

EXTENDED ABSTRACT

Laboratory Evaluation of Stabilization of Clay Soil with Recycled Concrete Materials for Road Construction Layers

Javad Shamsi Sosahab, Alireza Ardakani *, Mahmoud Hassanlourad

Faculty of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

Received: 08 May 2023; **Reviewed:** 09 September 2023; **Accepted:** 17 September 2023

Keywords:

Clay subgrade, Recycled Concrete Aggregate (RCA), Uniaxial compressive strength, CBR.

1. Introduction

Expansive soils are considered as problematic soils due to their high swelling and shrinkage potential and low bearing capacity. Cracks are usually observed in the structures based on this type of soil, which causes the instability of the structure and large settlements in the structure. Due to the scarcity of land and the rapid progress of construction, engineers have focused on construction on such soils. These lands require soil stabilization with the help of various additives to improve the subgrade and the strength characteristics of weak soils.

Soil stabilization is a technique that is used to improve and treat soil engineering properties such as strength, stiffness and compressibility of the unfavorable soil in site. Subgrade improvement using mechanical and chemical techniques is very common in transportation infrastructure projects. Although natural materials are mainly used for mechanical stabilization of subgrade soil, there is limited past studies on the relationship with the use of RCA in subgrade soil stabilization.

In this research, the behavior of clay subgrade soil stabilized with recycled concrete aggregate (RCA) and granulated blast furnace slag (GBS) as a chemical stabilizer for use in rigid and flexible pavements has been evaluated. At first, proctor compaction, uniaxial compressive strength and California bearing ratio tests have been conducted on different combinations of clay, RCA and GBS in order to reach the optimum additive content. RCA and GBS additives have been used in order to achieve the target uniaxial strength (28-day minimum strength of 1379kPa and 1724kPa for rigid and flexible pavements, respectively) as suggested by UFC for stabilized subgrade layers.

2. Methodology

2.1. Experimental study

This research used laboratory tests to investigate the suitability of RCA for clay subgrade soil stabilization. The soil used in this research was taken from the western part of Zanjan city, Iran. The measured clay liquid limit was 65, and the plasticity index was 33. Based on the AASHTO classification system, the clay was classified as an A-7-5 soil, and according to the Unified Soil Classification System, it was high plasticity clay (CH). The C&D materials consisted of concrete waste and recycled concrete aggregate (RCA) are obtained from it. RCA waste obtained from the demolition of low-rise buildings in Zanjan city. The RCA waste is transferred to the transformation site and the large concrete pieces are crushed by the crusher. After completing the

transformation process, concrete materials are obtained in the range of 0-6, 6-12, 12-19 and 19-25mm. The slag used in this research is the type of granulated blast furnace slag (GBS), which was extracted from Esfahan Steel Company, Iran. The grain size distribution for the used materials is shown in Fig. 1.

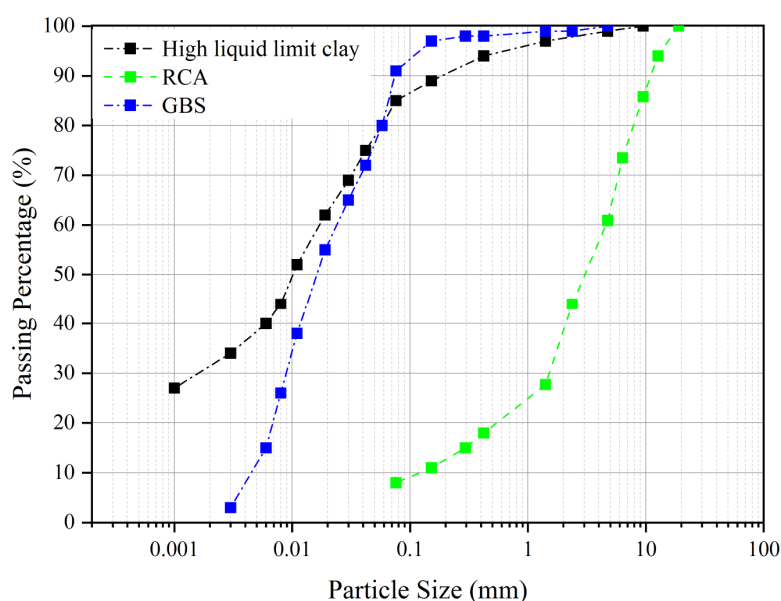


Fig. 1. Particle size distribution curves of the tested clay, RCA and GBS

2.2. Testing procedure

The standard Proctor test according to ASTM D698 is performed for different combinations in order to reach the optimum moisture content (OMC) and the maximum dry unit weight (MUW), which is required for the preparation of samples for uniaxial compressive Strength (UCS) and CBR tests. According to ASTM D2166, a standard UCS specimen is cylindrical with a diameter of 71mm and a height of 142mm (i.e., a 2:1 ratio) and the samples were compacted in 5 layers in order to reach the MUW and OMC. To investigate the effect of curing age on the stabilized samples, the samples should be maintained in a closed space carefully. Hence, the clay-RCA and clay-RCA-GBS mixtures were cured in a humid chamber (with a relative humidity of 80% to 90% and temperature between 20° to 23°C) for 3, 7 and 28 days. CBR tests are also performed according to ASTM D1883 on different combination. The specimens were compacted to the MUW and OMC of untreated soil and stabilized clay-RCA mixtures with 0%, 3%, 6%, 9%, and 12% GBS contents in five layers in a mold with a diameter of 152.4mm and a height of 177.8mm. After the 7-day moist cured samples were immersed in water for 96 hours, they are tested under a seating pressure of 4.5 kg and a penetration rate of 1.27mm/min. The results of stress versus penetration are used to determine the CBR value.

3. Results and discussion

Adding RCA to clay increases MDD and decreases OWC. When the percentage of RCA reaches 30, the MDD of the mixture increases from 1.65g/cm³ to 1.80g/cm³ and the OWC decreases from 22.50% to 13.7%. The decrease in OWC was probably the result of lower specific surface area of the RCA than that of the clay. The increases in MDD can be attributed to the intergranular porosity ratio concept. Also, for clay treated with RCA, the addition of GBS increases MDD and decreases OWC. The increase in MDD value with the addition of GBS can be due to the higher grain density (Gs) of GBS compared to clay soil and RCA. Also, the increase of GBS content decreases the OWC of clay-RCA mixture, which is because GBS materials required less water to reach the OWC.

The soaked CBR value increases from 2.9% for untreated clay to 10.3% for stabilized clay with 30% RCA. Also, the addition of RCA to clay improved the mixture stiffness. Adding RCA create a two-phase composite consisting of hard particles in a soft matrix with overall improved composite stiffness. The increase in CBR value due to the addition of RCA aggregates may be attributed to the improved strength in clay-RCA mixtures due to improved strain compatibility between RCA particle and clay matrix.

The results of UCS and failure strain for clay-RCA mixture with different content of RCA at different curing times (3-7 and 28-days) are shown in Fig. 2. As can be seen in the figure, for all curing times, as the content of

RCA increases, the value of UCS increases up to RCA=20% and then decreases. Also, the failure strain decreases with increasing RCA content. However, the amount of increase in UCS was not enough to reach the target uniaxial strength proposed by UFC (28 days UCS value of 1379kPa and 1724kPa for rigid and flexible pavements, respectively) for stabilized subgrade/subbase layers. As a result, an additional stabilizer, such as granulated blast furnace slag (GBS), was selected to achieve the target value.

Clay soil with an optimum value of RCA=20% was used as a base study the effect of GBS different content and curing time on UCS value. UCS tests were conducted at different percentages of GBS in different curing times (3-7 and 28-days curing age) in order to determine the required content in order to reach the 28-day strength target value suggested by UFC. However, adding RCA caused considerable improvement in the UCS value of mixtures. As seen in Fig. 3, for stabilized clay with 20% RCA, UCS increased with increasing GBS content. The GBS consists of calcium-silicates; hydration of GBS occurs to form cementitious gels of hydrated calcium silicates and calcium hydroxide. Cementitious gels strengthen and bind the bonds between clay-RCA mixtures and form a hardened skeleton matrix. The results showed a slight decrease in UCS values for clay-RCA mixtures stabilized with 12% GBS compared with mixtures stabilized with 9% GBS. The drop in UCS value may have been due to drying-induced microcracking and excess amounts of GBS will behave as low-strength filler that weakens the clay-RCA mixture

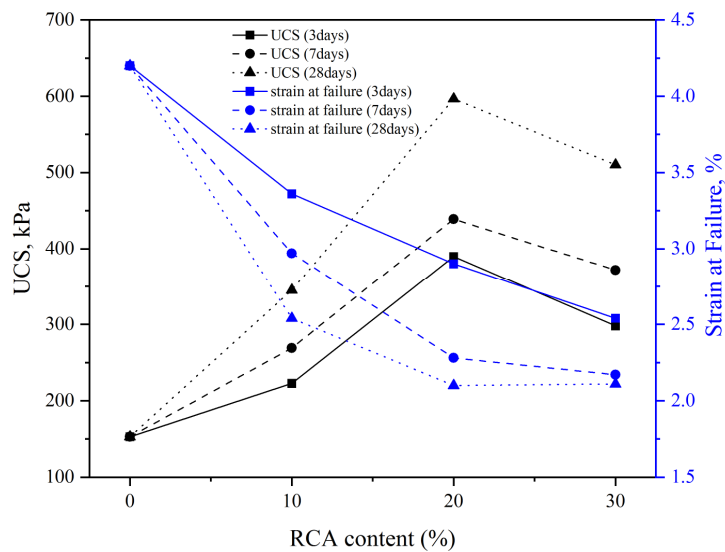


Fig. 2. UCS and strain at failure for soils with different percentages of RCA

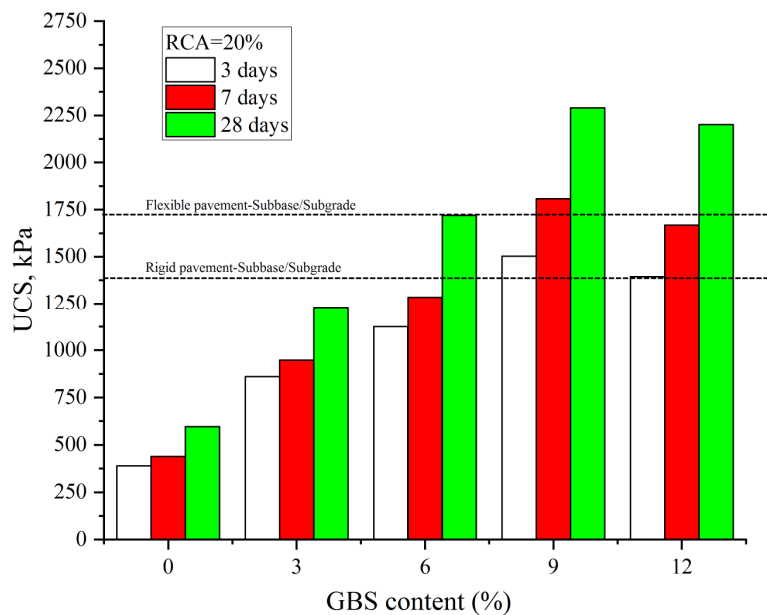


Fig. 3. UCS of clay-20%RCA mixture with GBS different content at different curing times, and limits of UFC for subgrade stabilization

4. Conclusions

The main purpose of this study is to use construction and demolition (C&D) wastes to improve the strength of clay subgrade, and GBS chemical stabilizer has been used to achieve this aim as best as possible. The obtained results showed that as RCA content increased, UCS values increased for clay subgrade with up to 20% RCA content and decreased after that. The use of GBS additive significantly improved the mechanical properties of subgrade soil, transforming it into an appropriate subgrade material. Significant increases in UCS and CBR were found in clay-20%RCA mixture stabilized with GBS.

