

بررسی تأثیرات سیکل‌های ذوب و انجماد بر پارامترهای تغییرشکلی ماسه تثبیت‌شده به‌روش بیولوژیکی

مینا ملک‌دوست پیشکناری^۱، محمد آزادی^{۲*}، مجید قیومی^۳

^۱ دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی

^۲ دانشیار گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی

^۳ دانشیار گروه مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه نیوهامشایر، آمریکا

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۹، بازنگری: ۱۴۰۱/۷/۵، پذیرش: ۱۴۰۱/۹/۱۹، نشر آنلاین: ۱۴۰۱/۹/۵

چکیده

با توجه به مشکلات اقتصادی و زیست‌محیطی استفاده از مواد تثبیت‌کننده سنتی مانند سیمان و آهک، بکارگیری روش‌های نوین بهسازی خاک نظیر روش بیولوژیکی مورد توجه مهندسين ژئوتکنیک قرار گرفته است. به دلیل وجود مناطق گسترده در جهان و ایران با شرایط محیطی گوناگون، لازم است که کارایی تثبیت خاک در محیط‌های گوناگون ارزیابی شود و در این راستا لزوم بررسی تأثیر شرایط محیطی بر کارایی روش تثبیت نوین بیولوژیکی احساس می‌گردد. از سوی دیگر در طراحی یک سازه ژئوتکنیکی باید به دو عامل مقاومت و تغییرشکل توجه نمود، از این‌رو در این پژوهش تأثیرات سیکل‌های ذوب و انجماد بر پارامترهای تغییرشکلی ماسه تثبیت‌شده به‌روش بیولوژیکی ارزیابی می‌شود و عوامل گوناگونی نظیر فشار همه‌جانبه، تعداد سیکل‌های ذوب و انجماد تغییرات دما در هر سیکل و مدت زمان هر سیکل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین منظور آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی تحکیم‌یافته زهکشی‌نشده انجام می‌شود و منحنی‌های تنش انحرافی - کرنش محوری، سختی و تری (E_{sec})، سختی مماسی (E_{tan})، سختی معادل ۵۰ درصد مقاومت بیشینه (E_{50}) و انرژی جذب‌شده (E_A) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به‌منظور طراحی آزمایش‌ها و ارائه رابطه‌ای برای پیش‌بینی برخی از پارامترهای تغییرشکلی از روش تاگوچی (Taguchi) استفاده می‌شود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که اعمال سیکل‌های ذوب و انجماد موجب کاهش پارامترهای تغییرشکلی نمونه‌های تثبیت‌شده می‌شود. اثر مخرب سیکل‌های ذوب و انجماد بر سختی بیشتر از انرژی جذب‌شده می‌باشد. همچنین نتایج تحلیل واریانس مشخص ساخت که به‌ترتیب، فشار همه‌جانبه، تعداد سیکل‌های ذوب و انجماد، کمینه دمای سیکل‌ها، بیشینه دمای سیکل‌ها و مدت زمان آن‌ها بیشترین اهمیت را در مقدار E_{50} دارند.

کلیدواژه‌ها: سیکل‌های ذوب و انجماد، تثبیت به‌روش بیولوژیکی، پارامترهای تغییرشکلی، سختی، آزمایش سه‌محوری.

۱- مقدمه

مصرف انرژی در تولید سیمان مهم‌ترین تأثیر را بر محیط-زیست دارد. کارخانه‌های تولید سیمان از عمده‌ترین انتشاردهندگان گازهای مضر گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن می‌باشند. انتشار گاز دی‌اکسیدکربن یکی از دلایل افزایش دمای کره زمین است. از طرفی امروزه در کنار کاهش این گازهای مضر، ذخیره و حفظ منابع تجدیدناپذیر و کاهش ضایعات، نیازمند مصالح ساختمانی می‌باشد که سازگاری بهتری با محیط زیست دارد (Taslimi Paein Afrakoti و همکاران، ۲۰۲۰؛ Jacoby و Pelisser، ۲۰۱۵).

در سال ۲۰۱۵ تولید سیمان در سراسر جهان به بیش از چهار میلیارد تن رسیده و پیش‌بینی می‌شود این میزان تا سال ۲۰۵۰

گاهی خاک موجود در محل احداث پروژه‌ها از دیدگاه مهندسی برای ساخت‌وساز، ایده‌آل و کاملاً مطلوب نمی‌باشد. با توجه به افزایش جمعیت و نیاز بشر به ایجاد سازه‌های مقاوم و مستحکم و همچنین مشاهده خسارات ناشی از زلزله و سایر عوامل طبیعی این معضل، روش‌های مختلف تقویت و بهسازی خاک به‌طور روزافزون گسترش یافته است. یکی از روش‌های بهسازی تثبیت خاک با استفاده از افزودنی‌ها می‌باشد. سیمان و آهک جز افزودنی‌های سنتی پرکاربرد در زمینه بهسازی خاک می‌باشند (Ghadakpour و همکاران، ۲۰۲۱؛ Fakhrabadi و همکاران، ۲۰۲۱؛ Zare و همکاران، ۲۰۲۰).

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۲۳۱۹۸۷۹۰

آدرس ایمیل: mmalekdoost@yahoo.com (م. ملک‌دوست)، azadi@qiau.ac.ir (م. آزادی)، majid.ghayoomi@unh.edu (م. قیومی).

محصورنشده به ازای سیکل های ذوب و انجماد برابر با ۵ و ۲۰، به ترتیب برابر با ۴ و ۳۴ درصد می باشد. همچنین در اثر ۲۰ سیکل ذوب و انجماد، مدل برشی ماسه تثبیت شده به شیوه بیولوژیکی در حدود ۸۰ درصد کاهش یافت.

Gowthaman و همکاران (۲۰۲۰) با انجام آزمایش های سرعت امواج فشاری و برشی، مقاومت فشاری محصورنشده، مقاومت برشی و تصاویر میکروسکوپ روبشی تأثیر سیکل های ذوب و انجماد را روی خاک برجا (عمده متشکل از ماسه ریز) تثبیت به روش MICP (به منظور استفاده برای پایدارسازی شیروانی های خاکی) ارزیابی نمودند. آن ها گزارش نمودند در ۱۵ سیکل ذوب و انجماد ماسه تثبیت شده به شیوه MICP دچار افت سرعت امواج برشی در حدود ۴۰ درصد گردید. همچنین هنگامی که میزان کرنات کلسیم ایجاد شده در فرآیند تثبیت در حدود ۲۳ درصد وزنی خاک باشد، میزان افت جرم در اثر سیکل های انجماد-ذوب ناچیز می گردد.

Sun و همکاران (۲۰۲۱) با انجام آزمایش های مقاومت فشاری محصورنشده تأثیر سیکل های ذوب و انجماد را روی خاک لس تثبیت شده به روش MICP ارزیابی نمودند. آن ها گزارش نمودند که در اثر ۵ چرخه یخبندان- ذوب مقاومت فشاری محصورنشده خاک لس تثبیت شده به روش بیولوژیکی در حدود ۲۲ درصد افت داشت. Seyyedi و Tabrizi (۲۰۱۹) در سال ۲۰۱۹ روش تزریق جدیدی را با هدف کاهش حجم مواد مصرفی بررسی نمودند. نمونه های آماده شده از لحاظ ریزساختار، رفتار مقاومتی و میزان رسوب آزمایش شده اند. نتایج به دست آمده نشان داد که همگنی نسبتاً خوبی در نمونه به وجود آمده است. همچنین روش تزریق پیشنهادی علاوه بر کاهش مواد مصرفی منجر به ایجاد نمونه نسبتاً همگن و با مقاومت فشاری مناسب می گردد.

Claker و همکاران (۲۰۱۶) از روش MICP برای بهبود برای تثبیت شن های روان استفاده نمودند. نتایج آزمایش مقاومت فروری نشان داد که کاربرد MICP تا حدود سه برابر سبب افزایش مقاومت فروری لایه سطحی نمونه ها شده است که نشان دهنده تشکیل لایه مقاوم سطحی بر روی نمونه های سیمانی شده است. اسدی و همکاران (۱۳۹۷) با انجام آزمایش های مقاومت فشاری محصورنشده و SEM تأثیر روش MICP را روی رفتار ماسه با مقادیر متفاوت سیلت ارزیابی نمودند. نتایج این پژوهش مشخص ساخت که افزایش درصد ریزدانه از ۲ تا ۲۲ موجب کاهش ۴۰ درصد در میزان رسوب کرنات کلسیم، افزایش ۵۷ درصد در مقاومت تک محوری و افزایش ۷۹ در مدول الاستیسیته نمونه ها شد. این تغییرات ناشی از کم شدن فضای خالی و افزایش سطح تماس بین حفرات خاک بود.

بررسی پژوهش های صورت پذیرفته مشخص می سازد که روش تثبیت MICP می تواند راهکاری مناسبی برای مواجهه با شرایط ذوب

به ۵/۸ میلیارد تن افزایش پیدا خواهد کرد. تولید سیمان به عنوان بزرگ ترین بخش انتشار کربن در صنعت شناخته شده است. به طور متوسط به ازای هر تن سیمان یک تن گاز گلخانه ای دی-اکسید کربن در جو آزاد می شود (Abbey و Amakye، ۲۰۲۱؛ Modarres و همکاران، ۲۰۱۶).

