



Research Article

Evaluation of the Strength Characteristics of Clay Stabilized with Recycled Concrete Aggregates Under Freeze-Thaw Cycles

Hosna Soeizi^a, Alireza Ardakani^{b*}

^a MSc. Student, Imam Khomeini International University, Qazvin, I. R. Iran.

^b Associate Professor, Imam Khomeini International University, Qazvin, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-10-09

Revised: 2025-02-08

Accepted: 2025-02-08

Keywords:

Low plasticity clay;
Recycled concrete-
aggregate (RCA);
Compaction;
Uniaxial compressive-
strength;
Freeze-thaw cycles.

ABSTRACT

Due to extensive construction activities in urban areas, the generation of construction waste has been increasing significantly. Among these wastes, recycled concrete aggregates (RCA) are notable, as they can serve as alternative natural materials in various road construction projects. Utilizing such materials in road construction projects can mitigate the environmental hazards associated with their disposal. This study investigates the clay from Kazem Abad region of Qazvin, Iran, which exhibits low plasticity characteristics. The RCA materials used in this research were obtained from laboratory concrete samples. A series of laboratory tests, including compaction tests and uniaxial compressive strength (UCS) tests, were conducted on stabilized clay samples incorporating 25% and 50% RCA, and the effect of curing durations of 7, 14 and 28 days on UCS was investigated. Also, the effect of freezing and melting cycles on the uniaxial compressive strength of the stabilized clay was investigated. Results indicated that incorporating RCA into clay soil reduces maximum dry density (MDD) and optimum moisture content (OMC). Moreover, due to the higher proportion of unhydrated cement particles in the 50% RCA mixture compared to the 25% RCA mixture, the UCS values exhibited greater growth over time. Additionally, UCS values for all RCA percentages declined as the number of freeze-thaw cycles increased, with the most significant strength reduction occurring in the initial cycles. Overall, the findings suggest that incorporating RCA can enhance the geotechnical properties of clay subgrade layers, making them a viable option for sustainable road construction.

* Corresponding author

E-mail address: a.ardakani@eng.ikiu.ac.ir

How to cite this article: Soeizi, H. and Ardakani, A. (2025). Evaluation of the strength characteristics of clay stabilized with recycled concrete aggregates under freeze-thaw cycles. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 10(4), 95-114. <https://doi.org/10.22075/jtie.2025.35579.1695>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



مقاله پژوهشی

ارزیابی ویژگی‌های مقاومتی رس تثبیت‌شده با دانه‌های بتن بازیافتی تحت سیکل‌های ذوب و یخ

حسنا سویزی^۱، علیرضا اردکانی^{۲*}

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(۹)، قزوین، ایران.

^۲دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(۹)، قزوین، ایران.

چکیده

با توجه به ساخت‌وسازهای عمده در مناطق شهری، ضایعات به‌دست آمده از این عملیات رو به افزایش می‌باشد. از جمله این ضایعات، می‌توان به سنگدانه‌های بتن بازیافتی (RCA) اشاره نمود که می‌توان از آنها به عنوان مصالح طبیعی جایگزین در بسیاری از پروژه‌های راه‌سازی استفاده نمود که می‌تواند راه‌حلی برای حل مخاطرات زیست‌محیطی ناشی از دفع آنها باشد. در این تحقیق، خاک رس منطقه کاظم آباد آبیگ قزوین ایران بررسی شده است که از نوع رس با خاصیت خمیری ناچیز می‌باشد و مصالح RCA استفاده شده نیز از مصالح ضایعاتی به‌دست آمده از نمونه‌های بتن آزمایشگاهی می‌باشد. یک سری مطالعات آزمایشگاهی شامل آزمایش‌های تراکم و مقاومت فشاری تک‌محوری روی رس تثبیت‌شده به ازای ۲۵ و ۵۰ درصد RCA انجام شد و تأثیر زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه بر مقاومت فشاری تک‌محوری بررسی گردید. همچنین، تأثیر سیکل‌های ذوب و یخ بر مقاومت فشاری تک‌محوری رس تثبیت‌شده بررسی شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که افزودن مصالح RCA به خاک رسی باعث کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه می‌شود. همچنین، به دلیل اینکه سیمان‌های هیدراته نشده در محتوای ۵۰ درصد RCA بیشتر از محتوای ۲۵ درصد RCA می‌باشد، بنابراین با گذشت زمان عمل‌آوری، مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری رشد بیشتری از خود نشان می‌دهد. همچنین، مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری به ازای تمامی درصدهای RCA با افزایش تعداد سیکل‌های ذوب و یخ کاهش پیدا می‌کند و بیشترین مقادیر کاهش مقاومت در سیکل‌های اولیه اتفاق می‌افتد. اضافه کردن مصالح RCA تأثیر مثبتی بر ویژگی‌های ژئوتکنیک خاک‌های بستر رسی داشت.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰

واژگان کلیدی:

رس با خاصیت خمیری کم، سنگدانه‌های بتن بازیافتی، تراکم، مقاومت فشاری تک‌محوری، سیکل ذوب و یخ.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: a.ardakani@eng.ikiu.ac.ir

استناد به این مقاله: سویزی، حسنا و اردکانی، علیرضا. (۱۴۰۳). ارزیابی ویژگی‌های مقاومتی رس تثبیت‌شده با دانه‌های بتن بازیافتی تحت سیکل‌های

<https://doi.org/10.22075/jtie.2025.35579.1695>

ذوب و یخ. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱۰(۴)، ۹۵-۱۱۴

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱. مقدمه

محققین نشان داده‌اند که فرآیند ذوب و یخ می‌تواند باعث تغییرات محسوسی در ویژگی‌های ژئوتکنیک خاک‌های مختلف گردد. همچنین، به دلیل اینکه طراحی روسازی‌ها عمدتاً به ویژگی‌های خاک‌های بستر بستگی دارد، بنابراین بعضی از محققین تأثیر سیکل‌های ذوب و یخ بر پارامترهای مهندسی لایه‌های بستر را مورد بررسی قرار داده‌اند (بُزی و همکاران، ۲۰۱۷؛ شو و همکاران، ۲۰۱۹). وانگ و همکاران (۲۰۱۷) و سیمونسن و همکاران (۲۰۰۲) نتیجه گرفتند که سیکل‌های ذوب و یخ باعث کاهش مقدار مدول برجهندگی لایه‌های بستر به دلیل افزایش حجم فضای خالی می‌گردند. کارهای انجام شده توسط کی و همکاران (۲۰۰۸) نشان داد که در یک وزن مخصوص خشک بحرانی، سیکل‌های ذوب و یخ می‌تواند باعث کاهش یا افزایش وزن مخصوص خشک خاک گردد. آنها نشان دادند که بعد از سیکل‌های ذوب و یخ، وقتی وزن مخصوص خشک کمتر از مقدار بحرانی باشد، چسبندگی خاک افزایش پیدا می‌کند و در مقابل، اگر وزن مخصوص خشک بیشتر از مقدار بحرانی باشد، سیکل ذوب و یخ باعث کاهش چسبندگی خاک می‌گردد. اسکیر و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر سیکل‌های ذوب و یخ را بر مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رسی با خاصیت خمیری کم و خاک رسی با خاصیت خمیری زیاد مورد بررسی قرار دادند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مقدار کاهش در مقاومت فشاری تک‌محوری خاک به دلیل افزایش در سیکل‌های ذوب و یخ در خاک CL کمتر از خاک CH می‌باشد. بعد از سیکل پنجم ذوب و یخ، مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک‌های CH و CL به ترتیب ۴۰ و ۲۵ درصد کاهش پیدا کرد. تنگ و همکاران (۲۰۱۸) یک سری آزمایش‌های سه‌محوری CU تحت فشارهای همه‌جانبه مختلف به منظور بررسی تأثیر سیکل‌های ذوب و یخ انجام دادند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که افزایش تعداد سیکل‌های ذوب و یخ منجر

به کاهش مقاومت خاک می‌گردد. به عنوان مثال، بعد از ۹ سیکل ذوب و یخ، مقاومت خاک با ضریب ۰/۶۷ کاهش پیدا می‌کند. گُزن و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که سیکل‌های ذوب و یخ می‌تواند باعث کاهش ۵۰ درصدی مقاومت برشی خاک گردد. هان و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی تأثیر سیکل‌های ذوب و یخ بر مقاومت برشی خاک شور با استفاده از آزمایش‌های مقاومت فشاری سه‌محوری UU پرداختند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مقاومت برشی خاک بعد از ۱۰ سیکل ذوب و یخ کاهش محسوسی نشان می‌دهد. به هر حال، نرخ کاهش مقاومت در سیکل‌های ۱۰ تا ۶۰ ملایم‌تر می‌گردد و بعد از سیکل ۶۰ ام نیز بسیار محسوس می‌باشد. بنابراین، بر اساس مطالعات گذشته، سیکل‌های ذوب و یخ می‌تواند باعث کاهش پارامترهای مقاومت خاک همانند چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی گردد و در نتیجه باعث کاهش مقاومت خاک می‌شود.