ارزیابی آزمایشگاهی تثبیت خاک رسی به کمک مصالح بتن بازیافتی به منظور استفاده در لایه‌های راهسازی

جواد شمسی سوسه‌ب¹، علیرضا اردکانی^{2*}، محمود حسنلوراد²

¹ دانشجوی دکتری خاک و پی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ع)

² دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ع)

دریافت: 1402/2/18، بازنگری: 1402/6/18، پذیرش: 1402/6/26، نشر آنلاین: 1402/6/26

چکیده

به دلیل ساخت و سازهای گسترده در شهرها، تولید ضایعات ناشی از ساخت و ساز افزایش یافته است. یکی از این ضایعات، دانه‌های بتن بازیافتی می‌باشد که به عنوان مصالح جایگزین برای منابع طبیعی در پروژه‌های راهسازی استفاده می‌شود. همچنین ضایعات به دست آمده از کارخانه‌های آهن و فولاد به صورت سرباره کوره آهن گدازی می‌تواند باعث آسیب به محیط زیست شود. استفاده از چنین مصالحی در پروژه‌های راهسازی می‌تواند راه حلی برای حل مخاطرات زیست‌محیطی ناشی از دفع آن‌ها باشد. در این تحقیق، خاک رس جاده فرودگاه شهر زنجان مورد بررسی قرار گرفته است که از نوع رس با خاصیت خمیری بالا می‌باشد و مصالح بتن بازیافتی استفاده شده نیز از مصالح ضایعاتی ساختمان‌های کم‌طبقه شهر زنجان استخراج شده است. یک سری مطالعات آزمایشگاهی شامل آزمایش‌های تراکم، مقاومت فشاری تک‌محوری و نسبت باربری کالیفرنیا بر روی خاک رس تثبیت شده انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش محتوای بتن بازیافتی تا 20 درصد، مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری افزایش پیدا می‌کند و سپس سبب کاهش پیدا می‌کند. خاک بستر رسی تثبیت شده با 20 درصد مصالح بتن بازیافتی به ازای سرباره کوره آهن گدازی معیار پیشنهادی UFC را برآورده می‌کند. همچنین نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که برای ترکیب بهینه، به ازای درصد‌های مختلف سرباره کوره آهن گدازی، افزایش سیکل‌های ذوب و یخ می‌تواند باعث کاهش مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری در محدوده 32 تا 53 درصد گردد. نتایج حاصله نشان داد که اضافه کردن مصالح بتن بازیافتی و سرباره کوره آهن گدازی می‌تواند تأثیر مثبتی را بر روی ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های بستر رسی ایجاد کند.

کلیدواژه‌ها: خاک رس بستر، دانه‌های بتن بازیافتی، مقاومت فشاری تک‌محوری، نسبت باربری کالیفرنیا، سیکل ذوب و یخ.

1- مقدمه

در قرن 21ام، لزوم توسعه پایدار در مواجهه با پدیده‌های غیرقابل اجتناب همانند گرمایش زمین و تغییرات آب و هوایی بیشتر از گذشته احساس شده است. تولید و استفاده روزافزون از مصالح ساختمانی باعث ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی شده است که این مسئله را به یک معضل جهانی تبدیل کرده است. این موضوع را می‌توان از سه دیدگاه مختلف زیر مورد تحلیل قرار داد: (1) اکتشاف، معدن‌کاری و تولید مصالح ساختمانی طبیعی نیازمند مصرف انرژی مخصوصاً برای سوخت‌های فسیلی می‌باشد که این مسئله باعث انتشار کربن و دیگر گازهای گلخانه‌ای زبان‌آور می‌گردد (Akhtar و Sarmah, 2018; Disfani و همکاران, 2014).

خاک‌های متورم شونده به دلیل پتانسیل تورمی و انقباض بالا و ظرفیت باربری کم، به عنوان خاک‌های ضعیف محسوب می‌شوند. عمدتاً ترک‌هایی در سازه‌های مستقر بر روی این نوع خاک‌ها مشاهده می‌گردد که باعث ناپایداری سازه و ایجاد نشست‌های زیاد در آن می‌گردد. به دلیل کمبود زمین و پیشرفت سریع ساخت و سازها، مهندسی بر ساخت و ساز در روی چنین خاک‌هایی تمرکز کرده‌اند. ساخت پل‌ها، راه‌ها، دیوارهای حائل و خاکریزها بر روی خاک‌های ضعیف بسیار چالش می‌باشد. این زمین‌ها نیاز به تثبیت به کمک افزودنی‌های مختلف برای بهبود بستر و ویژگی‌های مقاومتی خاک‌های ضعیف می‌باشد.



خاک‌های متورم بهسازی شده در مناطق یخ‌زده فصلی، از بسیاری از افزودنی‌ها استفاده شده است.

Jafari و Esna-ashari (2012) چندین آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری به‌منظور بررسی تأثیر سیکل‌های ذوب و یخ در خاک‌های رسی تثبیت‌شده به کمک آهک و خرده لاستیک انجام دادند (Jafari و Esna-ashari، 2012).

Hotineanu و همکاران (2015) به بررسی تأثیر محتوای آهک و زمان عمل‌آوری بر روی مقاومت تورمی ناشی از یخ‌زدگی و فشار تورمی بر روی دو نوع خاک رسی متورم شونده پرداختند. Lu و همکاران (2020) یک سری مطالعات آزمایشگاهی بر روی تأثیر استفاده از سیمان در رفتار مقاومتی خاک‌های متورم شونده تحت سیکل‌های ذوب و یخ انجام دادند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که استفاده از سیمان باعث افزایش مقاومت تک‌محوری و مدول برجهندگی و کاهش کرنش گسیختگی می‌گردد.

Chan و Poon (2006) دریافتند که مصالح RCA باعث افزایش محتوای رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص خشک ماکزیمم مصالح بستر می‌گردند و مقادیر نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) مصالح زیراساس در حالت خشک و اشباع در حالت 100 درصد RCA کمتر از مقادیر CBR⁶ مصالح زیراساس طبیعی می‌باشد. Cetin و Brooks (2012) در رابطه با کاهش ضخامت لایه‌های روسازی به‌دلیل افزودن مصالح ساخت‌وساز و تخریب و سیمان به خاک ضعیف محل گزارشی را ارائه دادند که این فرآیند باعث بهبود عملکرد لایه‌های بستر و زیراساس بزرگراه‌ها می‌شود. Arulrajah و همکاران (2013) در رابطه با پنج نوع مختلف از مصالح C&D بازیافتگی مطالعاتی را انجام دادند و پارامترهای اساسی آن‌ها همانند پارامترهای مقاومت برشی، مدول برجهندگی و تغییر شکل‌های دائمی را بررسی کردند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مصالح RCA معادل یا بهتر از مصالح زیراساس طبیعی می‌باشند.

Cabalar و همکاران (2019) مخلوط رس و RCA را مورد ارزیابی قرار دادند و نشان دادند که اضافه کردن رس به مصالح بتن بازیافتی سبب شنی، باعث افزایش محتوای رطوبت بهینه می‌شود و مقدار وزن مخصوص خشک ماکزیمم مخلوط رس و RCA تا یک مقدار مشخصی از محتوای رس افزایش می‌یابد و بعداً کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین دریافتند که اضافه کردن رس به مصالح RCA باعث افزایش جذب انرژی می‌گردد که این مسئله می‌تواند باعث بهبود پاسخ روسازی به بارهای دینامیکی شدید گردد.

(2) منابع ساختمانی طبیعی محدود می‌باشند و استفاده بیش از حد از آن‌ها می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیری را در پی داشته باشد (Agrela و همکاران، 2012).

(3) انبارش ضایعات ساخت‌وساز و تخریب (C&D)¹ در محیط بیرون باعث آلودگی و معضلات محیط زیستی می‌گردد (Jiménez و همکاران، 2012). دانه‌های بتن بازیافتی (RCA)² یکی از تولیدات سازه‌های بتنی و تخریب‌های روسازی می‌باشد (Kang و McNeil، 2013). در سال‌های اخیر استفاده از مصالح ساخت‌وساز و تخریب در شاخه‌های مختلف مهندسی عمران همانند راه‌ها، خاکریزها، پشت لوله‌های مدفون و مصالح پشت دیوار حائل مورد استفاده قرار می‌گیرند.

تثبیت خاک³ تکنیکی می‌باشد که برای بهبود و اصلاح ویژگی‌های مهندسی خاک همانند مقاومت، سختی و تراکم‌پذیری خاک نامطلوب محل مورد استفاده قرار می‌گیرد (Zhang و همکاران، 2020). بهسازی خاک بستر به کمک روش‌های مکانیکی و شیمیایی در پروژه‌های زیربنایی حمل‌ونقل بسیار رایج می‌باشد (Chakrabarti و Kodikara، 2003).

با وجود این‌که عمدتاً از مصالح طبیعی برای تثبیت مکانیکی خاک بستر استفاده می‌شود، مطالعات گذشته محدودی در رابطه با استفاده از مصالح بتن بازیافتی در تثبیت خاک بستر وجود دارد. آیین‌نامه UFC⁴ برای خاک‌های تثبیت‌شده به‌منظور استفاده در لایه‌های بستر و زیراساس مقدار حداقل مقاومت فشاری تک‌محوری 28 روزه 1379 کیلوپاسکال و 1724 کیلوپاسکال را به ترتیب برای روسازی‌های صلب و انعطاف‌پذیر پیشنهاد می‌کند (UFC، 2004).

مواد سیمانی همانند آهک و سیمان می‌توانند به‌عنوان تثبیت‌کننده‌های شیمیایی خاک بستر به‌منظور رسیدن به مقاومت هدف تحت بارگذاری‌های ترافیکی روسازی‌ها استفاده شود. به هر حال به‌منظور به حداقل رساندن تأثیرات محیط زیستی مرتبط با آهک و سیمان، همانند مصرف انرژی، مصرف منابع غیرقابل تجدید و انتشار گاز CO₂، از یک سری مصالح سیمانی جایگزین همانند خاکستر بادی، سرباره کوره آهن‌گدازی، غبار کوره سیمان و غیره برای تثبیت خاک‌ها استفاده می‌شود (Cai و همکاران، 2019).

