

## تعیین مقدار مدول برجهندگی رس متورم شونده تثبیت شده با ضایعات بتن بازیافتی به کمک آزمایش سه محوری سیکلیک

مقاله علمی - پژوهشی

سید طاها طباطبائی عقدا\*، استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران  
حسنا سویزی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [taha.tab@gmail.com](mailto:taha.tab@gmail.com)

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

صفحه ۲۸۵-۲۹۶

### چکیده

در مناطق شهری و در کشورهای توسعه یافته، به دلیل نبود فضای کافی برای ساخت جاده‌ها، راه‌ها ممکن است بر روی خاک‌های رسی متورم شونده به عنوان خاک مسئله دار ساخته شوند. خاک‌های رسی متورم شونده در تماس با آب افزایش حجم پیدا می‌کند و با از دست دادن آب، انقباض پیدا می‌کند. دانه‌های بتن بازیافتی به عنوان یکی از مصالح بدست آمده از فرآیند ساخت و ساز، می‌توانند به عنوان مصالح جایگزین در پروژه‌های راهسازی مورد استفاده قرار گیرند. در این تحقیق، از ضایعات دانه‌های بتن بازیافتی به عنوان افزودنی برای تثبیت خاک رسی متورم شونده استفاده شده است تا رفتار خاک تثبیت شده به کمک این افزودنی در جهت بهبود رفتار فیزیکی و مقاومتی مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. یک سری آزمایشات آزمایشگاهی شامل دانه بندی، چکالی دانه‌ها، حدود اتربرگ، تراکم استاندارد و آزمایش سه محوری سیکلیک انجام گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که افزودن ضایعات دانه‌های بتن بازیافتی به خاک رسی متورم شونده باعث کاهش مقادیر حد روانی و شاخص خمیری می‌گردد و از طرفی باعث کاهش مقدار رطوبت بهینه و افزایش مقدار وزن مخصوص خشک ماکزیمم می‌گردد. همچنین یک سری آزمایشات سه محوری سیکلیک مطابق استاندارد AASHTO T307 به منظور تعیین مقدار مدول برجهندگی ( $M_r$ ) ترکیبات مختلف در زمان‌های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه انجام گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که وجود مصالح دانه‌های بتن بازیافتی در خاک رسی باعث افزایش مقاومت و اصطکاک بسیج شده می‌گردد و همین مسئله موجب افزایش مقدار مدول برجهندگی می‌گردد. همچنین به دلیل واکنش‌های پوزولانی، مقادیر  $M_r$  بدست آمده به ازای تمامی ترکیبات در زمان عمل آوری ۲۸ روزه بیشتر از زمان عمل آوری ۷ روزه می‌باشد. نتایج حاصله از این تحقیق نشان داد که استفاده از ضایعات دانه‌های بتن بازیافتی، علاوه بر کاهش ضایعات دیو شده و آلودگی‌های زیست محیطی، می‌تواند باعث بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک‌های رسی متورم شونده گردد.

واژه‌های کلیدی: مدول برجهندگی، تثبیت، خاک رسی

### ۱-مقدمه

به هر حال بعضی از این خاک‌های طبیعی همانند خاک‌های رسی متورم شونده دارای ویژگی‌های نامطلوب همانند پتانسیل تورمی و انقباضی بالا، ظرفیت باربری کم، تراکم پذیری بالا می‌باشند.

روسازی جاده‌های راهسازی معمولاً از ۴ لایه اصلی شامل لایه‌های آسفالتی، اساس، زیراساس و لایه‌های بستر تشکیل می‌شود. لایه‌های بستر اغلب خاک‌های طبیعی می‌باشند.

Kianimehr et al, 2019, Yang et al, 2020, al, 2017 و (Tavakol et al, 2020).

در تثبیت شیمیایی نیز از تثبیت کننده‌هایی همانند سیمان، خاکستر بادی، آهک، سرباره‌ی کوره آهن گدازی استفاده می‌شود که باعث ایجاد واکنش‌های شیمیایی در مخلوط می‌گردد و منجر به بهبود ویژگی‌های مقاومتی خاک رس می‌شود (Zhao et al, 2014, Phanikumar & Nagaraju, 2018, Ghadir et al, 2021, Jahandari et al, 2022).

در سال‌های اخیر، بعضی از کشورها پیشرفت‌های متعددی را در زیرساخت‌هایشان داشته‌اند و این موضوع باعث تولید حجم بسیار زیادی از ضایعات ساخت و ساز و تخریب شده است. دپو کردن این ضایعات به مدت طولانی می‌تواند علاوه بر اشغال کردن مساحت زیاد و خسارت به اکولوژی باعث تاثیر نامناسب بر روی محیط زیست گردد. استفاده از این ضایعات می‌تواند باعث کاهش استخراج مناسب طبیعی و کاهش تولید گاز کربن دی اکسید ( $CO_2$ ) شود. ضایعات ساخت و ساز و تخریب می‌تواند در پروژه‌های ساختمانی راه‌ها به عنوان لایه‌های اساس و زیر اساس، روسازی، خاک زیرین لوله‌ها (Rahman et al, 2014, Poon & Chan, 2006, Agrela et al, 2012, Mohammadinia et al, 2015) و یا تثبیت خاک‌های سست (Kianimehr et al, 2019 و Cabalar et al, 2019) مورد استفاده قرار گیرد. یکی از اجزای تشکیل دهنده ی ضایعات ساخت و ساز و تخریب دانه‌های بتن بازیافتی می‌باشد. تحقیقات متعددی بر روی خاک‌های رسی تثبیت شده به کمک مصالح RCA صورت گرفته است. کابالار و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی مخلوط‌های خاک رسی و RCA پرداختند و نتیجه گرفتند که افزودن خاک رسی به مصالح RCA باعث افزایش مقدار رطوبت بهینه می‌شود و مقدار وزن مخصوص خشک ماکزیمم مخلوط‌های رس و RCA تا یک مقدار مشخصی از محتوای خاک رسی افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند. Kianimehr و همکاران (۲۰۱۹) تحقیقاتی را بر روی مخلوط رس و مصالح RCA سایز ماسه انجام دادند. آنها در تحقیق‌شان بر روی ویژگی‌های ژئوتکنیکی همانند مقاومت تک محوری، پارامترهای مقاومت برشی و نشست مخلوط‌های رس و دانه‌های بتن بازیافتی تمرکز کردند. نتایج آنها نشان داد که افزودن

