استفاده از ضایعات بتنی و سرباره کوره آهن‌گدازی در تثبیت خاک رس با خاصیت خمیری کم

حسنا سویزی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

علیرضا اردکانی*، دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

Email: a.ardakani@eng.ikiu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۸ – پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۲

چکیده

استفاده از مصالح بازیافتی در فعالیت‌های مهندسی و کارهای عمرانی مزایای مختلفی را از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی به همراه دارد. دپوکردن مصالح بازیافتی در محل‌های دفن زباله بسیار پرهزینه می‌باشد و مسائل زیست‌محیطی زیادی را ایجاد می‌کند. بازیافت و استفاده مجدد از مصالح ضایعاتی، در مواردی مانند سازه‌های روسازی و عناصر غیرسازه‌ای ساختمان، منجر به حفظ منابع طبیعی و کاهش آلودگی محیط‌زیست می‌گردد. در سال‌های اخیر، این مصالح عمدتاً در پروژه‌های راه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و بنابراین رفته رفته تأثیرشان را بر محیط‌زیست نشان می‌دهند. در این تحقیق، به بررسی مقاومت فشاری تک‌محوری و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) خاک رس با خاصیت خمیری کم، مربوط به آبیک قزوین، به کمک ضایعات بتنی (CW) و سرباره کوره آهن‌گدازی (BFS) پرداخته شده است. نمونه‌های خاک رسی به ازای محتوای ۲۵ و ۵۰ درصد مصالح CW و با محتوای ۲ و ٤ درصد BFS و تحت زمان‌های عمل‌آوری ۷، ١٤ و ۲۸ روزه تثبیت گردید. نتایج به‌دست آمده نشان داد که افزودن مصالح CW و BFS به خاک رسی با خاصیت خمیری کم باعث افزایش مقدار CBR می‌گردد و زمان عمل‌آوری نیز تأثیر مثبتی بر نتایج CBR می‌گذارد. همچنین، افزودن مصالح BFS تأثیر به‌سزایی بر مقاومت تک‌محوری ترکیبات رس و CW (مخصوصاً ترکیب رس با ۵۰ درصد CW) می‌گذارد و ترکیب رس به ازای ۵۰ درصد CW و ٤ درصد BFS، در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه، می‌تواند مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری را تا پنج برابر افزایش دهد.

واژه‌های کلیدی: رس با خاصیت خمیری کم، ضایعات بتنی، سرباره کوره آهن‌گدازی، مقاومت فشاری تک‌محوری، CBR

۱. مقدمه

خاک‌های رسی سهم قابل توجهی از خاک‌های جهان، از جمله ایران، را شامل می‌شوند. خاک‌های رسی اغلب مستعد مشکلات مرتبط با ترک‌خوردگی، مقاومت کم و قابلیت تراکم زیاد هستند. علاوه بر این، رفتار تغییر حجم خاک‌های رسی متورم شونده به تغییرات رطوبت بسیار حساس است؛ با اضافه شدن رطوبت و اشباع شدن، مقاومت آنها به میزان قابل توجهی کم شده و متورم می‌شوند. بنابراین، در صورت وجود در بستر راه‌ها، خرابی‌هایی (مانند ترک‌خوردگی، چاله‌ها، خراب شدن، ناهمواری) را ایجاد می‌کنند. روش‌های مختلفی برای بهسازی خاک وجود دارد که تثبیت خاک[1] یکی از روش‌های متداول در بهسازی خاک‌های رسی است.

افزایش جمعیت و رشد روز به روز صنعت باعث افزایش میزان مصالح ضایعاتی در کل جهان شده است که بخش بزرگی از این مصالح ضایعاتی به صنعت ساخت و ساز اختصاص دارد. استفاده بیش از حد از منابع طبیعی در پروژه‌های عمرانی باعث آسیب جدی به محیط‌زیست شده است. در سال ۲۰۱۷، روزانه تقریباً ۵۰۰۰۰ تن مصالح ساخت و ساز و تخریب[2] (CDW) در تهران تولید می‌شده که از این مقدار ۲۰۰۰۰ تن به مصالح ناشی از تخریب و مصالح مرتبط با فرآیند خاک‌برداری اختصاص داشته است (توکلی مهرجردی و همکاران، ۲۰۲۰). از جمله مصالح CDW می‌توان به ضایعات بتنی (CW)[3] اشاره کرد. تثبیت خاک روشی است که در لایه‌های راه‌سازی با هدف بهبود کیفیت لایه‌ها استفاده می‌گردد. از مصالح تثبیت شده می‌توان برای ساخت خاکریزها، لایه‌های اساس، زیراساس و بستر و حتی در بعضی مواقع به عنوان لایه رویه استفاده کرد. با وجود اینکه برای تثبیت مکانیکی خاک بستر عمدتاً از مصالح طبیعی استفاده می‌شود، اما مطالعات محدودی در رابطه با استفاده از ضایعات بتنی (CW) در تثبیت خاک بستر وجود دارد. مواد سیمانی، همانند آهک و سیمان، می‌توانند به عنوان تثبیت‌کننده‌های شیمیایی خاک بستر، به منظور رسیدن به مقاومت هدف تحت بارگذاری‌های ترافیکی روسازی‌ها، استفاده شود.

کنسولی و همکاران (۲۰۱٤) به بررسی استفاده از ترکیب آهک و سیمان برای تثبیت خاک‌های رسی نرم و ضعیفی که دارای مقاومت کم و تراکم‌پذیری زیادی هستند، پرداختند. خاک مورد استفاده در پژوهش آنها دارای ۱٦/۱ درصد ماسه متوسط، ٤٥/٥ درصد ماسه ریز، ۳۳/٤ درصد لای و ۵ درصد رس بود، که بخش رسی آن کائولینیت می‌باشد. نمونه‌ها با مقادیر مختلفی شامل ۷۵، ۱۲۵، ۱۷۵، ۲۲۵ و ۲۷۵ کیلوگرم بر متر مکعب از آهک، سیمان و ترکیب آهک و سیمان ساخته شدند و برای آنها دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه لحاظ شده است. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مقاومت فشاری نمونه‌هایی که از ترکیب ۵۰ درصد سیمان و ۵۰ درصد آهک ساخته شده‌اند، با افزایش مقدار سیمان و آهک و همچنین افزایش مدت عمل‌آوری، افزایش می‌یابد. در مدت عمل‌آوری ۹۰ روزه، تا مقدار ۲۲۵ از ترکیب سیمان و آهک، بیشترین مقاومت فشاری را دارند و پس از آن مقدار مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. همچنین، مقاومت کششی نمونه‌ها با افزایش مدت عمل‌آوری افزایش می‌یابد.

محمدی‌نیا و همکاران (۲۰۱۵) یک سری مطالعات آزمایشگاهی به منظور تعیین ویژگی‌های مهندسی مصالح بازیافتی تثبیت شده توسط سیمان انجام دادند. مصالح بازیافتی بررسی شده شامل روسازی آسفالت بازیافتی (RAP)، مصالح بتنی بازیافتی (RCA) و آجرهای خردشده (CB) می‌باشد. ویژگی‌های ژئوتکنیکی مصالح بازیافتی تثبیت شده توسط سیمان به منظور ارزیابی

[1]- Soil stabilization
[2]- Construction and demolition waste (CDW)
[3]- Concrete waste

عملکرد آنها برای استفاده در لایه‌های اساس و زیراساس روسازی بررسی شده است. تأثیر مدت عمل‌آوری بر مقاومت مصالح بازیافتی با استفاده از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و آزمایش‌های سه‌محوری سیکلیک مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که مصالح RAP به ۲ درصد سیمان با مدت عمل‌آوری ۷ یا ۲۸ روز و مصالح RCA و CB به ٤ درصد سیمان و ۲۸ روز عمل‌آوری به منظور تامین نیازهای طراحی لایه‌های روسازی نیاز دارند. مصالح RAP در تمامی حالات به ازای محتوای سیمان و مدت عمل‌آوری یکسان بیشترین مقاومت را در مقایسه با مصالح RCA و CB نشان می‌دهد.