تعداد سیکل‌های ذوب و یخ به عنوان یکی از پارامترهای مهمی محسوب می‌شود که مستقیماً بر ساختار خاک تأثیر می‌گذارد. ویکلندر و آینگنرود (۲۰۰۰) و وانگ و همکاران (۱۹۹۶) نتیجه گرفتند که سیکل‌های ذوب و یخ یکی از پارامترهای تأثیرگذار در ساختار خاک می‌باشند و به دلیل آرایش مجدد ذرات خاک می‌تواند باعث کاهش مقدار مقاومت تک‌محوری گردد. مطالعات انجام شده توسط وانگ و همکاران (۲۰۰۷) نشان داد که افزایش تعداد سیکل‌های ذوب و یخ، بعد از تعداد مشخصی از سیکل‌های دمایی، تأثیر شاخصی را بر مقاومت خاک ندارد. به عبارت دیگر، افزایش تعداد سیکل‌های ذوب و یخ ابتدا باعث کاهش مقدار مقاومت تک‌محوری می‌گردد و بعد از سیکل مشخصی، مقاومت گسیختگی ثابت می‌ماند و از سیکل‌های ذوب و یخ تأثیر نمی‌پذیرد. بر اساس نتایج وانگ و همکاران (۲۰۰۹)، یک تعادل دینامیک بعد از ۷ تا ۱۰ سیکل در ساختار داخلی خاک رسی تشکیل می‌گردد. بعد از ۷ تا ۱۰ سیکل،

تغییرات قابل ملاحظه‌ای در ویژگی‌های مکانیکی خاک رسی مشاهده نمی‌شود. بر اساس مطالعات گذشته، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد سیکل‌های ذوب و یخ تا تعداد مشخصی، مقاومت خاک کاهش پیدا می‌کند. بعد از آن، افزایش سیکل‌های ذوب و یخ تأثیر محسوسی را بر ویژگی‌های مکانیکی خاک نمی‌گذارد که علت این مسئله ایجاد تعادل جدیدی در ساختار خاک می‌باشد.

بعضی از محققین، به بررسی رفتار خاک‌های تثبیت‌شده توسط مواد افزودنی پرداخته‌اند. افزودنی‌های مختلفی همانند افزودنی‌های مکانیکی و شیمیایی برای بهبود ویژگی‌های مقاومتی و مکانیکی خاک‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. کیانی‌مهر و همکاران (۲۰۱۹) دریافتند که مصالح RCA در اندازه ماسه ممکن است به جای تثبیت‌کننده‌های شیمیایی در خاک رسی مورد استفاده قرار گیرد. اگرچه استفاده از مصالح RCA در اندازه ماسه در عملیات راه‌سازی زیاد مرسوم نمی‌باشد، اما آنها بر ویژگی‌های ژئوتکنیک، همانند مقاومت تک‌محوری، مقاومت برشی و نشست، تمرکز کردند و محتوای RCA افزوده شده توسط آنها ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد می‌باشد و دریافتند که رس اصلاح شده با ۱۵ درصد RCA معیار طراحی لایه‌های بستر و زیراساس روسازی‌های صلب را تأمین می‌کند. توکل و همکاران (۲۰۲۰) به ارزیابی استفاده از مصالح RCA به‌دست آمده از روسازی‌های ترک خورده برای تثبیت خاک رسی پرداختند و ویژگی‌های مهندسی مخلوط خاک رسی با پلاستیسته کم و RCA و سه نوع تثبیت‌کننده (آهک، خاکستر بادی کلاس C، ترکیب سیمان و خاکستر بادی) را مورد ارزیابی قرار دادند. آزمایش‌های انجام شده شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، انقباض خطی و نسبت باربری کالیفرنیا می‌باشد. محتوای RCA افزوده شده

توسط آنها ۵۰ درصد بود. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مصالح RCA در ترکیب با تمامی مصالح سیمانی، به جز آهک، باعث بهبود ویژگی‌های انقباض، سختی و مقاومت خاک رسی می‌گردد و این مصالح می‌توانند برای تثبیت بستر رسی مورد استفاده قرار گیرند. دنگ و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی عملکرد مکانیکی مخلوط خاک سیلتی و ضایعات ساختمانی خردشده^۱، همراه با افزودنی سیمان، به منظور استفاده در لایه‌های زیراساس پرداختند. نتایج به‌دست آمده توسط آنها نشان داد که مخلوط سیلت-CDW-سیمان به منظور به‌دست آوردن بهترین عملکرد مهندسی باید مقدار ۵۰ درصد CDW به عنوان درصد بهینه داشته باشد. همچنین، سیمان علاوه بر ایجاد چسبندگی در مخلوط به‌دست آمده، تأثیر ضدفرسایشی نیز دارد. سویزی و اردکانی (۱۴۰۲) به بررسی اثر سرباره کوره آهن‌گدازی (BFS) بر رفتار مخلوط رس و ضایعات بتنی (CW) پرداختند. نتایج آنها نشان داد که افزودن مصالح BFS تأثیر به‌سزایی بر مقاومت تک‌محوری ترکیبات رس و ضایعات بتنی می‌گذارد و ترکیب رس به ازای ۵۰ درصد CW و ۴ درصد BFS در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه می‌تواند مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری را تا ۵ برابر افزایش دهد.

کامی و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی مقاومت خاک رسی تثبیت‌شده به کمک Bassanite بازیافتی تحت سیکل‌های ذوب و یخ پرداختند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که با افزایش سیکل‌های ذوب و یخ، مقاومت خاک رسی کاهش پیدا می‌کند. بعد از ۵ سیکل ذوب و یخ، مقاومت تک‌محوری رس تثبیت نشده و رس تثبیت‌شده با ۲۰ درصد Bassanite بازیافتی به ترتیب حدود ۴۶ و ۱۸ درصد کاهش پیدا می‌کند. لی و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که افزودن ۵ درصد سیمان به خاک رسی، بعد از ۱۲ سیکل ذوب و یخ، زاویه اصطکاک داخلی و

^۱- Crushed Demolished construction Wastes

صورت نگرفته است و رفتار مقاومتی خاک رسی تثبیت‌شده با مصالح بتن بازیافتی (RCA) تحت تأثیر سیکل‌های ذوب و یخ تحت زمان‌های عمل‌آوری مختلف بررسی نشده است.

هدف اصلی این تحقیق، بررسی تأثیر سیکل‌های ذوب و یخ بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس تثبیت‌شده با سنگدانه‌های بتن بازیافتی (RCA) می‌باشد. به همین منظور، آزمایش‌هایی شامل تراکم و مقاومت فشاری تک‌محوری روی رس تثبیت‌شده با ۲۵ و ۵۰ درصد RCA انجام گردید. تأثیر زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه تحت سیکل‌های ذوب و یخ صفر، ۲، ۴، ۸ و ۱۲ روی مقادیر مقاومت تک‌محوری مخلوط رس و RCA مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، آنالیز SEM روی رس تثبیت‌شده در حالت بدون و با سیکل ذوب و یخ با بررسی میکروسکوپی انجام گردید. نتایج این تحقیق می‌تواند برای استفاده از رس‌های تثبیت‌شده با ضایعات بتنی در نواحی سردسیر مفید باشد.

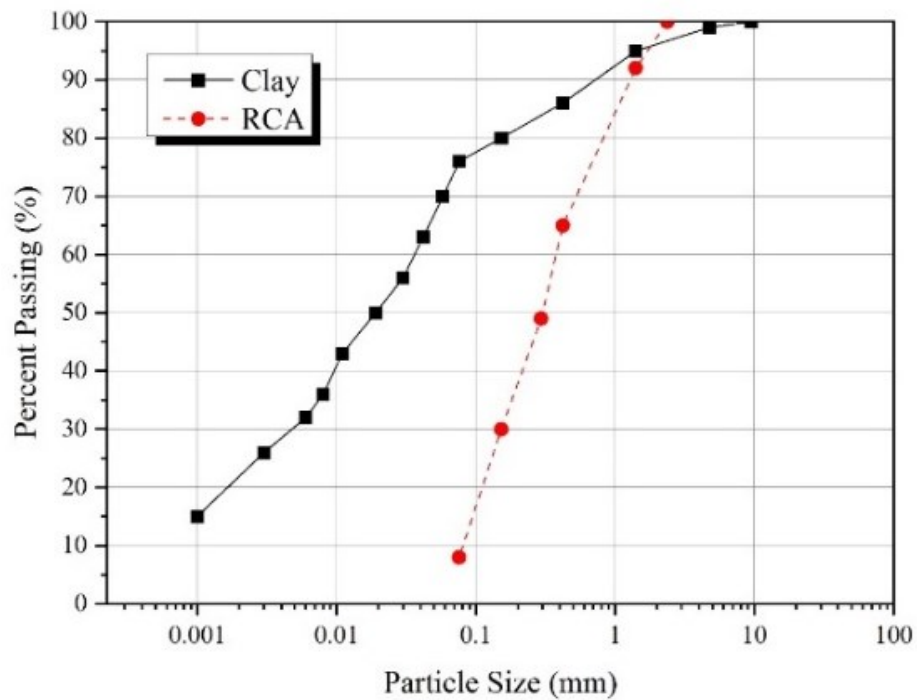
۲. ویژگی‌های مصالح

خاک استفاده شده در تحقیق حاضر از منطقه کاظم آباد آبیگ قزوین برداشت شده است. مطابق استاندارد ASTM 2487 خاک رسی دارای طبقه‌بندی رس با خاصیت خمیری کم (CL) می‌باشد. در شکل ۱، منحنی دانه‌بندی خاک رسی ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، خاک رسی دارای ۲۵ درصد ذرات ماسه‌ای و ۷۵ درصد مصالح ریزدانه می‌باشد. ویژگی‌های مهندسی خاک رسی و RCA در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین، منحنی دانه‌بندی ضایعات بتنی استفاده شده در شکل ۱ نشان داده شده است. این مصالح از بلوک‌های بتنی آزمایشگاهی حاصل شده‌اند. در جداول ۱ و ۲ به ترتیب نتایج آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی به‌دست آمده از XRF^۱ ضایعات بتنی ارائه شده است.