داشتن چنین ویژگی‌هایی در خاک بستر ممکن است عملکرد سیستم روسازی را با مشکل روبرو کند. در مناطق شهری، به دلیل توسعه شهری و کمبود فضا، جاده‌ها ممکن است بر روی خاک‌های مسئله دار همانند خاک‌های رس متورم شونده ساخته شوند. خاک‌های متورم شونده به دلیل داشتن کانی‌های آبدوست همانند الیت و مونتوریلونیت، نسبت به تغییرات رطوبت بسیار حساس می‌باشند. خاک‌های متورم شونده در تماس با آب افزایش حجم پیدا می‌کنند که این مسئله می‌تواند باعث ایجاد خسارات جبران ناپذیری در روسازی جاده‌ها و دیگر سازه‌های ساخته شده بر روی آنها (به دلیل پتانسیل تورم و انقباض بالا و ظرفیت باربری کم) شود (Narani et al, 2020, Al-Rawas, 2002, Tiwari et al, 2020). پتانسیل تورمی خاک‌های متورم شونده می‌تواند از فاکتورهای مختلفی همانند ویژگی‌های خاک، عوامل محیطی و تنش‌های اعمالی تاثیر پذیرد (Rababah et al, 2022). بنابراین، به دلیل مشکلات مهندسی و نبود مصالح ساختمانی مناسب، خاک‌های مسئله دار نمی‌توانند به عنوان لایه‌های مختلف خاکریز بدون بهسازی مناسب مورد استفاده قرار گیرند. به عنوان نتیجه کلی، خاک‌های رسی متورم شونده به منظور بهبود ویژگی‌های مقاومتشان نیاز به بهسازی به کمک افزودنی‌های مختلف را دارند (Bourokba Mrabent et al, 2017, Murmu et al, 2019, Okeke et al, 2020, Seco et al, 2022 و Zagvozda et al, 2022).

تثبیت خاک تکنیکی می‌باشد که برای بهبود و تقویت ویژگی‌های مهندسی خاک همانند مقاومت، سختی و کنترل تغییرات حجمی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Zhang et al, 2020). تثبیت خاک‌های متورم شونده می‌تواند به کمک دو رویکرد تثبیت مکانیکی و تثبیت شیمیایی انجام شود که در پروژه‌های زیرساخت حمل و نقل بسیار رایج و محبوب می‌باشد (Chakrabarti & Kodikara 2003). تثبیت مکانیکی شامل افزودن مصالح خارجی به خاک پایه می‌باشد.

از افزودنی‌های مکانیکی می‌توان به مصالح ضایعاتی، فیبرها، لاستیک‌ها و ... اشاره کرد که باعث ایجاد ویژگی‌های فیزیکی مطلوب در خاک رسی می‌شوند و منجر به کاهش رفتار مشکل ساز آن می‌گردد (Chaduvula et al, 2017, Bordoloi et al, 2017).

Ardah et al, 2017, Abu-Farsakh et al, 2015  
Rababah et و Rabab'ah et al, 2020, Gandhi, 2018  
(al, 2022).

تاکنون تحقیقات کمی بر روی پاسخ برجهندگی خاک رس متورم شونده تثبیت شده به کمک مصالح RCA صورت گرفته است. در این تحقیق، رفتار مدول برجهندگی رس متورم شونده تثبیت شده به کمک مصالح RCA به منظور استفاده در لایه‌های بستر راهسازی مورد ارزیابی قرار گرفت. ابتدا آزمایشات دانه بندی، حدود اتربرگ و تراکم استاندارد بر روی ترکیبات مختلف رس و RCA انجام گرفت و در مرحله ی بعد، آزمایش سه محوری سیکلیک بر روی مخلوط رس و RCA در زمان‌های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه به منظور تعیین مدول برجهندگی رس تثبیت شده انجام شد.

## ۲- ویژگی‌های مصالح

خاک رسی استفاده شده از نزدیکی روستای بهرام آباد منطقه الموت غربی قزوین بخش رازمیان استخراج شده است. بعد از خشک کردن خاک رسی در هوای آزاد، یک سری آزمایشات آزمایشگاهی پایه بر روی آن انجام گرفت. خاک رسی دارای طبقه بندی رس با خاصیت خمیری بالا (CH) مطابق سیستم طبقه بندی یونیفاید می باشد. مصالح RCA استفاده شده نیز از تخریب ساختمان های کم طبقه اطراف شهر قزوین استخراج شده است. این ضایعات RCA دارای ابعاد بزرگ بودند که توسط دستگاه خرد شونده، قطعات بزرگ آن خرد شده و در محدوده‌های ۶-۰، ۱۲-۶ و ۱۹-۱۲ میلی متر تقسیم شدند.

منحنی دانه بندی خاک رسی و ضایعات RCA نیز در شکل ۱ آورده شده است. ویژگی‌های فیزیکی خاک و مصالح RCA استفاده شده در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین ترکیبات شیمیایی مصالح رسی و RCA با استفاده از استاندارد اشعه ایکس بدست آمده و در جدول ۲ آورده شده است.

۱۵ درصد دانه‌های بتن بازیافتی به خاک رسی می‌تواند معیار طراحی پیشنهادی برای لایه‌های بستر و زیراساس را تامین کند. Tavakol و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی ویژگی‌های مهندسی مخلوط‌های رس و دانه‌های بتن بازیافتی به کمک افزودنی‌های شیمیایی آهک، خاکستر بادی و ترکیب خاکستر بادی و سیمان پرداختند. آزمایشات انجام شده توسط آنها شامل تک محوری، CBR و انقباض خطی می‌باشد و نتایج بدست آمده نشان داد که افزودن RCA به خاک رسی باعث بهبود مقاومت و سختی خاک رسی می‌گردد. Ma و همکاران (۲۰۲۲) بررسی ویژگی‌های پارامترهای مقاومتی ترکیب خاک رسی با خاصیت خمیری زیاد و مخلوط RCA و RCB پرداختند. آزمایشات آنها شامل آزمایشات تراکم، مقاومت تک محوری، برش مستقیم، CBR می‌باشد. نتایج آزمایشات آنها نشان داد که افزودن مصالح بازیافتی باعث می‌شود که مقدار مقاومت تک محوری ابتدا افزایش و سپس کاهش یابد. همچنین افزودن مصالح بازیافتی به خاک رسی باعث افزایش مقاومت برشی و افزایش پایداری ترکیب می‌گردد. با ارائه مفهوم مدول برجهندگی ( $M_r$ ) به عنوان پارامتری برای تعیین سختی مصالح در سال ۱۹۶۷ (Seed et al, 1967) توجه ویژه ای به رفتار خاک‌های بستر تحت بارگذاری‌های دینامیکی تکراری ایجاد شد. مدول برجهندگی می‌تواند مستقیماً از آزمایش سه محوری سیکلیک بدست آید و به صورت نسبت تنش انحرافی به کرنش الاستیک برگشت پذیر تعریف می‌گردد که بعد از یک سری بارگذاری‌های همه جانبه و انحرافی محاسبه می‌گردد. مقدار  $M_r$  تابعی از تنش های اعمالی بر نمونه می‌باشد. بنابراین، تنش همه جانبه و تنش انحرافی از پارامترهای مهمی می‌باشند که مقدار  $M_r$  را تعیین می‌کنند.