کیانی‌مهر و همکاران (۲۰۱۹) دریافتند که مصالح RCA با اندازه ماسه، ممکن است به‌جای تثبیت‌کننده‌های شیمیایی در خاک رسی مورد استفاده قرار گیرد. اگرچه استفاده از مصالح RCA در اندازه ماسه در عملیات راه-سازی زیاد مرسوم نمی‌باشد. اما آنها روی ویژگی‌های ژئوتکنیکی همانند مقاومت تک‌محوری، مقاومت برشی و نشست تمرکز کردند و دریافتند که رس تثبیت شده با ۱۵ درصد RCA معیار طراحی لایه‌های بستر و زیراساس روسازی‌های صلب را تأمین می‌کند. کابالار و همکاران (۲۰۱۹) یک سری مطالعات آزمایشگاهی روی رفتار ترکیبات مختلف خاک رسی و مصالح CDW به منظور استفاده در لایه‌های بستر روسازی انجام دادند. مصالح استفاده شده شامل مصالح بتن بازیافتی (RCA)، آسفالت-های خردشده (DAP) و مصالح طبیعی (NA) در ترکیب با خاک رسی با پلاستیسیته کم به مقدار صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ٤۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد وزنی می‌باشد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که اضافه کردن خاک رسی به مصالح ضایعاتی باعث افزایش تندی در مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری می‌گردد. همچنین، نتایج CBR نشان می‌دهد که حدود ۸۰، ۷۵ و ۵۰ درصد کاهش در عملکرد مصالح NA، RCA و DAP در ترکیب با ۵۰ درصد خاک رسی وجود دارد. 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 پلاستیسیته کم و RCA و سه نوع تثبیت‌کننده (آهک، خاکستر بادی کلاس C، ترکیب سیمان و خاکستر بادی) را مورد ارزیابی قرار دادند. 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. ساکپراسرت و همکاران (۲۰۲۱) در رابطه با ویژگی‌های مکانیکی و میکروساختاری خاک رس تثبیت‌شده به وسیله خاکستر بادی (FA) و سرباره کوره آهن‌گدازی (BFS) مطالعاتی را انجام دادند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مقاومت فشاری تک‌محوری به‌دست آمده برای ترکیبات مختلف برای نسبت‌های مختلف FA به BFS و دمای عمل‌آوری مختلف (۲۵، ۵۰ و ۸۰ درجه سلسیوس)، با افزایش غلظت سدیم هیدرواکسید افزایش می‌یابد. همچنین، مقاومت فشاری تک‌محوری به ازای تمامی نسبت‌های FA به BFS با افزایش غلظت سدیم هیدرواکسید از ۵ تا ۱۵ مولار افزایش می‌یابد و هر چه دمای عمل‌آوری نمونه‌ها افزایش یابد، مقاومت فشاری تک‌محوری نیز بهبود می‌یابد.

در این تحقیق، رفتار خاک رس تثبیت‌شده به کمک ضایعات بتنی (CW) به عنوان تثبیت‌کننده مکانیکی و سرباره کوره آهن‌گدازی[1] (BFS) به عنوان تثبیت‌کننده شیمیایی به منظور استفاده در لایه‌های بستر مورد ارزیابی قرار گرفته است. آزمایش‌های تراکم، مقاومت تک‌محوری[2] (UCS) و نسبت باربری کالیفرنیا[3] (CBR)

[1]- Blast Furnace Slag
[2]- Unconfined Compressive Strength
[3]- California Bearing Ratio

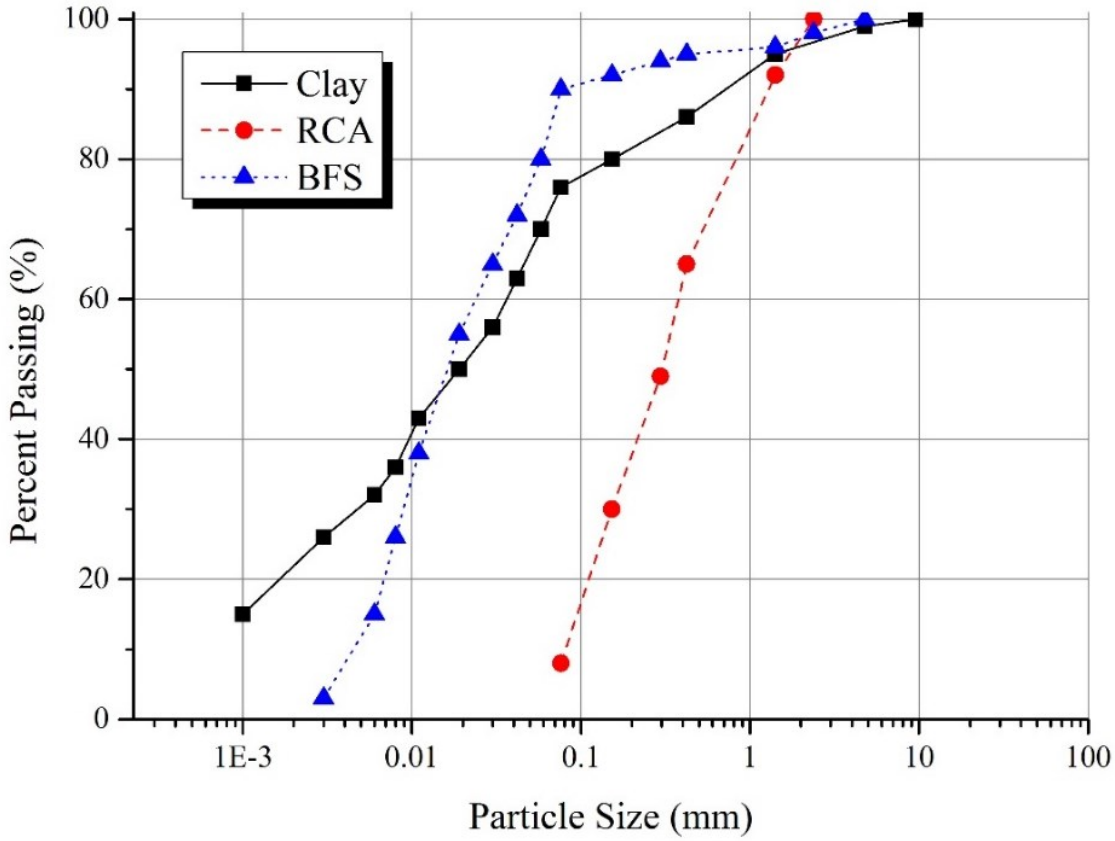
به ازای نسبت‌های صفر، ۲۵ و ۵۰ درصد CW و نسبت‌های صفر، ۲ و ٤ درصد BFS و تحت زمان‌های عمل‌آوری ۷، ١٤ و ۲۸ روزه قرار گرفته‌اند تا در جهت بهبود و تثبیت ویژگی‌های مکانیکی خاک رسی اقدام گردد. رفتار خاک رس تثبیت‌شده مکانیکی و شیمیایی تحت بارگذاری استاتیک مورد تحلیل قرار گرفته است.

۲. ویژگی‌های مصالح

در این تحقیق، به منظور انجام آزمایش‌ها، خاک رسی با خاصیت خمیری کم (مربوط به حوالی کاظم آباد آبیک شهر قزوین) مورد استفاده قرار گرفته است که موقعیت برداشت نمونه در شکل ۱ با علامت آبی رنگ آورده شده است. حد روانی خاک رسی ۳۱ و شاخص خمیری آن ۱۱ می‌باشد و طبق سیستم طبقه‌بندی یونیفاید، نوع خاک رسی (CL) می‌باشد. منحنی دانه‌بندی خاک رسی در شکل ۲ آورده شده است. در جداول ۱ و ۲ نیز به ترتیب ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی به‌دست آمده از آزمایش XRF[1] ارائه شده است.

شکل ۱. موقعیت برداشت مصالح رسی استفاده شده در تحقیق حاضر

[1]- X-ray Fluorescence (XRF)



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مصالح استفاده شده در تحقیق حاضر

همچنین، ضایعات بتنی از خرد کردن نمونه‌های بتنی آزمایشگاهی برداشت شده است. این نمونه‌ها بعد از انتقال به کارخانه ماسه‌شویی، در داخل خردکن ریخته می‌شوند و توسط نوار نقاله در اندازه‌های مختلف استخراج می‌گردند. در شکل ۳- الف کارخانه استفاده شده مربوط به شهرداری قزوین به منظور خرد کردن مصالح بتنی نشان داده شده است. در شکل‌های ۳- ب و ۳- ج نیز نمونه‌های بتنی استفاده شده در تحقیق حاضر قبل و بعد از خرد شدن آورده شده است.

