبوس داخل منافذ خاک را توسط گاز CO₂ تخلیه کرده و نمونه با کنترل B اسکمتون¹² اشباع می شود. جهت تحکیم نمونه از فشار همه جانبه 100 کیلو پاسکال استفاده گردیده و پس از پایان تحکیم نمونه، با حصول اطمینان از بسته بودن شیرهای زهکشی، بارگذاری جهت اعمال تنش های انحرافی اعمال شده تا گسیختگی نمونه رخ دهد. بارگذاری بر اساس روش کنترل کرنش انجام گرفته و پس از اتمام آزمایش، با توجه به خروجی داده های دستگاه سه محوری رفتار تنش-کرنش و سختی نمونه ها مورد ارزیابی قرار می گیرد.

4- بحث و نتایج**4-1- مقایسه رفتار تنش-کرنش**

جهت بررسی تأثیر پارامترهای مولاریته محلول سیمان تاسیون، چگالی اپتیکی و زمان عمل آوری نمونه، مجموعه ای از آزمایشات سه محوری CU مطابق با سطوح تغییرات جدول 2، قبل و بعد از

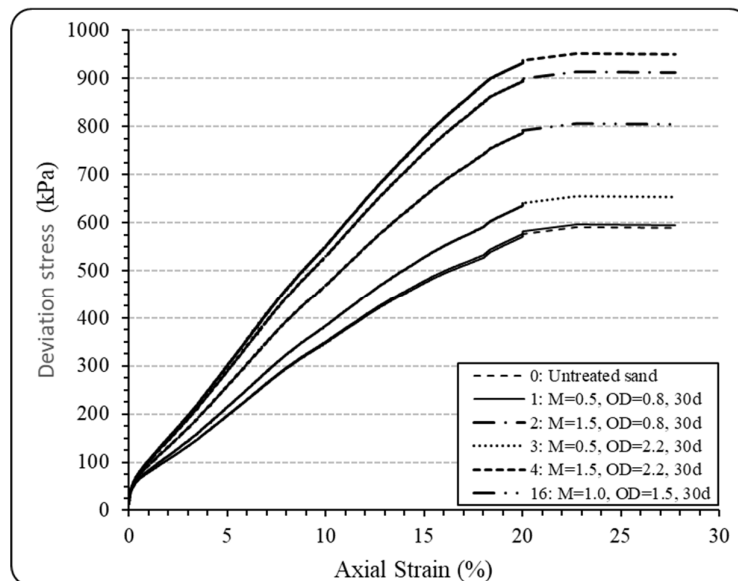
بهسازی نمونه انجام شد. بر اساس نتایج آزمایش سه محوری CU حداکثر تنش انحرافی پس از بهسازی بیولوژیکی برابر 957 kPa به دست آمد که در مقایسه با حالت قبل از بهسازی تقریباً 62 درصد افزایش داشته است. جهت مقایسه نمونه ها قبل و بعد از بهسازی تحت آزمایش سه محوری CU، نمودارهای تنش انحرافی در برابر کرنش محوری ترسیم گردید. مطابق شکل های 5 تا 7 مشاهده گردید که شیب نمودار تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری در کرنش های پایین، زیاد بوده و با افزایش کرنش محوری شیب ملایم تری را دنبال خواهد کرد. ضمناً نمونه ها تقریباً در کرنش های محوری حدود 18 تا 22 درصد، به حداکثر تنش انحرافی رسیده و پس از آن با افزایش کرنش ها، نمونه ها قادر به تحمل بار بیشتر نخواهند بود.