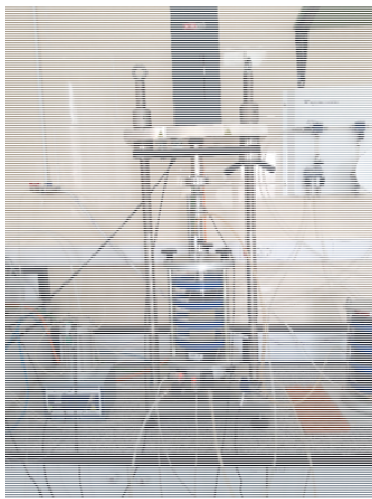
بر اساس پیشنهاد MEPDG، مدول برجهندگی ( $M_r$ ) یکی از پارامترهای مهم مصالح می باشد که برای لایه‌های تثبیت شده در طراحی سطح یک (مطمئن‌ترین سطح طراحی) مورد استفاده قرار می گیرد (NCHRP, 2004). خاک‌های تثبیت شده به کمک تکنیک‌های مکانیکی و شیمیایی، توانایی تحمل بارهای ترافیکی ناشی از وسایل نقلیه در طول و بعد از ساخت را با تغییرشکلی جزئی دارند (Al-Jharyish, 2014). تحقیقات متعددی در زمینه بررسی پارامترهای موثر بر مقدار مدول برجهندگی خاک‌های تثبیت شده انجام شده است (Rout et al, 2012).



#### ۴- آزمایشات سه محوری سیکلیک

آزمایشات سه محوری سیکلیک به منظور ارزیابی مدول برجهنگی نمونه‌های تثبیت شده مطابق **AASHTO T307** انجام شد. به دلیل اینکه مصالح روسازی تحت یک سری بارگذاری ضربه ای قرار می‌گیرند، آزمایش سه محوری سیکلیک به خوبی این نوع بارگذاری را شبیه سازی می‌کند. در آزمایش سه محوری سیکلیک، نمونه‌های خاک تحت یک سری بارگذاری‌های تکراری قرار می‌گیرند که دارای زمان اعمال نیرو و زمان استراحت می‌باشد که به خوبی تنش‌های اعمالی از طرف چرخ‌های ماشین‌های متعدد را شبیه سازی می‌کند. تنش‌های همه جانبه اعمالی به نمونه در آزمایش سه محوری سیکلیک تنش‌های جانبی ناشی از فشار سربار و بار چرخ‌های ماشین آلات را شبیه سازی می‌کند. نمونه‌های خاک رسی به ازای افزودنی‌های مختلف و در وزن مخصوص خشک ماکزیمم و رطوبت بهینه تهیه شدند و در ۵ لایه در داخل مولد به قطر ۷۱ میلی‌متر و ارتفاع ۱۴۲ میلی‌متر متراکم شدند. در این تحقیق نمونه‌ها به مدت حدوداً ۲۴ ساعت در داخل قالب نگه داشته شدند و توسط نایلون‌های پلاستیکی پوشانده شدند. بعد از ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از داخل قالب خارج شده و به یک اتاق رطوبت با دمایی بین ۲۰ تا ۲۳ درجه و رطوبت ۸۰ تا ۹۰ درصد منتقل می‌شوند تا تحت عمل‌آوری قرار گیرند. در شکل ۲ نمونه مخلوط رس و ۲۰ درصد RCA نشان داده شده است.

سپس نمونه‌های تهیه شده در زمان‌های عمل‌آوری مورد نظر (۷ و ۲۸ روزه) در داخل سل سه محوری قرار داده شد که در آن بارگذاری محوری تکراری در فشار همه جانبه مشخصی اعمال می‌گردد. آزمایش **RLT** مطابق استاندارد **AASHTO T307** با اعمال بارگذاری هاورسینوسی انجام می‌شود مدت بارگذاری سیکلیک ۱ ثانیه می‌باشد که ۰/۱ ثانیه مدت بارگذاری و ۰/۹ ثانیه مدت استراحت بود. آزمایشات سه محوری سیکلیک در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) انجام گرفته است که شمای کلی دستگاه در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. دستگاه سه محوری سیکلیک استفاده شده در تحقیق حاضر

بر اساس رو آزمایش **AASHTO T307**، نمونه‌های تهیه شده تحت سیکل بارگذاری ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ در تنش همه جانبه ۴۱/۴ کیلوپاسگال و تنش سیکلیک ۲۴/۸ کیلوپاسگال قرار می‌گیرند. سپس آزمایش با ۱۵ سیکل بارگذاری به ازای تنش‌های همه جانبه و تنش‌های سیکلیک مختلف ادامه پیدا می‌کند.