(الف)

(ب)

(ج)

شکل ۳. الف) کارخانه استفاده شده برای خرد کردن ضایعات بتنی واقع در شهرداری قزوین، ب) نمونه‌های بتنی قبل از خرد شدن و ج) نمونه‌های بتنی بعد از خرد شدن

سرباره استفاده شده در این تحقیق از نوع سرباره کوره آهن‌گدازی (BFS) می‌باشد که از کارخانه ذوب آهن اصفهان تهیه شده است. سرباره کوره آهن‌گدازی دارای سطح شیشه‌ای و ساختار ریز و کریستال مانند است. توزیع دانه‌بندی BFS در شکل ۲ آورده شده است. مشخصات فیزیکی مصالح BFS در جدول ۱ و ترکیبات شیمیایی آن، که با استفاده از آزمایش XRF استخراج شده است، در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی مصالح استفاده شده در تحقیق حاضر

ویژگی	رس	CW	BFS
حد روانی (٪)	۳۱	غیرپلاستیک	غیرپلاستیک
حد خمیری (٪)	۲۰	غیرپلاستیک	غیرپلاستیک
شاخص خمیری (٪)	۱۱	غیرپلاستیک	غیرپلاستیک
چگالی ویژه	۲/۷۱	۲/٦٦	۲/۸۹
رطوبت بهینه (٪)	١٤/٤	--	--
وزن مخصوص خشک حداکثر (KN/m^3)	۱۸/۸	--	--

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

ترکیبات شیمیایی (درصد)	رس	CW	BFS
SiO_2	٤٥/٥۰	۲۷/۷٥	۳٤/۹٥
Al_2O_3	۱۲/۰٤	٦/۸۰	۹/٥٤
Fe_2O_3	٤/۰٦	۳/۷۲	۱/۱٤
CaO	۱۳/۲۸	۳۱/٤	٤۱/۲۰
MgO	٤/٤٦	۳/۲۰	۷/۳۳
Na_2O	۰/۷۲	۰/۹٤	۰/۸۱
SO_3	۰/۲۲	۱/۲٥	۳/۲٦
K_2O	۱/۹۱	۱/۰٦	۰/۹۸
LOI	۱٦/۸۲	۲۲/۹۳	۰/۳۰

۳. تهیه نمونه و آزمایش‌ها

به منظور تهیه ترکیبات مورد نیاز، خاک رسی و ضایعات بتنی (CW) به صورت خشک و با استفاده از فرمول زیر با همدیگر مخلوط می‌شوند:

$$\%CW = \frac{m_{CW}}{m_{clay} + m_{CW}} \times 100 \qquad (۱)$$

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

برای ترکیب‌هایی که دارای سرباره کوره آهن‌گدازی (BFS) می‌باشند، مشابه بالا، محتوای BFS افزودنی به صورت خشک به ترکیب خاک رس و CW مطابق فرمول زیر افزوده می‌شود:

$$\%BFS = \frac{m_{BFS}}{m_{clay} + m_{CW} + m_{FBS}} \times 100 \qquad (۲)$$

در این فرمول نیز m_{FBS} وزن مصالح BFS استفاده شده در ترکیب می‌باشد که در این تحقیق محتوای صفر، ۲ و ٤ درصد مورد استفاده قرار گرفته است.

آزمایش تراکم اصلاح‌شده مطابق ASTM D1557 به ازای ترکیبات مختلف به منظور رسیدن به رطوبت بهینه (ω_{opt}) و وزن مخصوص خشک حداکثر ($\gamma_{d\max}$) انجام می‌گیرد که این آزمایش و مقادیر به‌دست آمده برای

ω_{opt} و $\gamma_{d\max}$ برای تهیه نمونه‌های آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و CBR مورد نیاز می‌باشد. برای آزمایش‌های تک‌محوری از قالبی به قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. نمونه‌ها در ۵ لایه به منظور رسیدن به $\gamma_{d\max}$ و ω_{opt} متراکم می‌شوند و به مدت ٢٤ ساعت در داخل پلاستیک‌های سرپوشیده می‌مانند و بعد از آن متناسب با مدت عمل‌آوری مطلوب، در داخل پلاستیک‌های سربسته نگهداری می‌شوند. بر اساس استاندارد ASTM D1632، نمونه‌ها داخل قالب نگه داشته شدند و توسط نایلون‌های پلاستیکی مطابق شکل ٤- الف پوشیده شدند. بعد از ٢٤ ساعت، نمونه‌ها مطابق شکل ٤- ب از داخل قالب خارج شده و تحت عمل‌آوری قرار می‌گیرند تا به سن عمل‌آوری مورد نظر برسند (۷، ١٤ یا ۲۸ روزه) و فوراً مطابق شکل ٤- ج آزمایش می‌شوند. نمونه‌ها به صورت اتوماتیک به کمک دستگاه مقاومت فشاری با نرخ جابجایی ۱/۳ میلی‌متر تحت بارگذاری قائم قرار می‌گیرند. حداکثر بار اعمالی به نمونه قبل از اینکه نمونه گسیخته گردد، به عنوان مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) استفاده می‌شود. گسیختگی در نمونه‌ها به صورت آشکار شدن ترک‌های بزرگ در نمونه‌ها یا افت ناگهانی در بار اعمالی تعریف می‌گردد (شکل ٤- د).

(الف) نمونه‌های پوشیده شده توسط پلاستیک قبل از بیرون آوردن از قالب

(ج) نمونه قرار گرفته روی دستگاه تک‌محوری برای انجام آزمایش

(ب) نمونه‌های خارج شده از داخل قالب به منظور انجام عمل‌آوری

(د) نمونه‌ها بعد از گسیختگی

شکل ٤. مراحل انجام آزمایش تک‌محوری

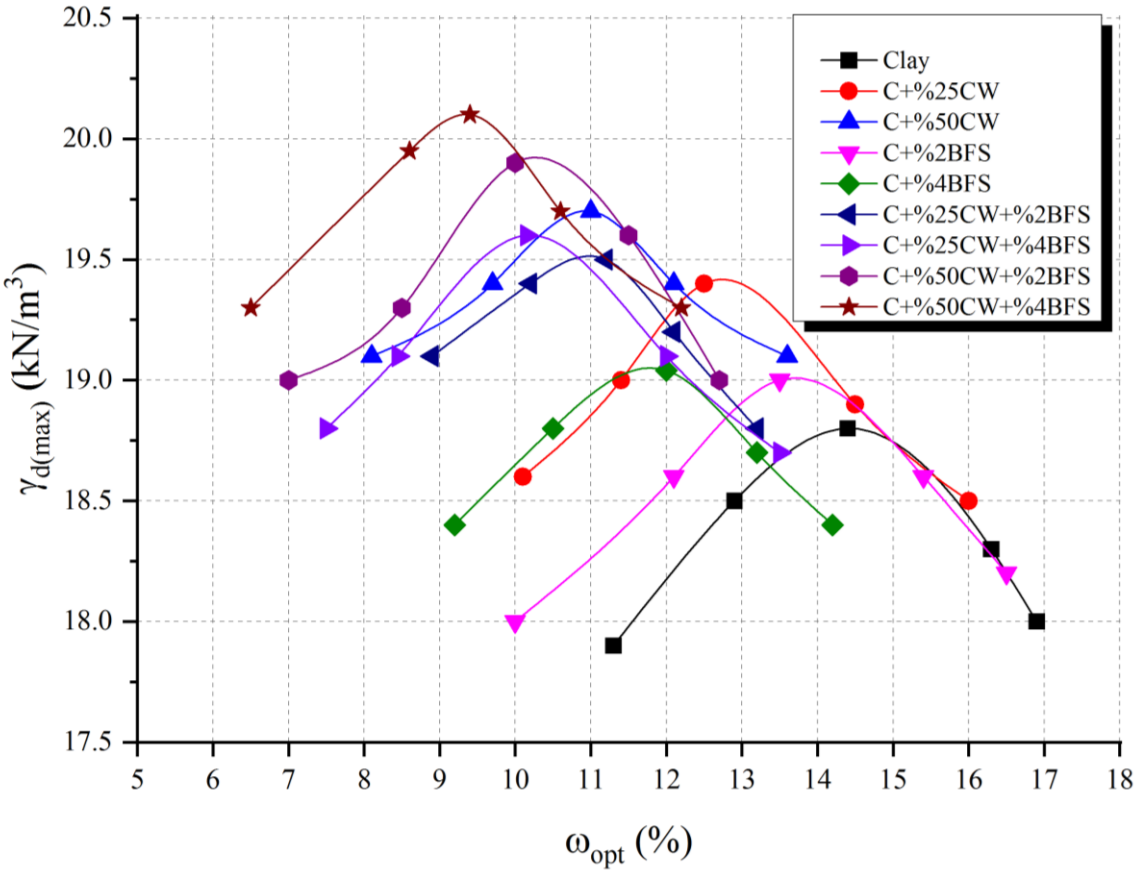
آزمایش‌های CBR نیز مطابق استاندارد ASTM D1883 روی ترکیبات مختلف انجام می‌شوند. آزمایش‌های CBR روی نمونه‌های عمل‌آوری شده ۷، ١٤ و ۲۸ روزه انجام شده است که در آن نمونه‌ها در ۵ لایه در داخل قالبی به قطر ١٥٢/٤ میلی‌متر و ارتفاع ۱۷۷/۸ میلی‌متر به ازای ترکیبات مختلف و در رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر متراکم می‌شوند. بعد از اینکه نمونه‌ها به عمل‌آوری مورد نظر رسیدند، در داخل آب به مدت ۹٦ ساعت غرقاب شده و تحت فشار نشست[1] ٤/٥ کیلوگرم و در نرخ نفوذ ۱/۲۷ میلی‌متر بر دقیقه مورد آزمایش قرار می گیرند. نتایج تنش در مقابل نفوذ سمبه به منظور تعیین مقدار CBR مورد استفاده قرار می‌گیرد.