چسبندگی خاک را به ترتیب با ضریب $1/88$ و 2 افزایش می‌دهد. هوتینو و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی رفتار خاک رس متورم شونده تثبیت‌شده با آهک تحت سیکل‌های ذوب و یخ پرداختند. آنها نشان دادند که افزایش تعداد سیکل‌های ذوب و یخ منجر به کاهش در مقاومت برشی خاک تثبیت نشده می‌گردد. با افزایش سیکل‌های ذوب و یخ، مقدار زاویه اصطکاک داخلی ثابت می‌ماند و در مقابل، چسبندگی کاهش پیدا می‌کند. همچنین، مقدار زاویه اصطکاک داخلی خاک تثبیت‌شده تقریباً ثابت می‌ماند و چسبندگی خاک بیشتر از ۵۰ درصد کاهش پیدا می‌کند. بُز و سزار (۲۰۱۸) نتیجه گرفتند که رس به دلیل واکنش‌های پوزولانی می‌تواند باعث بهبود پارامترهای مقاومتی خاک رسی تحت سیکل‌های ذوب و یخ گردد. نتایج آنها نشان داد که مقاومت خاک تثبیت‌شده با ۳ درصد آهک در نخستین سیکل‌های ذوب و یخ حدود ۵۰ درصد کاهش پیدا می‌کند. با وجود اینکه استفاده از افزودنی‌های شیمیایی همانند آهک و سیمان باعث بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک می‌گردد، اما معایبی همانند خطرات زیست‌محیطی به دلیل گازهای گلخانه‌ای و افزایش در زمان پروژه به دلیل عمل‌آوری نادیده گرفته می‌شود. بنابراین، استفاده از مصالح جایگزین اجتناب‌ناپذیر است. ایسمیک و شکور (۲۰۲۰) بیان کردند که آهک می‌تواند باعث کاهش تأثیر منفی سیکل‌های ذوب و یخ گردد. آنها نشان دادند که حدود ۶ درصد آهک به عنوان درصد بهینه عمل می‌کند. دونراک و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که افزایش محتوای سیمان و سیکل‌های ذوب و یخ باعث کاهش مقدار مقاومت تک‌محوری خاک بستر می‌گردد.

تا کنون مطالعات شاخصی در مورد رفتار خاک رسی تثبیت‌شده به کمک سنگدانه‌های بتن بازیافتی (RCA)

^۱ - X-ray Fluorescence (XRF)



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مصالح استفاده شده در تحقیق حاضر

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی رس استفاده شده در تحقیق حاضر

ویژگی	رس	RCA
حد روانی (%)	۳۱	غیرپلاستیک
حد پلاستیک (%)	۲۰	غیرپلاستیک
شاخص پلاستیک (%)	۱۱	غیرپلاستیک
چگالی ویژه	۲/۷۱	۲/۶۶
رطوبت بهینه (%)	۱۴/۴	-
وزن مخصوص خشک حداکثر (g/cm^3)	۱/۹۱	-
شن (%)	۰	۰
ماسه (%)	۲۵	۱۰۰
سیلت (%)	۵۳	۰
رس (%)	۲۲	۰
طبقه‌بندی یونفاید	CL	SP
طبقه‌بندی آشتو	A-7-5	A-3

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی مصالح استفاده شده در تحقیق حاضر به دست آمده از آزمایش XRF

ترکیبات شیمیایی (درصد)	رس	RCA
SiO ₂	۴۵/۵۰	۲۷/۷۵
Al ₂ O ₃	۱۲/۰۴	۶/۸۰
Fe ₂ O ₃	۴/۰۶	۳/۷۲
CaO	۱۲/۲۸	۳۱/۴
MgO	۴/۴۶	۳/۲۰
Na ₂ O	۰/۷۲	۰/۹۴
SO ₃	۰/۲۲	۱/۲۵
K ₂ O	۱/۹۱	۱/۰۶
LOI	۱۶/۸۲	۲۲/۹۳

۳. روش تهیه نمونه

در جهت نمونه‌سازی و تهیه ترکیبات مختلف، خاک رسی و سنگدانه‌های بتن بازیافتی (RCA) به صورت خشک و با استفاده از فرمول زیر با همدیگر مخلوط می‌شوند:

$$\%RCA = \frac{m_{RCA}}{m_{clay} + m_{RCA}} \times 100 \quad (1)$$

که در آن $\%RCA$ درصد مصالح RCA موجود در مخلوط و m_{RCA} و m_{clay} به ترتیب وزن خشک خاک رسی و مصالح RCA می‌باشد. مقدار محتوای مصالح RCA استفاده شده در این تحقیق صفر، ۲۵ و ۵۰ درصد انتخاب شده است. مجموع m_{RCA} و m_{clay} متناسب با ابعاد قالب‌های آزمایشگاهی استفاده شده و وزن مخصوص خشک حداکثر هر ترکیب لحاظ می‌شود.

۴. روش انجام آزمایش‌ها

۴-۱. آزمایش تراکم

همانند روش‌های تثبیت خاک به کمک مواد افزودنی‌های مختلف همانند سیمان، آهک، خاکستر بادی و ... ترکیب خاک رس و RCA نیاز به تراکم با درصد تراکمی مناسب دارد و همین مسئله نیاز به انجام آزمایش‌های تراکمی

دقیقی دارد. آزمایش‌های تراکم مطابق استاندارد ASTM D1557 روی ترکیبات مختلف به منظور تعیین حداکثر وزن مخصوص خشک (MDD) و رطوبت بهینه (OWC) خاک تثبیت نشده و خاک تثبیت‌شده با RCA انجام می‌گیرد. برای این منظور، ابتدا خاک رس و RCA در نسبت‌های ۲۵ و ۵۰ درصد مخلوط می‌شوند. در مرحله بعد، آب به صورت تدریجی به مخلوط حاصل اضافه می‌گردد و ترکیب می‌گردد. مخلوط رس و RCA تهیه شده به مدت ۲۴ ساعت توسط پلاستیک‌های نایلونی پوشانده می‌شوند تا تعادل در محتوای رطوبت بین ذرات خاک و مصالح RCA ایجاد گردد. در گام نهایی، اقدام به انجام آزمایش تراکم استاندارد و تعیین مقادیر وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه به منظور انجام آزمایش‌های تک‌محوری می‌گردد.

۴-۲. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

به منظور انجام آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، ابتدا نمونه‌های رس تثبیت نشده و تثبیت‌شده به ازای محتوای مختلف RCA در داخل نایلون‌های پلاستیکی به مدت ۲۴ ساعت پوشانده می‌شوند تا بین مصالح رسی و

(شکل ۲- الف). بعد از ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از داخل قالب خارج شده و تحت عمل‌آوری قرار می‌گیرند. بعد از اینکه نمونه‌ها به سن عمل‌آوری مورد نظر رسیدند (۷، ۱۴ یا ۲۸ روزه)، فوراً تحت آزمایش قرار می‌گیرند (شکل ۲- ب). نمونه‌ها به صورت اتوماتیک به کمک دستگاه مقاومت فشاری با نرخ جابجایی 1.3 mm/min تحت بارگذاری قائم قرار می‌گیرند. حداکثر بار اعمالی به نمونه قبل از اینکه نمونه گسیخته گردد، به عنوان حداکثر مقاومت فشاری تک‌محوری استفاده می‌شود. گسیختگی در نمونه‌ها به صورت آشکار شدن ترک‌های بزرگ در نمونه‌ها یا افت ناگهانی در بار اعمالی تعریف می‌گردد (شکل ۲- ج).

ضایعات RCA تعادل رطوبتی ایجاد گردد. ترکیبات ایجاد شده با کنترل وزن و با استفاده از حجم قالب‌های تک‌محوری به منظور رسیدن MDD و OMC تهیه می‌شوند. مطابق استاندارد ASTM D2166، یک نمونه تک‌محوری استاندارد به صورت استوانه‌ای با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و قطر ۵۰ میلی‌متر (نسبت ۲ به ۱) می‌باشد. برای مخلوط‌های مختلف، وزن مورد نیاز برای رسیدن به وزن مخصوص حداکثر در حجم مشخص به صورت لایه به لایه به کمک وزنه‌های فولادی در پنج لایه کوبیده شده است تا به ارتفاع مورد نظر برسد و نمونه آماده بارگذاری استاتیکی می‌گردد.