در سه تنش همه جانبه مختلف ۴۱/۴، ۲۷/۸ و ۱۳/۸ کیلوپاسگال، تنش‌های سیکلیک ۱۲/۴، ۲۴/۸، ۳۷/۲ و ۴۹/۶ و ۶۲/۱ کیلوپاسگال (در مجموع ۱۵۰۰ سیکل) در نمونه‌های تهیه شده اعمال شد. مقدار  $M_r$  در هر مرحله، میانگین مقادیر  $M_r$  بدست آمده در ۵ سیکل انتهایی بارگذاری تکراری می‌باشد. برای نمونه در شکل ۴ تغییرات تنش‌های سیکلیک در مقابل کرنش محوری در تنش همه جانبه ۴۱/۴ کیلوپاسگال برای مخلوط رس و ۲۰ درصد RCA در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه آورده شده است. مقدار  $M_r$  با استفاده از آزمایش **RLT** تعیین شد که به صورت نسبت تنش تفاضلی محوری به کرنش قابل بازگشت



شکل ۲. مخلوط رس و ۲۰ درصد RCA تهیه شده جهت آزمایش **RLT**

می‌یابد و در نتیجه باعث کاهش مقدار شاخص خمیری مخلوط رس و RCA می‌گردد. برای تفسیر این رفتار، به این نکته می‌توان اشاره کرد که هرچه محتوای RCA غیرپلاستیک در خاک رسی افزایش یابد، میزان ذرات ماسه ای (ذرات عبوری از الک نمره ۴۰ و مانده روی الک نمره ۲۰۰) در خاک رسی افزایش می‌یابد و در نتیجه باعث کاهش مقادیر LL و PI می‌گردد. نتایج مشابهی توسط Aldeeky و Al Hattamleh (۲۰۱۷) ارائه شده است.

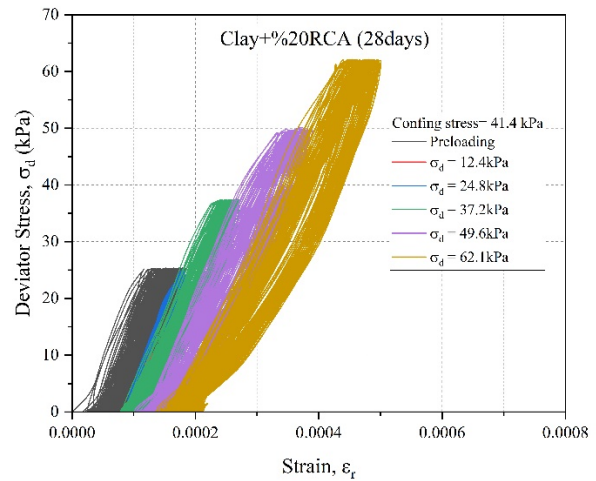
### نتایج آزمایش تراکم

منحنی‌های تراکم برای خاک تثبیت شده به ازای محتوای مختلف RCA در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که در شکل دیده می‌شود، با افزایش محتوای RCA، مقدار وزن مخصوص خشک ماکزیمم افزایش و مقدار رطوبت بهینه کاهش پیدا می‌کند. وقتی محتوای RCA به ۳۰ درصد می‌رسد، مقدار وزن مخصوص خشک ماکزیمم مخلوط از مقدار ۱/۶۵ تا ۱/۸۰ افزایش می‌یابد و مقدار رطوبت بهینه نیز از مقدار ۲۲/۵۰ تا ۱۳/۷ کاهش پیدا می‌کند. کاهش در مقدار رطوبت بهینه احتمالاً به دلیل سطح ویژه کمتر مصالح RCA نسبت به خاک رسی می‌باشد (Kianimehr et al, 2019). افزایش در مقدار MDD نیز می‌تواند به مفهوم نسبت تخلخل بین دانه‌ای مربوط باشد. نتایج مشابهی توسط Cabalar و همکاران (۲۰۱۹)، Tavakol و همکاران (۲۰۲۰) و Deng و همکاران (۲۰۲۱) ارائه شده است.

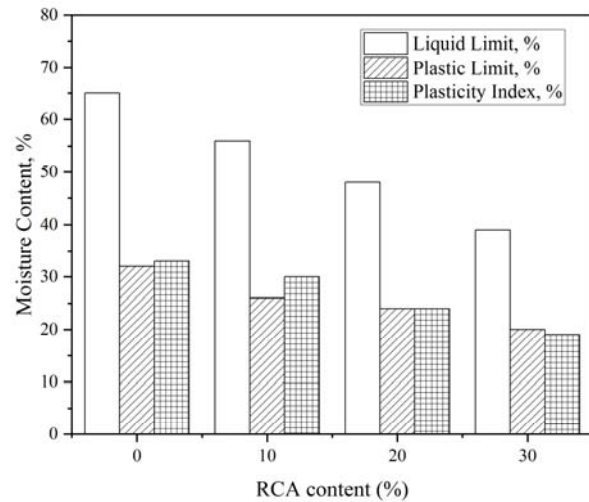
### نتایج آزمایش مدول برجهنگی

آزمایش تعیین مدول برجهنگی ( $M_R$ ) بر روی خاک رس متورم شونده تثبیت شده ازای محتوای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد RCA انجام شد. در شکل ۷ و ۸ به ترتیب نمودار تغییرات  $M_R$  خاک تثبیت شده به ازای مقادیر مختلف RCA در تنش‌های سیکلیک مختلف به ازای تنش همه جانبه متفاوت در زمان‌های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه نشان داده شده است. همان طور که دیده می‌شود، به ازای هر دو زمان عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه با افزایش محتوای RCA مقدار  $M_R$  نیز افزایش می‌یابد. افزودن RCA به خاک رسی باعث افزایش مقدار وزن مخصوص خشک ماکزیمم، کاهش رطوبت بهینه و همچنین افزایش مقاومت اصطکاک سطحی بین ذرات می‌رود و در نتیجه در کل باعث

تعریف می‌شود. تاثیر فاکتورهای مختلف موثری همانند محتوای افزودنی RCA و زمان عمل آوری بر روی مقدار  $M_R$  مورد مطالعه قرار گرفت.