[1]- Seating pressure

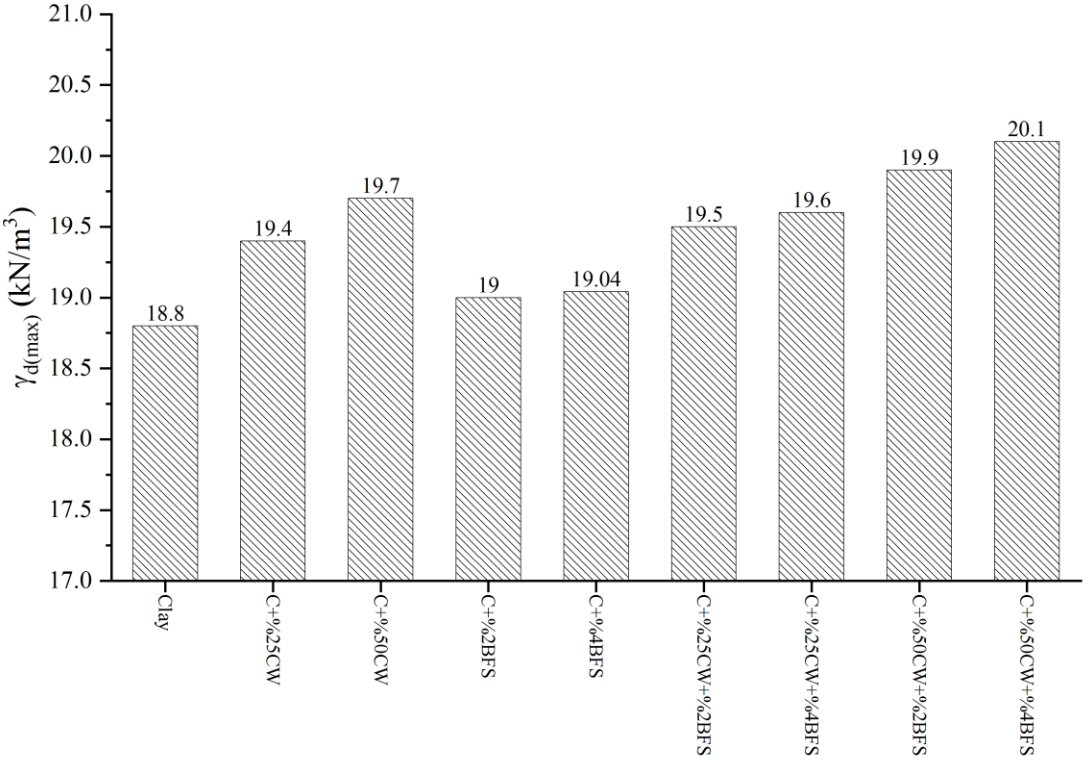
٤. مشاهدات و نتایج آزمایش‌ها

٤-١. نتایج آزمایش تراکم

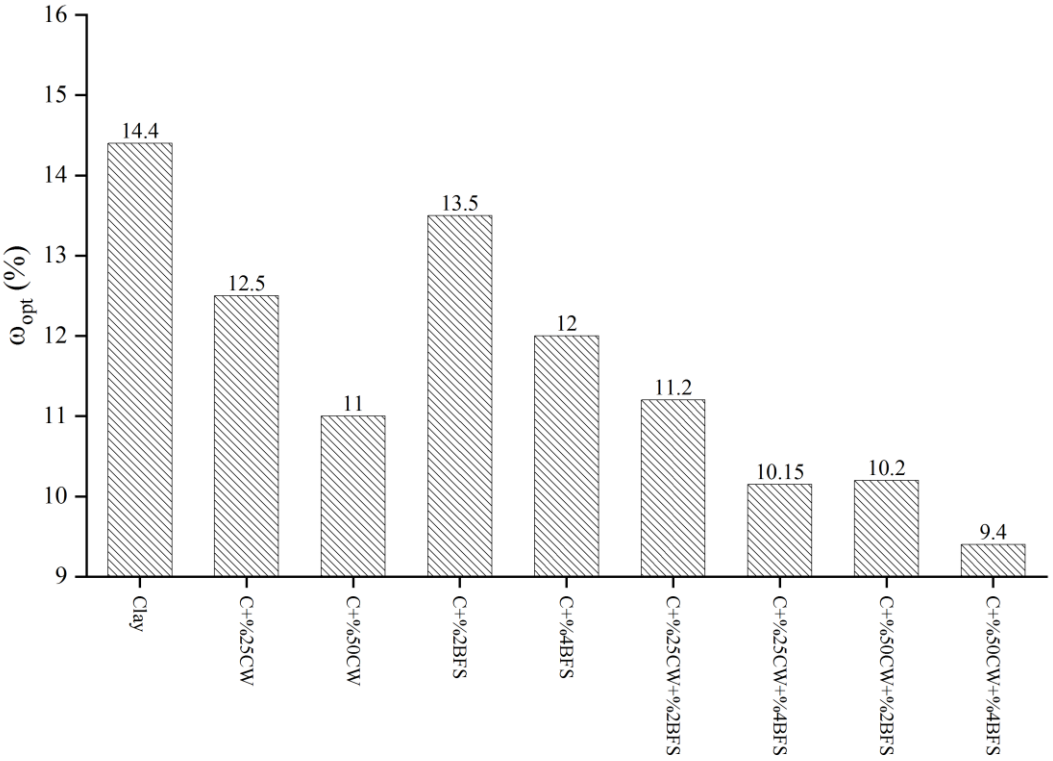
منحنی تراکم (تغییرات وزن مخصوص خشک حداکثر در مقابل رطوبت بهینه) ترکیبات مختلف خاک رس به ازای مقادیر مختلف CW (صفر، ٢٥ و ٥٠ درصد) و BFS (صفر، ٢ و ٤ درصد) در شکل ٥ آورده شده است. در شکل‌های ٦- الف و ٦- ب نیز به ترتیب تغییرات مقادیر وزن مخصوص خشک حداکثر ($\gamma_{d\max}$) و رطوبت بهینه (ω_{opt}) برای ترکیبات مختلف ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد، با افزودن مقدار CW به خاک رسی، وزن مخصوص خشک حداکثر افزایش و رطوبت بهینه کاهش می‌یابد که این مسئله می‌تواند به نسبت پوکی بین‌دانه‌ای برگردد. به این صورت که در اثر افزودن مصالح CW به خاک رسی، وزن حجم مشخصی از مخلوط رس و CW نسبت به رس خالص بیشتر می‌باشد و همین مسئله موجب افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر می‌گردد. از طرف دیگر، هرچه مقدار CW در خاک رسی بیشتر باشد، ترکیب حاصله به آب کمتری برای رسیدن به حالت بهینه نیازمند است. همچنین، افزودن محتوای BFS به خاک رسی نیز باعث تغییرات مشابهی همانند CW می‌گردد. علت این پدیده به دلیل چگالی توده (G_s) بیشتر BFS نسبت به خاک رسی است و افزودن محتوای BFS باعث می‌شود که ترکیب حاصله به آب کمتری برای رسیدن به حالت بهینه نیاز داشته باشد.