بعد از اینکه نمونه‌های درست شدند، به مدت ۲۴ ساعت در داخل قالب‌های تعبیه شده نگه داشته شده‌اند



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۲. الف) نمونه‌های پوشیده شده توسط پلاستیک قبل از بیرون آوردن از قالب، ب) نمونه‌های ساخته شده در زیر جک بارگذاری و ج) نمونه بعد از گسیختگی

(دینگ و همکاران، ۲۰۱۸). بعد از اتمام زمان‌های عمل‌آوری، مخلوط رس-RCA در داخل یخچال کنترل دما به منظور انجام آزمایش سیکل ذوب و یخ قرار می‌گیرد. سیکل‌های ذوب و یخ مطابق استاندارد ASTM D560 انجام می‌گیرد. در مرحله یخ زدن ۱، نمونه‌های

۳-۴. سیکل‌های ذوب و یخ

برای انجام آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری تحت سیکل‌های ذوب و یخ از یک سیستم بسته استفاده می‌شود. در این سیستم بسته، فرآیند یخ زدن بدون ورود هیچ هوایی به داخل نمونه‌های تثبیت‌شده انجام می‌گیرد

¹ - Freezing

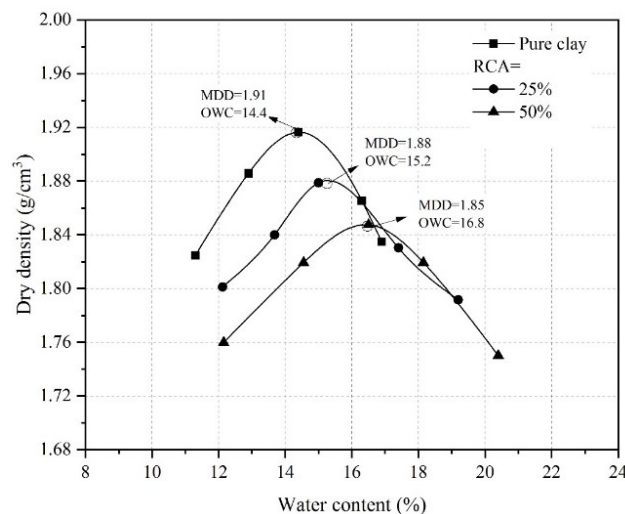
افزودن مصالح RCA به خاک رسی باعث کاهش مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر (MDD) شده است که این مسئله می‌تواند ناشی از مفهوم نسبت تخلخل بین-دانه‌ای باشد که معمولاً در مخلوط خاک‌های ریزدانه و درشت‌دانه حاکم می‌باشد و همچنین باعث کاهش درصد رطوبت بهینه (OWC) شده است که می‌تواند به سطح ویژه کمتر مصالح RCA نسبت به خاک رسی برگردد. تغییرات MDD و OWC خاک تثبیت‌شده اصولاً به مقادیر MDD و OWC خاک پایه بستگی دارد. یعنی در حالتی که مقدار MDD و OMC خاک پایه کم (زیاد) باشد، در صورت اضافه کردن مصالح RCA به خاک رسی، مقادیر MDD و OWC افزایش (کاهش) می‌یابد (ما و همکاران، ۲۰۲۲). در این تحقیق، چون مقدار MDD خاک رسی کم و مقدار OWC زیاد می‌باشد، افزودن RCA به خاک رسی باعث افزایش مقدار MDD و کاهش OWC شده است. نتایج مشابهی توسط محققین مختلف ارائه شده است (کانبالار و همکاران، ۲۰۱۹؛ توکل و همکاران، ۲۰۲۰؛ دنگ و همکاران، ۲۰۲۱).

رس تثبیت‌شده و تثبیت نشده در دمای ۲۳- درجه به مدت ۲۴ ساعت به منظور یخ‌زدگی کامل قرار می‌گیرند. بعد از اتمام فرآیند یخ زدن، نمونه‌ها به اتاق رطوبت با دمای ۲۳+ درجه منتقل می‌شوند تا به مدت ۲۴ ساعت به منظور ذوب شدن کامل در آنجا بمانند. بعد از رسیدن به زمان عمل‌آوری مدنظر، مخلوط رس و RCA تحت سیکل‌های ذوب و یخ صفر، ۲، ۴، ۸ و ۱۲ درجه قرار می‌گیرند. سیکل‌های ذوب و یخ تا ۱۲ انجام شده است. بعد از تکمیل فرآیند سیکل ذوب و یخ، نمونه‌ها تحت آزمایش تک‌محوری مطابق استاندارد ASTM D2166 به منظور تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری قرار می‌گیرند.

۵. مشاهدات و نتایج آزمایش‌ها

۵-۱. نتایج آزمایش تراکم

در شکل ۳، منحنی وزن مخصوص خشک در مقابل رطوبت رس به ازای درصد‌های مختلف RCA آورده شده است. همان طور که در این شکل دیده می‌شود،



شکل ۳. منحنی تراکم مخلوط رس و RCA

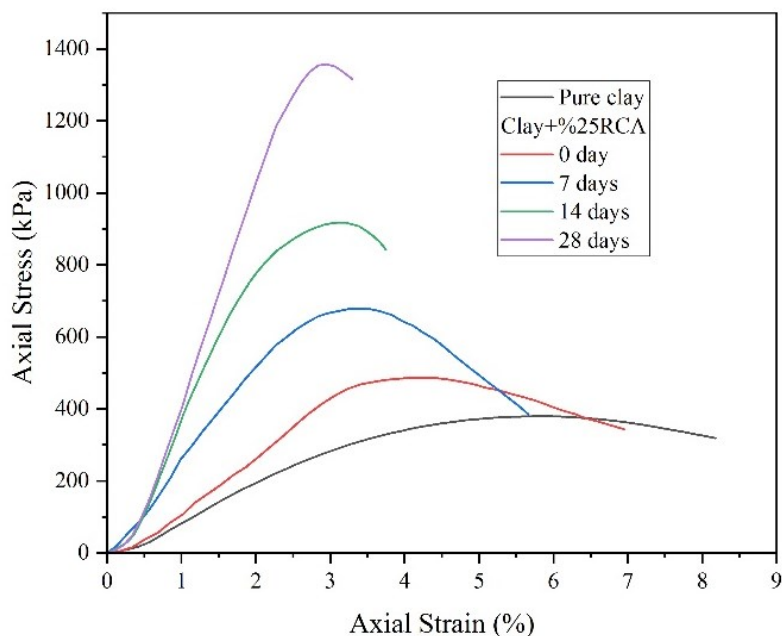
۷، ۱۴ و ۲۸ روزه به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. همان طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، به ازای ۲۵ درصد مصالح RCA، مقادیر مقاومت پیک به ازای

۵-۲. نتایج آزمایش تک‌محوری

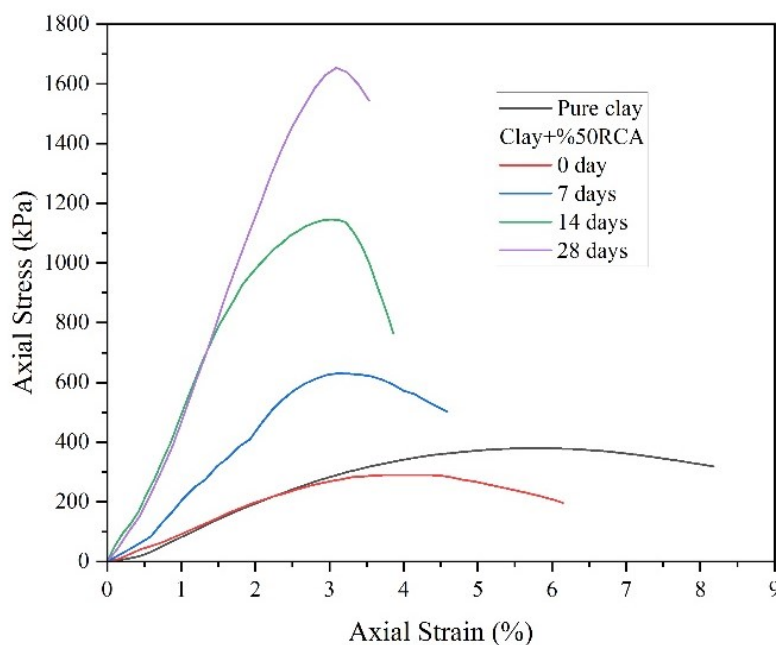
رفتار تنش کرنش رس تثبیت‌شده به ازای محتوای مختلف ضایعات RCA تحت زمان‌های عمل‌آوری صفر،

روزه به اندازه ۲۳ درصد کاهش می‌یابد و در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه در مقایسه با رس تثبیت نشده به اندازه ۶۵، ۲۰۰ و ۳۳۵ درصد افزایش پیدا می‌کند.

زمان‌های عمل‌آوری صفر، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه در مقایسه با رس تثبیت نشده به ترتیب ۲۸، ۷۸، ۱۴۱ و ۲۵۷ درصد افزایش می‌یابد. همچنین، با افزودن ۵۰ درصد RCA به خاک رسی مقدار مقاومت پیک در زمان عمل‌آوری صفر



شکل ۴. منحنی تنش - کرنش رس تثبیت شده با ۲۵ درصد RCA در زمان‌های مختلف عمل‌آوری



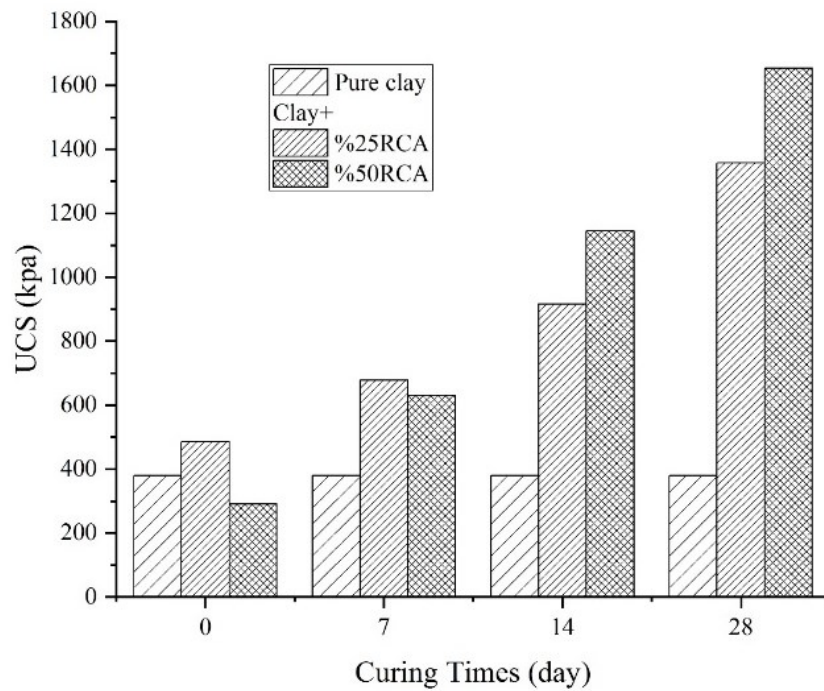
شکل ۵. منحنی تنش - کرنش رس تثبیت شده با ۵۰ درصد RCA در زمان‌های مختلف عمل‌آوری