شکل ۴. تغییرات تنش های سیکلیک در مقابل کرنش محوری (مخلوط رس و ۲۰ درصد RCA)

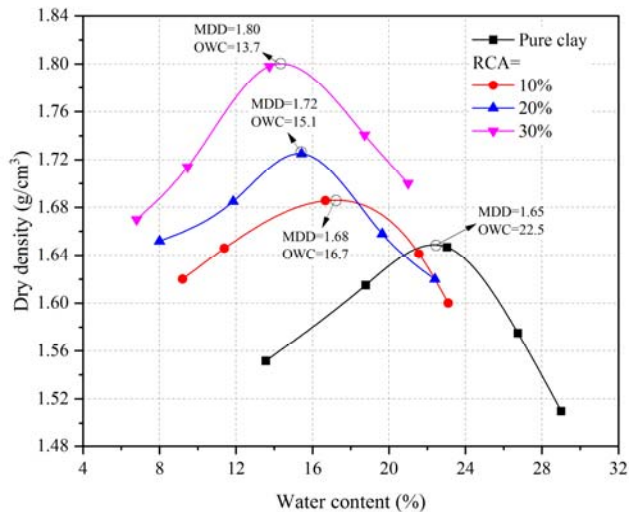


شکل ۵. تغییرات حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری به ازای محتوای مختلف RCA

### نتایج آزمایشات و بحث

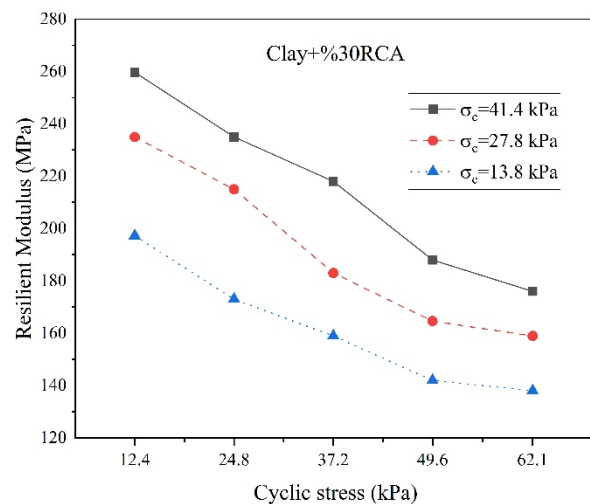
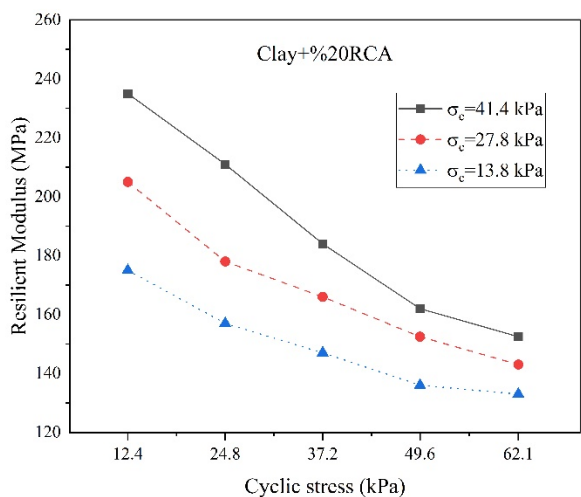
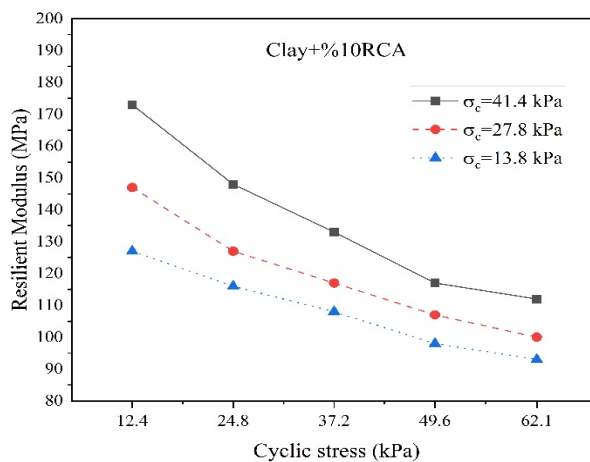
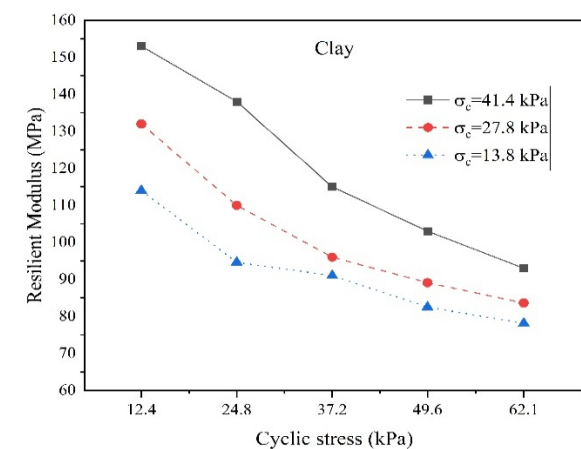
#### نتایج حدود اتبرگ

در شکل ۵ نتایج آزمایشات حد روانی و حد خمیری برای خاک رس بستر تثبیت شده با ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد RCA آورده شده است. همان طور که دیده می‌شود، هر دو مقدار حد روانی و حد خمیری با افزایش محتوای غیرپلاستیک RCA کاهش