شکل ٥. تغییرات MUW نسبت به OMC به ازای ترکیبات مختلف



(الف)

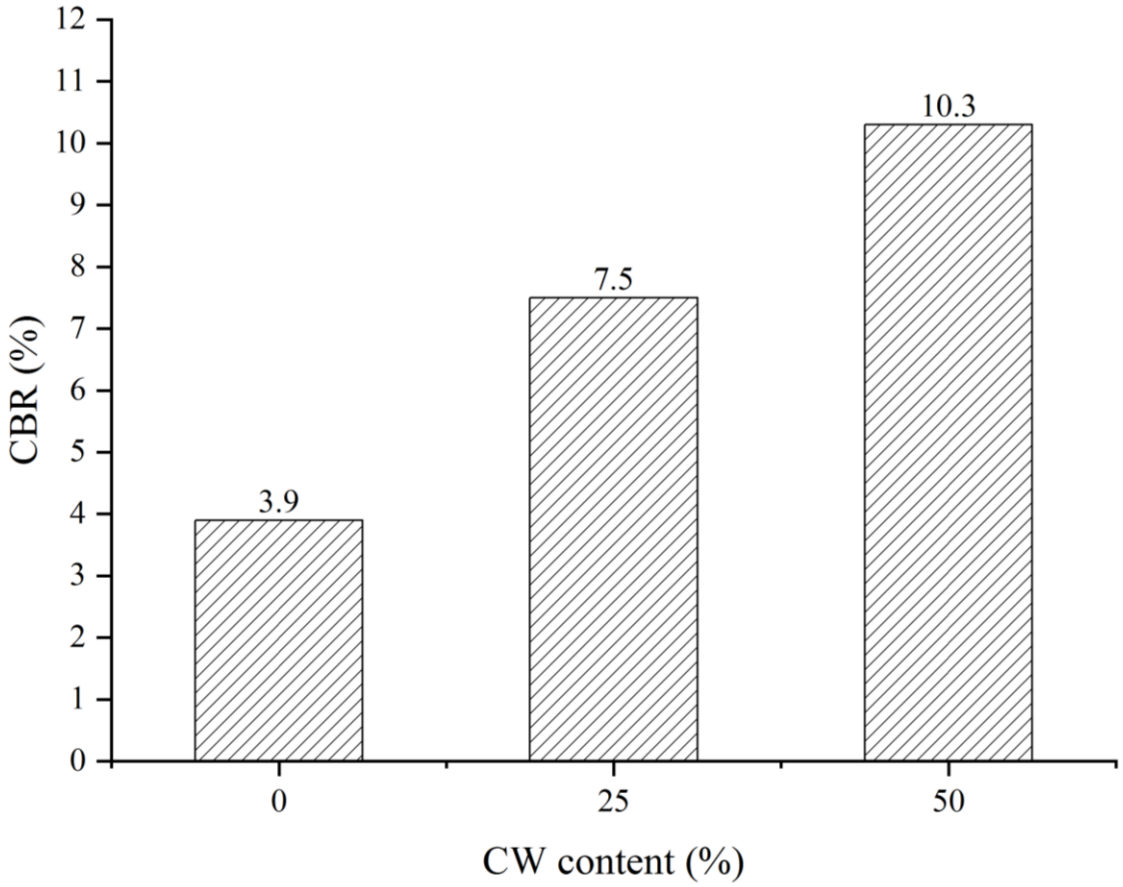


(ب)

شکل ٦. الف) تغییرات وزن مخصوص خشک حداکثر ($\gamma_{d\,\max}$) به ازای ترکیبات مختلف و ب) تغییرات رطوبت بهینه (ω_{opt}) به ازای ترکیبات مختلف

٤-٢ نتایج آزمایش CBR

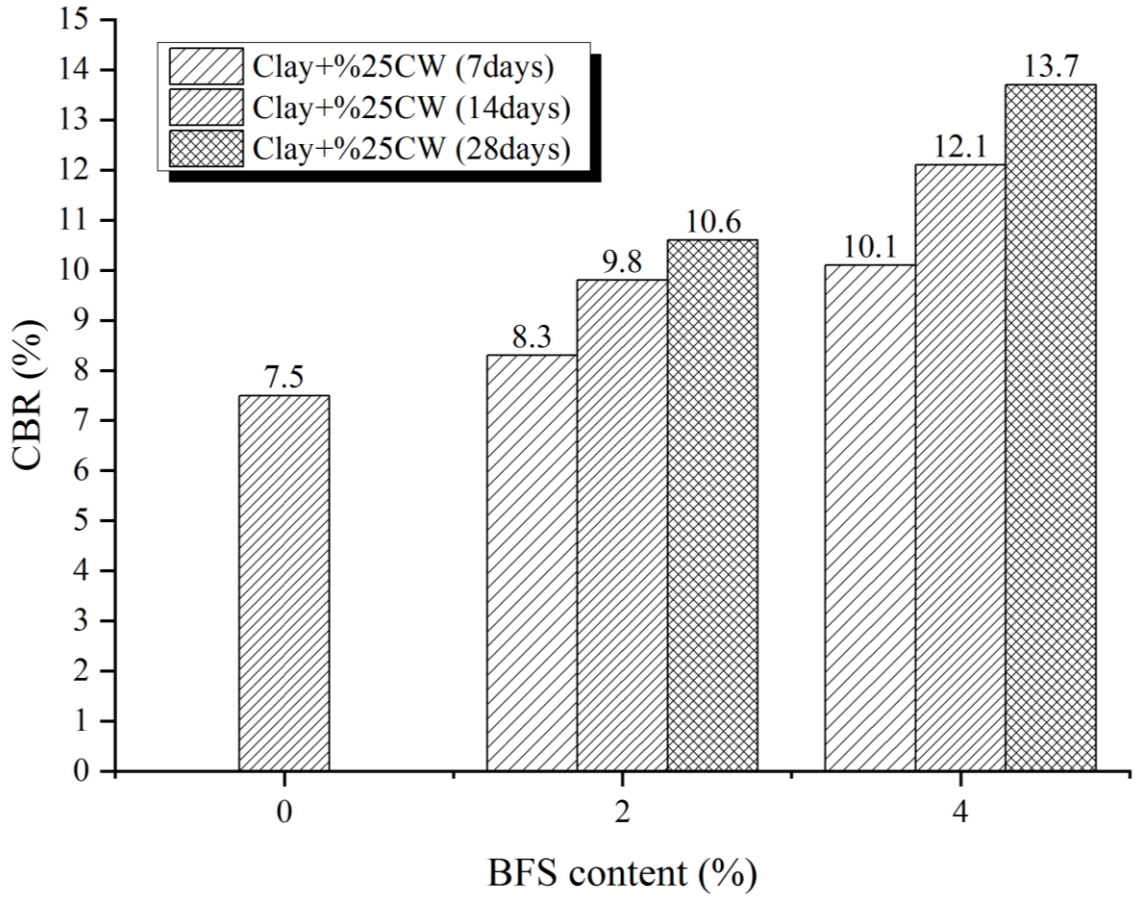
آزمایش CBR یکی از آزمایش‌های آزمایشگاهی نسبتاً ساده می‌باشد که قابل تکرار، ارزان و آسان است. بسیاری از آیین‌نامه‌ها و آژانس‌ها مقدار حداقل ۱۵ درصد را برای CBR مصالح بستر تثبیت‌شده نیاز دارند (حسین و مول، ۲۰۱۱). مقادیر CBR خاک رس تثبیت شده با محتوای مختلف CW در شکل ۷ نشان داده شده است. همان طور که مشهود است، CBR از مقدار ۳/۹ درصد برای رس تثبیت نشده به مقدار ۱۰/۳ درصد برای رس تثبیت‌شده با ۵۰ درصد CW افزایش می‌یابد. افزودن مصالح CW به خاک رسی باعث بهبود سختی مخلوط کل می‌شود. مصالح CW باعث ایجاد ترکیب دو فازی تشکیل شده از ذرات سخت در یک ماتریکس نرم، همراه با سختی ترکیب تثبیت‌شده کلی می‌گردد. افزایش مقدار CBR به دلیل افزودن مصالح CW همچنین می‌تواند به سازگاری کرنش بهبودیافته بین ماتریکس رس و ذرات CW برگردد (توکل و همکاران، ۲۰۲۰). همان طور که دیده می‌شود، به ازای ترکیبات مختلف رس و CW حداقل مقدار مورد نیاز ۱۵ درصد برای لایه‌های بستر تثبیت‌شده حاصل نمی‌شود. به منظور رسیدن به این هدف (CBR=15)، افزودنی BFS مورد استفاده قرار گرفته است.