در شکل ۶، مقادیر میانگین UCS و کرنش گسیختگی رس تثبیت نشده و رس تثبیت‌شده به ازای ۲۵ و ۵۰ درصد RCA در زمان‌های عمل‌آوری صفر، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۶-الف دیده می‌شود، در زمان عمل‌آوری صفر روزه، به ازای محتوای ۲۵ درصد RCA در خاک رسی، سطح تماسی بین خاک و RCA بیشتر شده که این مسئله باعث افزایش مقاومت اصطکاکی سطحی و چفت و بست مکانیکی شده و در نتیجه باعث افزایش مقاومت تک‌محوری می‌گردد در حالی که وجود ۵۰ درصد RCA در خاک رسی باعث کاهش سطح تماس بین رس - رس و جایگذاری مصالح RCA در داخل خاک رسی می‌گردد و موجب کاهش چسبندگی خاک رسی می‌شود و همین مسئله باعث کاهش مقدار UCS به ازای محتوای ۵۰ درصد RCA می‌گردد. تحقیقات و نتایج مشابهی توسط محققین مختلف ارائه شده است (توکل و همکاران ۲۰۲۰؛ دنگ و همکاران ۲۰۲۱؛ ما و همکاران ۲۰۲۲). در رابطه با تحلیل افزایش مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری در رس تثبیت‌شده به ازای محتوای ۲۵ و ۵۰ درصد RCA و تحت زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

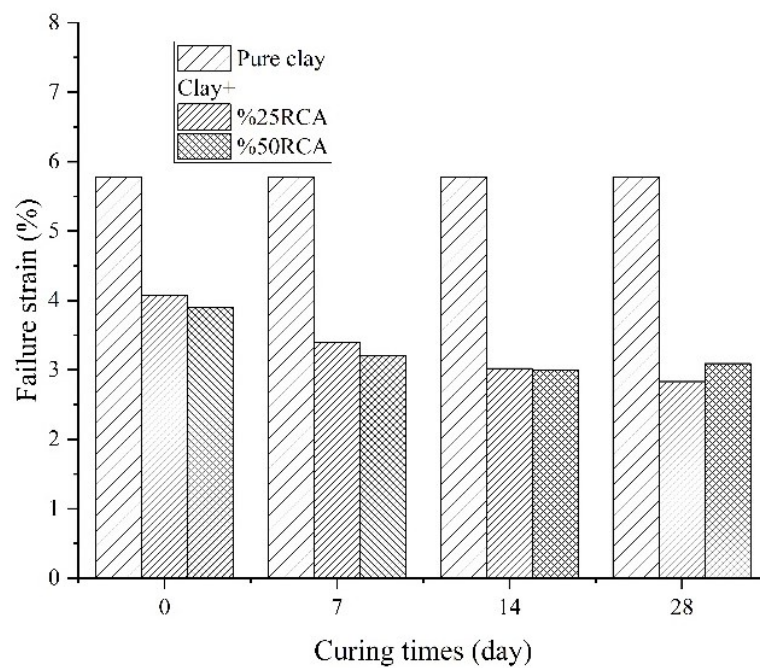
- اندرکنش مکانیکی (تأثیر کوتاه‌مدت): به دلیل اینکه بخش عمده تشکیل‌دهنده مصالح RCA از نوع مصالح طبیعی دارای ذرات شنی می‌باشد، افزودن ضایعات RCA به خاک رسی باعث افزایش اصطکاک بسیج شده و افزایش در مقاومت خاک می‌گردد. پارامترهای مقاومت برشی برای مخلوط رس و دانه‌های شنی به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از خاک رس خالص می‌باشد. به دلیل اینکه مقدار

- حداکثر RCA اضافه شده به خاک رسی ۵۰ درصد می‌باشد، بنابراین می‌تواند باعث افزایش در مقاومت برشی خاک رسی گردد و همین مسئله موجب افزایش در مقدار UCS شده است.
- اندرکنش شیمیایی (تأثیر بلندمدت): با افزودن RCA و با گذشت زمان و فرآیند عمل‌آوری، یون-های Ca^{2+} موجود در سیمان‌های هیدراته نشده RCA با کاتیون‌های تک‌ظرفیتی موجود در خاک رسی تبادل یونی انجام می‌دهند. با گذشت زمان، هیدراتاسیون سیمانی همانند CSH (هیدرات سیلیکات کلسیم) و CAH (هیدرات آلومینا کلسیم) تشکیل می‌شود. به دلیل اینکه سیمان‌های هیدراته نشده در محتوای ۵۰ درصد RCA بیشتر از محتوای ۲۵ درصد RCA می‌باشد، بنابراین با گذشت زمان عمل‌آوری، مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری رشد بیشتری از خود نشان می‌دهد.
- آیین‌نامه UFC^۱ برای خاک‌های تثبیت‌شده به منظور استفاده در لایه‌های بستر و زیراساس مقدار حداقل مقاومت فشاری تک‌محوری ۲۸ روزه ۱۳۷۹ کیلوپاسکال برای روسازی‌های صلب پیشنهاد می‌کند (UFC، ۲۰۰۴). مطابق شکل ۶-الف، مخلوط رس به ازای محتوای ۲۵ و ۵۰ درصد RCA در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه به این هدف می‌رسد. در شکل ۶-ب، تغییرات کرنش گسیختگی رس تثبیت‌شده به ازای محتوای ۲۵ و ۵۰ درصد RCA در زمان‌های عمل‌آوری مختلف ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، افزودن RCA باعث کاهش کرنش گسیختگی می‌گردد و با افزایش زمان عمل‌آوری نمونه سخت‌تر و در کرنش‌های کمتری گسیخته می‌گردد.

^۱ - Unified Facilities Criteria



(الف)



(ب)

شکل ۶. الف) تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری و ب) کرنش کسب‌خستگی رس تثبیت‌شده با RCA در مقابل زمان عمل-آوری

در شکل ۷ (الف و ب) نمونه رس تثبیت‌شده به ازای ۵۰ درصد RCA در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، شیب گسیختگی حادث شده در حدود ۴۵ درجه نسبت به افق می‌باشد که در راستای طولی نمونه ادامه پیدا کرده است.



(الف)



(ب)

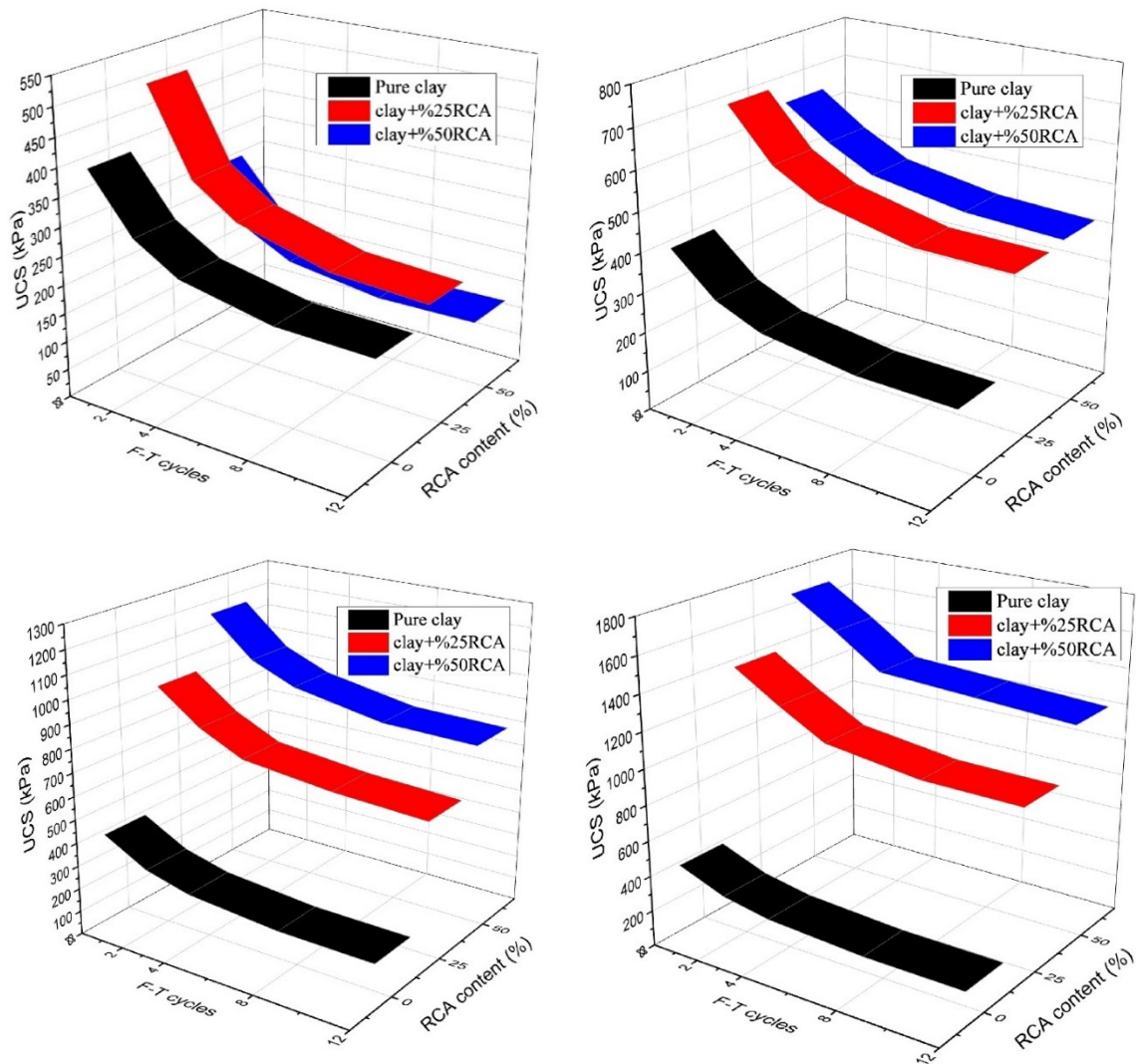
شکل ۷. الف) نمونه تک‌محوری قبل از گسیختگی و ب) نمونه تک‌محوری بعد از گسیختگی