در مناطق یخ‌زده فصلی، خاک‌های متورم شونده غالباً تحت تأثیر سیکل‌های ذوب و یخ⁵ قرار دارند. تغییرات مکانیکی و ترک‌خوردگی در خاک‌های متورم شونده تحت تأثیر سیکل‌های ذوب و یخ مورد توجه بسیاری قرار گرفته است (Lu و همکاران، 2016، 2019). اخیراً در ساخت بسیاری از پروژه‌ها بر روی

4. Unified Facilities Criteria

5. Freezing-Thawing cycles (F-T cycles)

6. California bearing ratio

1. Construction and demolition (C&D) waste

2. Recycled concrete aggregate

3. Soil stabilization

مطالعاتی را به صورت آزمایشگاهی انجام دادند. مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط آن‌ها شامل آزمایش‌های تراکم، مقاومت فشاری تک‌محوری، CBR و مدول برجهندگی بر روی مخلوط‌های خاک و FLF می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان داد که افزودن FLF باعث افزایش ویژگی‌های مکانیکی در هر دو خاک رسی و ماسه‌ای می‌گردد. همچنین مقدار CBR برای مخلوط رس و FLF می‌تواند تا 44 درصد و برای مخلوط ماسه و FLF تا 140 درصد بهبود پیدا کند و مقدار تورم به دست آمده از آزمایش CBR برای هر دو نوع خاک روندی کاهش دارد. در این تحقیق قصد داریم به بهسازی خاک رسی با خاصیت خمیری بالا به کمک مصالح بتن بازیافتی (RCA) سایز شنی بپردازیم تا بتوانیم مشکل این خاک‌های مسئله‌دار را که به وفور در طبیعت یافت می‌شوند، به منظور استفاده در لایه‌های مختلف راهسازی حل کنیم. همچنین در کشور ایران نیز به دلیل وجود کارخانه‌های فولاد و ذوب آهن، تولید سرباره‌های کوره آهن‌گدازی³ (GBS) به وفور اتفاق می‌افتد که در این تحقیق به استفاده از این تثبیت کننده شیمیایی به منظور دستیابی به اهداف طراحی استفاده شده است. تاکنون مطالعات شاخصی بر روی خاک رسی با خاصیت خمیری بالا تثبیت شده به کمک مصالح بتن بازیافتی (RCA) صورت نگرفته است و رفتار مقاومتی خاک رسی تثبیت شده با مصالح بتن بازیافتی (RCA) تحت تأثیر سیکل‌های ذوب و یخ بررسی نشده است.

در این تحقیق، رفتار خاک رس با خاصیت خمیری بالا تثبیت شده به کمک مصالح بتن بازیافتی (RCA) به عنوان تثبیت کننده مکانیکی و سرباره کوره آهن‌گدازی (GBS) به عنوان تثبیت کننده شیمیایی به منظور استفاده در لایه‌های بستر روسازی‌های صلب و انعطاف‌پذیر مطابق پیشنهاد UFC مورد ارزیابی قرار گرفته است. آزمایش‌های تراکم، تک‌محوری و نسبت باربری کالیفرنیا بر روی ترکیبات مختلف افزودنی به منظور رسیدن به محتوای بهینه انجام شده است تا در جهت بهبود و تثبیت ویژگی‌های مکانیکی خاک رسی اقدام گردد. همچنین آزمایش‌های تک‌محوری بر روی ترکیب بهینه در مدت عمل‌آوری هفت روزه به منظور بررسی تأثیر سیکل ذوب و یخ انجام شده است. در انتها رابطه همبستگی بین مقدار مدول الاستیسیته سکانت و مقاومت فشاری تک‌محوری ارائه گردید و نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج دیگر محققین مورد مقایسه قرار گرفت.

Kianimehr و همکاران (2019) دریافتند که مصالح RCA در سایز ماسه ممکن است به جای تثبیت‌کننده‌های شیمیایی در خاک رسی مورد استفاده قرار گیرد. اگرچه استفاده از مصالح RCA در سایز ماسه در عملیات راهسازی زیاد مرسوم نمی‌باشد اما آن‌ها بر روی ویژگی‌های ژئوتکنیکی همانند مقاومت تک‌محوری، مقاومت برشی و نشست تمرکز کردند و دریافتند که رس اصلاح شده با 15 درصد RCA معیار طراحی لایه‌های بستر و زیرساز روسازی‌های صلب را تأمین می‌کند.

Tavakol و همکاران (2020) به ارزیابی استفاده از مصالح RCA به دست آمده از روسازی‌های ترک‌خورده برای تثبیت خاک رسی پرداختند و ویژگی‌های مهندسی مخلوط خاک رسی با پلاستیسیته کم و RCA و سه نوع تثبیت‌کننده (آهک، خاکستر بادی کلاس C، ترکیب سیمان و خاکستر بادی) مورد ارزیابی قرار دادند. آزمایش‌های انجام شده شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، انقباض خطی و نسبت باربری کالیفرنیا می‌باشد. نتایج به دست 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.

Deng و همکاران (2021) به بررسی عملکرد مکانیکی مخلوط خاک سیلتی و ضایعات ساختمانی خردشده¹ همراه با افزودنی سیمان به منظور استفاده در لایه‌های زیرساز پرداختند. نتایج به دست آمده توسط آن‌ها نشان داد که مخلوط سیلت - CDW - سیمان به منظور به دست آوردن بهترین عملکرد مهندسی باید مقدار 50 درصد CDW به عنوان درصد بهینه داشته باشد. همچنین سیمان علاوه بر ایجاد چسبندگی در مخلوط به دست آمده، تأثیر ضد فرسایشی نیز دارد.

Tabatabaie Shourijeh و همکاران (2022) به بررسی کاربرد استفاده از مصالح بتن بازیافتی (RCA) برای تثبیت خاک رس مسلح شده با فیبرهای لاستیکی و شیشه‌ای پرداختند. آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و کشش غیرمستقیم به ازای محتوای 0/5 درصد فیبر و محتوای 5، 10 و 15 درصد RCA انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که افزایش در مقدار RCA و زمان عمل‌آوری به صورت شاخصی باعث افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی در مقایسه با خاک رس خالص می‌گردد. همچنین محتوای 0/5 درصد فیبر و 10 درصد RCA بعد از 28 روز عمل‌آوری می‌تواند نیاز طراحی لایه‌های زیرساز را برآورده کند.

Lopes و همکاران (2023) در رابطه با تأثیر استفاده از سرباره کوره (FLF)² برای تثبیت خاک‌های رسی و ماسه‌ای

3. Granulated Blast furnace Slag

1. Crushed Demolished construction Wastes

2. Ladle furnace slag fines



شکل 2- دانه‌های بتن بازیافتی استفاده شده در تحقیق حاضر

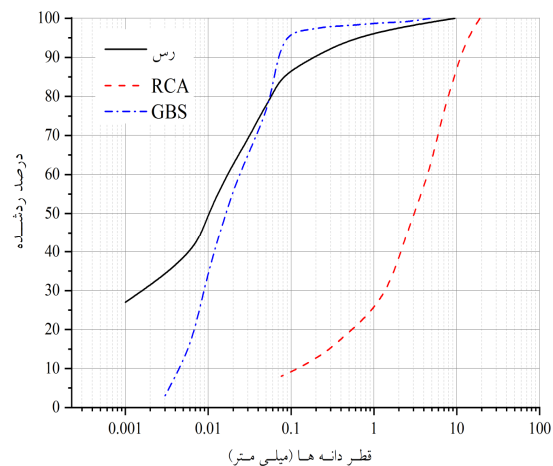
سرباره استفاده شده نیز از نوع سرباره کوره آهن‌گدازی (GBS) می‌باشد که از کارخانه ذوب‌آهن اصفهان ایران استخراج شده است. سرباره کوره آهن‌گدازی دارای سطح شیشه‌ای و ساختار ریز و کریستال مانند دارد. توزیع دانه‌بندی GBS در شکل (1) آورده شده است. سرباره کوره آهن‌گدازی دارای ویژگی‌های سیمانی ملایمی دارد و در ترکیب با آهک و سیمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. به هر حال به دلیل ماهیت هیدرولیکی سرباره و محتوای قابل ملاحظه کلسیم، در حضور آب و بدون هیچ‌گونه مصالح اضافی سخت و هیدراته می‌گردد و فرآیند هیدراسیون آن با گذشت زمان تکمیل می‌گردد. ترکیبات شیمیایی سرباره با استفاده از آزمایش XRF استخراج شده است و در جدول (2) آورده شده است.

جدول 1- ویژگی‌های فیزیکی مصالح استفاده شده در تحقیق حاضر

حاضر			ویژگی
GBS	RCA	رس	حد روانی (٪)
غیرپلاستیک	غیرپلاستیک	65	حد پلاستیک (٪)
غیرپلاستیک	غیرپلاستیک	32	شاخص پلاستیک (٪)
2/91	2/65	2/70	چگالی ویژه
--	--	22/5	رطوبت بهینه (٪)
--	--	16/5	وزن مخصوص خشک حداکثر (kN/m^3)
11/85	12/35	8/40	PH
0	39	0	شن (٪)
3	53	15	ماسه (٪)
97	5	54	سیلت (٪)
0	3	31	رس (٪)

2- ویژگی‌های مصالح

خاک استفاده شده در تحقیق حاضر از جاده فرودگاه شهر زنجان برداشت شده است و حد روانی خاک رسی 65 و شاخص خمیری آن 33 می‌باشد و طبق سیستم طبقه‌بندی یونیفاید نوع خاک رسی با خاصیت خمیری بالا (CH) و بر اساس سیستم طبقه‌بندی آستو از نوع 5-7-A می‌باشد. درصد تورم و فشار تورمی خاک رسی استفاده شده در این تحقیق به ترتیب 7/4 درصد و 180 کیلوپاسگال می‌باشند که مطابق پیشنهاد Thomas و همکاران، 2000 دارای پتانسیل تورمی زیاد می‌باشد. منحنی دانه‌بندی خاک رسی در شکل (1) آورده شده است. در جداول (1) و (2) نیز به ترتیب ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی به دست آمده از آزمایش XRF¹ ارائه شده است.



شکل 1- منحنی دانه‌بندی مصالح استفاده شده در تحقیق حاضر

مصالح حاصل از C&D شامل ضایعات بتنی می‌باشد و دانه‌های بتن بازیافتی (RCA) از آن استخراج شده است. ضایعات بتنی به دست آمده از تخریب ساختمان‌های کم طبقه شهر زنجان حاصل شده است. این ضایعات بتنی دارای ابعاد بزرگ می‌باشند و لازم است برای مطالعات آزمایشگاهی به ابعاد کوچکتر تبدیل شوند. ضایعات بتنی به محل تبدیل² منتقل می‌شوند و قطعات بتنی بزرگ توسط خردکننده³ خرد می‌شوند. بعد از تکمیل فرآیند دگرگونی، مصالح بتنی در محدوده دانه‌بندی 0-6، 6-12، 12-19 میلی‌متر به دست می‌آید. در شکل (1) منحنی دانه‌بندی مصالح بتن بازیافتی نشان داده شده است. در شکل (2) نیز مصالح بتن بازیافتی استفاده شده آورده شده است.

