

بهبود وضعیت روسازی بالاستی خطوط ریلی با استفاده از بسترهای رسی نرم

تثبیت شده به کمک افزودنی RRP

حسین قربانی دولاما، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران
جبارعلی ذاکری*، استاد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
مرتضی اسمعیلی، استاد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
پرهام حیاتی، استادیار، دانشکده عمران، معماری و هنر، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران

Email: zakeri@iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۲۵ - پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۱۱

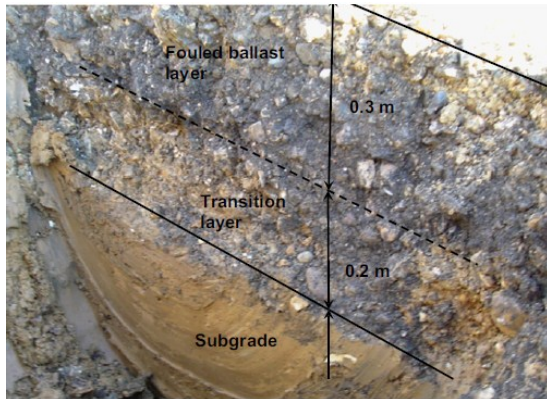
چکیده

به موازات توسعه خطوط باری سنگین و خطوط پرسرعت، چالش مهم نگهداری و تعمیر بالاست در این خطوط ریلی همواره مطرح بوده است. گرچه هزینه احداث خطوط بالاستی در مقایسه با خطوط بدون بالاست به‌طور قابل توجهی کمتر است اما مسأله حذف لایه بالاست و یا تثبیت آن به روش‌های گوناگون از جمله موضوعات مهم تحقیقات زیرسازی ریلی در دهه اخیر به شمار می‌رود. در این تحقیق، با هدف جایگزینی بخشی از لایه بالاست در بخش زیر تراورس با خاک بستر تثبیت شده، امکان‌پذیری استفاده از نوع جدیدی از روسازی بدون بالاست مطرح شده است. در این راستا، با استفاده از مصالح رسی تهیه شده از بستر راه‌آهن ارومیه - مراغه و افزودن درصد‌های مختلف ماده شیمیایی تثبیت‌کننده **Royal Road Product 235 (RRP)** به مصالح بستر، نمونه‌های متعددی ساخته شده و تحت آزمایش‌های تراکم، CBR، مقاومت فشاری و مقاومت کششی قرار گرفته و نهایتاً نتیجه‌گیری شده که افزودن این ماده به میزان $1.52E-02$ درصد حجمی نسبت به حجم خاک، مقدار بهینه بوده و باعث کاهش رطوبت بهینه به میزان ۳۱٪ و افزایش مقاومت فشاری، کششی و برشی به ترتیب به میزان ۴۶، ۲۰ و ۶۷ درصد گردیده است. در گام دوم، نمونه‌های تثبیت‌شده با درصد‌های مختلف ماده RRP، به‌وسیله دستگاه جعبه بالاست تحت آزمایش سیکلیک تک‌محوری قرار داده شده و رفتار نشست-تعداد سیکل آنها تحت فشار معادل بار بهره‌برداری راه‌آهن در ۱۰۰۰۰۰ سیکل بررسی گردیده است. بر اساس نتایج، با لحاظ افزایش سختی و کاهش نشست، نمونه با $2.73E-02$ درصد ماده تثبیت‌کننده و از لحاظ میرایی، نمونه با $1.52E-02$ درصد ماده تثبیت‌کننده، بهترین عملکرد را داشته و به ترتیب باعث ۲۸٪ کاهش نشست و ۲۵٪ افزایش میرایی شده‌اند. در مجموع، با لحاظ نتایج آزمایش‌های استاتیک و دینامیک و مسائل اقتصادی، مقدار $1.52E-02$ به عنوان درصد بهینه قابل استفاده ماده افزودنی به‌منظور تثبیت بستر انتخاب شده است.

واژه‌های کلیدی: ماده RRP، تثبیت بستر، خطوط بالاستی، آزمایش جعبه بالاست

۱. مقدمه

عمده در بسترهای ریزدانه رسی - سیلتی تحت اثر بار تکراری راه آهن رخ می دهد. وقوع این تغییر مکان ها در شرایط پیش رونده می تواند به خرابی هایی از نوع لغزش بستر بیانجامد. به طور کلی، در چنین مواردی، عیوب بستر را می توان در عدم تأمین الزامات باربری و کنترل نشست خط ریلی جستجو نمود (اسمعیلی و همکاران، ۱۳۸۹).