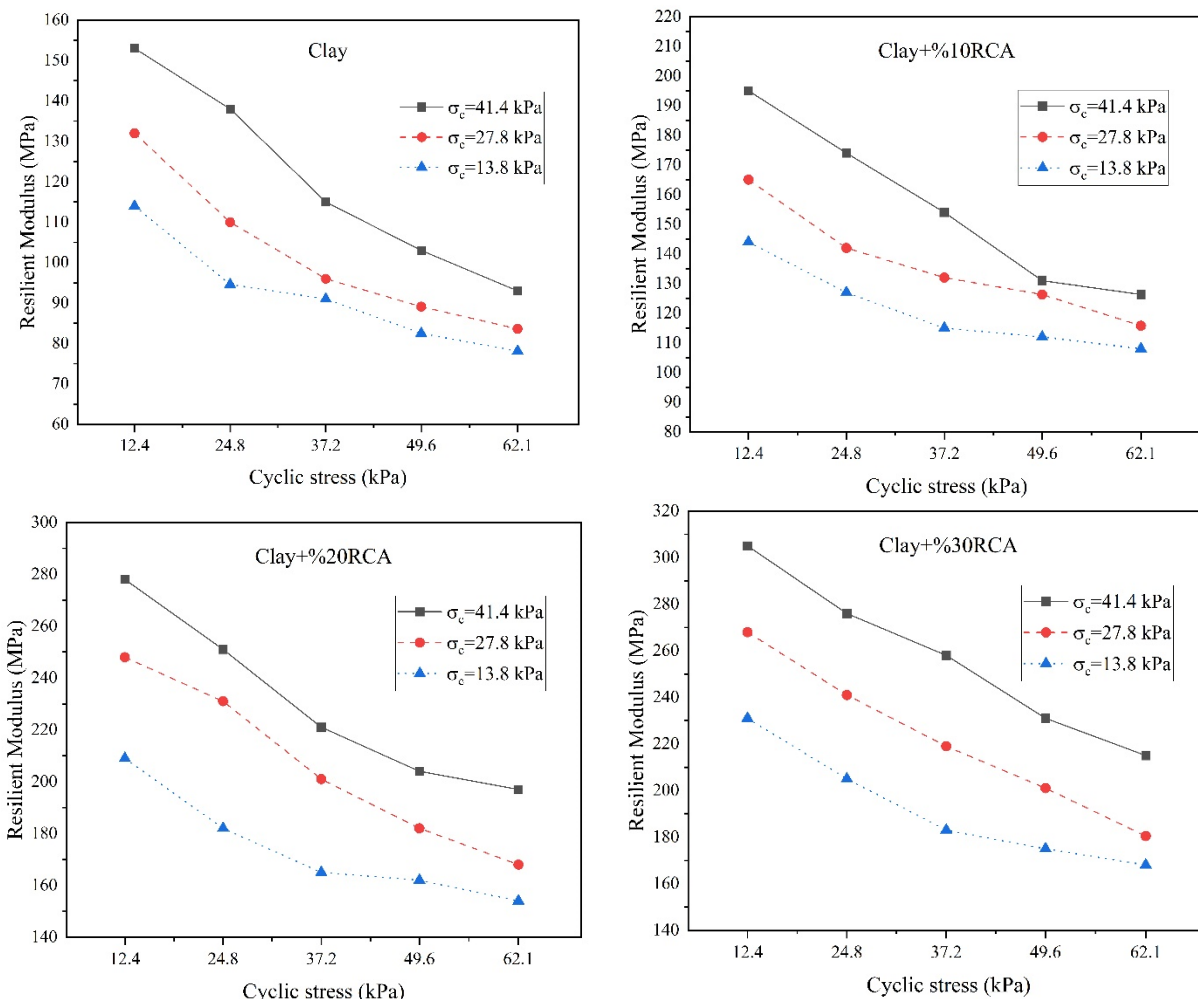
شکل ۶. منحنی تراکم رس تثبیت شده

به ازای محتوای مختلف RCA



شکل ۷. تغییرات مدول برجهنگی در مقابل تنش سیکلیک به ازای تنش های همه جانبه مختلف (زمان عمل آوری ۷ روزه)

بهبود مقاومت و سختی خاک رسی می گردد. به طور کلی، خاکی با مقدار وزن مخصوص خشک بیشتر و رطوبت بهینه کمتر دارای مدول سختی بیشتری می باشد (Rabab'ah et al, 2020). همان طور که در شکل دیده می شود، در مخلوط رس و RCA، افزایش تنش انحرافی باعث کاهش مقادیر  $M_R$  می گردد که این رفتار نرم شدگی کرنش را معرفی می کند که متناسب با رفتار خاک های ریزدانه می باشد (NCHRP, 2004). خردشدگی ناشی از بارگذاری در داخل نمونه های خاک باعث سستی و نرم شدگی خاک می گردد (Patel & Shahu, 2016).



شکل ۸. تغییرات مدول برجهندگی در مقابل تنش سیکلیک به ازای تنش‌های همه جانبه مختلف (زمان عمل آوری ۲۸ روزه)

(CAH) واکنش می‌دهد. کاتیون‌های کلسیم با دی اکسید سیلیکون ( $\text{SiO}_2$ ) و اکسید آلومینوم ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) آزاد شده ترکیب می‌شوند و باعث تشکیل ژل‌های سیمانی به شکل CSH و CAH می‌شوند و این ژل‌های سیمانی باعث تقویت باند بین رس و RCA و تشکیل ماتریکس اسکلتی سخت شده می‌گردد و در نتیجه منجر به افزایش مقدار مدول برجهندگی مخلوط می‌شود. مقاومت خاک‌های تثبیت شده به کمک افزودنی‌های RCA به دلیل واکنش‌های پوزولانی با زمان افزایش پیدا می‌کند (Bergado, 1996). همان‌طور که گفته شد، در یک واکنش پوزولانی، کلسیم هیدرواکسید موجود در افزودنی با سیلیکات‌ها و آلومینات‌های موجود در خاک واکنش می‌دهد و باعث تشکیل

عمده اجزای تشکیل دهنده مصالح RCA سنگدانه‌های طبیعی هستند (در حدود ۶۰ تا ۸۵ درصد) (Kianimehr et al, 2019). در مرحله‌ی افزودن RCA به خاک رس متورم شونده، اندرکنش مکانیکی بین این مصالح ایجاد می‌شود. وجود مصالح RCA در خاک رسی باعث افزایش مقاومت و اصطکاک بسیج شده می‌گردد. تقریباً در حدود ۲۰ تا ۳۵ درصد مصالح RCA را ملات‌های سیمانی تشکیل می‌دهند. ملات‌های سیمانی دارای مقدار کمی سیمان‌های هیدراته نشده می‌باشند. مطابق نتایج XRD (جدول ۲)، پوزولان‌هایی سیلیکا و آلومینا موجود در خاک با کلسیم موجود در RCA و در حضور آب به شکل کلسیم-سیلیکات-هیدرات و (CSH) و کلسیم-آلومینات-هیدرات

## ۵- نتیجه گیری

هدف این تحقیق ارزیابی رفتار خاک رسی با خاصیت خمیری بالا به عنوان خاک متورم شونده تثبیت شده به کمک مصالح RCA بود. آزمایشات آزمایشگاهی مختلفی بر روی خاک رسی به ازای درصدهای مختلف RCA در زمان های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه انجام شد. بر اساس آزمایشات انجام شده در این تحقیق، نتایج زیر بدست آمد:

-هرچه محتوای RCA غیرپلاستیک در خاک رسی افزایش یابد، میزان ذرات ماسه ای (ذرات عبوری از الک نمره ۴۰ و مانده روی الک نمره ۲۰۰) در خاک رسی افزایش می یابد و در نتیجه باعث کاهش مقادیر LL و PI می گردد.

-به دلیل سطح ویژه کمتر مصالح RCA نسبت به خاک رسی، محتوای رطوبت بهینه خاک رسی با افزایش RCA، کاهش پیدا می کند، در حالی که مقدار وزن مخصوص خشک ماکزیمم به دلیل مفهوم نسبت تخلخل بین دانه ای افزایش پیدا می کند.