مشکلات اقتصادی و زیست محیطی تثبیت کننده های سنتی پژوهشگران را واداشت که برای بهسازی خاک از مواد و شیوه های نوینی استفاده نمایند. روش سیمانی شدن زیستی از جمله جدیدترین روش هایی است که با استفاده از باکتری ها باعث تشکیل بلورهای کرنات کلسیم به منظور ساخت محصولات دگرگون شده با مقاومت بالا می شود (Paassen و همکاران، ۲۰۱۰؛ De Jong و همکاران، ۲۰۰۶؛ De Muynck و همکاران، ۲۰۱۰؛ Cheng و همکاران، ۲۰۱۳).

این فرآیند می تواند خاک را بدون ازهم گسیختگی ساختار اولیه تثبیت کند. فرآیند تولید رسوب میکروبیولوژیکی کرنات کلسیم به روش رسوب بیولوژیکی کرنات کلسیم، بر پایه واکنش هیدرولیز اوره با استفاده از میکروارگانیسم های باقابلیت اوره آزی انجام می پذیرد (Mujah و همکاران، ۲۰۱۶؛ Moravej و همکاران، ۲۰۱۷؛ Duo و همکاران، ۲۰۱۸).

خاک های تثبیت شده به طور معمول در معرض شرایط آب-وهوایی گوناگون قرار می گیرند. ارزیابی کارایی و دوام خاک های تثبیت شده در مواجهه با شرایط محیطی یکی از جنبه های با اهمیت در ارزیابی روش های بهسازی نوین می باشد. سیکل های ذوب و انجماد یکی از شرایطی می باشد که در مناطق وسیعی از جهان و ایران امکان وقوع دارد. ایجاد بلورهای یخ و افزایش حجم آب در هنگام یخ زدگی می تواند موجب ایجاد فشار به پیوندهای بین ذرات و تخریب آن ها گردد. تابه حال پژوهش های زیادی در زمینه تأثیر سیکل های ذوب و انجماد بر رفتار خاک های تثبیت شده به روش MICP صورت پذیرفته است.

Liu و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر شرایط محیطی گوناگون را بر ماسه تثبیت شده به روش MICP ارزیابی نمودند. آن ها سیکل های ذوب و انجماد را با تغییرات دمایی در بازه ۱۸- تا ۲۳ درجه سانتی گراد و زمان هر سیکل برابر با ۲۴ ساعت بر نمونه تثبیت شده اعمال نمودند. به منظور ارزیابی رفتار نمونه ها آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده صورت پذیرفت. نتایج این پژوهش نشان داد در اثر ۱۵ سیکل های ذوب و انجماد، مقاومت فشاری محصورنشده به میزان ۵۰ درصد کاهش یافت.

Sharma و همکاران (۲۰۲۱) با کمک آزمایش های نفوذپذیری، مقاومت فشاری محصورنشده، مقاومت کششی غیرمستقیم و سرعت امواج تکانه فراصوتی تأثیر سیکل های ذوب و انجماد را بر رفتار ماسه تثبیت شده به شیوه MICP را ارزیابی نمودند. آن ها مشاهده کردند میزان کاهش مقاومت فشاری

شد. این قالب برگرفته از شرایط نمونه دستگاه سه محوری بود. به منظور خروج محلول تثبیت کننده در انتهای هر گام از فرآیند تزریق نیاز به ایجاد مجرای خروجی در پایه قالب (دارای امکان باز و بسته شدن) بود. همچنین با قرار دادن فیلتر در انتهای قالب از خروج ذرات خاک جلوگیری می شود. پس از ساخت و آب بندی قالب، از روش بارش خشک برای ساخت نمونه ها استفاده شد. تراکم نسبی نمونه ها برابر با ۴۲ درصد می باشد. حجم مورد نیاز محلول سیمان تاسیون محاسبه و جهت تزریق آماده می گردد. باکتری مورد استفاده در این پژوهش یک باکتری از خانواده باسیلاس است. برای تهیه دوغاب ابتدا باکتری در محیط کشت مناسب، شامل عصاره مخمر و کلرید آمونیوم در دستگاه انکوباتور - شیکر قرار داده می شود. سپس بر اساس منحنی رشد، باکتری ها پس از ۴۸ ساعت، در انتهای فاز رشد به وسیله یک دستگاه سانتریفیوژ از محیط کشت جدا می گردند. ۳ گرم از بیومس^۱ حاصل در ۱۰۰ میلی لیتر NaCl نرمال رقیق می شوند. فعالیت اوره آزی اندازه گیری شده در این آزمایش برابر با ۲/۵ ms/min به دست آمد و باکتری ها در داخل یک ارلن و با درب پوشیده شده با پنبه تا انجام آزمایش در یخچال و در دمای ۴ درجه سانتی گراد نگهداری می گردد. اوره و کلرید کلسیم به عنوان ماده مصرفی باکتری و با غلظت های ۰/۵ مولار در آب حل شده و جهت انجام آزمایش آماده می شوند. برای انجام آزمایش پس از اجرای فاز شستشو (عبور آب مقطر از نمونه به اندازه حجم نمونه) ابتدا سوسپانسیون باکتری با محیط کشت از طریق تزریق ثقلی وارد خاک شده (۱/۲ برابر حجم منافذ) و پس از اجرای فاز تثبیت و بعد از ماندگاری ۶ ساعته، مواد مصرفی از قبیل اوره و کلرید کلسیم با غلظت ۰/۵ مولار با هم ترکیب می گردند و روی خاک ریخته می شود، سپس نمونه جهت انجام واکنش هیدرولیز توسط باکتری ها و اوره و کلرید کلسیم در دمای آزمایشگاه نگهداری می گردد. وابسته به نیاز محلول سیمان تاسیون شامل اوره و کلرید کلسیم ۲ یا ۴ بار به خاک وارد می شود. فرآیند بهسازی به روش MICP به ترتیب شامل فاز شستشو، فاز بیولوژیکی، فاز تثبیت و فاز سیمان تاسیون می شود (Do و همکاران، ۲۰۱۷؛ Cheng و Shahin، ۲۰۱۶؛ Al Qabany و همکاران، ۲۰۱۲). پس از اتمام فرآیند تثبیت نمونه ها به مدت ۲۱ روز در دمای ۲۳ درجه سانتی گراد عمل آوری شدند.

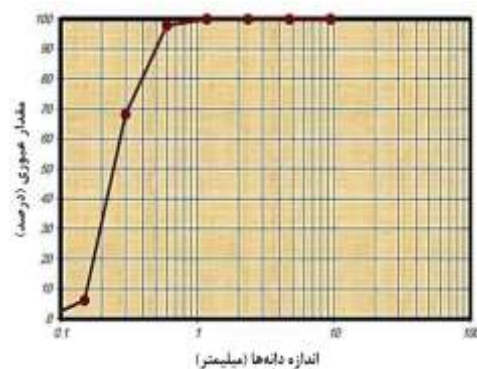
بررسی پژوهش های صورت گرفته مشخص می سازد که عواملی نظیر فشار همه جانبه، بازه تغییرات دمایی سیکل های ذوب و انجماد، مدت زمان و تعداد سیکل ها، بر رفتار خاک تأثیر گذار می باشند. از این رو هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر عوامل فوق روی نمونه تثبیت شده به روش MICP است. بدین منظور از

و انجماد باشد. با این وجود رفتار خاک تثبیت شده در برابر سیکل های ذوب و انجماد وابسته به عوامل گوناگونی نظیر تغییرات بازه دمایی، مدت زمان اعمال هر سیکل و تعداد سیکل ها می باشد که در پژوهش های صورت پذیرفته، به تأثیرات توأم این عوامل پرداخته نشده است. از سوی دیگر بیشتر پژوهش های صورت پذیرفته از آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده برای ارزیابی رفتار خاک های تثبیت شده با روش MICP استفاده نمودند. در طراحی یک سازه ژئوتکنیکی باید به دو عامل مقاومت و تغییر شکل توجه نمود. بنابراین در این پژوهش توجه ویژه ای به شاخص های تغییر شکلی می شود. در این پژوهش آزمایش های سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده روی ماسه تثبیت شده به روش MICP صورت می پذیرد تا اثرات توأم فشار همه جانبه، تغییرات بازه دمایی، مدت زمان اعمال هر سیکل و تعداد سیکل های ذوب و انجماد بر پارامترهای تغییر شکلی نظیر، سختی سکانت، سختی تانژانت، سختی معادل ۵۰ درصد مقاومت بیشینه و انرژی جذب شده ارزیابی گردد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- خاک مورد استفاده

منحنی دانه بندی خاک مورد استفاده برای ساخت نمونه ها در شکل (۱) نمایش داده شده است. این خاک دارای نسبت منافذ بیشینه و کمینه ۰/۸۸ و ۰/۴۲، چگالی دانه های جامد ۱/۵۹، ضریب انحنای ۱/۰۲ و ضریب یکنواختی ۱/۷۳ می باشد. این خاک در سیستم نام گذاری متحد در رسته ماسه بدانه بندی شده قرار می گیرد.