3. Crusher

1. X-Ray Fluorescence (XRF)
2. Transformation site

جدول 2- ترکیبات شیمیایی مصالح استفاده شده در تحقیق حاضر به دست آمده از آزمایش XRF

ترکیبات شیمیایی (درصد)	رس	RCA	GBS
SiO ₂	53/3	21/3	34/95
Al ₂ O ₃	12/66	4/63	9/54
Fe ₂ O ₃	5/46	2/82	1/14
CaO	6/26	36/7	41/20
MgO	4/40	4/93	7/33
Na ₂ O	1/04	1/03	0/81
SO ₃	0/76	0/75	3/26
K ₂ O	2/06	0/84	0/98
LOI	12/99	26/08	0/30

3- روش تهیه نمونه

به منظور تهیه ترکیبات مورد نیاز، خاک رسی و مصالح ضایعاتی RCA به صورت خشک و با استفاده از فرمول زیر با همدیگر مخلوط می شوند:

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

که در آن %RCA مصالح RCA موجود در مخلوط و m_{clay} و m_{RCA} به ترتیب وزن خشک خاک رسی و مصالح RCA می باشد. مقدار محتوای مصالح RCA استفاده شده در این تحقیق 10، 20 و 30 درصد انتخاب شده است. مجموع m_{clay} و m_{RCA} متناسب با ابعاد قالب های آزمایشگاهی استفاده شده و وزن مخصوص خشک ماکزیمم هر ترکیب لحاظ می شود. برای ترکیب هایی که دارای سرباره کوره آهن گدازی (GBS) می باشند، مشابه بالا محتوای GBS افزودنی به صورت خشک به ترکیب خاک رس و RCA مطابق فرمول زیر افزوده می شود:

$$\%GBS = \frac{m_{GBS}}{m_{clay} + m_{RCA} + m_{GBS}} \times 100 \quad (2)$$

در این فرمول نیز m_{GBS} وزن مصالح GBS استفاده شده در ترکیب می باشند که در این تحقیق محتوای 3، 6، 9 و 12 درصد مورد استفاده قرار گرفته است. در جدول (3) برنامه آزمایشات انجام شده در تحقیق حاضر ارائه شده است.

جدول 3- برنامه آزمایشات انجام شده در تحقیق حاضر

ترکیب	افزودنی RCA (درصد)	افزودنی GBS (درصد)	آزمایشات
رس خالص	10، 20 و 30	--	تراکم، UCS (3، 7 و 28 روزه)، CBR (7 روزه)
رس ⁺ 10 درصد RCA	--	3، 6، 9 و 12	تراکم، CBR (7 روزه)
رس ⁺ 20 درصد RCA	--	3، 6، 9 و 12	تراکم، UCS (3، 7 و 28 روزه)، UCS ذوب و یخ (7 روزه در سیکل های 2، 5، 8 و 12)، CBR (7 روزه)
رس ⁺ 30 درصد RCA	--	3، 6، 9 و 12	تراکم، CBR (7 روزه)

4- روش انجام آزمایش ها

4-1- آزمایش تراکم

مشابه روش های تثبیت خاک به کمک مواد افزودنی (همانند سیمان، خاکستر بادی، آهک و...)، مخلوط خاک رس و RCA نیاز به تراکم با درصد تراکمی مناسب دارد و همین مسئله نیاز به انجام آزمایش های تراکمی دقیقی دارد. مشابه تحقیقات گذشته بر روی تثبیت خاک رسی با سیمان و آهک، آزمایش تراکم بر روی خاک رسی خالص و ترکیب خاک رسی با RCA به ازای محتوای مختلف GBS مطابق استاندارد ASTM D698 انجام شده است. آزمایش های تراکم بر روی ترکیبات مختلف به منظور تعیین ماکزیمم وزن مخصوص خشک ماکزیمم (MUW)¹ و رطوبت بهینه (OMC)² خاک تثبیت نشده و خاک تثبیت شده با RCA و GBS انجام می گیرد. برای این منظور ابتدا خاک رس و RCA در نسبت های ذکر شده در بخش قبل مخلوط می شوند. در مرحله بعد آب به صورت تدریجی به مخلوط حاصله اضافه می گردد و ترکیب می گردد. مخلوط رس - RCA تهیه شده به مدت 24 ساعت توسط پلاستیک های نایلونی پوشانده می شوند تا تعادل در محتوای رطوبت بین ذرات خاک و مصالح RCA ایجاد گردد. در گام نهایی مطابق استاندارد ASTM D698 اقدام به انجام آزمایش تراکم استاندارد و تعیین مقادیر وزن مخصوص خشک ماکزیمم (MUW) و رطوبت بهینه (OMC) به منظور انجام آزمایشات تک محوری و CBR می گردد.

4-2- آزمایش CBR

استاندارد ASTM D1883 به منظور تعیین مقدار CBR نمونه های ساخته شده مورد استفاده قرار گرفته است. این آزمایشات بر روی نمونه های عمل آوری شده هفت روزه انجام شده



(الف)



(ب)

شکل 3- الف) نمونه‌های پوشیده شده توسط پلاستیک قبل از بیرون آوردن از قالب، ب) نمونه‌های ساخته شده در اتاق رطوبت به منظور عمل‌آوری

4-4- سیکل‌های ذوب و یخ

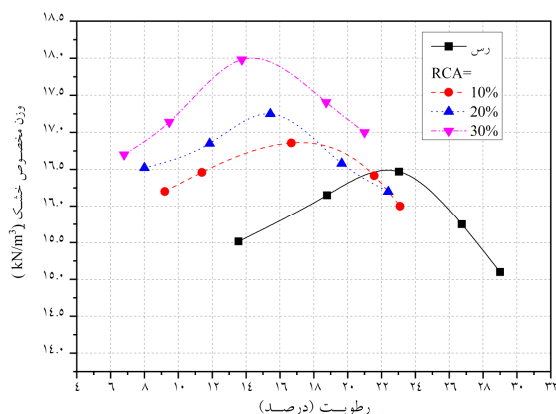
برای انجام آزمایش سیکل ذوب و یخ از یک سیستم بسته استفاده شده است. در این سیستم بسته، فرآیند یخ‌زدن² بدون ورود هیچ هوایی به داخل نمونه‌های تثبیت‌شده انجام می‌گیرد (Ding و همکاران، 2018). بعد از 7 روز عمل‌آوری، ترکیب رس- RCA به‌ازای محتوای مختلف GBS در داخل یخچال کنترل دما به منظور انجام آزمایش سیکل ذوب و یخ قرار می‌گیرد. سیکل‌های ذوب و یخ مطابق استاندارد ASTM D560 انجام می‌گیرد. در مرحله یخ‌زدن، نمونه‌ها در دمای 23- درجه و به مدت 24 ساعت به منظور یخ‌زدگی کامل قرار می‌گیرند. بعد از آن نمونه‌ها به اتاق رطوبت با دمای 23+ درجه منتقل می‌شوند تا به مدت 24 ساعت به منظور ذوب شدن بمانند. علت استفاده از دمای 23+ برای ذوب شدن و دمای 23- برای یخ زدن این است که در این دماها، رس استفاده شده در این تحقیق به یخ‌زدن و ذوب شدن کامل می‌رسد و همچنین مطابق بازدهی‌های میدانی انجام شده از محل

است که در آن نمونه‌ها در پنج لایه در داخل قالب به قطر 152/4 میلی‌متر و ارتفاع 177/8 میلی‌متر به‌ازای ترکیبات مختلف و در رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر متراکم می‌شوند. بعد از این که نمونه‌ها 7 روزه در داخل آب به مدت 96 ساعت غرقاب شدند، تحت فشار نشست¹ 4/5 کیلوگرم و در نرخ نفوذ 1/27 mm/min مورد آزمایش قرار می‌گیرند. نتایج تنش در مقابل نفوذ سمبه به منظور تعیین مقدار CBR مورد استفاده قرار می‌گیرد.

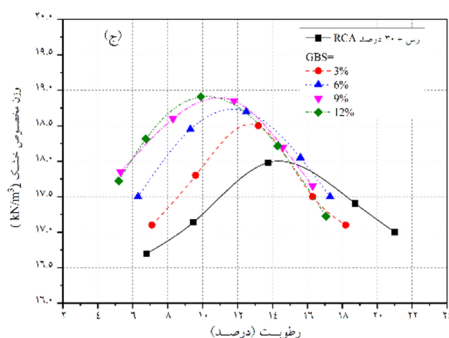
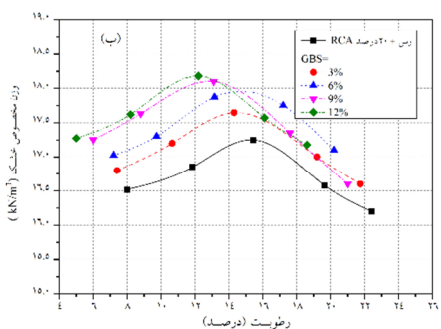
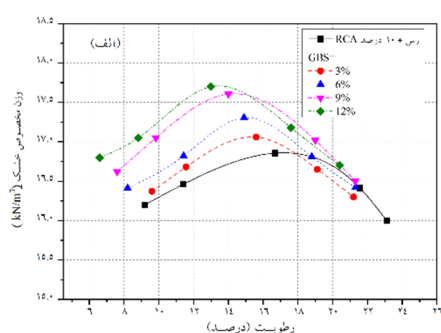
3-4- آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

به منظور انجام آزمایش تک‌محوری، ابتدا نمونه‌های رس تثبیت نشده و تثبیت‌شده با RCA به مدت 24 ساعت در داخل نایلون‌های پلاستیکی پوشانده می‌شوند تا تعادل رطوبتی بین خاک و مصالح RCA ایجاد گردد. نمونه‌ها با کنترل وزن و با استفاده از حجم قالب‌های تک‌محوری به منظور رسیدن MUW و OMC تهیه می‌شوند. مطابق استاندارد ASTM D2166، یک نمونه تک‌محوری استاندارد به صورت استوانه‌ای با ارتفاع 142 میلی‌متر و قطر 71 میلی‌متر (نسبت 2 به 1) می‌باشد. برای ترکیبات مختلف، وزن مورد نیاز برای رسیدن به وزن مخصوص ماکزیمم به‌ازای حجم مشخص به صورت لایه‌به‌لایه در 5 سطح به کمک میله فولادی صاف کوبیده شده است تا به ارتفاع مورد نظر برسد و نمونه آماده بارگذاری استاتیکی می‌گردد.