-برای ترکیب رس و ضایعات RCA، به دلیل تشکیل زل های سیمانی، مقاومت و سختی زیاد بدست آمد که باعث چسبیدن ذرات رس و RCA به همدیگر می شود و در نتیجه توده منسجم سخت شده تشکیل می دهد. با افزایش زمان عمل آوری، مقدار این زل های سیمانی در مخلوط رس و RCA افزایش می یابد و باعث افزایش مقدار مدول برجهندگی می گردد.

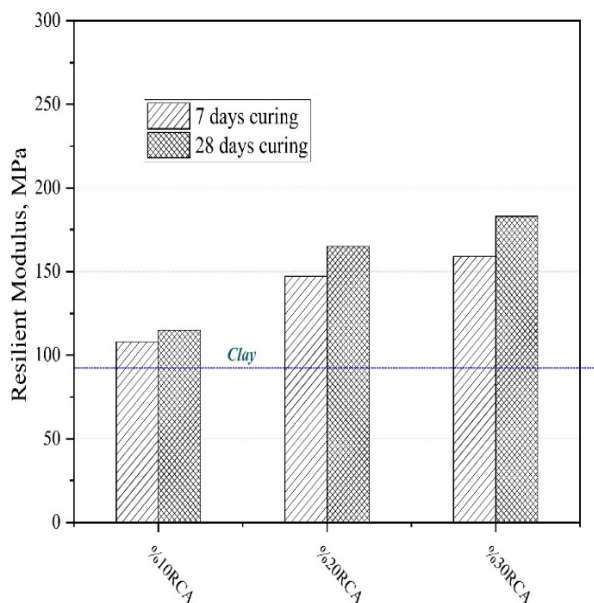
-استفاده از ضایعات RCA در ساختار خاک رسی متورم شونده، می تواند در مرحله ی اول باعث بهبود ویژگی های فیزیکی و مکانیکی لایه های بستر رسی گردد و در در مرحله ی بعد استفاده از این ضایعات می تواند باعث کاهش مصالح دپو شده و کاهش آلودگی های زیست محیطی گردد.

## ۶- مراجع

-Abu-Farsakh, M., Dhakal, S., and Chen, Q. (2015). Laboratory characterization of cementitiously treated/stabilized very weak subgrade soil under cyclic loading. *Soils and Foundations*, 55(3), 504–516.

-Aldeeky, H., and Al Hattamleh, O. (2017). Experimental Study on the Utilization of Fine Steel Slag on Stabilizing High Plastic Subgrade Soil. *Advances in Civil Engineering*, 1–11.

زل های سیمانی می گردد و در نتیجه موجب بهبود مقاومت خاک تثبیت شده می شود. در حالت کلی، با افزایش در مقدار زل های سیمانی تولید شده، چسبندگی بین ذرات بیشتر می گردد و در نتیجه موجب افزایش در مقدار  $M_R$  می شود. به همین منظور، تمامی نمونه های تثبیت شده تحت زمان های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه قرار گرفته اند تا تاثیر زمان عمل آوری بر روی مقادیر  $M_R$  مورد ارزیابی قرار گیرد. مقادیر  $M_R$  در تنش همه جانبه ۱۳/۸ و تنش انحرافی ۳۷/۲ کیلوپاسگال انتخاب شده است. این شرایط بارگذاری بر اساس مقادیر تنش های پیش بینی شده مورد انتظار در محل می باشد که توسط محققین مختلفی مطرح شده است (Virgil Ping et al, 2001, Jones & Witczak, 1977). در شکل ۹ مقادیر  $M_R$  خاک رس متورم شونده تثبیت شده به ازای محتوای مختلف RCA در زمان های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود، وجود مصالح RCA در خاک رسی باعث افزایش مقاومت و اصطکاک بسیج شده می گردد و همین مسئله موجب افزایش مقدار مدول برجهندگی می گردد. همچنین به دلیل واکنش های پوزولانی، مقادیر  $M_R$  بدست آمده به ازای تمامی ترکیبات در زمان عمل آوری ۲۸ روزه بیشتر از زمان عمل آوری ۷ روزه می باشد.



شکل ۹. تغییرات مدول برجهندگی رس تثبیت شده به ازای مقادیر مختلف RCA در زمان های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه

- Ghadir, P., Zamanian, M., Mahbubi-Motlagh, N., Saberian, M., Li, J., and Ranjbar, N. (2021). Shear strength and life cycle assessment of volcanic ash-based geopolymer and cement stabilized soil: A comparative study. *Transportation Geotechnics*, 31, 100639.
- Gandhi, S. B. R. G. R. S. R. (2018). "Resilient Modulus of Lime Treated Expansive Soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, Springer International Publishing.
- Jahandari, S., Tao, Z., Saberian, M., Shariati, M., Li, J., Abolhasani, M., Kazemi, M., Rahmani, A., and Rashidi, M. (2022). Geotechnical properties of lime-geogrid improved clayey subgrade under various moisture conditions. *Road Materials and Pavement Design*, 23(9), 2057–2075.
- Jones, M. P., and Witzczak, M. (1977). Subgrade modulus on the San Diego test road.
- 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. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, 227, 116792.
- Ma, Q., Hu, Z., Hu, Z., and Li, J. (2022). Strength characteristics and micro-scale mechanism of high liquid limit clay treated by recycled construction and demolition wastes (CDW) aggregates. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, 332(April), 127367.
- 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. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(6), 04014186.
- Murmu, A. L., Jain, A., and Patel, A. (2019). Mechanical Properties of Alkali Activated Fly Ash Geopolymer Stabilized Expansive Clay. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(9), 3875–3888.
- Narani, S. S., Abbaspour, M., Mir Mohammad Hosseini, S. M., Aflaki, E., and Moghadas Nejad, F. (2020). Sustainable reuse of Waste Tire Textile Fibers (WTTFs) as reinforcement materials for expansive soils: With a special focus on landfill liners/covers. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119151.
- Agrela, F., Barbudo, A., Ramírez, A., Ayuso, J., Carvajal, M. D., and Jiménez, J. R. (2012). Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain. *Resources, Conservation and Recycling*, 58, 98–106.
- Al-Rawas, A. A. (2002). Microfabric and mineralogical studies on the stabilization of an expansive soil using cement by-pass dust and some types of slags. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(5), 1150–1167.
- Al-Jhayyish, A. K. (2014). Incorporating chemical stabilization of the subgrade in pavement design and construction practices.
- Ardah, A., Chen, Q., and Abu-Farsakh, M. (2017). Evaluating the performance of very weak subgrade soils treated/stabilized with cementitious materials for sustainable pavements. *Transportation Geotechnics*, 11, 107–119.
- Bergado, D. T. (1996). Soft ground improvement in lowland and other environments.
- Bordoloi, S., Hussain, R., Garg, A., Sreedeeep, S., and Zhou, W. H. (2017). Infiltration characteristics of natural fiber reinforced soil. *Transportation Geotechnics*, 12, 37–44.
- Bourokba Mrabent, S. A., Hachichi, A., Souli, H., Taibi, S., and Fleureau, J.-M. (2017). Effect of lime on some physical parameters of a natural expansive clay from Algeria. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21(1), 108–125.
- Chaduvula, U., Viswanadham, B. V. S., and Kodikara, J. (2017). A study on desiccation cracking behavior of polyester fiber-reinforced expansive clay. *Applied Clay Science*, 142, 163–172.
- Chakrabarti, S., and Kodikara, J. (2003). 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*, 1819(1), 18–26.
- 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. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, 294, 123567.