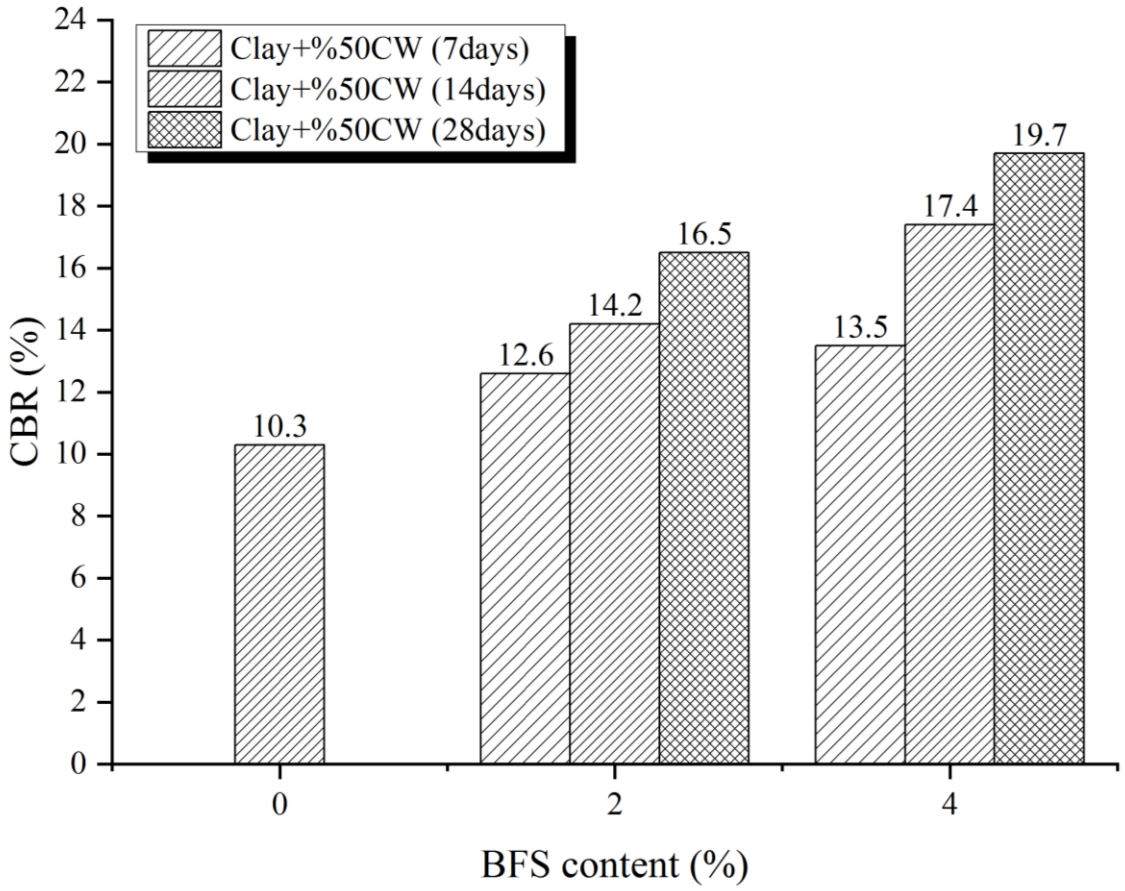
شکل ۷. تغییرات مقدار CBR برای خاک رس تثبیت‌شده به ازای مقادیر مختلف CW

شکل‌های ۸- الف و ۸- ب به ترتیب تغییرات مقدار CBR را برای رس تثبیت‌شده به ازای ۲۵ و ۵۰ درصد CW و مقادیر مختلف BFS (زمان عمل‌آوری ۷، ۱٤ و ۲۸ روزه) نشان می‌دهند. همان طور که در شکل ۸- الف

دیده می‌شود، افزودن مقدار BFS به مخلوط رس و ۲۵ درصد CW باعث افزایش مقدار CBR شده است. به عنوان مثال، مقدار CBR برای ترکیب رس و ۲۵ درصد CW از ۷/۵ به ۱۳/۷ برای ترکیب رس، ۲۵ درصد CW و ٤ درصد BFS در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه رسیده است که بهبود ۸۲ درصدی را نشان می‌دهد. برای شکل ۸- ب نیز نتایج مشابهی مشاهده می‌گردد و محتوای BFS و زمان عمل‌آوری باعث بهبود مقدار CBR شده است. از تحلیل‌های ذکر شده در بالا می‌توان به این مسئله مهم رسید که تأثیر افزودنی CW بیشتر از BFS و زمان عمل‌آوری بر مقدار CBR می‌باشد که این مسئله می‌تواند به ماهیت اصطکاکی آزمایش CBR برگردد. هر چه مصالح به سمت دانه‌ای‌تر شدن پیش بروند زاویه اصطکاک و اندرکنش بین ذرات خاک بیشتر می‌شود و در نتیجه مقاومت بیشتری را از خود در هنگام نفوذ سمبه نشان می‌دهد. به ازای ترکیب خاک رسی و ۵۰ درصد مصالح CW از محتوای ۲ درصد BFS (در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه) و محتوای ٤ درصد BFS (در زمان‌های عمل‌آوری ١٤ و ۲۸ روزه) می‌توان به مقدار هدف CBR=15 دست یافت.



(الف)

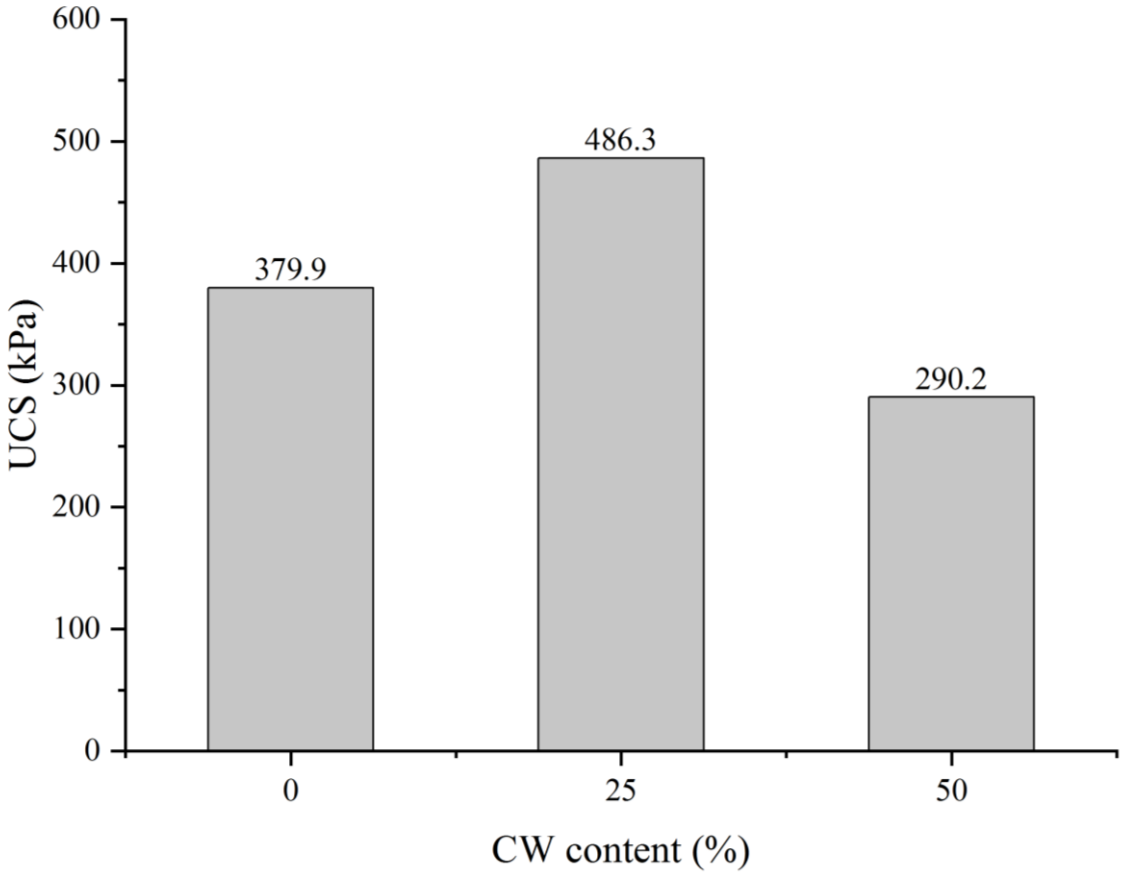


(ب)