شکل ۱- منحنی دانه بندی خاک مورد استفاده برای ساخت نمونه ها

۲-۲- ساخت نمونه ها

در این پژوهش نمونه ها در قالبی استوانه ای شکل از جنس پی پی-سی که داری قطر و ارتفاعی برابر با ۷۰ و ۱۴۰ میلی متر بود ساخته

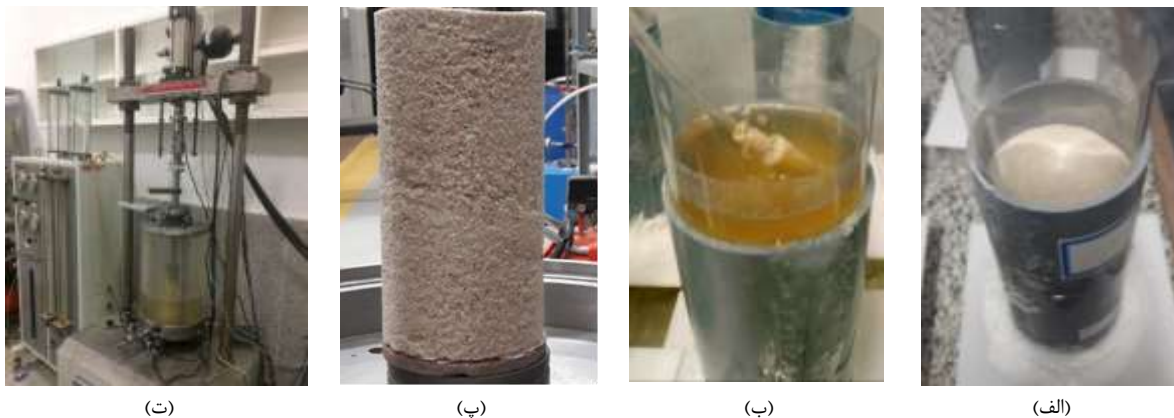
پذیرفته مقادیر زیر برای عوامل مدنظر انتخاب می‌گردد:

- ✓ فشار همه‌جانبه: ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال
- ✓ بازه تغییرات دمایی سیکل‌های ذوب و انجماد: ۷- تا ۷، ۱۰- تا ۱۰ (Eslami و همکاران، ۲۰۱۸ و ۱۸- تا ۲۳ (ASTM D560).
- ✓ مدت زمان سیکل‌های ذوب و انجماد: ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعت (Eslami و همکاران، ۲۰۱۸)
- ✓ تعداد سیکل‌های ذوب و انجماد: ۵ (Binal و Viran، ۲۰۱۸؛ Mujah و همکاران، ۲۰۱۶؛ Eslami و همکاران، ۲۰۱۸).

شکل (۲) تصویری از قالب آبدی شده به همراه ماسه ریخته شده در آن، انجام تزریق ثقلی، نمونه تثبیت شده و دستگاه سه-محوری مورد استفاده را نشان می‌دهد. در نهایت برنامه آزمایشگاهی در نظر گرفته شده در این پژوهش در جدول (۱) ارائه شده است.

آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم‌یافته زهکشی نشده استفاده می‌شود. آزمایش‌های سه‌محوری بر اساس استاندارد ASTM D4767 صورت پذیرفت. پس از قرارگیری نمونه در دستگاه سه‌محوری ابتدا از نمونه گاز CO₂ از نمونه عبور داده می‌شود تا جایگزین هوای موجود در درون حفرات گردد. سپس از نمونه آب عبور داده می‌شود. پس از عبور آب، پس فشار به صورت گام‌به‌گام اعمال می‌گردد تا پس فشار نهایی برابر با ۲۵۰ کیلوپاسکال گردد.

B-Value تمامی نمونه‌ها بیشتر از ۹۵ درصد بود. پس اتمام اشباع سازی فشار همه‌جانبه اعمال می‌گردد و پس باز کردن شیر زهکشی مرحله تحکیم آغاز می‌گردد. پس از اتمام تحکیم و بستن شیر زهکشی بارگذاری برشی با نرخ کرنش محوری ۰/۲۵ درصد بر دقیقه اعمال شد. با توجه به تعداد عوامل گوناگون در نظر گرفته شده در این پژوهش برای طراحی آزمایش‌ها از روش تاگوچی و نرم‌افزار Minitab استفاده می‌شود. با توجه به پژوهش‌های صورت



شکل ۲- تصویری از: الف) قالب آبدی شده به همراه ماسه ریخته شده در آن، ب) انجام تزریق ثقلی، پ) نمونه تثبیت شده، ت) دستگاه سه‌محوری

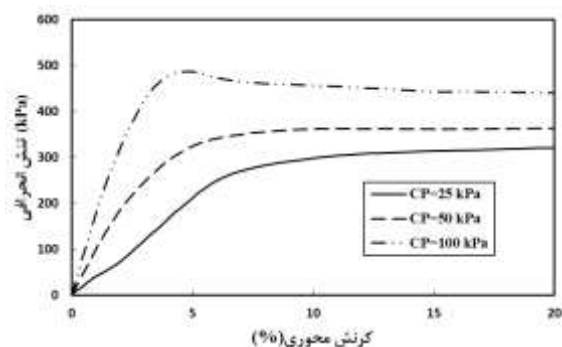
جدول ۱- برنامه آزمایشگاهی مد نظر

| شماره آزمایش (نمونه) | بازه تغییرات دمایی هر چرخه یخبندان ذوب (سانتی‌گراد) | تعداد چرخه یخبندان ذوب | فشار همه‌جانبه (کیلوپاسکال) | مدت زمان هر چرخه یخبندان ذوب (ساعت) |
|----------------------|-----------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| ۱ | -۱۰، ۱۰ | ۵ | ۲۵ | ۶ |
| ۲ | -۷، ۷ | ۱۰ | ۲۵ | ۱۲ |
| ۳ | -۱۸، ۲۳ | ۱۵ | ۲۵ | ۲۴ |
| ۴ | -۷، ۷ | ۵ | ۵۰ | ۲۴ |
| ۵ | -۱۸، ۲۳ | ۱۰ | ۵۰ | ۶ |
| ۶ | -۱۰، ۱۰ | ۱۵ | ۵۰ | ۱۲ |
| ۷ | -۱۸، ۲۳ | ۵ | ۱۰۰ | ۱۲ |
| ۸ | -۱۰، ۱۰ | ۱۰ | ۱۰۰ | ۲۴ |
| ۹ | -۷، ۷ | ۱۵ | ۱۰۰ | ۶ |

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، افزایش فشار همه‌جانبه موجب افزایش بیشینه مقدار تنش انحرافی می‌گردد و از سوی دیگر موجب تمایل رفتار، به نشان دادن بیشینه مقاومت آشکار می‌گردد. به‌عنوان نمونه افزایش فشار همه‌جانبه از ۲۵ به ۱۰۰ کیلوپاسکال

۳- نتایج و بحث

شکل (۳) تأثیر فشار همه‌جانبه را بر نمودار تنش انحرافی-کرنش محوری نمونه شاهد (تثبیت شده به روش بیولوژیکی و در معرض سیکل‌های ذوب و انجماد قرار نگرفته) نشان می‌دهد.



شکل ۳- تأثیر فشار همه‌جانبه را بر نمودار تنش انحرافی بر حسب کرنش محوری نمونه شاهد

Liu و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر دوره‌های ذوب-انجماد را با تغییرات دمایی در بازه ۱۸- تا ۲۳ درجه سانتی‌گراد و زمان هر چرخه برابر با ۲۴ ساعت بر رفتار خاک ماسه‌ای تثبیت‌شده با روش MICP ارزیابی نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد در اثر ۱۵ چرخه ذوب-انجماد، مقاومت فشاری محصورنشده، به میزان ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، افزایش تعداد سیکل‌های ذوب و انجماد موجب کاهش قابل ملاحظه مقاومت انحرافی می‌گردد. افزایش سیکل‌های ذوب و انجماد باعث تخریب پیوندهای سیمانی و هدایت آن به‌وسیله جریان آب به بیرون نمونه می‌گردد. بنابراین می‌توان انتظار داشت پس از هر چرخه شرایط بحرانی‌تری برای نمونه به‌وجود آید. همچنین در هر دوره یخبندان-ذوب، فشاری اعمالی به حفرات وارد موجب انبساط حفره شده و حفره در دوره‌های بعدی یخبندان-ذوب و در هنگام جذب آب، مقداری بیشتری آب را در خود جای می‌دهد. بنابراین افزایش حجم و فشار بیشتری به نمونه تثبیت‌شده تحمیل می‌گردد. در نتیجه پدیده یخبندان-ذوب می‌تواند عامل مؤثری در خرابی زودرس نمونه تثبیت‌شده باشد و دوام آن را کاهش دهد.