مولاریته محلول سیمان تاسیون یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار تنش-کرنش ماسه بهسازی شده بیولوژیکی می باشد. شکل 5 نشان می دهد که مولاریته محلول سیمان تاسیون می تواند تأثیر زیادی بر افزایش تنش های انحرافی ماسه پس از بهسازی توسط رسوب میکروبی کربنات کلسیم (MICP) داشته باشد. با توجه به شکل 5، مقایسه نمونه های 3 و 4 در شرایط چگالی اپتیکی و زمان عمل آوری یکسان نشان داد که با افزایش مولاریته محلول سیمان تاسیون از 0/5 به 1/5 مولار بر لیتر، مقدار تنش انحرافی در نمونه ها از 655 kPa به 952 kPa تغییر یافته و با افزایش حدود

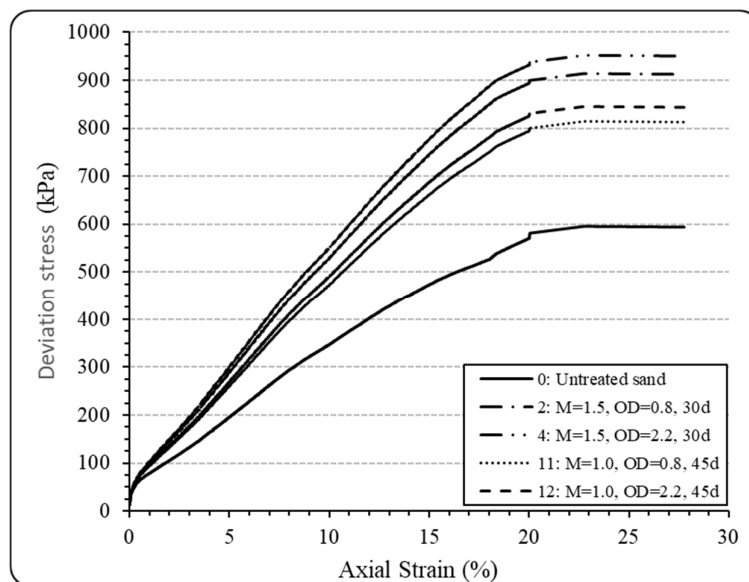
¹² Skempton's coefficient B

گرفته و با ایجاد پیوندهای تماسی قوی‌تر بین دانه‌ها، روند افزایش مقاومت و تنش‌های انحرافی سریع‌تر دنبال می‌گردد. همچنین در شکل 5 نمونه با غلظت مولی 0/5، به دلیل پایین بودن زیاد مولاریته محلول سیمان‌تاسیون و چگالی اپتیکی باکتری، نسبت به حالت قبل از بهسازی بیولوژیکی، افزایش تنش انحرافی چندانی حاصل نگردید.

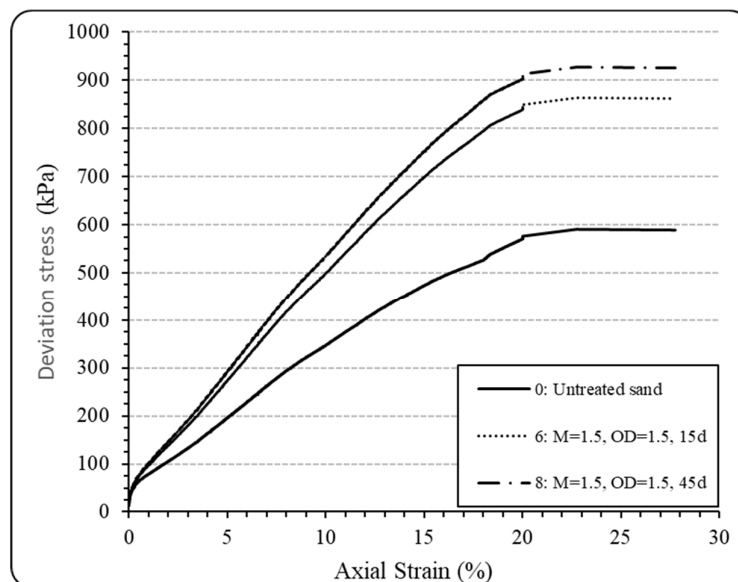
45 درصدی همراه بوده (روند مشابه برای نمونه‌های 1 و 2 نیز دیده شده است) که تطابق مناسب آن با کارهای فنگ و همکاران (2016) دارد (Feng et al., 2016). از طرفی دیگر، نتایج نشان داده که در سطوح مولاریته پایین، تأثیر مولاریته نسبت به حالت قبل بهسازی چندان چشمگیر نیست و با افزایش مولاریته با تامین مواد مغذی، رسوب گذاری بهتری در داخل منافذ خاک شکل



شکل 5 - تأثیر مولاریته محلول سیمان‌تاسیون بر تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری.