نمونه‌ها به مدت حدوداً 24 ساعت در داخل قالب نگه‌داشته شدند و توسط نایلون‌های پلاستیکی مطابق شکل (3-الف) پوشیده شدند. بعد از 24 ساعت، نمونه‌ها از داخل قالب خارج شده و مطابق شکل (3-ب) به یک اتاق رطوبت یا دمایی بین 20 تا 23 درجه و رطوبت 80 تا 90 درصد منتقل می‌شوند تا تحت عمل‌آوری قرار گیرند. بعد از این که نمونه‌ها به سن عمل‌آوری مورد نظر رسیدند (3، 7 یا 28 روزه)، فوراً تحت آزمایش قرار می‌گیرند. نمونه‌ها به صورت اتوماتیک به کمک دستگاه مقاومت فشاری با نرخ جابه‌جایی 1/3 mm/min تحت بارگذاری قائم قرار می‌گیرند. ماکزیمم بار اعمالی به نمونه قبل از این که 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 5- منحنی تراکم رس به ازای درصدهای مختلف RCA



شکل 6- منحنی تراکم رس تثبیت شده با 10 درصد RCA، (ب) 20 درصد RCA، (ج) 30 درصد RCA به ازای محتوای مختلف GBS

در این تحقیق، چون مقدار MUW خاک رسی کم و مقدار OMC زیاد می‌باشد، افزودن RCA به خاک رسی باعث افزایش مقدار MUW و کاهش OMC شده است. نتایج مشابهی توسط

لایه‌های بستر کارشده، کمترین دمای محیط تقریباً 23- درجه می‌باشد. بعد از مدت هفت روزه عمل‌آوری، مخلوط رس - RCA به ازای محتوای 0، 3، 6، 9 و 12 درصد GBS و تحت سیکل‌های ذوب و یخ 0، 2، 5، 8 و 12 قرار می‌گیرند. سیکل‌های ذوب و یخ تا 12 انجام می‌گیرند که سختی مخلوط‌های درست شده تغییرات زیادی را در محدوده 8 تا 12 سیکل از خود نشان نمی‌دهند و بخش عمده کاهش مقاومت خاک در سیکل‌های اولیه اتفاق می‌افتد و بعد از 5 تا 10 سیکل یک شرایط تعادلی جدیدی در نمونه‌ها ایجاد می‌گردد (Roustaie و Ghazavi، 2010). بعد از تکمیل فرآیند سیکل ذوب و یخ، نمونه‌ها تحت آزمایش تک‌محوری مطابق استاندارد ASTM D1633 به منظور تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری قرار می‌گیرند. در شکل (4) نمونه‌های رس تثبیت شده بعد از فرآیند یخ‌زدن نشان داده شده‌اند.

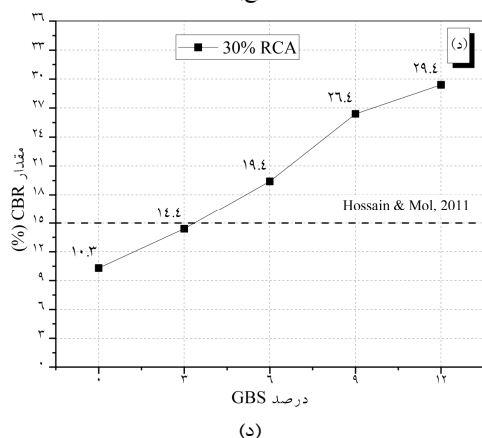
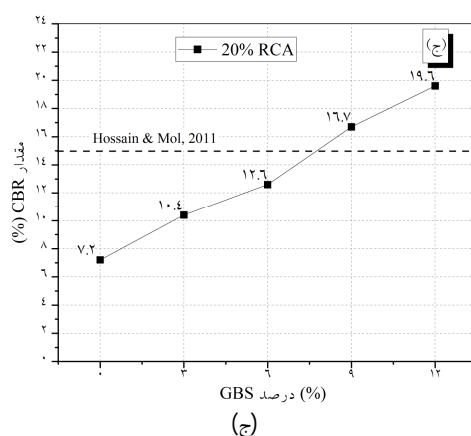
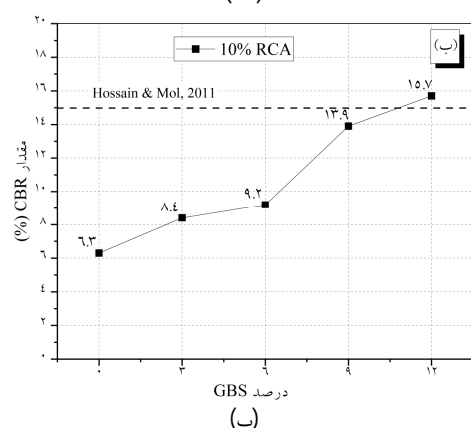
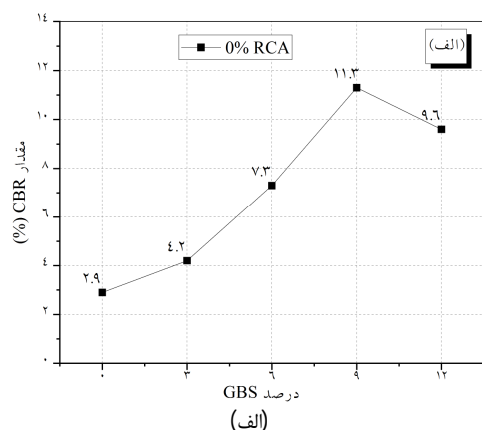


شکل 4- نمونه‌های ساخته شده بعد از فرآیند یخ‌زدن در یخچال

5- مشاهدات و نتایج آزمایش‌ها

5-1- نتایج آزمایش تراکم

در شکل (5) منحنی تراکم رس به ازای درصدهای مختلف RCA آورده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، اضافه کردن مصالح RCA به خاک رسی افزایش مقدار وزن مخصوص خشک ماکزیمم (MUW) که می‌تواند به مفهوم نسبت تخلخل بین دانه‌های برگردد و همچنین باعث کاهش محتوای رطوبت بهینه (OMC) که می‌تواند به سطح ویژه کمتر مصالح RCA نسبت به خاک رسی برگردد، منجر شده است. تغییرات MUW و OMC خاک تثبیت شده اصولاً به مقادیر MUW و OMC خاک پایه بستگی دارد. یعنی در حالتی که مقدار MUW و OMC خاک پایه کم (زیاد) باشد، در صورت اضافه کردن مصالح RCA به خاک رسی، مقادیر MUW و OMC افزایش (کاهش) می‌یابد (Ma و همکاران، 2022).



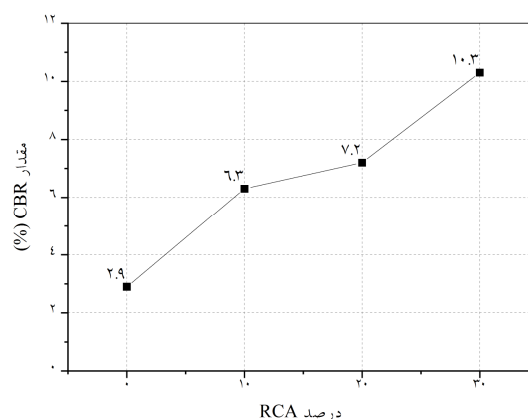
شکل 8- تغییرات مقدار CBR در مقابل محتوای GBS:

(الف) RCA=0%، (ب) RCA=10%، (ج) RCA=20%، (د) RCA=30%

محققین مختلف ارائه شده است (Cabalar و همکاران، 2019؛ Tavakol و همکاران، 2020؛ Deng و همکاران، 2021). همچنین در شکل (6-الف)، (6-ب) و (6-ج) نیز به ترتیب منحنی تراکم مخلوط رس با 10 درصد RCA، رس با 20 درصد RCA و رس با 30 درصد RCA به‌ازای محتوای مختلف GBS آورده شده است. همان‌طور که به‌وضوح دیده می‌شود، برای خاک رسی تثبیت‌شده به‌ازای درصدهای مختلف RCA، افزودن محتوای GBS نیز باعث افزایش MUW و کاهش OMC شده است. افزایش در مقدار MUW می‌تواند به‌دلیل چگالی ویژه بیشتر مصالح GBS در مقایسه با خاک رسی و RCA باشد و همچنین کاهش رطوبت بهینه می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش محتوای GBS مخلوط‌های ساخته شده به‌مقدار آب کمتری برای رسیدن به‌حالت بهینه نیاز دارند.

2-5- نتایج آزمایش CBR

آزمایش CBR یکی از آزمایش‌های آزمایشگاهی نسبتاً ساده می‌باشد که قابل تکرار، ارزان و آسان است. بسیاری از آیین‌نامه‌ها و آژانس‌ها به‌مقدار حداقل 15 درصد را برای مصالح بستر تثبیت‌شده نیاز دارند (Hossain و Mol، 2011). مقادیر CBR خاک رس تثبیت‌شده با محتوای مختلف RCA در شکل (7) نشان داده شده است. همان‌طور که مشهود است، CBR از مقدار 2/9 درصد برای رس تثبیت نشده به‌مقدار 10/3 درصد برای رس تثبیت‌شده با 30 درصد RCA افزایش می‌یابد. افزودن مصالح RCA به خاک رسی باعث بهبود سختی مخلوط کل می‌شود. مصالح RCA باعث ایجاد ترکیب دو فازي تشکیل شده از ذرات سخت در یک ماتریکس نرم، همراه با سختی ترکیب تثبیت‌شده کلی می‌گردد.



شکل 7- تغییرات مقدار CBR برای خاک رس تثبیت‌شده به‌ازای محتوای مختلف RCA

به‌ازای تمامی زمان‌های عمل‌آوری، افزایش مقدار UCS تا محتوای 20 درصد RCA وجود دارد و بعد از آن با افزایش مصالح RCA به‌دلیل کاهش سطح تماس بین رس- رس و جای‌گذاری مصالح RCA در داخل خاک رسی، چسبندگی خاک رسی کاهش می‌یابد و همین مسئله باعث کاهش مقدار UCS به‌ازای محتوای 30 درصد RCA می‌گردد. به‌رحال افزایش در مقدار UCS برای رسیدن به مقاومت هدف پیشنهادی توسط UFC برای لایه‌های بستر و زیرسازاس تثبیت‌شده کافی نمی‌باشد (مقادیر مقاومت تک‌محوری 28 روزه برای روسازی‌های صلب مقدار 1379 کیلوپاسکال و برای روسازی‌های انعطاف‌پذیر مقدار 1724 کیلوپاسکال می‌باشد). به‌عنوان یک نتیجه، از یک تثبیت‌کننده اضافی رایج همانند سرباره کوره آهن‌گدازی (GBS) به‌منظور رسیدن به مقاومت هدف استفاده شده است.