Sharma و همکاران (۲۰۲۱) با کمک آزمایش‌های مقاومت فشاری محصورنشده، تأثیر تعداد سیکل‌های ذوب و انجماد را بر رفتار ماسه تثبیت‌شده به شیوه MICP ارزیابی نمودند. آن‌ها مشاهده کردند، میزان کاهش مقاومت فشاری محصورنشده به‌ازای سیکل‌های ذوب و انجماد برابر با ۵ و ۲۰، به‌ترتیب برابر با ۴ و ۳۴ درصد می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد تخریب پیوندهای سیمانی به‌صورت فزاینده رخ داده و به‌ازای تعداد چرخه‌های مشخص میزان کاهش مقاومت به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این موضوع می‌تواند به‌دلیل تضعیف مقاومت باند سیمانی و کم‌ترشدن مقاومت این باند نسبت فشار کریستال‌های یخ باشد. Sun و همکاران (۲۰۲۱) گزارش نمودند که در اثر ۵ چرخه یخبندان-ذوب مقاومت فشاری محصورنشده خاک لس تثبیت‌شده به‌روش بیولوژیکی در حدود ۲۲ درصد کاهش یافت. تفاوت در

موجب افزایش تنش انحرافی در حدود ۸۰ درصد می‌گردد. از سوی دیگر نمونه آزمایش شده تحت فشار همه‌جانبه ۲۵ کیلوپاسکال دارای رفتاری سخت‌شونده می‌باشد و افت مقاومت در اثر افزایش کرنش مشاهده نمی‌شود. این در حالی است که برای نمونه آزمایش شده تحت فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال پس از مقاومت بیشینه افت مقاومت مشهود می‌باشد و نمونه رفتاری نرم‌شونده از خود بروز می‌دهد. در بارگذاری زهکشی‌شده افزایش فشار همه‌جانبه موجب تمایل به کاهش میزان اتساع می‌گردد. در این پژوهش بارگذاری برشی زهکشی‌نشده می‌باشد. از این‌رو کاهش در میزان اتساع در بارگذاری زهکشی‌نشده به‌صورت افزایش میزان فشار آب حفره‌ای بروز می‌نماید. در نتیجه می‌توان انتظار داشت که پس از گسیختگی و تخریب پیوندها نمونه دچار کاهش مقاومت گردد. این‌درحالی است که برای آزمایش انجام‌شده در فشار همه‌جانبه ۲۵ کیلوپاسکال به‌دلیل تمایل به اتساع و تشکیل فشار آب حفره‌ای منفی بالا و در نتیجه افزایش تنش مؤثر، تخریب پیوندها سیمانی تأثیر چندانی بر مقاومت برشی نداشته و در نتیجه نمونه با کاهش مقاومت برشی همراه نیست.

Amini و Hamidi (۲۰۱۴) با انجام آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی در حالت زهکشی‌شده و نشده تأثیر تثبیت با سیمان پرتلند را بر رفتار برشی مخلوط‌های ماسه و شن ارزیابی نمودند. آن‌ها گزارش کردند که در فشارهای همه‌جانبه کم (۵۰ کیلوپاسکال) نمونه در شرایط زهکشی‌شده تمایل به نشان دادن بیشینه مقاومت واضح دارد، اما در شرایط زهکشی‌نشده میزان این تمایل کاسته می‌شود.

شکل (۴) تأثیر مدت زمان و دمای سیکل‌های ذوب و انجماد را بر منحنی تنش انحرافی-کرنش محوری نمونه‌های ۱، ۲، ۳ و شاهد تحت فشار همه‌جانبه ۲۵ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود وقوع سیکل‌های ذوب و انجماد موجب کاهش در مقاومت بیشینه انحرافی می‌گردد. به‌طور مثال قرارگیری نمونه ۳ تحت اثر ۱۵ سیکل ذوب و انجماد با تغییرات دمای در بازه ۱۸- تا ۲۳ درجه سانتی‌گراد و زمان هر چرخه برابر با ۲۴ ساعت، موجب کاهش بیشینه مقاومت انحرافی در حدود ۶۷ درصد می‌شود. عاملی که باعث می‌شود دوره‌های یخ و ذوب تخریب نمونه‌های تثبیت‌شده را به‌همراه داشته باشد، افزایش حجم ۹ درصدی آب هنگامی که دمای آن به صفر درجه رسیده و یخ می‌زند، است. این افزایش حجم آبی که هنوز در حفره به‌صورت سیال باقی‌مانده است موجب می‌شود تا سیال در معرض فشار هیدرولیکی قرار گیرد. چنانچه آب موجود در حفره راهی برای تخلیه این فشار هیدرولیکی نداشته باشد، باعث ایجاد تنش‌های کششی در نمونه شده و تخریب باندهای سیمانی را به‌همراه خواهد داشت. پژوهشگران دیگری نتایج مشابه‌ای را گزارش نمودند.

شکل (۵) تأثیر سیکل‌های ذوب و انجماد را بر تغییرات سختی و تری برحسب کرنش محوری نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در ابتدا سختی و تری تقریباً ثابت می‌باشد. این محدوده از رفتار در مرحله ارتجاعی می‌باشد. پس از کرنش مشخصی، با افزایش کرنش محوری سختی و تری کاهش می‌یابد. این موضوع نشان‌دهنده وقوع رفتار غیرارتجاعی است. در کرنش‌های محوری کم تغییرشکل‌های رخ داده ناشی از دانه‌های خاک و باند سیمانی است که این تغییرشکل‌ها ارتجاعی می‌باشد. با افزایش کرنش محوری، تغییرشکل‌های رخ داده ناشی از لغزش دانه‌ها روی یکدیگر می‌باشد و دارای ماهیت غیرارتجاعی است. همچنین بیشینه تأثیر سیکل‌های ذوب و انجماد در محدوده ارتجاعی رفتار است. دلیل این موضوع تخریب پیوندهای سیمانی در اثر سیکل‌های ذوب و انجماد تأثیر قابل‌ملاحظه پیوندهای سیمانی در رفتار ارتجاعی می‌باشد. لازم به ذکر است در محدوده غیرارتجاعی به دلیل کرنش‌های بالا پیوندهای سیمانی تخریب می‌شوند، بنابراین تخریب پیوندهای سیمانی در اثر سیکل‌های ذوب و انجماد تأثیر چشمگیری بر رفتار ندارد. در نهایت می‌توان گفت تثبیت به روش MICP موجب افزایش قابل‌ملاحظه سختی در کرنش کوچک و تأثیر اندک بر سختی در کرنش‌های بزرگ می‌گردد. از این رو اعمال سیکل‌های یخبندان- ذوب نیز تأثیر بیشتری بر کاهش سختی وتر در کرنش‌های کوچک می‌گذارد. در مسائلی مانند پی ماشین آلات که رفتار خاک در محدوده کرنش‌های کوچک می‌باشد باید به این مطلب توجه نمود.

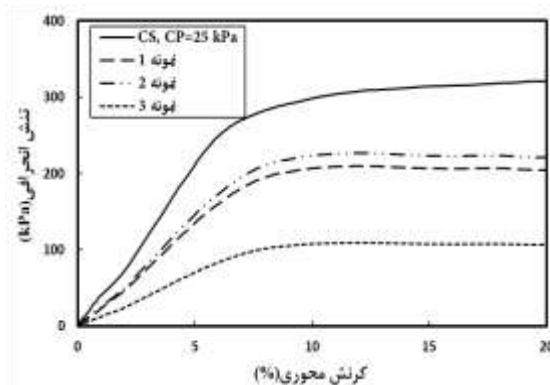
یکی دیگر از پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش به منظور تعیین میزان تغییرشکل نمونه‌های تثبیت‌شده به روش MICP سختی مماسی E_{tan} می‌باشد. سختی مماسی در حقیقت شیب خط مماس در هر نقطه بر منحنی تنش انحرافی- کرنش محوری می‌باشد. از سختی مماسی به منظور تعیین تنش و کرنش در لحظه تسلیم استفاده می‌شود. با توجه به اینکه فرق اساسی رفتار پیش و پس از تسلیم تغییر سختی می‌باشد، می‌توان از سختی مماسی بدین منظور استفاده نمود.

شکل (۶) تغییرات سختی مماسی را برحسب کرنش محوری نشان می‌دهد. روند تغییرات سختی مماسی بدین شکل می‌باشد که در ابتدا سختی مماسی، تقریباً ثابت است و در نقطه‌ای به طور ناگهانی دچار افت چشمگیر می‌گردد. این نقطه بیانگر تسلیم خاک است. از سوی دیگر زمانی که سختی مماسی برابر با صفر (افقی شدن منحنی تنش انحرافی- کرنش محوری) می‌گردد، نشان‌دهنده گسیخته شدن خاک است. همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، در ناحیه ارتجاعی (پیش از تسلیم) سختی مماسی به مانند سختی و تری در اثر سیکل‌های ذوب و انجماد کاهش می‌یابد. از سوی دیگر کرنش نظیر تسلیم (افت مشهود در سختی مماسی) در اثر چرخه‌های یخبندان- ذوب، افزایش می‌یابد.