شکل 6 - تأثیر چگالی اپتیکی باکتری بر تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری.



شکل 7 - تأثیر زمان عمل‌آوری نمونه بر تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری.

تا محدوده زمانی بین 35 تا 39 روزه روند افزایشی بسیار خوبی را دنبال کرده، اما پس از آن رشد قابل ملاحظه‌ای نداشته است.

4-2- مقایسه سختی نمونه

یکی از پارامترهای مهم ژئوتکنیکی حاکم بر رفتار تنش-کرنش، مدول یا سختی خاک می‌باشد. در ادامه مدول ثانویه (E_{sec}) و مدول معادل 50 درصد تنش انحرافی حداکثر (E_{50}) مورد بررسی قرار گرفت. طبق آنچه در بخش‌های قبلی مشاهده شد (شکل‌های 5 تا 7)، شیب نمودارهای تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری در کرنش‌های پایین (محدوده ارتجاعی) زیاد بوده و با انتقال به محدوده غیر ارتجاعی کاهش یافت. مطلب فوق بیانگر این نکته است که در ابتدای آزمایش سه محوری CU، نمونه‌ها رفتار سخت شونده کرنشی داشته و با افزایش کرنش محوری در محدوده کرنش‌های کوچک و ارتجاعی، مدول ثانویه (E_{sec}) با سرعت زیاد کاهش می‌یابد (مطابق اشکال 8 تا 10). سپس با انتقال به ناحیه غیر ارتجاعی رفتار نرم‌شوندگی کرنشی از خود نشان داده و سختی ثانویه (E_{sec}) با نرخ کاهشی ملایم‌تری، نهایتاً به مقدار تقریباً ثابتی میل می‌کند. باید توجه داشت که در کرنش‌های کوچک، تغییر شکل‌های به وجود آمده حاصل شکستن پیوند بین دانه‌ها و باندهای تماسی ناشی از سمت‌شدن بیولوژیکی و در محدوده رفتار ارتجاعی بوده، در حالی که تغییر شکل‌ها در کرنش‌های بزرگ، حاصل لغزش دانه‌ها بر روی هم با خاصیت غیر ارتجاعی همراه خواهد بود.

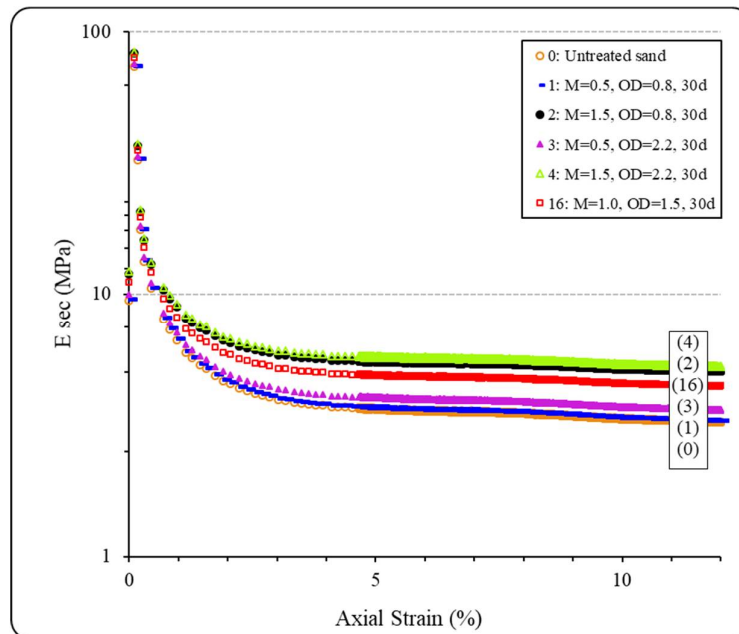
مشاهدات حاصل از شکل 8 نشان داد که افزایش مولاریته محلول سیمان‌تاسیون در شرایط چگالی اپتیکی و زمان عمل‌آوری