خاک رس با مقدار بهینه 20 درصد RCA به‌عنوان ترکیب پایه به‌منظور بررسی تأثیر محتوای مختلف GBS و زمان عمل‌آوری بر روی مقادیر مقاومت تک‌محوری انتخاب شده است. آزمایش‌های تک‌محوری در محتوای مختلف GBS (0، 3، 6، 9 و 12 درصد) و در زمان‌های عمل‌آوری مختلف (3، 7 و 28 روزه) به‌منظور تعیین درصد مورد نیاز برای رسیدن به مقاومت هدف پیشنهادی UFC انجام شده است.

در شکل (10) تغییرات مقدار UCS مخلوط رس تثبیت‌شده با 20 درصد RCA به‌ازای محتوای مختلف GBS و در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت ارائه شده است. همان‌که در شکل دیده می‌شود، به‌ازای تمامی زمان‌های عمل‌آوری، با افزایش محتوای GBS تا 9 درصد مقدار UCS افزایش پیدا می‌کند و بعد از آن نرخ کاهشی از خود نشان می‌دهد. در مخلوط رس و 20 درصد RCA، با گذشت زمان عمل‌آوری به‌ازای تمامی درصدهای GBS، نرخ افزایش در مقاومت فشاری تک‌محوری بیشتر می‌باشد. نتایج به‌دست آمده یک روند کاهشی ملایمی را در مقادیر UCS به‌ازای محتوای 12 درصد GBS نسبت به 9 درصد GBS نشان می‌دهند. این افت ملایم می‌تواند به‌دلیل ریزترک‌های ناشی از خشک شدن باشد و مقدار بیشتر GBS می‌تواند به‌عنوان پرکننده با مقاومت کمتر رفتار کند و باعث کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری گردد (Abu-Farsakh و همکاران، 2015).

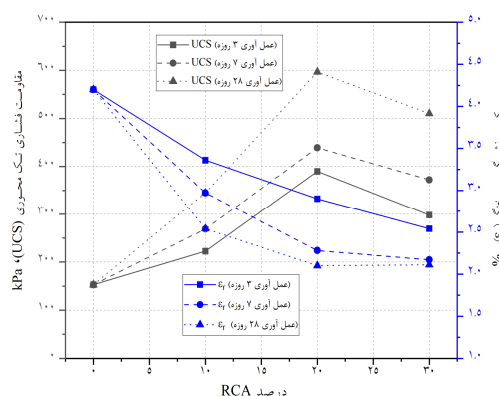
در رابطه با تحلیل افزایش مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری در حضور ضایعات RCA به‌عنوان تثبیت‌کننده مکانیکی و همچنین GBS به‌عنوان تثبیت‌کننده شیمیایی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- اندرکنش مکانیکی (تأثیر کوتاه‌مدت): به‌دلیل این‌که عمده اجزای تشکیل‌دهنده مصالح RCA از نوع مصالح طبیعی شنی می‌باشد، اضافه کردن RCA به خاک رسی باعث افزایش اصطکاک بسیج شده و افزایش در مقاومت خاک می‌گردد. پارامترهای

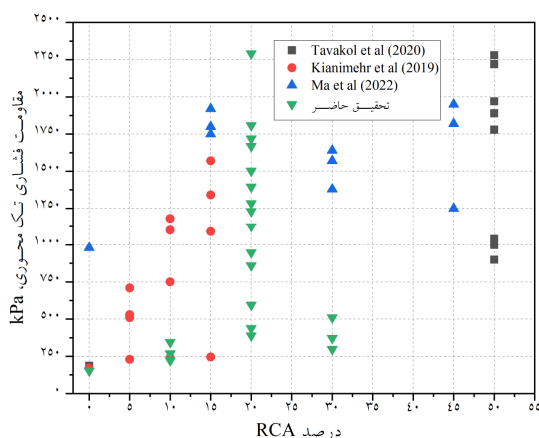
افزایش مقدار CBR به‌دلیل افزودن مصالح RCA همچنین می‌تواند به سازگاری کرنش بهبودیافته بین ماتریکس رس و RCA برگردد (Tavakol و همکاران، 2020). همان‌طور که دیده می‌شود به‌ازای ترکیبات مختلف رس و RCA حداقل مقدار مورد نیاز 15 درصد برای لایه‌های بستر تثبیت‌شده حاصل نمی‌شود. به‌منظور رسیدن به این هدف (CBR=15)، افزودنی GBS مورد استفاده قرار گرفته است.

3-5- نتایج آزمایش تک‌محوری

نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و کرنش (ϵ_r) در هنگام گسیختگی مخلوط خاک رسی به‌ازای محتوای مختلف RCA در زمان‌های عمل‌آوری 3، 7 و 28 روزه در شکل (9) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، به‌ازای تمامی زمان‌های عمل‌آوری، مقدار UCS با افزایش مقدار RCA تا محتوای 20 درصد افزایش می‌یابد و سپس کاهش پیدا می‌کند. به‌عنوان مثال برای زمان عمل‌آوری هفت روزه، مقاومت تک‌محوری با افزایش محتوای RCA از 153 کیلوپاسکال برای رس تثبیت‌نشده تا 438 کیلوپاسکال برای 20 درصد RCA افزایش می‌یابد و به‌ازای 30 درصد RCA مقدار مقاومت تک‌محوری کاهش می‌یابد. همچنین کرنش گسیختگی از مقدار حدود 4/2 درصد برای رس تثبیت‌نشده تا مقدار 2/2 درصد برای محتوای 30 درصد RCA کاهش می‌یابد. افزودن مصالح RCA باعث بهبود مقاومت خاک رسی شده است. همان‌طور که در شکل (9) مشاهده می‌شود با افزایش محتوای RCA کرنش گسیختگی کاهش می‌یابد و مخلوط حاصل بیشتر شکننده‌تر می‌گردد. با افزایش مقدار مصالح RCA در خاک رسی، سطح تماسی بین خاک و RCA بیشتر شده که این مسئله باعث افزایش مقاومت اصطکاکی سطحی و چفت‌وبست مکانیکی شده و در نتیجه باعث افزایش مقاومت تک‌محوری می‌گردد و نتایج مشابهی توسط Kianimehr و همکاران (2019) ارائه شده است.



شکل 9- نتایج مقاومت تک‌محوری و کرنش گسیختگی برای رس تثبیت‌شده به‌ازای محتوای مختلف RCA



شکل 11- تغییرات مقدار UCS در مقابل محتوای RCA در مقایسه با سایر محققین

در کار Ma و همکاران (2022) نیز خاک رسی با 15، 30 و 45 درصد از مخلوط مصالح بتن بازیافتی و آجر بازیافتی در زمان‌های عمل‌آوری 1، 7 و 28 روزه ترکیب شده است و در کار Tavakol و همکاران (2020) نیز خاک رسی به‌ازای 50 درصد از مصالح RCA به‌کمک افزودنی شیمیایی سیمان و خاکستر بادی ترکیب شده است. همان‌طور که در شکل (11) دیده می‌شود، تغییرات به‌دست آمده برای مقدار UCS در مقابل محتوای مختلف RCA در مطالعات محققین مختلف با نتایج به‌دست آمده از این تحقیق هم‌خوانی و قرابت خوبی را نشان می‌دهد.

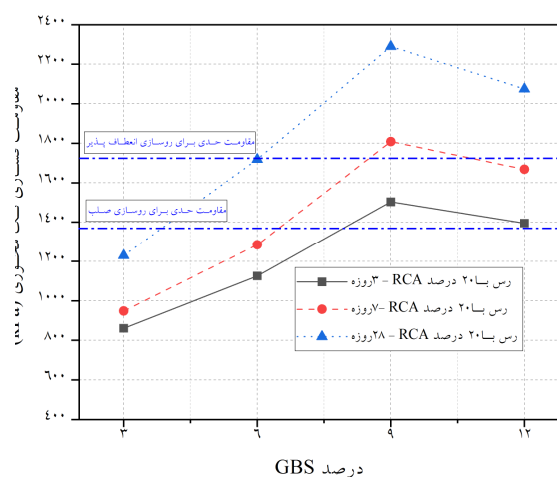
5-4- نتایج آزمایش تک‌محوری تحت سیکل ذوب و یخ

شکل (12) تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری ترکیب رس به‌ازای 20 درصد RCA در محتوای مختلف GBS در تعداد سیکل‌های ذوب و یخ متفاوت در فضای مختصاتی سه‌بعدی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، مقدار UCS با افزایش محتوای GBS افزایش و با افزایش سیکل‌های ذوب و یخ کاهش پیدا می‌کند. به‌منظور بررسی تأثیر سیکل‌های ذوب و یخ بر روی کاهش مقدار UCS، از UCS نرمال شده استفاده می‌گردد. که نسبت به مقاومت UCS ماکزیمم هر ترکیب ارائه می‌گردد. بنابراین مقدار UCS نرمال شده به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\bar{q}_u^i = \frac{q_u^i}{q_u^{\max}} \quad i=0, 2, 5, 8, 12 \quad (3)$$

که در آن i تعداد سیکل‌های ذوب و یخ، q_u^i مقدار UCS بعد از سیکل ذوب و یخ i ام و q_u^{\max} نیز مقدار UCS حداکثر هر ترکیب هست. در شکل (13) مقادیر UCS نرمال شده در مقابل تعداد سیکل‌های ذوب و یخ به‌ازای درصدهای مختلف GBS آورده شده است.

مقاومت برشی برای مخلوط رس و دانه‌های شنی به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از خاک رس خالص می‌باشد. به‌دلیل این‌که مقدار حداکثر RCA اضافه شده به خاک رسی 30 درصد می‌باشد، بنابراین می‌تواند باعث افزایش در مقاومت برشی خاک رسی گردد و همین مسئله موجب افزایش در مقدار UCS شده است و به‌ازای محتوای 20 درصد RCA بیشترین مقدار UCS حاصل شده است. - اندرکنش شیمیایی (تأثیر بلندمدت): با افزودن GBS و با گذشت زمان و فرآیند عمل‌آوری، یون‌های Ca^{2+} موجود در GBS با کاتیون‌های موجود در خاک رسی (همانند Na^+) تبادل یونی انجام می‌شود و همین فرآیند که ممکن است در ساعت‌های اولیه اختلاط حادث شود، باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه ذرات رس می‌گردد. با گذشت زمان بیشتر، هیدراتاسیون سیمانی همانند CSH (هیدرات سیلیکات کلسیم) و CAH (هیدرات آلومینا کلسیم) تشکیل می‌شود. با توجه به مقادیر PH ارائه شده در جدول (1) برای مصالح مختلف، با افزودن مصالح RCA و GBS ترکیب حاصله قلیایی می‌گردد و همین مسئله باعث می‌شود محیطی مناسب برای واکنش‌های پوزولانی و تبادل یونی بهتر ایجاد گردد. در نتیجه با توجه به شکل (10) ترکیباتی که مقدار مقاومت هدف پیشنهادی توسط UFC برای روسازی‌های صلب و انعطاف‌پذیر را برآورده می‌کنند، مشخص می‌باشد.