مقاومت فشاری تک‌محوری می‌گردد. همان طور که دیده می‌شود، بیشترین کاهش در مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری در سیکل‌های اولیه اتفاق می‌افتد و بعد از سیکل ۸ ام کاهش محسوسی در مقاومت فشاری تک‌محوری حادث نمی‌شود. همچنین، با افزایش زمان عمل‌آوری در رس تثبیت‌شده با RCA مقدار کاهش در UCS کمتر می‌گردد.

۳-۵. تأثیر سیکل ذوب و یخ بر مقاومت فشاری

تک‌محوری

تأثیر محتوای RCA بر پاسخ تنش کرنش رس تثبیت نشده و رس تثبیت‌شده برای تعداد صفر، ۲، ۴، ۸ و ۱۲ سیکل ذوب و یخ در شکل ۸ به ازای زمان‌های عمل‌آوری مختلف نشان داده شده است. همان طور که دیده می‌شود، افزایش تعداد سیکل‌های ذوب و یخ باعث کاهش مقدار



شکل ۸. تغییرات UCS در رس تثبیت شده با RCA به ازای سیکل های مختلف ذوب و یخ: الف) صفر روزه، ب) ۷ روزه، ج) ۱۴ روزه و د) ۲۸ روزه

UCS حداکثر هر ترکیب است. در شکل ۹، مقادیر UCS نرمال شده در مقابل تعداد سیکل های ذوب و یخ به ازای درصدهای مختلف RCA در زمان های عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه آورده شده است.

همان طور که در شکل ۹ دیده می شود، مقادیر UCS نرمال شده به ازای تمامی محتوای مختلف RCA با افزایش تعداد سیکل های ذوب و یخ کاهش پیدا می کند و بیشترین نرخ کاهش مقاومت در سیکل های اولیه حادث می گردد و بیشترین نرخ کاهش مقاومت مربوط به محتوای ۵۰ درصد RCA در زمان عمل آوری صفر روزه

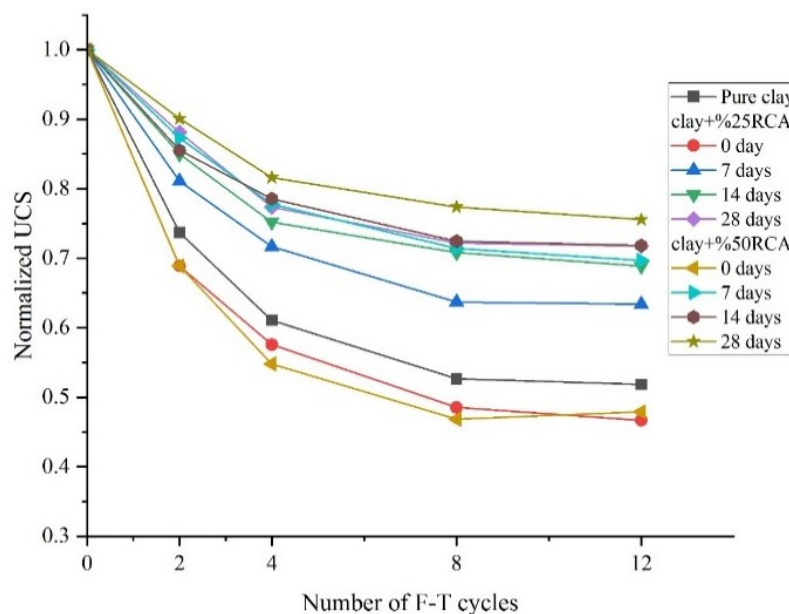
به منظور بررسی تأثیر سیکل های ذوب و یخ بر کاهش مقدار UCS، از UCS نرمال شده استفاده می گردد که نسبت به مقاومت UCS حداکثر هر ترکیب ارائه می گردد. پس مقدار UCS نرمال شده به صورت زیر تعریف می گردد:

$$\bar{q}_u^i = \frac{q_u^i}{q_u^{\max}} \quad i=0, 2, 4, 8, 12 \quad (2)$$

که در آن، i تعداد سیکل های ذوب و یخ، q_u^i مقدار UCS بعد از سیکل ذوب و یخ i ام و $q_u^{\max}$ نیز مقدار

بر ویژگی‌های مکانیکی ترکیبات مختلف تأثیر بگذارد. مقادیر کاهش مقاومت در ترکیبات مختلف برای تعداد ۱۲ سیکل ذوب و یخ در محدوده ۲۵ تا ۵۴ درصد می‌باشد. نتایج مشابهی روی نمونه‌های رسی تثبیت‌شده با افزودنی‌های شیمیایی توسط محققین مختلف ارائه شده است. در تحقیق کامی و همکاران (۲۰۱۲) در ترکیب رس نرم به ازای محتوای ۲۰ درصد بازائیت، تقریباً ۴۸ درصد کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری بعد از سیکل ۵ ام ذوب و یخ مشاهده شده است و همچنین در تحقیق لو و همکاران (۲۰۲۰) به ازای محتوای ۷ درصد سیمان در خاک رس متورم شونده، بعد از سیکل ۷ ام ذوب و یخ حدود ۶۰ درصد کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری مشاهده شده است.

می‌باشد. این کاهش مقاومت احتمالاً به دلیل تغییرات ساختاری در خاک رس تثبیت‌شده می‌باشد. در طول فرآیند یخ زدن، آب حفره‌ای موجود در داخل نمونه، به کریستال‌های یخی تبدیل می‌گردد و همین مسئله باعث افزایش حجم نمونه تثبیت‌شده می‌شود (لو و همکاران، ۲۰۲۰). در ترکیبات رس تثبیت‌شده با RCA، باند سیمانی موجود در بین ذرات خاک و ذرات خاک با مصالح RCA شکسته می‌شود. این باند سیمانی توسط کریستال‌های یخی ایجاد شده، جدا می‌گردد. وقتی دمای نمونه به بالای صفر درجه افزایش پیدا می‌کند، این کریستال‌های یخی ذوب شده و موقعیت ذرات نمونه نسبتاً ثابت می‌ماند. بعد از اینکه سیکل‌های ذوب و یخ تکمیل گردید، فضاها و ترک‌های جدید بسیاری در داخل نمونه ایجاد می‌گردد که این فرم و ساختار جدید می‌تواند



شکل ۹. تغییرات مقدار UCS نرمال‌شده رس تثبیت‌شده نسبت به تعداد سیکل‌های ذوب و یخ

نمونه‌های رس تثبیت‌شده با سیکل‌های ذوب و یخ مختلف و به ازای محتوای مختلف ضایعات RCA و تحت زمان‌های مختلف عمل‌آوری در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود،

مدول الاستیسیته سکانت (E50) به صورت شیب خط اتصالی از مرکز منحنی تنش- کرنش به نقطه‌ای با مقدار ۵۰ درصد مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) تعریف می‌گردد. مقدار E50 نمونه‌های رس تثبیت نشده و

جدول ۳ دیده می‌شود، افزایش سیکل‌های ذوب و یخ تا ۸ سیکل، باعث کاهش مقدار مدول الاستیسیته نمونه‌های تثبیت‌شده می‌گردد و بعد از سیکل ۸ ام، تقریباً ثابت می‌ماند و این رفتار بیان‌کننده تعادل دینامیک می‌باشد که در مطالعات گذشته به آن اشاره گردیده که توسط محققین مختلف مطرح شده است.