پارامتر دیگری که در این پژوهش به آن پرداخته شد، چگالی اپتیکی باکتری بود. مطابق شکل 6، مقایسه نمونه‌های 2 و 4 (و همچنین 11 و 12) نشان داد که چگالی اپتیکی باکتری نسبت به مولاریته محلول سیمان‌تاسیون تأثیر بسیار کمتری بر افزایش تنش‌های انحرافی داشته است. در شرایط یکسان مولاریته و زمان عمل‌آوری برای نمونه‌های 2 و 4، با افزایش چگالی اپتیکی باکتری از 0/8 به 2/2، میزان تنش‌های انحرافی از 914 kPa به 952 kPa و تقریباً معادل 4 درصد افزایش داشته است، که در مقایسه با پارامتر قبلی چندان قابل ملاحظه نبود. از سوی دیگر، مقایسه اشکال 5 و 6 نشان داد که روند افزایش مقاومت با تغییرات چگالی اپتیکی باکتری، در سطوح مولاریته بالاتر به مراتب کمتر است، که خود گویای نقش بسزای مولاریته محلول سیمان‌تاسیون بر افزایش تنش انحرافی می‌باشد.

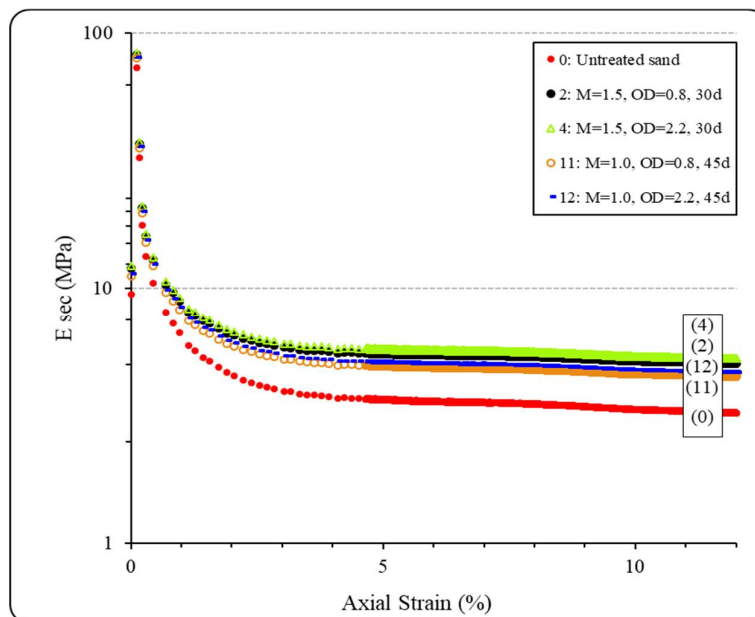
جهت بررسی تأثیر زمان عمل‌آوری بر بهسازی بیولوژیکی ماسه (MICP)، بر اساس جدول 2، نمونه‌ها در بازه زمانی 15، 30 و 45 روزه تحت آزمایش سه محوری CU قرار گرفتند. با توجه به شکل 7، روند تغییرات تنش انحرافی در برابر کرنش محوری نشان داد که در شرایط مولاریته محلول سیمان‌تاسیون و چگالی اپتیکی برابر، افزایش زمان عمل‌آوری باعث افزایش مقاومت نمونه‌های بهسازی شده می‌گردد. به طوری که برای نمونه‌های 6 و 8، افزایش زمان عمل‌آوری از 15 به 45 روز باعث افزایش حدود 7 درصدی تنش انحرافی گردید. همچنین نتایج حاصل از آزمایشات سه محوری CU نشان داد که در سطوح مولاریته و چگالی اپتیکی پایین، زمان عمل‌آوری تأثیر چندانی بر روند بهسازی ندارد (نمونه 1 در شکل 5). تنش‌های انحرافی نمونه‌ها از شروع زمان عمل‌آوری