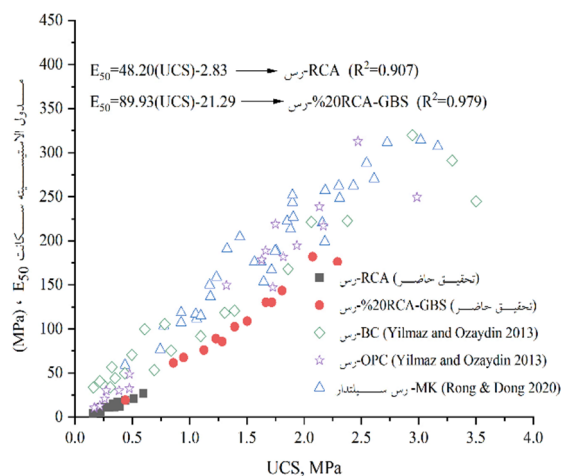
شکل 10- تغییرات مقاومت تک‌محوری رس تثبیت شده با 20 درصد RCA به‌ازای محتوای مختلف GBS در زمان‌های عمل‌آوری مختلف و حدود UFC

در شکل (11) تغییرات مقدار UCS در مقابل محتوای RCA به‌ازای افزودنی‌های مختلف برای این تحقیق و در مقایسه با مطالعات سایر محققین ارائه شده است. در تحقیق Kianimehr و همکاران در سال (2019)، خاک رسی با محتوای 5، 10 و 15 درصد از مصالح RCA سایز ماسه و به‌ازای زمان‌های عمل‌آوری 7، 14 و 28 روزه قرار گرفته است.

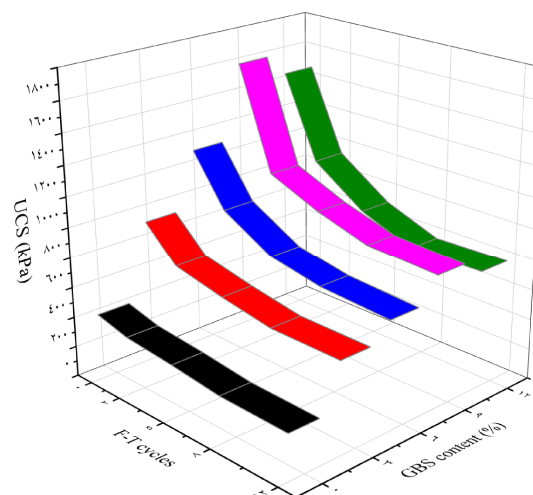
یخی ذوب شده و موقعیت ذرات نمونه نسبتاً ثابت می ماند. بعد از تکمیل سیکل های ذوب و یخ، فضاها و ترک های جدید بسیاری در داخل نمونه ایجاد می گردد که این فرم و ساختار جدید می تواند بر روی ویژگی های مکانیکی ترکیبات مختلف تأثیر بگذارد. مقادیر کاهش مقاومت در ترکیبات مختلف برای تعداد 12 سیکل ذوب و یخ در محدوده 32 تا 53 درصد می باشد. نتایج مشابهی بر روی نمونه های رسی تثبیت شده با افزودنی های شیمیایی توسط محققین مختلف ارائه شده است. در تحقیق Kamei و همکاران (2012) در ترکیب رس نرم به ازای محتوای 20 درصد بازائیت، تقریباً 48 درصد کاهش مقاومت تک محوری بعد از سیکل 5 ام ذوب و یخ مشاهده شده است و همچنین در تحقیق LU و همکاران (2020) به ازای محتوای 7 درصد سیمان در خاک رس متورم شونده، بعد از سیکل 7 ام ذوب و یخ حدود 60 درصد کاهش مقاومت تک محوری مشاهده شده است.

4-5- مدول الاستیسیته سکانت

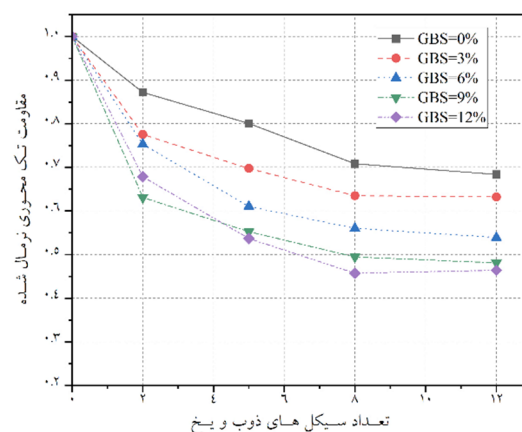
مدول الاستیسیته سکانت (E_{50}) به صورت شیب خط اتصالی از مرکز منحنی تنش- کرنش به نقطه ای با مقدار 50 درصد مقاومت فشاری تک محوری تعریف می گردد. مقدار E_{50} برای مخلوط خاک رس و RCA و برای مخلوط رس و 20 درصد RCA به ازای محتوای مختلط GBS در مقابل مقادیر UCS در شکل (14) آورده شده است. همان طور که دیده می شود یک همبستگی خوبی (0/91) برای مخلوط رس و RCA و (0/98) برای مخلوط رس با 20 درصد RCA به ازای محتوای مختلف GBS بین UCS و E_{50} دیده می شود. Yilmaz و Ozaydin (2013) نسبت بین UCS و E_{50} برای ترکیب رس و سیمان بلیت (BC) و ترکیب رس و سیمان پرتلند معمولی (OPC) به ترتیب برابر با 79 و 107 ارائه کردند.



شکل 14- همبستگی بین مدول الاستیسیته سکانت و UCS و مقایسه با نتایج محققین دیگر



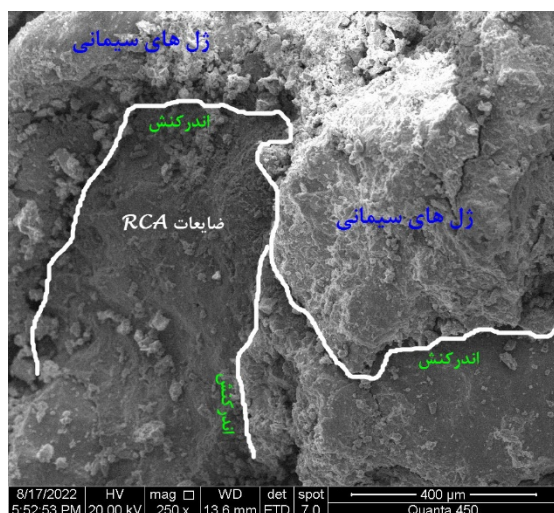
شکل 12- تغییرات UCS ترکیب رس با 20 درصد RCA به ازای محتوای مختلف GBS در سیکل های ذوب و یخ مختلف



شکل 13- تغییرات مقدار UCS نرمال شده نسبت به تعداد سیکل های ذوب و یخ در محتوای مختلف GBS

همان طور که دیده می شود، مقادیر UCS نرمال شده به ازای تمامی درصد های GBS با افزایش تعداد سیکل های ذوب و یخ کاهش پیدا می کند و همان طور که به وضوح مشهود است، بیشترین مقادیر کاهش مقاومت در سیکل های اولیه اتفاق می افتد و بیشترین نرخ کاهش مقاومت مربوط به محتوای 12 درصد GBS می باشد. این کاهش مقاومت احتمالاً به دلیل تغییرات ساختاری در خاک رس تثبیت شده می باشد. در طول فرآیند یخ زدن، آب حفره ای به کریستال های یخی تبدیل می شود و حجم نمونه افزایش پیدا می کند (LU و همکاران، 2020). در ترکیبات رس تثبیت شده با RCA و به ازای مقادیر مختلف GBS، باند سیمانی بین ذرات خاک و ذرات خاک با مصالح RCA و GBS شکسته می شود و توسط کریستال های یخی جدا می گردد. وقتی دمای نمونه به بالای صفر درجه افزایش می یابد، این کریستال های

SEM نشان داده شده در شکل (16)، باند و چسبندگی بین ترکیب خاک رسی و مصالح GBS را با مصالح RCA به خوبی نشان می‌دهد. افزایش در مقاومت تک‌محوری می‌تواند به سطح زبر و دانه‌های تیز گوشه مصالح RCA برگردد که منجر به قفل و بست خوب بین خاک رسی و مصالح RCA می‌گردد. همچنین اضافه کردن GBS به مخلوط رسی و مصالح RCA باعث می‌شود که فضاهای خالی ترکیب حاصله توسط ژل سیمانی ایجاد شده پر شود و به‌عنوان یک نتیجه چسبندگی ذرات رسی و مصالح RCA می‌شود. در حضور مصالح RCA و افزودنی شیمیایی GBS، بعد از یک روز (تا یک ماه) هیدراتاسیون سیمانی به‌صورت 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 (Kianimehr و همکاران، 2019). همین مسئله منجر به بهبود و افزایش پاسخ نمونه تک‌محوری و در نتیجه افزایش در مقدار UCS می‌گردد.

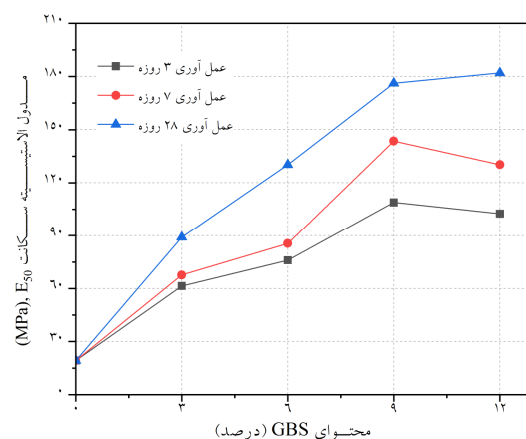


شکل 16- اندرکنش بین مصالح استفاده شده در ترکیب رسی با 20 درصد مصالح RCA به‌ازای 9 درصد GBS از آزمایش SEM

7- نتیجه‌گیری

بازیافت و استفاده مجدد از مصالح C&D به‌عنوان یک راه حل اساسی برای محافظت از محیط زیست و منابع طبیعی قلمداد می‌گردد. یکی از مصالح C&D پرمصرف استفاده از این مصالح به‌صورت دانه‌های بتن بازیافتی (RCA) می‌باشد. در این مقاله پتانسیل استفاده از مصالح RCA در بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک رسی با خاصیت خمیری بالا مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از مصالح RCA به‌عنوان افزودنی مکانیکی و GBS به‌عنوان افزودنی شیمیایی به‌منظور رسیدن به مقاومت هدف پیشنهادی

همچنین Dong-Dong و Rong-Rong (2020) این نسبت را برای رسی لای‌دار تثبیت شده با سیمان متاکاولین (MK) در محدوده بین 60 تا 145 به‌دست آوردند. در این تحقیق برای رسی تثبیت شده با RCA و مخلوط رسی و 20 درصد تثبیت شده با GBS این نسبت در محدوده 48 تا 90 حاصل گردید. مدول الاستیسیته سکانت برای ترکیب رسی و 20 درصد RCA به‌ازای محتوای مختلف GBS در شکل (15) آورده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، تا محتوای 9 درصد GBS، مقدار مدول الاستیسیته سکانت سیر افزایشی دارد و بعد از آن یک مقدار جزئی کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که به‌ازای تمامی درصدهای GBS، بعد از زمان عمل‌آوری هفت روزه، تأثیر مقدار GBS بر روی مقدار E₅₀ در مخلوط رسی و RCA بیشتر می‌شود مقدار E₅₀ با سرعت تندتری افزایش پیدا می‌کند. به‌عنوان مثال به‌ازای 9 درصد GBS و برای زمان عمل‌آوری 28 روزه، مقدار E₅₀ برای مخلوط رسی و RCA 180 مگاپاسگال می‌باشد.