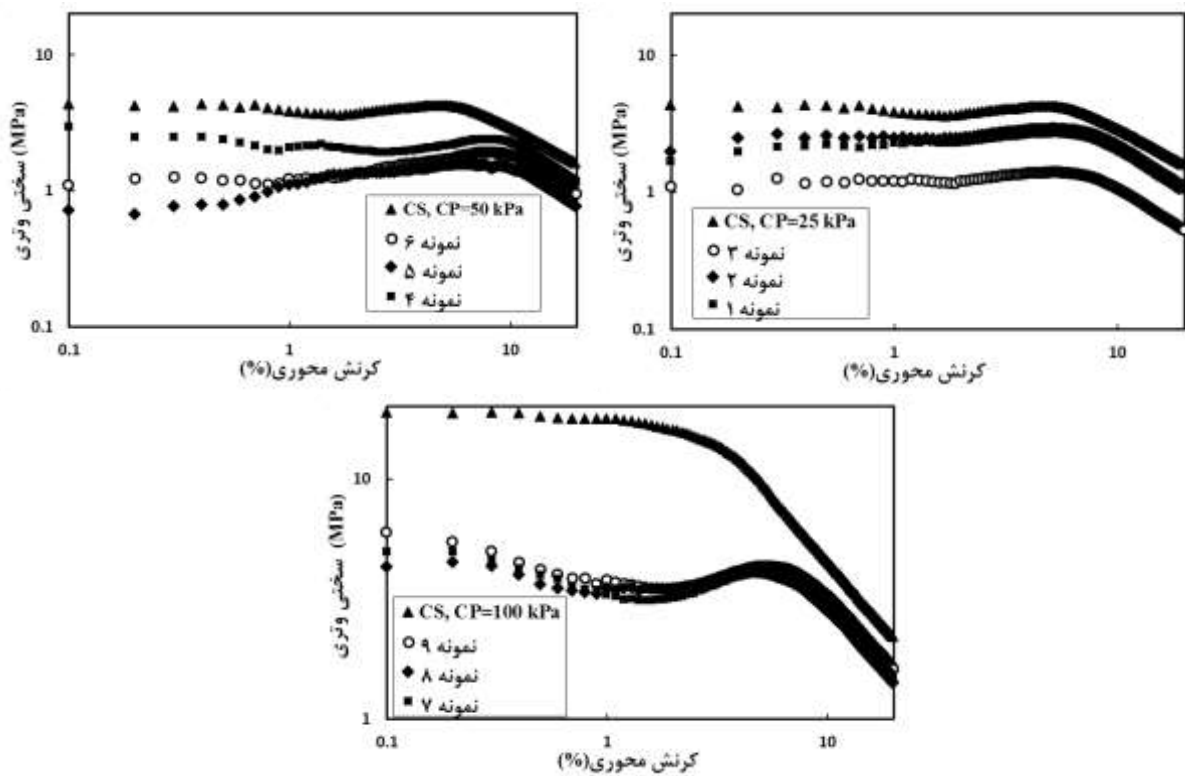
میزان افت مقاومت در اثر سیکل‌های ذوب و انجماد وابسته به نوع خاک و سطح تثبیت می‌باشد.

Binal و Viran (۲۰۱۸) تأثیر سیکل‌های ذوب و انجماد را بر پارامترهای مقاومت برشی خاک‌های ماسه‌رس‌دار و رس متورم شونده ارزیابی نمودند. آن‌ها گزارش نمودند که در اثر ۵ چرخه یخبندان، چسبندگی خاک‌های ماسه‌رس‌دار و رس متورم شونده به ترتیب در حدود ۲۵ و ۱۸ درصد افت می‌نماید.

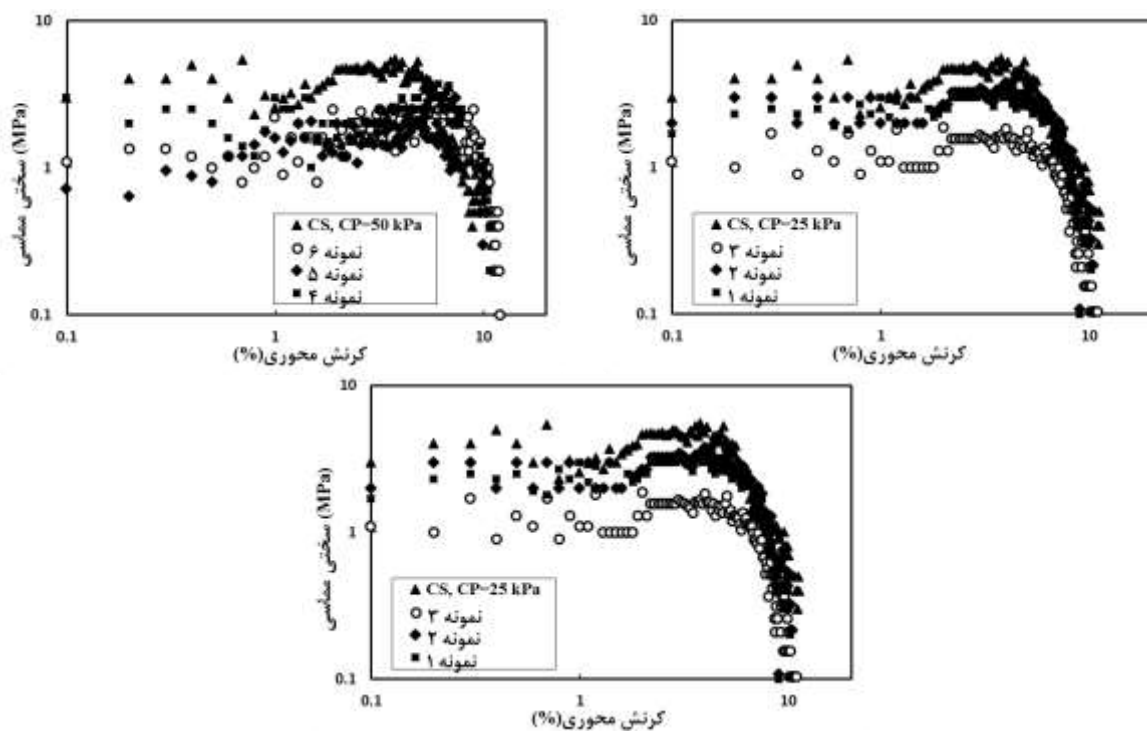
بررسی شکل (۴) مشخص می‌سازد که افزایش مدت‌زمان سیکل‌های ذوب و انجماد و کاهش دمای سیکل موجب کاهش مقاومت انحرافی می‌گردد. در مورد مدت‌زمان سیکل‌ها می‌توان گفت که افزایش مدت‌زمان، فرصت کافی را برای یخ‌زدن آب موجود در میان حفرات در اختیار قرار می‌دهد. لازم به ذکر است این زمان برای انتقال دما از سطح به داخل نمونه لازم می‌باشد. بنابراین می‌توان انتظار داشت، پس از تعادل دمایی نمونه، افزایش مدت‌زمان سیکل‌های ذوب و انجماد، تأثیری بر رفتار نمونه نداشته باشد. این دما وابسته به حجم و ابعاد نمونه می‌باشد. پیرامون تأثیر دمای سیکل‌های ذوب و انجماد بر رفتار برشی نمونه‌های تثبیت‌شده به روش MICP می‌توان گفت، دمای انجماد آب حفره‌ای وابسته به اندازه حفرات است. هرچه اندازه حفرات کوچک‌تر باشد، میزان مکش بافتی بیشتر می‌گردد. در نتیجه دمای انجماد آب کاهش می‌یابد. علاوه بر این، در حفرات کوچک موجود در نمونه، غلظت آب موجود در آن‌ها بسیار بالا می‌باشد و حاوی املاح و نمک‌ها است. بنابراین مکش بافتی و غلظت بالای آب در حفرات عامل باعث می‌شود که نقطه‌ی انجماد آب درون این حفرات بسیار پایین باشد در نتیجه کاهش دمای سیکل‌های انجماد- ذوب موجب می‌شود در مقداری از آب موجود در این حفرات نیز یخ بزند و فشار تخریبی بیشتر به باندهای سیمانی ایجاد شده در اثر تثبیت به روش MICP وارد نماید و در نهایت تنش انحرافی کاهش یابد.



شکل ۴- تأثیر مدت‌زمان و دمای سیکل‌های ذوب و انجماد بر منحنی تنش- کرنش نمونه‌های تحت فشار همه‌جانبه ۲۵ کیلوپاسکال



شکل ۵- تأثیر سیکل‌های ذوب و انجماد را بر تغییرات سختی و تری بر حسب کرنش محوری

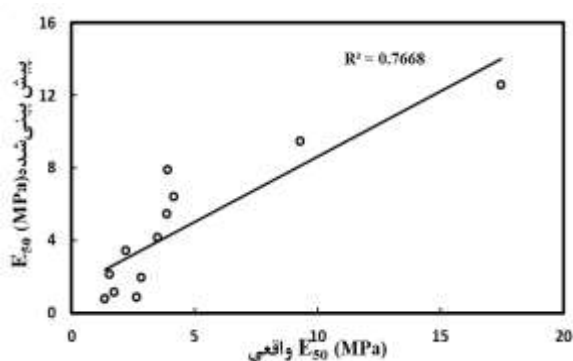


شکل ۶- تغییرات سختی مماسی بر حسب کرنش محوری برای نمونه‌های متفاوت

Gowthaman و همکاران (۲۰۲۰) گزارش نمودند در ۱۵ سیکل ذوب و انجماد ماسه ریز تثبیت‌شده به‌شیوه MICP دچار افت سرعت امواج برشی در حدود ۴۰ درصد می‌گردد. از آنجا که ضریب اطمینان در بسیاری از سازه‌های ژئوتکنیکی در حدود ۲ تا ۳ می‌باشد، بنابراین سختی معادل ۵۰ درصد مقاومت بیشینه، معیار مناسبی برای تعیین تغییرشکل‌ها می‌باشد. از این رو کوششی برای ارائه رابطه‌ای برای تخمین سختی معادل ۵۰ درصد مقاومت بیشینه بر مبنای زمان، تعداد و تغییرات دمای سیکل‌های ذوب-انجماد و فشار همه‌جانبه به‌کمک آنالیز واریانس به‌صورت زیر می‌گردد:

$$E_{50} = 6.33871 + 0.062221 \times CP - 0.10067 \times NC + 1.67022 \times LT + 1.04514 \times HT - 0.04756 \times T \quad (1)$$

در رابطه (۱)، CP فشار همه‌جانبه، NC تعداد سیکل‌های ذوب و انجماد، LT کمینه دمای سیکل‌های ذوب و انجماد، HT بیشینه دمای سیکل‌ها و T زمان سیکل‌های ذوب و انجماد می‌باشد. به‌منظور تخمین دقت رابطه (۱) در تعیین سختی معادل ۵۰ درصد مقاومت بیشینه، همبستگی میان E_{50} واقعی و پیش‌بینی‌شده در شکل (۸) رسم شده است. همان‌گونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی برابر با ۰/۷۶ می‌باشد، که نشان‌دهنده دقت مناسب این رابطه برای تخمین سختی معادل ۵۰ درصد مقاومت بیشینه است.