- Seco, A., del Castillo, J. M., Espuelas, S., Marcelino, S., and García, B. (2022). Sulphate soil stabilisation with magnesium binders for road subgrade construction. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(6), 1840–1850.
- Seed, H., Mitry, F., Monismith, C., and Chan, C. (1967). prediction of flexible pavement deflections from laboratory repeated-load tests.
- Tiwari, N., Satyam, N., and Kumar Shukla, S. (2020). An experimental study on micro-structural and geotechnical characteristics of expansive clay mixed with EPS granules. *Soils and Foundations*, 60(3), 705–713.
- 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.
- Virgil Ping, W., Yang, Z., Liu, C., and Dietrich, B. (2001). Measuring Resilient Modulus of Granular Materials in Flexible Pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1778(1), 81–90.
- Yang, Z., Zhang, Q., Shi, W., Lv, J., Lu, Z., and Ling, X. (2020). Advances in Properties of Rubber Reinforced Soil. *Advances in Civil Engineering*, (C. S. Vieira, ed.), 2020, 1–16.
- Zagvozda, M., Rukavina, T., and Dimter, S. (2022). Wood bioash effect as lime replacement in the stabilisation of different clay subgrades. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(8), 2543–2553.
- Zhang, H., Yuan, X., Liu, Y., Wu, J., Song, X., and He, F. (2020). Experimental study on the pullout behavior of scrap tire strips and their application as soil reinforcement.” *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, 254, 119288.
- Zhao, H., Ge, L., Petry, T. M., and Sun, Y.-Z. (2014). Effects of chemical stabilizers on an expansive clay. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(4), 1009–1017.
- Okeke, C., Abbey, S., Oti, J., Eyo, E., Johnson, A., Ngambi, S., Abam, T., and Ujile, M. (2020). Appropriate Use of Lime in the Study of the Physicochemical Behaviour of Stabilised Lateritic Soil under Continuous Water Ingress. *Sustainability*, 13(1), 257-258.
- Patel, S., and Shahu, J. T. (2016). Resilient Response and Permanent Strain of Steel Slag-Fly Ash-Dolime Mix. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(10).
- Phanikumar, B. R., and Nagaraju, T. V. (2018). Effect of Fly Ash and Rice Husk Ash on Index and Engineering Properties of Expansive Clays. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(6), 3425–3436.
- Poon, C. S., and Chan, D. (2006). Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. 20, 578–585.
- Rabab’ah, S., Al Hattamleh, O., Aldeeky, H., Aljarrah, M. M., and Al\_Qablan, H. A. (2020). Resilient Response and Permanent Strain of Subgrade Soil Stabilized with Byproduct Recycled Steel and Cementitious Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(6), 04020139.
- Rababah, S., Aldeeky, H., Qasrawi, H., and Al Hattamleh, O. (2022b). Performance of subgrade soil stabilised with by-product recycled mill scale and cementitious materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(3), 708–718.
- Rahman, M. A., Imteaz, M., Arulrajah, A., and Disfani, M. M. (2014). Suitability of recycled construction and demolition aggregates as alternative pipe backfilling materials. *Journal of Cleaner Production*, 66, 75–84.
- Rout, R. K., Ruttanapornmakul, P., Valluru, S., and Puppala, A. J. (2012). Resilient Moduli Behavior of Lime-Cement Treated Subgrade Soils. *GeoCongress 2012*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 1428–1437.

# Determination of the Modulus of Resilience of Expanded Clay Stabilized with Recycled Concrete Waste Using Cyclic Triaxial Testing

*Seyyed Taha Tabatabaei Aghda, Assistant Professor, Housing & Urban Development Research Center, Tehran, Iran.*

*Hosna Soeizi, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Faculty of Technical and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.*

*E-mail: taha.tabatabaei@gmail.com*

Received: May 2025- Accepted: August 2025

## **ABSTRACT**

In urban areas and developed countries, due to the lack of sufficient space for road construction, roads may be built on expansive clay soils, which are considered problematic soils. Recycled Concrete Aggregates (RCA) can be used as alternative materials in road construction projects. In this research, RCA waste was used as an additive to stabilize expansive clay soil, and the behavior of the stabilized soil with this additive was analyzed to improve its physical and strength properties. A series of laboratory tests, including gradation, particle density, Atterberg limits, standard compaction, and cyclic triaxial tests, were conducted. The results showed that adding RCA waste to expansive clay soil reduces the liquid limit (LL) and plasticity index (PI), while also decreasing the optimum moisture content and increasing the maximum dry density. Additionally, a series of cyclic triaxial tests were conducted in accordance with the AASHTO T307 standard to determine the resilient modulus ( $M_r$ ) of different mixtures at curing times of 7 and 28 days. The results indicated that the presence of RCA materials in the clay soil increases the mobilized strength and friction, leading to an increase in the resilient modulus. Furthermore, due to pozzolanic reactions, the  $M_r$  values obtained for all mixtures at the 28-day curing time were higher than those at the 7-day curing time.

**Keywords:** Resilience Modulus, Stabilization, Clay Soil