شکل ۸. تغییرات مقدار CBR در مقابل محتوای GBS برای الف) CW=25% و ب) CW =50%

٤-٣. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

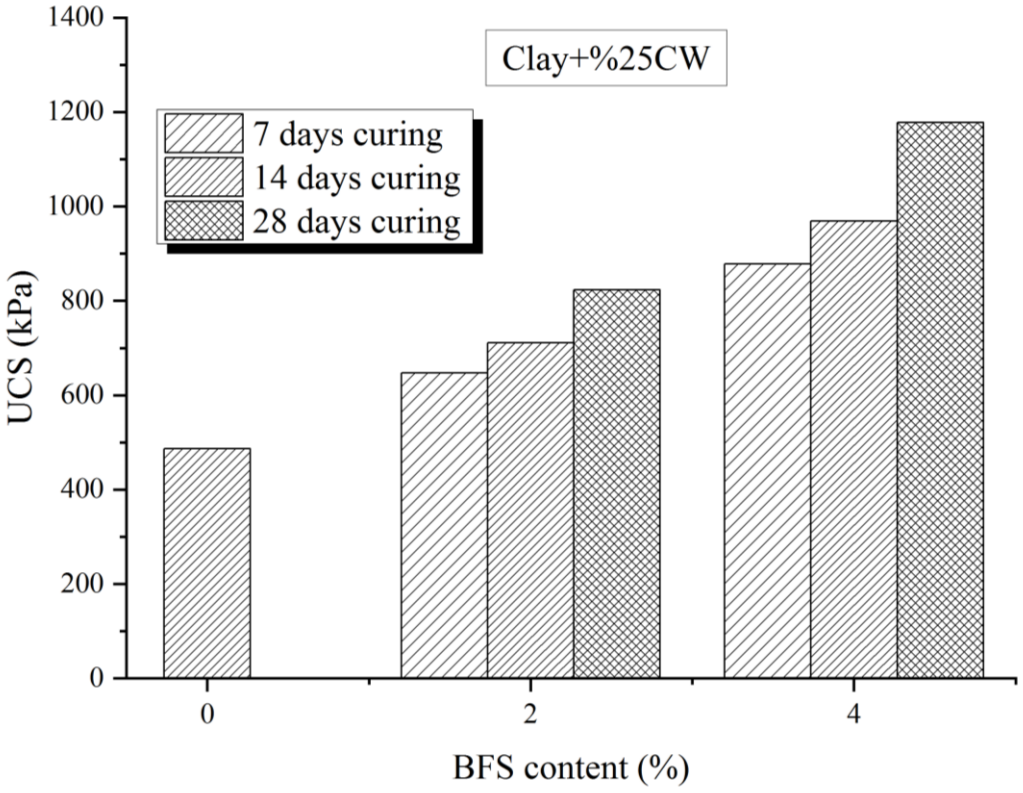
نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری به ازای محتوای مختلف CW در شکل ۹ نشان داده شده است. همان طور که در شکل دیده می‌شود، مقاومت تک‌محوری با افزایش محتوای CW از ۳۷۹/۹ kPa برای رس تثبیت نشده تا ٤٨٦/٣ kPa برای ۲۵ درصد CW افزایش می‌یابد و به ازای ۵۰ درصد CW مقدار مقاومت تک‌محوری به مقدار ۲۹۰/۲ kPa کاهش می‌یابد. علت این مسئله این است که اضافه کردن مصالح CW به خاک رسی باعث افزایش سطح تماسی بین رس و CW می‌گردد. همین مسئله باعث افزایش مقاومت اصطکاکی سطحی و قفل‌وبست‌های مکانیکی می‌شود که باعث افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری می‌گردد. اما با افزایش محتوای CW به ۵۰ درصد، از طرفی نیروی اصطکاکی بین ذرات رس و CW به صورت شاخص افزایش می‌یابد، تماس بین ذرات رس – رس کاهش می‌یابد و ترکیب حاصله رفتار شکننده‌تری پیدا می‌کند. همین مسئله باعث کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری می‌شود. مطابق نتایج تک‌محوری انجام شده روی ترکیبات رس و CW به منظور افزایش مقدار مقاومت تک‌محوری نیاز به یک تثبیت‌کننده شیمیایی به منظور ایجاد واکنش شیمیایی و رسیدن به مقادیر زیاد مقاومت می‌باشد که از سرباره کوره آهن‌گدازی (BFS) به منظور رسیدن به این هدف استفاده شده است.



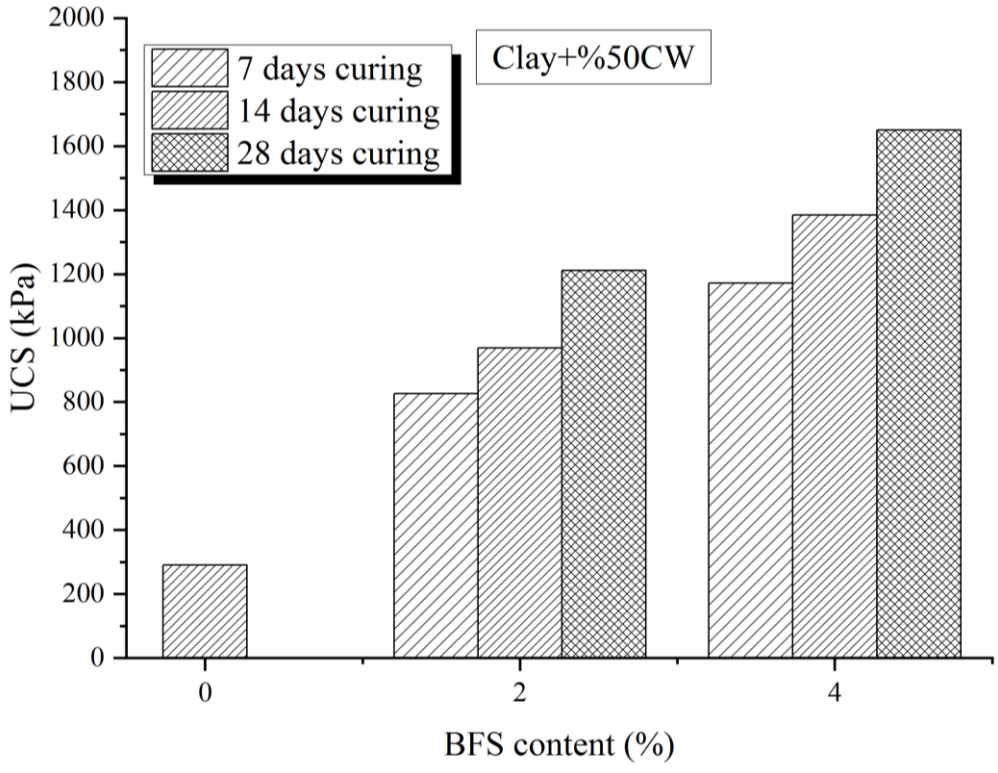
شکل ۹. نتایج مقاومت تک‌محوری برای رس تثبیت‌شده به ازای مقادیر مختلف CW

در شکل ۱۰- الف، تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری مخلوط رس و ۲۵ درصد CW به ازای محتوای مختلف BFS در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱٤ و ۲۸ روزه آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد، برای مخلوط رس و ۲۵ درصد CW نیز افزودن محتوای BFS باعث افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری می‌گردد و این مقاومت در زمان‌های عمل‌آوری بیشتر، رشد شاخصی را از خود نشان می‌دهد. علت این مسئله این می‌باشد که افزودن BFS به ترکیب رس و CW باعث می‌شود که ژل سیمانی ترکیب رس و بتن بازیافتی را احاطه کند و باعث تشکیل یک توده اسکلتی سخت شده گردد که در نتیجه افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری را در پی دارد. همچنین، با افزایش محتوای BFS و افزایش زمان عمل‌آوری، ترکیبات حاصله در کرنش‌های کمتری گسیخته می‌شوند و خاصیت شکننده‌تری پیدا می‌کنند.

شکل ۱۰- ب نیز تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری ترکیب رس با ۵۰ درصد CW را به ازای مقادیر متفاوت BFS در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت نشان می‌دهد. مشابه ترکیب قبلی، برای این ترکیب نیز افزودن BFS به مخلوط رس و CW باعث ایجاد یک توده منسجم به دلیل تشکیل کلسیم سیلیکات و کلسیم هیدرواکسید در ترکیب حاصله می‌شود که باعث افزایش شاخص در مقاومت تک‌محوری می‌گردد. همان طور که در شکل مشهود است، مشاهده می‌شود که مثلاً به ازای ترکیب رس و ۵۰ درصد CW به ازای محتوای ٤ درصد BFS در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه، مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری می‌تواند تا ۵ برابر رس تثبیت نشده افزایش یابد.



(الف)