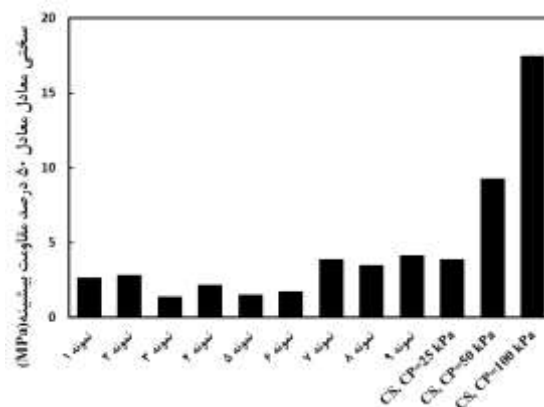


شکل ۸- همبستگی میان E_{50} واقعی و پیش‌بینی شده

به‌منظور تعیین میزان اهمیت پارامترهای گوناگون نتایج آزمون تحلیل واریانس (ANOVA) برای سختی معادل ۵۰ درصد مقاومت بیشینه به‌صورت جدول (۲) ارائه می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد مهم‌ترین پارامتر برای تعیین E_{50} ، فشار همه‌جانبه می‌باشد.

دلیل این رفتار را می‌توان با تخریب بخشی از پیوندهای سیمانی در اثر سیکل‌های ذوب و انجماد دانست. نمونه شاهد که در معرض سیکل‌های ذوب و انجماد قرار نگرفته است، داری پیوندهای مستحکم و سخت سیمانی می‌باشد. بنابراین اگرچه پیوندهای سیمانی مقاومت بالای از خود نشان می‌دهند، اما در کرنش پایین تخریب می‌گردند. بخشی از پیوندهای سیمانی نمونه‌هایی که در معرض سیکل‌های ذوب و انجماد قرار می‌گیرند دچار تخریب می‌شوند. بنابراین امکان ایجاد تغییرشکل در اثر بارگذاری به‌وجود می‌آید و کرنش نظیر تسلیم افزایش می‌یابد. به بیان دیگر رفتار نمونه تثبیت شده به‌روش MICP در اثر سیکل‌های انجماد-ذوب نرم‌تر و انعطاف‌پذیرتر می‌گردد.

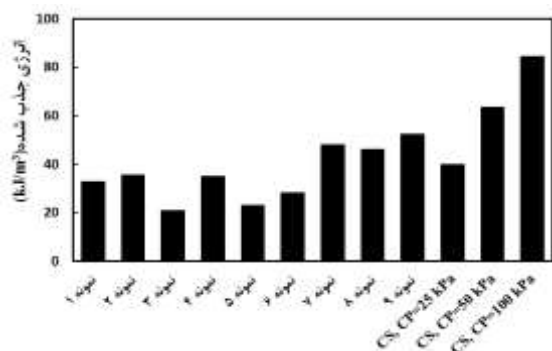
شکل (۷) تأثیر سیکل‌های ذوب و انجماد بر سختی معادل ۵۰ درصد مقاومت بیشینه (شیب خطی که در نمودار تنش-کرنش، مبدأ مختصات را به نقطه‌ای برابر با نیمی از مقاومت وصل می‌نماید) نمونه‌های متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، سیکل‌های ذوب و انجماد موجب کاهش سختی معادل ۵۰ درصد مقاومت بیشینه نمونه‌ها می‌شود. تضعیف پیوندهای سیمانی در اثر سیکل‌های ذوب و انجماد باعث می‌گردد تا به‌منظور ایجاد تغییرشکل در نمونه تنش‌های کمتری نیاز باشد. در حقیقت فشار ایجاد شده توسط کریستال‌های یخ به‌همراه فشار هیدرولیکی ایجاد شده در اثر افزایش حجم رخ داده به علت انجماد، باعث سسته‌شدن و ایجاد ترک در باندهای سیمانی می‌گردد. هرچه میزان پارامترهای سیکل‌های انجماد-ذوب بحرانی‌تر گردد، اثر مخرب سیکل‌های انجماد-ذوب بیشتر می‌گردد. بنابراین به‌میزان کمتری تنش برای یک ایجاد جابه‌جایی مشخص نیاز است که معرف کاهش سختی می‌باشد. پژوهشگران دیگر به نتایج مشابهی دست‌یافتند. Sharma و همکاران (۲۰۲۱) گزارش نمودند در اثر ۲۰ سیکل ذوب و انجماد مدول برشی ماسه تثبیت‌شده به‌شیوه MICP در حدود ۸۰ درصد کاهش یافت.



شکل ۷- تأثیر سیکل‌های ذوب و انجماد بر سختی معادل ۵۰ درصد مقاومت بیشینه

از سوی دیگر سیکل‌های ذوب و انجماد موجب کاهش انرژی جذب‌شده می‌گردد، به عبارت دیگر زوال پیوندهای سیمانی در اثر سیکل‌های ذوب و انجماد که موجب کاهش مقاومت و سختی خاک می‌شود، دلیل اصلی این رویداد می‌باشد. اختلاف میان نمودارها با افزایش کرنش محوری قابل توجه می‌شود.

شکل (۱۰) انرژی جذب‌شده برای تمامی نمونه‌های مورد آزمایش در این پژوهش را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، به‌طور کلی افزایش تعداد سیکل‌ها، کاهش دمای هر سیکل و افزایش مدت زمان هر سیکل موجب زوال بیشتر پیوندهای سیمانی تشکیل‌شده به‌روش MICP شده و در نهایت باعث کاهش انرژی جذب‌شده می‌شود. مقایسه تأثیر سیکل‌های ذوب و انجماد بر سختی معادل ۵۰ درصد مقاومت بیشینه و انرژی جذب‌شده مشخص می‌سازد که اثر مخرب سیکل‌ها بر سختی بیشتر است. سختی معادل ۵۰ درصد مقاومت بیشینه متأثر از رفتار برگشت‌پذیر می‌باشد. این در حالی است که در تعیین انرژی جذب‌شده، رفتار نمونه پس از ناحیه برگشت‌پذیر بسیار مؤثر است. در ناحیه برگشت‌پذیر نقش پیوندهای سیمانی قابل‌ملاحظه می‌باشد، این در حالی است که در کرنش‌های بالا، به‌دلیل تخریب پیوندهای سیمانی، نقش آن‌ها کم‌اهمیت می‌گردد. بنابراین می‌توان انتظار داشت زوال پیوندهای سیمانی در اثر سیکل‌های ذوب و انجماد تأثیر بسزایی بر انرژی جذب‌شده در مقایسه با سختی نداشته باشد.



شکل ۱۰- انرژی جذب‌شده برای تمامی نمونه‌های مورد آزمایش در این پژوهش

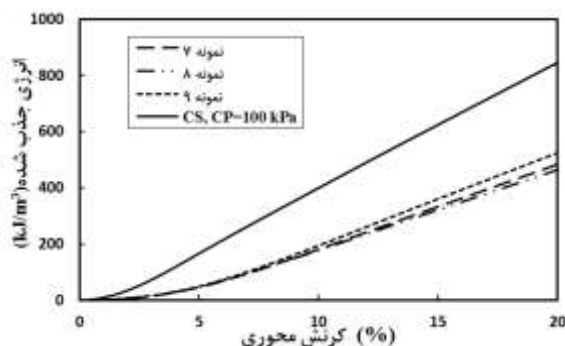
۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم‌یافته زهکشی نشده روی ماسه تثبیت‌شده به‌روش MICP صورت پذیرفت تا اثرات توأم فشار همه‌جانبه، تغییرات بازه دمایی، مدت‌زمان اعمال هر سیکل و تعداد سیکل‌های ذوب و انجماد بر پارامترهای تغییرشکلی نظیر، سختی سکانت، سختی تانژانت، سختی معادل ۵۰ درصد مقاومت بیشینه و انرژی جذب‌شده ارزیابی شود. خلاصه نتایج