افزودن ضایعات RCA باعث افزایش قابل توجهی در سختی نمونه‌های تثبیت‌شده می‌شود و این افزایش در سختی، در زمان‌های عمل‌آوری بیشتر، شاخص‌تر می‌باشد. برای مثال، در حالت بدون سیکل ذوب و یخ و در زمان عمل‌آوری ۱۴ روزه، مدول الاستیسیته نمونه‌های تثبیت‌شده با ۲۵ و ۵۰ درصد RCA به ترتیب با نسبت ۴/۱۱ و ۵/۲۷ افزایش پیدا می‌کند. همان‌طور که در

جدول ۳. مقادیر مدول E₅₀ بر حسب MPa برای رس تثبیت‌شده تحت سیکل‌های مختلف ذوب و یخ

	عمل‌آوری	۰ سیکل	۲ سیکل	۴ سیکل	۸ سیکل	۱۲ سیکل
رس خالص	۰	۹/۶۹	۷/۵۴	۶/۶۸	۶/۱۵	۶/۲۱
رس + ۲۵ درصد RCA	۰	۱۲/۶۵	۱۰/۵۰	۹/۲۵	۸/۴۲	۸/۳۸
	۷	۲۶/۱۵	۲۰/۳۲	۱۷/۱۵	۱۵/۱۴	۱۵/۱۰
	۱۴	۳۹/۸۶	۳۲/۲۰	۲۷/۹۰	۲۳/۴۰	۲۳/۴۸
	۲۸	۴۸/۴۶	۳۹/۳۳	۳۲/۵۰	۲۷/۸۰	۲۷/۹۶
رس + ۵۰ درصد RCA	۰	۹/۷۳	۷/۲۳	۶/۲۴	۶	۶/۱۱
	۷	۲۱/۶۵	۱۸/۴۵	۱۵/۸۰	۱۴/۳۰	۱۴/۲۵
	۱۴	۵۱/۱۱	۴۴/۷۴	۳۸/۲۰	۳۲/۱۱	۳۱/۸۰
	۲۸	۵۳/۷۰	۴۵/۱۷	۴۰/۶۵	۳۶/۱۹	۳۵/۹۸

رس با مصالح RCA در بیشترین مقدار UCS نشان داده است و اینکه چگونه اندرکنش این مصالح منجر به رسیدن به مقدار مقاومت مطلوب شده است و همچنین تأثیر سیکل‌های ذوب و یخ بر فضاهای خالی رس تثبیت‌شده مورد بررسی قرار گیرد. تصاویر SEM نشان داده شده در شکل ۱۰- الف، باند و چسبندگی بین ترکیب خاک رسی را با مصالح RCA به خوبی نشان می‌دهد. افزایش در مقاومت فشاری تک‌محوری می‌تواند به سطح زبر و دانه‌های تیزگوشه مصالح RCA برگردد

۶. نتایج SEM و XRD

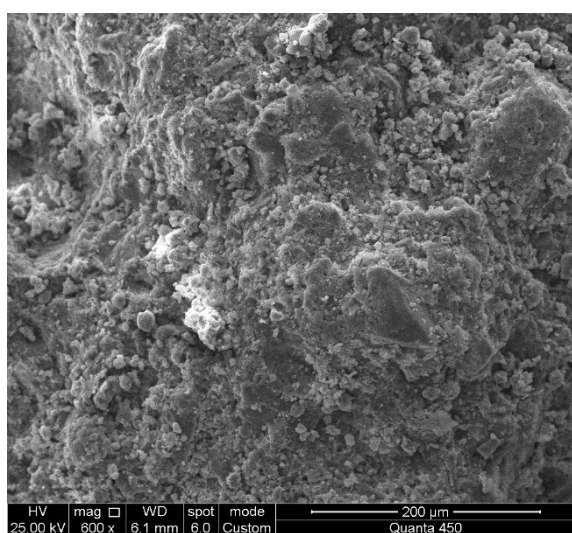
تصاویر SEM^۱ به منظور نشان دادن تغییرات ساختاری و مورفولوژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بعد از انجام آزمایش UCS، نمونه با بیشترین مقاومت فشاری تک‌محوری (رس تثبیت‌شده با ۵۰ درصد RCA در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه) به بخش‌های کوچکتر شکسته شده و تحت آزمایش SEM قرار می‌گیرد. هدف اصلی از انتخاب این ترکیب این است که اندرکنش بین مخلوط

^۱ - Scanning Electron Microscopy

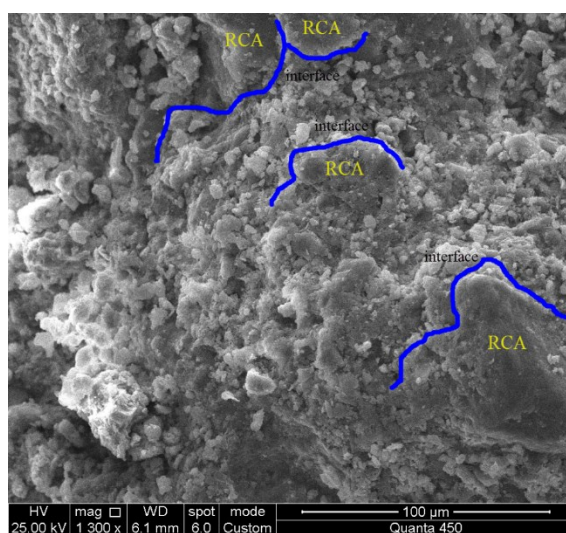
کاهش مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری می‌گردد. همچنین، کاهش در مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری ناشی از سیکل‌های ذوب و یخ می‌تواند به لنزهای یخی ایجاد شده در فرآیند یخ زدن برگردد که باعث تغییر در آرایش و چیدمان ذرات خاک تثبیت‌شده می‌گردد. محققین مختلفی روی تأثیر سیکل‌های ذوب و یخ بر روی خاک‌های مختلف مطالعاتی را انجام داده‌اند و نتایج مشابهی توسط آنها گزارش شده است (کروزدا و هومن، ۱۹۹۷؛ ویکلندر و ایگنبرود، ۲۰۰۰؛ یارباسی و همکاران، ۲۰۰۷).

همان طور که از آزمایش XRD روی ترکیب رس تثبیت‌شده با ۵۰ درصد RCA در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه دیده می‌شود (شکل ۱۱) در حضور ضایعات RCA، هیدراتاسیون سیمانی به شکل کلسیم سیلیکات هیدرات (CSH) و کلسیم آلومینات هیدرات (CAH) در ترکیب تشکیل شده است و موجب تثبیت ذرات رس و بهبود ساختار کل مجموعه شده است. این فرآیند منجر به بهبود و افزایش مقدار UCS گردیده است.

که منجر به قفل و بست خوب بین خاک رسی و مصالح RCA می‌گردد. همچنین، اضافه کردن RCA به مخلوط رس باعث می‌شود که فضاهای خالی ترکیب حاصله توسط ژل سیمانی ایجاد شده پر شود و به عنوان یک نتیجه چسبندگی ذرات رسی و مصالح RCA می‌شود. در حضور مصالح RCA، بعد از یک روز (تا یک ماه) هیدراتاسیون سیمانی به صورت CSH (هیدرات سیلیکان کلسیم) و CAH (هیدرات آلومینا کلسیم) در ترکیب حاصله ایجاد می‌شود که منجر به تثبیت ذرات رسی و بهبود ساختار مقاومتی کل مجموعه می‌شود (کیانی‌مهر و همکاران، ۲۰۱۹). همین مسئله منجر به بهبود و افزایش پاسخ نمونه تک‌محوری و در نتیجه افزایش در مقدار UCS می‌گردد. همان طور که در شکل ۱۰-ب دیده می‌شود، سیکل‌های ذوب و یخ باعث ریز فضاهایی در داخل نمونه رس تثبیت‌شده گردیده است که این ریز فضاهای ایجاد شده می‌تواند به افزایش در حجم موجود در نمونه در فرآیند یخ زدن برگردد. بنابراین، در طول فرآیند یخ زدن و ذوب شدن‌های متوالی، همبستگی ذرات خاک و ضایعات بتنی کاهش پیدا می‌کند و همین مسئله منجر به

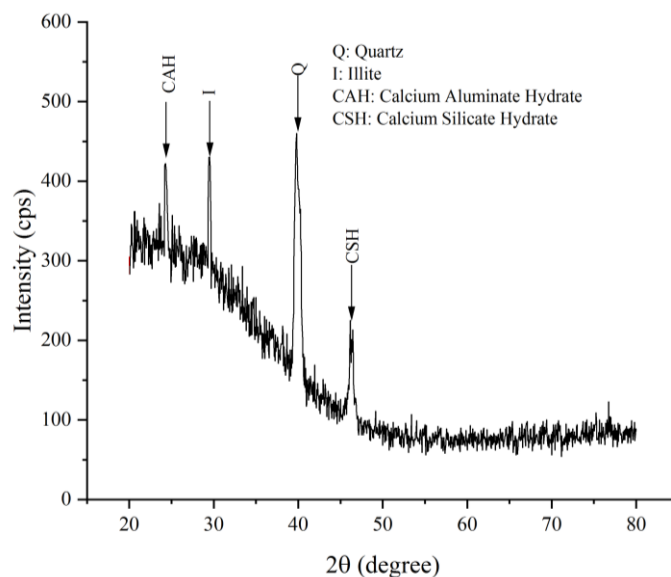


(ب)



(الف)

شکل ۱۰. تصویر SEM رس تثبیت‌شده با ۵۰ درصد RCA در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه: (الف) بدون سیکل ذوب و یخ و (ب) ۸ سیکل ذوب و یخ