کلسیم بین منافذ خاک، افزایش قابل ملاحظه در سختی ثانویه (E_{sec}) نسبت به حالت قبل از بهسازی مشاهده نگردید. مطابق شکل 11، روند مشابه مدول ثانویه (E_{sec}) در ارتباط با سختی معادل 50 درصد تنش انحرافی حداکثر (E_{50}) مشاهده گردید. مجدداً مدول (E_{50})، با افزایش مولاریته محلول سیمانناسیون افزایش زیادی داشته، در حالی که پس از بهسازی توسط رسوب میکروبی کربنات کلسیم (MICP) با مولاریته و چگالی اپتیکی پایین، سختی چندان افزایش پیدا نکرد (نمونه 1).

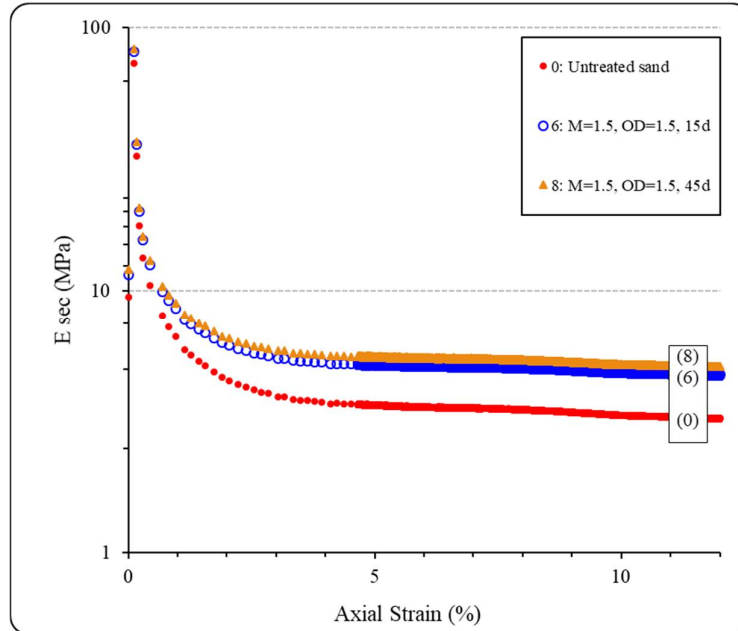
مشابه، باعث افزایش مدول ثانویه (E_{sec}) نمونه‌های بهسازی شده بیولوژیکی می‌گردد (مقایسه نمونه‌های 1 و 2 و همچنین 3 و 4). در واقع افزایش مولاریته منجر به تشکیل رسوب کربنات کلسیم بیشتر بین منافذ خاک و ایجاد باندهای تماسی قوی‌تر گشته و در نتیجه در کرنش‌های پایین، کرنش سخت شونده بالاتری داشته و افزایش مدول ثانویه (E_{sec}) را در پی خواهد داشت. از طرفی دیگر برای نمونه‌های با سطوح مولاریته محلول سیمانناسیون و چگالی اپتیکی پایین، به دلیل عدم شکل‌گیری مناسب رسوب کربنات



شکل 8 - تأثیر مولاریته محلول سیمانناسیون بر مدول ثانویه (E_{sec}) ماسه بهسازی شده بیولوژیکی (MICP).