جدول ۲- نتایج آزمون تحلیل واریانس (ANOVA) برای سختی

| معادل ۵۰ درصد مقاومت بیشینه | | | | | |
|-----------------------------|---------|----------------|------------|--------------|--------------|
| مقدار p-Prob > F | مقدار F | میانگین مربعات | درجه آزادی | مجموع مربعات | منشأ تغییرات |
| ۰/۰۰۱ | ۳/۵ | ۳۴/۳ | ۵ | ۱۷۱/۵۱ | Model |
| | ۴/۶۱ | ۴۵/۱۷ | ۱ | ۴۵/۱۷ | CP |
| | ۰/۱۷ | ۱/۶۸ | ۱ | ۱/۶۸ | NC |
| | ۱/۶ | ۱۵/۶۹ | ۱ | ۱۵/۶۹ | LT |
| | ۱/۲۲ | ۱۱/۹۲ | ۱ | ۱۱/۹۲ | HT |
| | ۰/۱۲ | ۱/۲۱ | ۱ | ۱/۲۱ | T |
| | | ۹/۹۷ | ۶ | ۵۸/۷۶ | Residual |
| | | ۱۱ | | ۲۳۰/۲۸ | Cor Total |

دلیل این موضوع ایجاد ترک‌ها و حفرات در اثر سیکل‌های ذوب و انجماد می‌باشد که اعمال فشار همه‌جانبه موجب بسته‌شدن این ترک‌ها و اتصال مجدد می‌گردد. پس از فشار همه‌جانبه، به ترتیب تعداد سیکل‌های ذوب و انجماد، کمینه دمای، بیشینه دمای آن‌ها و مدت زمان سیکل‌ها، بیشترین اهمیت را در مقدار E_{50} دارند. انرژی جذب‌شده (سطح زیر نمودار تنش انحرافی- کرنش محوری) نشان‌دهنده میزان انرژی لازم برای ایجاد تغییرشکل می‌باشد. این کمیت به‌منظور ارزیابی پتانسیل جذب انرژی سازه‌های جاذب انرژی به‌کار می‌رود. انرژی جذب‌شده تأثیر توأم مقاومت، سختی و انعطاف‌پذیری رفتار را در نظر می‌گیرد. شکل (۹) تغییرات میزان انرژی جذب‌شده بر حسب کرنش محوری برای نمونه‌های گوناگون تحت تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۹) ملاحظه می‌شود، افزایش کرنش محوری موجب افزایش انرژی جذب‌شده می‌گردد. در حقیقت با افزایش کرنش محوری مقاومت بسیج‌شده در نمونه افزایش می‌یابد و در نتیجه سطح زیر منحنی تنش- کرنش افزایش می‌یابد و انرژی جذب‌شده بیشتر می‌گردد.



شکل ۹- تغییرات میزان انرژی جذب‌شده بر حسب کرنش محوری برای نمونه‌های گوناگون تحت تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال

۵- مراجع

- حاصل از این پژوهش به شرح زیر می باشد:
۱. وقوع سیکل های ذوب و انجماد موجب کاهش در مقاومت بیشینه انحرافی می شود که برای نمونه ای که تحت اثر ۱۵ سیکل ذوب و انجماد با تغییرات دمای در بازه ۱۸- تا ۲۳ درجه سانتی گراد و زمان هر چرخه برابر با ۲۴ ساعت قرار داشت، کاهش بیشینه مقاومت انحرافی در مقایسه با نمونه ای که در معرض سیکل های ذوب و انجماد قرار نگرفته است در حدود ۶۷ درصد رخ داده است و از سوی دیگر افزایش تعداد سیکل های ذوب و انجماد موجب کاهش قابل ملاحظه مقاومت انحرافی شده است. همچنین این افزایش، باعث تخریب پیوندهای سیمانی و هدایت آن به وسیله جریان آب به بیرون نمونه گردیده است بنابراین می توان انتظار داشت پس از هر سیکل شرایط بحرانی تری برای نمونه به وجود آید.
 ۲. نتایج تحلیل واریانس مشخص نمود که به ترتیب، فشار همه جانبه، تعداد سیکل ها، کمینه دما، بیشینه دما و مدت زمان سیکل های ذوب و انجماد، بیشترین اهمیت را در مقدار E_{50} دارند. همچنین رابطه ای برای تخمین E_{50} بر مبنای زمان، تعداد و تغییرات دمای سیکل های ذوب و انجماد فشار همه جانبه به کمک آنالیز واریانس ارائه گردید که ضریب همبستگی آن برابر با ۰/۷۶ بود.
 ۳. افزایش مدت زمان سیکل های ذوب و انجماد کاهش دمای سیکل ها موجب کاهش مقاومت انحرافی گردیده است. افزایش مدت زمان، فرصت کافی را برای یخ زدن آب موجود در میان حفرات در اختیار قرار می دهد. همچنین کرنش نظیر تسلیم در اثر سیکل های ذوب و انجماد موجب افزایش می گردد.
 ۴. بیشینه تأثیر سیکل های ذوب و انجماد در محدوده ارتجاعی رفتار است. در محدوده غیر ارتجاعی به دلیل کرنش های بالا پیوندهای سیمانی تخریب می شوند، بنابراین تخریب پیوندهای سیمانی در اثر سیکل های ذوب و انجماد تأثیر چشمگیری بر رفتار نداشته است.
 ۵. مقایسه تأثیر سیکل های ذوب و انجماد بر E_{50} و انرژی جذب شده مشخص می سازد که اثر مخرب سیکل ها بر سختی مؤثرتر می باشد. E_{50} متأثر از رفتار برگذشت پذیر است؛ این در حالی است که در تعیین انرژی جذب شده، رفتار نمونه پس از ناحیه برگشت پذیر بسیار مؤثر است و برای نمونه ای که تحت اثر ۱۵ سیکل با تغییرات دمای در بازه ۱۸- تا ۲۳ درجه سانتی گراد و زمان هر چرخه برابر با ۲۴ ساعت قرار گرفت، کاهش E_{50} و انرژی جذب شده در مقایسه با نمونه ای که در معرض سیکل های ذوب و انجماد قرار نگرفته است در حدود ۶۴ و ۴۵ درصد رخ داده است.
- داریوش شریفی ا، اردکانی ع، قاسمعلی گ، "بررسی عوامل مؤثر بر عملکرد بهسازی خاک به روش بیولوژیکی در خاک های ماسه ای با درصد ریزدانه متفاوت"، مهندسی عمران مدرس، ۱۳۹۷، ۱۸، ۱۲۷-۱۳۸.
- ملکی کاکلر م، ابراهیمی س، اسدزاده ف، امامی تبریزی م، "ارزیابی کارایی رسوب میکروبی کربنات برای تثبیت شن های روان"، تحقیقات آب و خاک ایران، ۲۰۱۶، ۴۷ (۲)، ۴۰۷-۴۱۵.
- <https://doi.org/10.22059/ijswr.2016.58345>
Al Qabany A, Soga K, Santamarina J, "Factors Affecting Efficiency of Microbially Induced Calcite Precipitation", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138, 992-1001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000666](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000666)
- Amakye SY, Abbey SJ, "Understanding the performance of expansive subgrade materials treated with non-traditional stabilisers: A review", Cleaner Engineering and Technology, 2021, 4, 100159. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100159>
- Amini Y, Hamidi A, "Triaxial shear behavior of a cement-treated sand-gravel mixture", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6 (5), 455-465. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.07.006>
- Binal A, Viran P, "Effects of repeated freeze-thaw cycles on physico-mechanical properties of cohesive soils", Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3592-5>
- Cheng L, Cord-Ruwisch R, Shahin M, "Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation", Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50, 81-90. <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0023>
- Cheng L, Shahin M, "Urease active bioslurry: A novel soil improvement approach based on microbially induced carbonate precipitation", Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53. <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0635>
- De Muynck W, De Belie N, Verstraete W, "Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review", Ecological Engineering, 2010, 36 (2), 118-136. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.02.006>
- Dejong J, Fritzes M, Nüsslein K, "Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - J Geotech Geoenviron ENG, 2006, 132. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:11\(1381\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:11(1381))
- Do J, Montoya B, Gabr M, "Mechanical behavior of sands treated by microbial induced calcite precipitation at low confining stress", 2017.
- Duo L, Kan-liang T, Hui-li Z, Yu-yao W, Kang-yi N, Shican Z, "Experimental investigation of solidifying desert aeolian sand using microbially induced