شکل ۱۱. نتایج XRD رس تثبیت شده با ۵۰ درصد RCA در زمان عمل آوری ۲۸ روزه

۷. نتیجه گیری

بازیافت و استفاده مجدد از مصالح C&D به عنوان یک راه حل اساسی برای محافظت از محیط زیست و منابع طبیعی قلمداد می گردد. یکی از مصالح C&D پرمصرف استفاده از این مصالح به صورت سنگدانه های بتن بازیافتی (RCA) می باشد. در این مقاله، پتانسیل استفاده از مصالح RCA در بهبود ویژگی های مکانیکی خاک رس با خاصیت خمیری پایین مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش های تراکم، مقاومت تک محوری و همچنین تأثیر سیکل های ذوب و یخ بر مقاومت فشاری تک محوری رس تثبیت شده به ازای ۲۵ و ۵۰ درصد RCA در زمان های عمل آوری صفر، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه انجام گردید. میکروساختار ترکیب با بیشترین مقدار مقاومت تک محوری با استفاده از تصاویر SEM مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- درصد رطوبت بهینه (OWC) شده است که می تواند به سطح ویژه کمتر مصالح RCA نسبت به خاک رسی برگردد.
- در زمان عمل آوری صفر روزه، به ازای محتوای ۲۵ درصد RCA در خاک رسی، سطح تماسی بین خاک و RCA بیشتر شده که باعث افزایش مقاومت تک محوری می گردد در حالی که وجود ۵۰ درصد RCA در خاک رسی باعث کاهش سطح تماس بین رس- رس و جایگذاری مصالح RCA در داخل خاک رسی می گردد و همین مسئله باعث کاهش مقدار UCS می گردد.
- به دلیل اینکه سیمان های هیدراته نشده در محتوای ۵۰ درصد RCA بیشتر از محتوای ۲۵ درصد RCA می باشد، بنابراین با گذشت زمان عمل آوری، مقدار مقاومت فشاری تک محوری رشد بیشتری از خود نشان می دهد.
- مقادیر UCS نرمال شده به ازای تمامی درصدهای RCA با افزایش تعداد سیکل های ذوب و یخ کاهش پیدا می کند و بیشترین مقادیر کاهش مقاومت در سیکل های اولیه اتفاق می افتد و بیشترین

- اضافه کردن مصالح RCA به خاک رسی باعث کاهش مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر (MDD) شده است که می تواند به مفهوم نسبت تخلخل بین دانه ای برگردد و همچنین باعث کاهش

- نرخ کاهش مقاومت مربوط به محتوای ۵۰ درصد RCA در زمان عمل‌آوری صفر روزه می‌باشد.
- می‌گردد و بعد از سیکل ۸ ام، تقریباً ثابت می‌ماند و این رفتار بیان‌کننده تعادل دینامیک می‌باشد.
- افزایش سیکل‌های ذوب و یخ تا ۸ سیکل، باعث کاهش مقدار مدول الاستیسیته نمونه‌های تثبیت‌شده

۸. مراجع

- Bozbey, I., Kamal, N. A. and Abut, Y. 2017. "Effects of soil pulverisation level and freeze and thaw cycles on fly-ash- and lime-stabilised high plasticity clay: Implications on pavement design and performance". *Road Mater. Pavement Design*, 18(5): 1098-1116. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1207553>
- Boz, A. and Sezer, A. 2018. "Influence of fiber type and content on freeze-thaw resistance of fiber reinforced lime stabilized clay". *Cold Reg. Sci. Tech.*, 151: 359-366. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.03.026>
- Cruzda, K. A. and Hohmann, M. 1997. "Freezing effect on strength of clayey soils". *Appl. Clay Sci.*, 12(1-2): 165-187. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(97\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(97)00005-7)
- Deng, Y., Xu, C., Marsheal, F., Geng, X., Chen, Y., and Sun, H. 2021. "Constituent effect on mechanical performance of crushed demolished construction waste/silt mixture". *Constr. Build. Mater.*, 294: 123567. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123567>
- Ding, M., Zhang, F., Ling, X. and Lin, B. 2018. "Effects of freeze-thaw cycles on mechanical properties of polypropylene fiber and cement stabilized clay". *Cold Reg. Sci. Tech.*, 154: 155-165.
- Donrak, J., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Kou, H., Chinkulkijniwat, A. and Hoy, M. 2020. "Wetting-drying cycles durability of cement stabilised marginal lateritic soil/melamine debris blends for pavement applications". *Road Mater. Pavement Design*, 21(2): 500-518. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1506816>
- Eskişar, T., Altun, S. and Kalıpcılar, I. 2015. "Assessment of strength development and freeze-thaw performance of cement treated clays at different water contents". *Cold Reg. Sci. Tech.*, 111: 50-59. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.12.008>
- Guzman, E. M. B., Stafford, D., Alfaro, C., Doré, G. and Arenson, L. U. 2018. "Large-scale direct shear testing of compacted frozen soil under freezing and thawing conditions". *Cold Reg. Sci. Tech.*, 151: 138-147. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.03.011>
- Han, Y., Wang, Q., Wang, N., Wang, J., Zhang, X., Cheng, S. and Kong, Y. 2018. "Effect of freeze-thaw cycles on shear strength of saline soil". *Cold Reg. Sci. Tech.*, 154: 42-53. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.06.002>
- Hotineanu, A., Bouasker, M., Aldaoud, A. and Al-Mukhtar, M. 2015. "Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays". *Cold Reg. Sci. Tech.*, 119: 151-157. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.08.008>
- Ismeik, M. and Shaqour, F. 2020. "Effectiveness of lime in stabilising subgrade soils subjected to freeze-thaw cycles". *Road Mater. Pavement Design*, 21(1): 42-60. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1479289>
- Kamei, T., Ahmed, A. and Shibi, T. 2012. "Effect of freeze-thaw cycles on durability and strength of very soft clay soil stabilised with recycled Bassanite". *Cold Reg. Sci. Tech.*, 82: 124-129. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.05.016>
- Kianimehr, M., Shourijeh, P. T., Binesh, S. M., Mohammadinia, A. and Arulrajah, A. 2019. "Utilization of recycled concrete aggregates for light-stabilization of clay soils". *Constr. Build. Mater.*, 227: 116792.
- Li, L., Shao, W., Li, T. and Cetin, B. 2014. "Effects of climatic factors on mechanical properties of cement and fiber reinforced clays". *Geotech. Geol. Eng.*, 33(3): 537-548. <https://doi.org/10.1007/s10706-014-9838-4>
- Lu, Y., Liu, S., Zhang, Y., Li, Z. and Xu, L. 2020. "Freeze-thaw performance of a cement-treated expansive soil". *Cold Reg. Sci. Tech.*, 170: 102926.
- Qi, J., Ma, W. and Song, C. 2008. "Influence of freeze-thaw on engineering properties of a silty soil". *Cold Reg. Sci. Tech.*, 53(3): 397-404. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.05.010>
- Simonsen, E., Janoo, V. C. and Isacsson, U. 2002. "Resilient properties of unbound road materials during seasonal frost conditions". *J. Cold Reg. Eng.*, 16(1): 28-50. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-381X\(2002\)16:1\(28\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-381X(2002)16:1(28))

- Soeizi, H., and Ardakani, A. 2023. "Use of concrete waste and blast furnace slag in the stabilization of low plasticity clay soil". *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 9(1): 57-75. doi: 10.22075/jtie.2023.29836.1633
- Tang, L., Cong, S., Geng, L., Ling, X. and Gan, F. 2018. "The effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of expansive soils". *Cold Reg. Sci. Tech.*, 145: 197-207. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.10.004>.
- Tavakol, M., Kulesza, S., Jones, C., and Hossain, M. 2020. "Effect of low-quality recycled concrete aggregate on stabilized clay properties". *Journal of materials in civil engineering*, 32(8): 04020196. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.000326](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000326)
- Unified Facilities Criteria (UFC) Soil Stabilization for Pavements. 2004. October.
- Viklander, P., and Eigenbrod, D. 2000. "Stone movements and permeability changes in till caused by freezing and thawing". *Cold Reg. Sci. Tech.*, 31(2): 151-162. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(00\)00009-4](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(00)00009-4)
- Wang, J. C. H., Xu, X. Z. and Wang, Y. J. 1996. "Thermal sieve effect and convectional migration of soil particles during unidirectional freezing". *J. Glaciol. Geocryol.*, 18(3): 252-255.
- Wang, D. Y., Ma, W., Niu, Y. H., Chang, X. X. and Wen, Z. 2007. "Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay". *Cold Reg. Sci. Tech.*, 48(1): 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2006.09.008>
- Wang, X., Yang, P., Wang, H. and Dai, H. 2009. "Experimental study on effects of freezing and thawing on mechanical properties of clay". *Chin. J. Geotech. Eng.*, 31(11): 1768-1772.
- Wang, W., Qin, Y., Lei, M. and Zhi, X. 2017. "Effect of repeated freeze-thaw cycles on the resilient modulus for fine-grained subgrade soils with low plasticity index". *Road Mater. Pavement Design*". <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1283352>
- Xu, X., Zhang, W., Fan, C., Ying Lai, Y. and Wu, J. 2019. "Effect of freeze-thaw cycles on the accumulative deformation of frozen clay under cyclic loading conditions: Experimental evidence and theoretical model". *Road Mater. Pavement Design*, <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1696221>
- Yarbasi, N., Kalkan, E., and Akbulut, S. 2007. "Modification of the geotechnical properties, as influenced by freeze-thaw, of granular soils with waste additives". *Cold Reg. Sci. Tech.*, 48(1): 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2006.09.009>