شکل 15- تغییرات مدول الاستیسیته سکانت در مقابل محتوای GBS برای ترکیب رسی با 20 درصد RCA

6- نتایج SEM

تصاویر SEM¹ به‌منظور نشان دادن تغییرات ساختاری و مورفولوژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بعد از انجام آزمایش UCS، نمونه با بیشترین مقاومت فشاری تک‌محوری (رسی تثبیت شده با 20 درصد RCA به‌ازای محتوای 9 درصد GBS و زمان عمل‌آوری 28 روزه) به بخش‌های کوچکتر شکسته شده و تحت آزمایش SEM قرار می‌گیرد. هدف اصلی از انتخاب این ترکیب این است که اندرکنش بین مخلوط رسی و GBS 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. تصاویر

1. Scanning Electron Microscopy

516. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.04.003>
 Agrela F, Barbudo A, Ramírez A, Ayuso J, Carvajal MD, Jiménez JR, "Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain", *Resources, Conservation and Recycling*, 2012 58, 98-106.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.11.003>
 Akhtar A, Sarmah AK, "Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective", *Journal of Cleaner Production*, 2018, 186, 262-281.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>
 Arulrajah A, Piratheepan J, Disfani MM, Bo MW, "Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013, 25 (8), 1077-1088. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000652](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000652)
 Brooks RM, Cetin M, "Application of construction demolition waste for improving performance of subgrade and subbase layers", *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 2012, 12 (3), 375-381.
http://arpapress.com/Volumes/Vol12Issue3/IJRR_AS_12_3_04.pdf
 Cabalar AF, Zardikawi OAA, Abdulnafa MD, "Utilisation of construction and demolition materials with clay for road pavement subgrade", *Road Materials and Pavement Design*, Taylor & Francis, 2019, 20 (3), 702-714.
<https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1407817>
 Cai GH, Liu SY, Zheng X, "Influence of drying-wetting cycles on engineering properties of carbonated silt admixed with reactive MgO", *Construction and Building Materials*, 2019, 204, 84-93.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.125>
 Chakrabarti S, Kodikara J, "Basaltic crushed rock stabilized with cementitious additives: compressive strength and stiffness, drying shrinkage, and capillary flow characteristics", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2003, 1819 (1), 18-26.
<https://doi.org/10.3141/1819b-03>
 Deng Y, Xu C, Marsheal F, Geng X, Chen Y, Sun H, "Constituent effect on mechanical performance of crushed demolished construction waste/silt mixture", *Construction and Building Materials*, 2021, 294, 123567.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123567>
 Ding M, Zhang F, Ling X, Lin B, "Effects of freeze-thaw cycles on mechanical properties of polypropylene Fiber and cement stabilized clay", *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 154, 155-165.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.07.004>
 Disfani MM, Arulrajah A, Haghghi H, Mohammadinia A, Horpibulsuk S, "Flexural beam fatigue strength evaluation of crushed brick as a supplementary material in cement stabilized recycled concrete aggregates", *Construction and Building Materials*, 2014, 68, 667-676.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.004>
- UFC برای لایه‌های بستر تثبیت‌شده (مقاومت تک‌محوری 28 روزه 1379 کیلوپاسکال و 1724 کیلوپاسکال به ترتیب برای روسازی‌های صلب و انعطاف‌پذیر) بررسی شده است. همچنین آزمایش‌های مقاومت تک‌محوری بر روی ترکیب بهینه به‌ازای محتوای مختلف GBS به‌منظور بررسی سیکل‌های ذوب و یخ نیز انجام گردید. میکروساختار ترکیب با بیشترین مقدار مقاومت تک‌محوری با استفاده از تصاویر SEM مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود:
- هر چه محتوای RCA افزایش می‌یابد، مقدار UCS تا محتوای 20 درصد RCA افزایش می‌یابد و بعد از آن کاهش می‌یابد. مصالح RCA به‌عنوان مصالح پرکننده‌ای استفاده می‌شود که باعث افزایش وزن مخصوص خشک ماکزیمم، CBR و UCS و باعث کاهش رطوبت بهینه می‌گردد.
 - استفاده از مصالح RCA برای تثبیت خاک‌های رسی با خاصیت خمیری بالا بسیار مؤثر می‌باشند اما نیازهای پیشنهادی UFC را به‌عنوان استفاده در لایه‌های بستر برآورده نمی‌کند بنابراین استفاده از یک تثبیت‌کننده شیمیایی همانند GBS برای رسیدن به مقدار هدف طراحی مورد نیاز می‌باشد.
 - برای خاک‌های رسی تثبیت‌شده با مصالح RCA همراه با تثبیت‌کننده شیمیایی GBS باعث تشکیل ژل سیمانی می‌گردد که همین مهم منجر به چسبندگی بین ذرات خاک و مصالح RCA می‌گردد و باعث ایجاد ساختاری سخت می‌گردد. مقدار ژل سیمانی ایجاد شده در مخلوط رس و RCA با افزایش زمان عمل‌آوری بیشتر می‌شود و موجب افزایش مقاومت تک‌محوری مخلوط می‌شود.
 - مقدار UCS ترکیب رس و RCA با افزایش محتوای GBS افزایش می‌یابد و با افزایش سیکل‌های ذوب و یخ کاهش پیدا می‌کند. بعد از سیکل‌های اولیه ذوب و یخ، مقدار UCS با شیب تندتری کاهش می‌یابد و در سیکل‌های نهایی میزان کاهش مقاومت کمتر می‌باشد. مقدار کاهش مقاومت تک‌محوری بعد از 12 سیکل ذوب و یخ در محدوده 32 تا 53 درصد می‌باشد.
 - با توجه به نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، افزودن مصالح RCA به خاک رسی (در زمان عمل‌آوری 28 روزه) می‌تواند باعث افزایش مقدار UCS به‌اندازه 3/9 برابر مقدار UCS خاک رس پایه گردد و همچنین محتوای 9 درصد GBS در زمان عمل‌آوری 28 روزه می‌تواند مقدار UCS خاک رس پایه را به‌اندازه تا حدود 15 برابر افزایش دهد.
- 8- مراجع**
- Abu-Farsakh M, Dhakal S, Chen Q, "Laboratory characterization of cementitiously treated/stabilized very weak subgrade soil under cyclic loading", *Soils and Foundations*, 2015, 55 (3), 504-

- McNeil K, Kang THK, "Recycled Concrete Aggregates: A Review", *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2013, 7 (1), 61-69. <https://doi.org/10.1007/s40069-013-0032-5>
- Poon CS, Chan D, "Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base", 2006, 20, 578-585. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.045>
- Rong-Rong Z, Dong-Dong M, "Effects of curing time on the mechanical property and microstructure characteristics of metakaolin-based geopolymer cement-stabilized silty clay", *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 18-23. <https://doi.org/10.1155/2020/9605941>
- Tabatabaie Shourijeh P, Masoudi Rad A, Heydari Bahman Bigloo F, Binesh SM, "Application of recycled concrete aggregates for stabilization of clay reinforced with recycled tire polymer fibers and glass fibers", *Construction and Building Materials*, 2022, 355, 129172. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129172>
- Tavakol M, Kulesza S, Jones C, Hossain M, "Effect of Low-Quality Recycled Concrete Aggregate on Stabilized Clay Properties", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32 (8), 04020196. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003263](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003263)
- Thomas PJ, Baker JC, Zelazny LW, "An expansive soil index for predicting shrink-swell potential", *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64 (1), 268-274. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.641268x>
- Unified Facilities Criteria (UFC) Soil Stabilization for Pavements, 2004, October.
- Zhang H, Yuan X, Liu Y, Wu J, Song X, He F, "Experimental study on the pullout behavior of scrap tire strips and their application as soil reinforcement", *Construction and Building Materials*, 2020, 254, 119288. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119288>
- Yilmaz Y, Ozaydin V, "Compaction and shear strength characteristics of colemanite ore waste modified active belite cement stabilized high plasticity soils", *Engineering Geology*, 2013, 155, 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.01.003>
- 7
- Ghazavi M, Roustaie M, "The influence of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay", *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 61 (2-3), 125-131. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.12.005>
- Hossain KMA, Mol L, "Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes", *Construction and Building Materials*, 2011, 25 (8), 3495-3501. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.042>
- Hotineanu A, Bouasker M, Aldaood A, Al-Mukhtar M, "Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays", *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 119, 151-157. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.08.008>
- Jafari M, Esna-ashari, M, "Effect of waste tire cord reinforcement on unconfined compressive strength of lime stabilized clayey soil under freeze-thaw condition", *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 82, 21-29. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.05.012>
- Jiménez JR, Ayuso J, Agrela F, López M, Galvín AP, "Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads", *Resources, Conservation and Recycling*, 2012, 58, 88-97. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.10.012>
- Kamei T, Ahmed A, Shibi T, "Effect of freeze-thaw cycles on durability and strength of very soft clay soil stabilised with recycled Bassanite", *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 82, 124-129. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.05.016>
- Kianimehr M, Shourijeh PT, Binesh SM, Mohammadinia A, Arulrajah A, "Utilization of recycled concrete aggregates for light-stabilization of clay soils", *Construction and Building Materials*, 2019, 227, 116792. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116792>
- Lopes EC, da Silva TO, Pitanga HN, Pedroti LG, Franco de Carvalho JM, Nalon GH, de Lima GES, de Araújo EN D, "Stabilisation of clayey and sandy soils with ladle furnace slag fines for road construction", *Road Materials and Pavement Design*, 2023, 24 (1), 247-266. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.2017328>
- Lu Y, Liu S, Alonso E, Wang L, Xu L, Li Z, "Volume changes and mechanical degradation of a compacted expansive soil under freeze-thaw cycles", *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 157, 206-214. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.10.008>
- Lu, Y, Liu S, Weng L, Wang L, Li Z, Xu L, "Fractal analysis of cracking in a clayey soil under freeze-thaw cycles", *Engineering Geology*, 2016, 208, 93-99. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.04.023>
- Lu Y, Liu S, Zhang Y, Li Z, Xu L, "Freeze-thaw performance of a cement-treated expansive soil", *Cold Regions Science and Technology*, 2020, 170, 102926. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102926>
- 6