- Paassen LA v, Ghose R, Linden TJM v d, Star WRL v d, Loosdrecht MCM v, "Quantifying Biomediated Ground Improvement by Ureolysis: Large-Scale Biogrout Experiment", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136 (12), 1721-1728.
[https://doi.org/doi:10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000382](https://doi.org/doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000382)
- Sharma M, Satyam N, Reddy K, "Effect of freeze-thaw cycles on engineering properties of biocemented sand under different treatment conditions", *Engineering Geology*, 2021, 284, 106022.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106022>
- Sun X, Miao L, Wang H, Chen R, Guo X, "Improvement of characteristics and freeze-thaw durability of solidified loess based on microbially induced carbonate precipitation", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80.
<https://doi.org/10.1007/s10064-021-02241-2>
- Taslimi Paein Afrakoti M, Choobbasti A, Ghadakpour M, Kutanaei S, "Investigation of the effect of the coal wastes on the mechanical properties of the cement-treated sandy soil", *Construction and Building Materials*, 2020, 239.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117848>
- Zare P, Sheikhi Narani S, Abbaspour M, Fahimifar A, Mir Mohammad Hosseini SM, Zare P, "Experimental investigation of non-stabilized and cement-stabilized rammed earth reinforcement by Waste Tire Textile Fibers (WTTFs)", *Construction and Building Materials*, 2020, 260, 120432.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120432>
- calcite precipitation", *Construction and Building Materials*, 2018, 172, 251-262.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.255>
- Emami Tabrizi M, Mohammad Seyyedi B, "Evaluation of a New Injection Method for Biologically Improvement of Sandy Soils", *Journal of Engineering Geology*, 2019, 13 (1), 29-44.
<https://doi.org/10.18869/acadpub.jeg.13.1.29>
- Eslami J, Walbert C, Beaucour A-L, Bourges A, Noumowe A, "Influence of physical and mechanical properties on the durability of limestone subjected to freeze-thaw cycles", *Construction and Building Materials*, 2018, 162, 420-429.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.031>
- Fakhrabadi A, Ghadakpour M, Choobbasti A, Soleimani Kutanaei S, "Evaluating the durability, microstructure and mechanical properties of a clayey-sandy soil stabilized with copper slag-based geopolymer against wetting-drying cycles", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80.
<https://doi.org/10.1007/s10064-021-02228-z>
- Ghadakpour M, Fakhrabadi A, Choobbasti A, Soleimani Kutanaei S, Vafaei A, Taslimi Paein Afrakoti M, Eisazadeh N, "Effect of post-construction moisture condition on mechanical behaviour of Fiber-reinforced-cemented-sand (FRCS)", *Geomechanics and Geoengineering*, 2021, 17, 1-13.
<https://doi.org/10.1080/17486025.2021.1980230>
- Gowthaman S, Nakashima K, Kawasaki S, "Freeze-thaw durability and shear responses of cemented slope soil treated by microbial induced carbonate precipitation", *Soils and Foundations*, 2020, 60 (4), 840-855.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.05.012>
- Jacoby P, Pelisser F, "Pozzolanic effect of porcelain polishing residue in Portland cement", *Journal of Cleaner Production*, 2015, 100.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.096>
- Liu S, Wen K, Armwood C, Bu C, Li C, Amini F, Li L, "Enhancement of MICP-Treated Sandy Soils against Environmental Deterioration", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31, 04019294.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002959](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002959)
- Modarres A, Hesami S, Soltaninejad M, Madani H, "Application of coal waste in sustainable roller compacted concrete pavement-environmental and technical assessment", *International Journal of Pavement Engineering*, 2016, 1-14.
<https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1205747>
- Moravej S, Habibagahi G, Nikoee E, Niazi A, "Stabilization of dispersive soils by means of biological calcite precipitation", *Geoderma*, 2017, 315C, 130-137.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.037>
- Mujah D, Shahin M, Cheng L, "Performance of biocemented sand under various environmental conditions", 2016.
<https://doi.org/10.20906/CPS/GJ-05-0002>

EXTENDED ABSTRACT

Investigation of the Effects of Freeze-Thaw Cycles on the Deformation Parameters of Biologically Stabilized Sand

Mina Malekdust Pishkenari^a, Mohammad Azadi^{a,*}, Majid Ghayoomi^b

^a *Phd Student of Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran*

^b *Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, University of New Hampshire, NH, USA*

Received: 09 January 2022; **Review:** 27 September 2022; **Accepted:** 10 December 2022

Keywords:

MICP, Freeze-thaw, Deviatoric strength, Taguchi method.

1. Introduction

In designing a geotechnical structure, two factors of resistance and deformation should be considered, so in this study, the effects of melting and freezing cycles on the deformation parameters of biologically stabilized sand are evaluated and various factors such as all-round pressure, number Melting and freezing cycles Temperature changes in each cycle and the duration of each cycle are evaluated. For this purpose, non-drained reinforced static triaxial tests are performed and the deviation-axis-strain stress curves, chord stiffness (E_{sec}), tangential stiffness (E_{tan}), stiffness equal to 50% of maximum resistance (E_{50}) and absorbed energy (EA) are performed). Is evaluated. The Taguchi method is used to design experiments and provide a relationship to predict some deformation parameters. The results of this study show that the application of melting and freezing cycles reduces the deformation parameters of stabilized samples. The destructive effect of melting and freezing cycles on hardness is greater than the absorbed energy.

2. Methodology

2.1. Experimental study

To investigate the effects of the mentioned factors on the specimen stabilized by the MICP method. For this purpose, consolidated-undrained triaxial tests were performed. According to the number of factors considered in this research, the Taguchi method and Minitab software were used to design experiments. In this research, four variables at three levels are incorporated. Considering the conducted research works, the following values are selected for the mentioned factors:

- Confining pressure: 25, 50, and 100kPa
- Temperature variation in the freeze-thaw cycles: -7°C to 7°C, -10°C to 10°C (2018) and -18°C to 23°C, -23°C to 23°C (2016).
- Duration of the freeze-thaw cycle: 3, 6, 12, and 24 hours (2018)
- Number of the freeze-thaw cycles: 5 (2018), 3, 7, 10 (2016) and 15 (2018)

3. Results and discussion

As can be seen at Fig. (1-a), an increase in CP leads to an increase in the strength of MCPI specimens subjected to FT cycles. An increase in CP increases the effective stress, increasing the specimens' shear strength.

* Corresponding Author

E-mail addresses: mmalekdoost@yahoo.com (Mina Malekdoost), azadi@qiau.ac.ir (Mohammad Azadi), majid.Ghayoomi@unh.edu (Majid Ghayoomi).

(1-b) shows that a decrease in the FT cycles' temperature causes reduced strength of the specimens. There is a surface tension force between the soil and water particles. (1-C) shows the effect of changes in maximum deviatoric strength in terms of confining pressure and the duration of freeze-thaw cycles in the form of two-dimensional contours. This figure shows that increasing the time of FT cycles decreases the deviatoric strength.

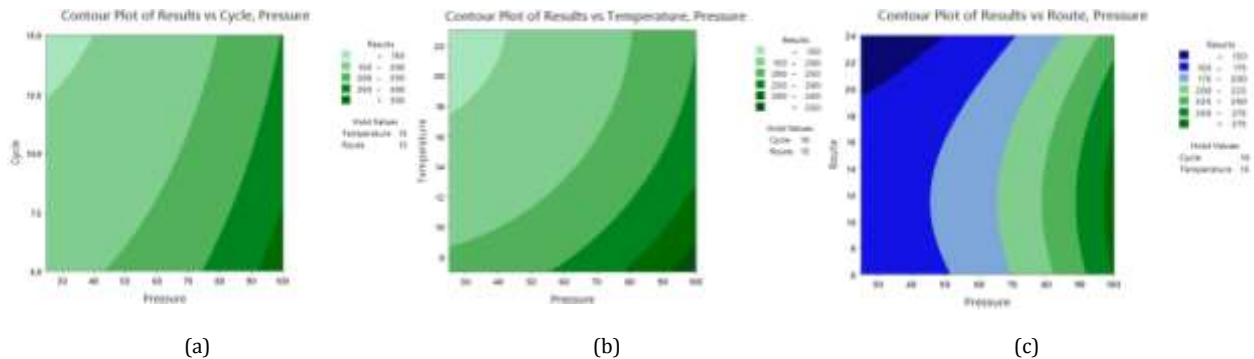


Fig. 1. (a) Changes in the maximum deviatoric strength according to the confining pressure and the number of freeze-thaw cycles, (b) Changes in deviatoric strength in terms of confining pressure and temperature of freeze-thaw cycles, (c) Maximum changes in deviatoric strength according to confining pressure and temperature of freeze-thaw cycles

3.2. Prediction of the strength

Equation (1) is presented for prediction of the strength. In this Equation, CP (confining pressure) is in kPa, NC denotes the FT cycle number, HT denotes the high temperature in centigrade, LT denotes the low temperature in centigrade, D denotes the time of each cycle in hours, and q denotes the deviatoric strength in kPa.

$$q=308.111+1.73714CP-3.9666NC+21.555LT+9.777HT-1.5476D \quad (1)$$

4. Conclusions

The summarized results of these studies show that A decrease in the FT cycle temperature reduces the strength of stabilized specimens, as predicted by the Taguchi method, the ideal temperature range (-7.7) for MICP method is suitable, and at a lower temperature than this range, the deviatoric strength drop abruptly increases. As predicted by Taguchi, the confinement pressure is 100kPa, the freeze-thaw cycles are 5 and the temperature (-7.7) are present in these cycles for an average of 12 hours. To test the deviatoric strength, a sample with these conditions yielded 393kPa, and the maximum value was determined to be approximately 386 kPa.

5. References

- Eslami J, Walbert C, Beaucour AL, Bourges A, Noumowe A, "Influence of physical and mechanical properties on the durability of limestone subjected to freeze-thaw cycles", *Construction and Building Materials*, 2018, 162, 420-429.
- ASTM D560 "Standard test methods for freezing and thawing compacted soil-cement mixtures", 2016.
- Adeli Ghareh Viran P, Binal A, "Effects of repeated freeze-thaw cycles on physico-mechanical properties of cohesive soils", *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 1-13.2018.
- Mujah D, Shahin M, Cheng L, "Performance of biocemented sand under various environmental conditions", In *XVIII Brazilian Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering the Sustainable Future of Brazil goes through our Minas Cobramseg*, 2016, 19-22.