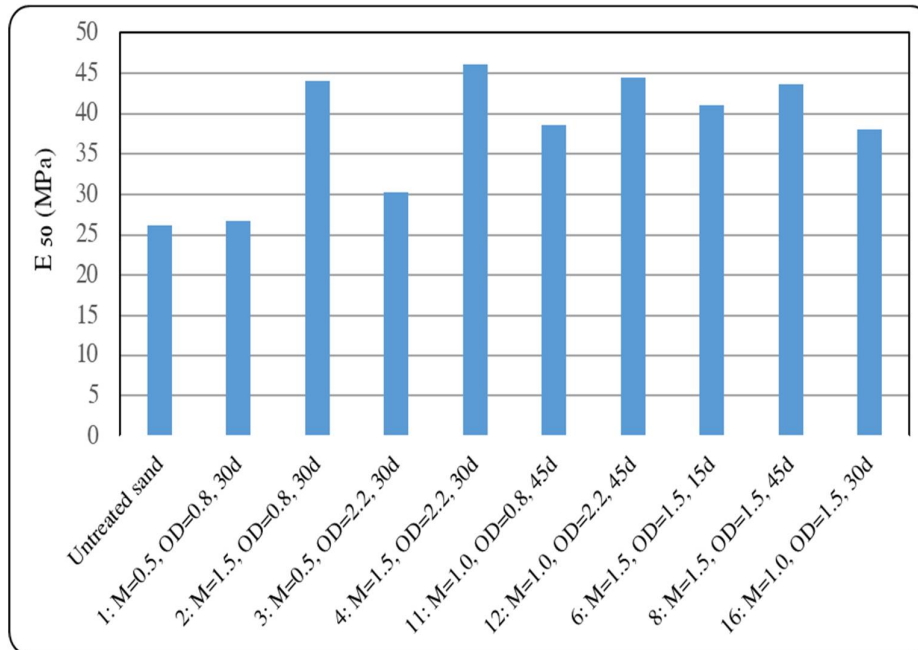
شکل 9 - تأثیر چگالی اپتیکی باکتری بر مدول ثانویه (E_{sec}) ماسه بهسازی شده بیولوژیکی (MICP).



شکل 10 - تأثیر زمان عمل‌آوری نمونه بر مدول ثانویه (E_{sec}) ماسه بهسازی شده بیولوژیکی (MICP).

عمل‌آوری نیز، هر چند باعث افزایش مدول ثانویه (E_{sec}) و مدول (E_{50}) می‌گردد، اما میزان تغییرات آنها بسیار زیاد نیست (شکل-های 10 و 11). ضمن آنکه عامل اصلی افزایش مدول ثانویه (E_{sec}) و مدول (E_{50}) نسبت به حالت قبل از بهسازی بیولوژیکی، افزایش مولاریته محلول سیمان‌تاسیون به 1/5 مولار بوده است.

در ادامه بررسی شکل 6 و 11 نشان داد که در صورت یکسان بودن مولاریته محلول سیمان‌تاسیون برای نمونه‌های 2 و 4، افزایش چگالی اپتیکی باکتری، باعث افزایش مدول ثانویه (E_{sec}) و مدول (E_{50}) گردیده، اما افزایش مشاهده شده در مقایسه با تأثیر مولاریته محلول سیمان‌تاسیون بسیار کمتر می‌باشد. همچنین افزایش زمان



شکل 11 - تأثیر مولاریته محلول سیمان‌تاسیون، چگالی اپتیکی باکتری و زمان عمل‌آوری بر مدول (E_{50}) ماسه بهسازی شده بیولوژیکی (MICP).