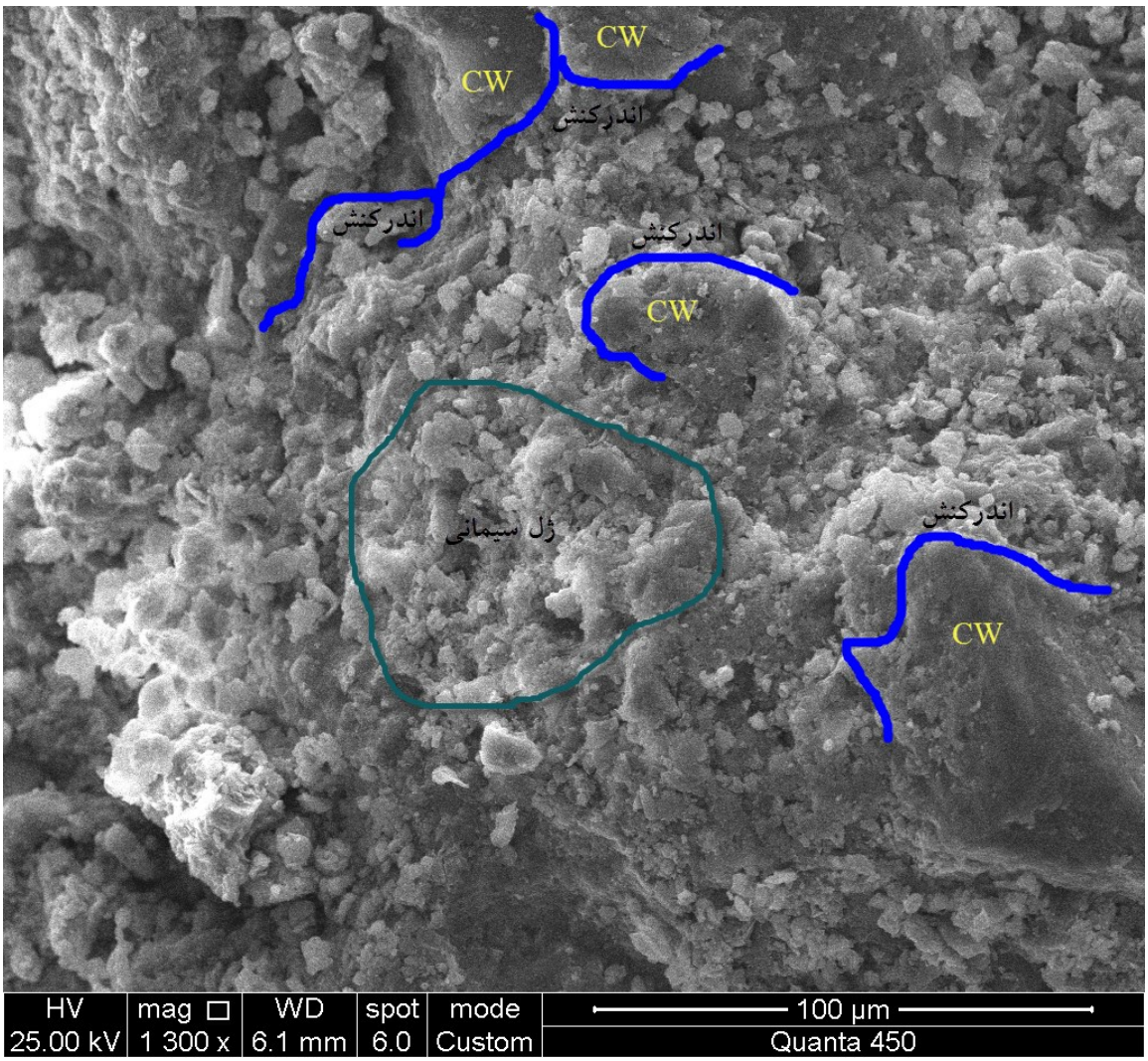


(ب)

شکل ۱۰. تغییرات مقاومت تک‌محوری به ازای محتوای مختلف BFS و در زمان‌های عمل‌آوری مختلف: الف) ترکیب رس با ۲۵ درصد CW و ب) ترکیب رس با ۵۰ درصد CW

۵. نتایج تصاویر SEM

تصاویر SEM[1] 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 CW به ازای محتوای ٤ درصد BFS و زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه) به بخش‌های کوچکتر شکسته شده و تحت SEM قرار می‌گیرد. هدف اصلی از انتخاب این ترکیب این است که اندرکنش بین مخلوط رس و BFS با مصالح CW در بیشترین مقدار UCS نشان داده است و اینکه چگونه اندرکنش این مصالح منجر به رسیدن به مقدار مقاومت مطلوب شده است. در شکل ۱۱، اندرکنش بین مصالح CW و ترکیب رس و BFS نشان داده شده ست و اینکه چگونه سطح زبر مصالح بازیافتی به همراه ژل سیمانی که در طی فرآیند هیدراتاسیون ایجاد می‌گردد منجر به افزایش مقاومت فشاری محوری قابل قبولی در ترکیب حاصله شده است.



شکل ۱۱. اندرکنش بین مصالح استفاده شده در ترکیب رس با ۵۰ درصد مصالح CW به ازای ٤ درصد BFS در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه

[1]- Scanning Electron Microscopy

٦. نتیجه‌گیری

بازیافت و استفاده مجدد از مصالح C&D به عنوان یک راه حل اساسی برای محافظت از محیط‌زیست و منابع طبیعی قلمداد می‌گردد. یکی از مصالح C&D پرمصرف، استفاده از این مصالح به صورت ضایعات بتنی (CW) می‌باشد. در این مقاله، پتانسیل استفاده از مصالح CW در بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک رس مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از مصالح CW به عنوان افزودنی مکانیکی و BFS به عنوان افزودنی شیمیایی به منظور افزایش ویژگی‌های مقاومتی خاک رس با خاصیت خمیری کم بررسی شده است. نمونه‌های رسی به ازای ۲۵ و ۵۰ درصد ضایعات بتنی (CW) و با محتوای ۲ و ٤ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی (BFS) تثبیت شده‌اند. زمان‌های عمل‌آوری ۷، ١٤ و ۲۸ روزه مورد استفاده قرار گرفت. میکروساختار ترکیب با بیشترین مقدار مقاومت تک‌محوری با استفاده از تصاویر SEM بررسی شد. نتایج به‌دست آمده را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- با افزودن مقدار CW به خاک رسی، وزن مخصوص خشک حداکثر افزایش و مقدار رطوبت بهینه کاهش می‌یابد که این مسئله می‌تواند به نسبت پوکی بین‌دانه‌ای برگردد. همچنین، افزودن BFS به خاک رسی و ترکیب رس و CW باعث افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر و کاهش رطوبت بهینه می‌گردد. علت این پدیده، چگالی توده (G_s) بیشتر BFS نسبت به خاک رسی است و افزودن BFS باعث می‌شود که ترکیب حاصله به آب کمتری برای رسیدن به حالت بهینه نیاز داشته باشد.
- افزودن CW به خاک رسی باعث افزایش مقدار CBR ترکیب می‌گردد. در توضیح علت این مسئله می‌توان به این نکته اشاره کرد که افزودن مصالح CW باعث ایجاد دو فاز در ترکیب حاصله می‌شود که شامل ذرات سخت ضایعات بتنی در ماتریس نرم رسی به همراه سختی ترکیب کلی بهبودیافته می‌باشد که همین مسئله باعث افزایش مقدار CBR شده است. همچنین، در حضور BFS، هر چه زمان عمل‌آوری بیشتر باشد، به دلیل پدیده سمنتاسیون و ژل سیمانی ایجاد شده، مقدار CBR نیز در تمامی ترکیبات افزایش می‌یابد.
- با افزایش محتوای CW تا ۲۵ درصد، مقاومت فشاری تک‌محوری افزایش می‌یابد و به ازای محتوای ۵۰ درصد CW، مقاومت تک‌محوری سیر کاهشی پیدا می‌کند که باعث شده ترکیب حاصله رفتار شکننده‌تری پیدا کند. همین مسئله باعث کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری می‌گردد. همچنین، هرچه مقدار BFS افزوده شده بیشتر شود، مقاومت فشاری تک‌محوری افزایش می‌یابد و با افزایش مدت زمان عمل‌آوری نیز مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. علت این مسئله، پدیده تبادل کاتیونی است که بین یون‌های رس و BFS اتفاق می‌افتد.
- در این تحقیق، به ازای ترکیب رس و ۵۰ درصد CW در محتوای ٤ درصد BFS در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه، مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری تا پنج برابر رس تثبیت نشده افزایش پیدا کرد.

۷. مراجع

Cabalar, A. F., Zardikawi, O. A. A. and Abdulnafaa, M. D. 2019. “Utilisation of construction and demolition materials with clay for road pavement subgrade”. Road Mater. Pavement Design, 20(3): 702-714. https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1407817

Consoli, N. C., da Silva Lopes Jr., L., Consoli, B. S. and Festugato, L. 2014. “Mohr–Coulomb failure envelopes of lime-treated soils”. Géotech., 64(2): 165-170. https://doi.org/10.1680/geot.12.P.168

Hossain, K. M. A. and Mol, L. 2011. “Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes”. Constr. Build. Mater., 25(8): 3495-3501. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.042

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. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116792

Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Sanjayan, J., Disfani, M. M., Bo, M. W. and Darmawan, S. 2015. “Laboratory evaluation of the use of cement-treated construction and demolition materials in pavement base and subbase applications”. J. Mater. Civ. Eng., 27(6): 04014186. https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001148

Sukprasert, S., Hoy, M., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Rashid, A. S. A. and Nazir, R. 2021. “Fly ash based geopolymer stabilisation of silty clay/blast furnace slag for subgrade applications”. Road Mater. Pavement Design, 22(2): 357-371. https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1621190

Tavakol, M., Kulesza, S., Jones, C. and Hossain, M. 2020. “Effect of low-quality recycled concrete aggregate on stabilized clay properties”. J. Mater. Civ. Eng., 32(8): 04020196. https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003263

Tavakoli Mehrjardi, G., Azizi, A., Haji Azizi, A. and Asdollafardi, G. 2020. “Evaluating and improving the construction and demolition waste technical properties to use in road construction”. Transport. Geotech., 23: 100349. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100349