5- نتیجه گیری

- افزایش مولاریته با ایجاد رسوب کربنات کلسیم بیشتر بین منافذ خاک باعث ایجاد باندهای تماسی قوی تر گشته، لذا در کرنش‌های پایین، با دارا بودن کرنش سخت شونده بالاتر منجر به افزایش مدول ثانویه (E_{sec}) خواهد شد. روند مشابه مدول ثانویه (E_{sec}) در ارتباط با سختی معادل 50 درصد تنش انحرافی حداکثر (E_{50}) مشاهده گردید.
 - افزایش چگالی اپتیکی باکتری باعث افزایش مدول ثانویه (E_{sec}) و مدول (E_{50}) گردید، اما افزایش مشاهده شده در مقایسه با تاثیر مولاریته محلول سیمانتاسیون بسیار کمتر بود.
 - همچنین افزایش زمان عمل‌آوری باعث افزایش مدول ثانویه (E_{sec}) و مدول (E_{50}) گردید، اما میزان تغییرات آنها بسیار زیاد نیست.
 - با افزایش جمعیت و رشد شهرنشینی، یکی از چالش‌های مهندسان ژئوتکنیک دسترسی به زمین‌های با ظرفیت باربری مناسب می‌باشد. لذا ضمن بکارگیری روش‌های مختلف بهسازی، از دیدگاه ژئوتکنیکی توجه به پارمترهای مقاومتی و تغییر شکلی خاک بسیار حائز اهمیت بوده و افزایش پارمترهای سختی خاک می‌تواند در مواجهه با نیروها و علی‌الخصوص نیروهای دینامیکی و عکس‌العمل خاک در برابر نشست تأثیرگذار باشد.
- 6- مراجع**
- Al Qabany A, Soga K, Santamarina C, "Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, 138(8), 992-1001.
 - Behzadipour H, Sadrekarimi A, "Effects of Microbially Induced Calcite Precipitation on Static Liquefaction Behavior of a Gold Tailings Sand", *Biogeotechnics*, 2024, 100097.
 - Cheng L, Kobayashi T, Shahin MA, "Microbially induced calcite precipitation for production of "bio-bricks" treated at partial saturation condition", *Construction and Building Materials*, 2020, 231, p.117095.
 - DeJong JT, Fritzsche MB, Nüsslein K, "Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2006, 132(11), 1381-1392.
 - DeJong JT, Mortensen BM, Martinez BC, Nelson DC, "Bio-mediated soil improvement", *Ecological Engineering*, 2010, 36(2), 197-210.
 - Ekramirad S A, Azadi M, Shamskia N, "The Effective Parameters on the Behaviour of Treated Sands by Microbial-Induced Calcite Precipitation under Undrained Triaxial Test", *Archives of Mining Sciences*, 2023, 55-69.
 - Feng, K. and Montoya, B.M. 2016. "Influence of confinement and cementation level on the
- از پارامترهای مهم ژئوتکنیکی حاکم بر رفتار تنش-کرنش خاک، بررسی تغییرات تنش انحرافی و سختی نسبت به کرنش محوری بوده که تأثیر مولاریته محلول سیمانتاسیون، چگالی اپتیکی باکتری و زمان عمل‌آوری نمونه بر بهسازی توسط رسوب میکروبی کربنات کلسیم (MICP) تحت آزمایش سه محوری فشاری تحکیم یافته زهکشی نشده مورد ارزیابی قرار گرفت. خلاصه نتایج حاصل از این تحقیق در ادامه آمده است:
- حداکثر تنش انحرافی پس از بهسازی بیولوژیکی برابر 62 kPa به دست آمد، که نسبت به قبل از بهسازی تقریباً 62 درصد افزایش داشته است.
 - شیب منحنی‌های تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری در کرنش‌های پایین، زیاد بوده و با افزایش کرنش محوری شیب ملایم‌تری را دنبال کرد. همچنین نمونه‌ها تقریباً در کرنش‌های محوری حدود 18 تا 22 درصد، به حداکثر تنش انحرافی رسیدند.
 - مولاریته محلول سیمانتاسیون تأثیر زیادی بر افزایش تنش‌های انحرافی ماسه بهسازی شده تحت القای رسوب کربنات کلسیم (MICP) داشته و در شرایط چگالی اپتیکی و زمان عمل‌آوری یکسان، افزایش مولاریته محلول سیمانتاسیون حتی منجر به افزایش تنش انحرافی نمونه‌ها در حدود 45 درصد گردید. از طرفی دیگر، در سطوح مولاریته پایین به دلیل عدم تامین مواد مغذی، تأثیر مولاریته (حتی با افزایش چگالی اپتیکی و زمان عمل‌آوری) نسبت به حالت قبل از بهسازی چندان چشم‌گیر نیست.
 - چگالی اپتیکی باکتری نسبت به مولاریته محلول سیمانتاسیون تأثیر بسیار کمتری بر افزایش تنش‌های انحرافی داشته و حداکثر تأثیرگذاری آن بر روند بهسازی تقریباً معادل 4 تا 6 درصد بوده است.
 - افزایش زمان عمل‌آوری از 15 به 45 روز باعث افزایش تنش انحرافی ماسه بهسازی شده گردید. همچنین تنش‌های انحرافی نمونه‌ها از شروع زمان عمل‌آوری تا محدوده زمانی بین 35 تا 39 روزه روند افزایشی بسیار خوبی را دنبال کرده، اما پس از آن رشد قابل ملاحظه‌ای نداشته است.
 - در ابتدای آزمایش سه محوری CU، نمونه‌ها رفتار سخت شونده کرنشی داشته و با افزایش کرنش محوری در محدوده کرنش‌های کوچک و ارتجاعی مدول ثانویه (E_{sec}) با سرعت زیادی کاهش یافت. سپس با انتقال به ناحیه غیر ارتجاعی رفتار نرم شونده‌گی کرنشی را دنبال کرده و سختی ثانویه (E_{sec}) با نرخ کاهشی ملایم‌تری، نهایتاً به مقدار تقریباً ثابتی رسید.

- sandy soil through multiple treatments in low cementation media concentration", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2019, 37(2), 1015-1027.
- Whiffin VS, "Microbial CaCO₃ precipitation for the production of biocement", Doctoral dissertation, 2004, Murdoch University.
- Zhang YS, Liu Y, Sun XD, Zeng W, Xing HP, Lin JZ, Yu L, "Application of microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) technique in concrete crack repair: A review", *Construction and Building Materials*, 2024, 417, 134313.
- behavior of microbial-induced calcite precipitated sands under monotonic drained loading", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, 142(1), 1-9.
- Han Z, Cheng X, Ma Q, "An experimental study on dynamic response for MICP strengthening liquefiable sands", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2016, 15(4), 673-679.
- Harkes MP, Van Paassen LA, Booster JL, Whiffin VS, van Loosdrecht MCM, "Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement", *Ecological Engineering*, 2010, 36(2), 112-117.
- Karol RH, "Chemical Grouting and Soil Stabilization", Revised and Expanded, 2003, Vol 12, Crc Press.
- Lin H, Suleiman MT, Brown DG, Kavazanjian JrE, "Mechanical behavior of sands treated by microbially induced carbonate precipitation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, 142(2), 1-13.
- Madigan MT, Brock TD, Martinko JM, Parker J, "Brock biology of microorganisms", Upper Saddle River (NJ): Prentice-Hall, 2003.
- Montoya BM, DeJong JT, "Stress-strain behavior of sands cemented by microbially induced calcite precipitation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, 141(6), 4015019.
- Nafisi A, Liu Q, Montoya BM, "Effect of stress path on the shear response of bio-cemented sands", *Acta Geotechnica*, 2021, 16, 3239-3251.
- Prajapati NK, Agnihotri AK, Basak N, "Microbial induced calcite precipitation (MICP) a sustainable technique for stabilization of soil: A review", *Materials Today: Proceedings*, 2023.
- Qu J, Li G, Ma B, Liu J, Zhang J, Liu X, Zhang Y, "Experimental Study on the Wind Erosion Resistance of Aeolian Sand Solidified by Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP)", *Materials*, 2024, 17(6), 1270.
- Rong H, Qian CX, Li L, "Study on microstructure and properties of sandstone cemented by microbe cement", *Construction and Building Materials*, 2012, 36, 687-694.
- Tang Q, Tian A, Ling C, Huang Y, Gu F, "Physical and mechanical properties of recycled aggregates modified by microbially induced calcium carbonate precipitation", *Journal of Cleaner Production*, 2023, 382, 135409.
- Van Paassen LA, "Biogrout, ground improvement by microbial induced carbonate precipitation", University of Delf, Dissertation, 2009.
- Wang X, Li C, Fan W, Li H, "Reduction of brittleness of fine sandy soil biocemented by microbial-induced calcite precipitation", *Geomicrobiology Journal*, 2022, 39(2), 135-147.
- Wang X, Bhukya PK, Arne palli DN, Chen S, "Coupled multiphysical model for investigation of influence factors in the application of microbially induced calcite precipitation", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2024.
- Wen K, Li Y, Liu S, Bu C, Li L, "Development of an improved immersing method to enhance microbial induced calcite precipitation treated