شکل ۱. لایه های خط بالاستی (ترین و همکاران، ۲۰۱۲)

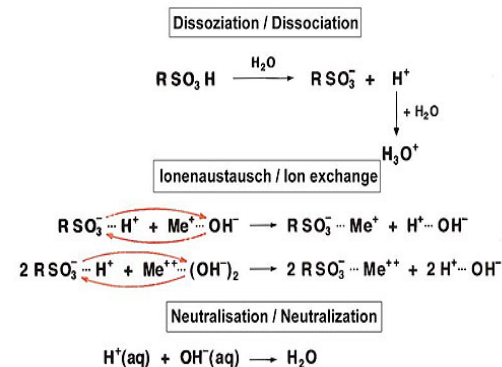
پایدارسازی بستر رسی از دو جنبه دارای اهمیت است: جنبه اول، پمپاژ گل به داخل بالاست، ایجاد کیفی بالاست و نفوذ بالاست در بستر و جنبه دوم ایجاد نشست، به خصوص نشست های ناهمگون، کاهش قدرت باربری خاک در اثر بارهای وارده و تغییرات درصد رطوبت متفاوت. در این راستا، روش های مختلفی با استفاده از مواد مختلف طی سالیان اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است. موادی مانند سیمان، آهک، پلیمر، اپوکسی، CBR PLUS، سنگ گچ و باقیمانده کاربرد کلسیم در تثبیت شیمیایی بسترهای رسی نرم مورد توجه و استفاده قرار گرفته است.

در مورد تثبیت با آهک تحقیقات جامعی انجام گرفته است که عمده نتایج آنها شامل افزایش در مقاومت فشاری، CBR، تراکم، مقاومت در برابر یخ-زدگی، مقاومت برشی، دوام و کاهش نفوذپذیری، حد خمیری و شاخص پلاستیک می باشد. برای تثبیت با سیمان نیز بررسی های متنوعی انجام گرفته که نتایج آنها

خطوط بالاستی، به علت مزایایی، از جمله هزینه ساخت ارزان و سرعت ساخت زیاد، اغلب توسط صاحبان و بهره برداران زیرساخت های ریلی مورد توجه قرار می گیرند. اما چالش هایی مانند کثیفی بالاست، نشست نامتقارن خط و تغییر شکل های بزرگ ناشی از جابجایی افقی باعث افزایش هزینه های نگهداری و تعمیر در این نوع خطوط گردیده است (ایندراراتنا و همکاران، ۲۰۲۰-ب). بستر خطوط ریلی وظایف مهمی از جمله تأمین سختی و استحکام کافی (مقاومت در برابر تغییر شکل های غیرمجاز)، توزیع ایمن و مناسب بارهای انتقال یافته از لایه بالاست و زیربلاست به زمین طبیعی، توانایی مقاومت در برابر چرخه های متوالی ذوب و انجماد، عدم حساسیت بیش از حد در مقابل تغییرات درصد رطوبت و تأمین الزامات مربوط به زهکشی خط آهن را برعهده دارد. با توجه به موارد اشاره شده، تقویت بستر می تواند عامل مناسبی در بهبود خصوصیات خط باشد. با حذف لایه زیربلاست و قرار دادن مستقیم تراورس روی خاک تثبیت شده، نقش بستر بسیار حائز اهمیت خواهد بود. لذا بهبود خصوصیات بستر می تواند تأثیر به سزایی در عملکرد کلی خط داشته باشد. بارهای دینامیک بزرگ وارده از چرخ لوکوموتیو و سرعت حرکت زیاد آن از یک سو و از سوی دیگر باربری ضعیف بسترهای رسی با رطوبت زیاد، از جمله عوامل ایجاد نشست و تغییر شکل های بزرگ در خط بالاستی هستند که بر عملکرد آن تأثیر نامطلوب گذاشته و در برخی موارد باعث اختلال در عملکرد آن می شوند. در نهایت، این موضوع، ضمن کاهش پایداری خط، موجب تغییر در مشخصات هندسی مسیر و تحمیل هزینه های زیاد نگهداری و تعمیر می شود (لازورنکو و همکاران، ۲۰۱۹). خرابی زیرسازی، عملاً خرابی و ناکارآمدی روسازی را نتیجه می دهد که این موضوع به طور عمده ناشی از تغییر مکان های دائمی بستر خطوط ریلی است. این نوع تغییر مکان به طور

همچنین، این ماده به علت تغییراتی که در ویسکوزیته آب ایجاد می کند باعث ایجاد شرایط تراکم بهتر و بالا بردن مقاومت خاک می شود (فرزانه و مصدق، ۲۰۱۱). در شکل ۲، نحوه عملکرد ماده RRP با علامت R و عکس العمل شیمیایی آن مشخص شده است.

Ionenaustausch und Reaktionen / Ion exchange and reactions



شکل ۲. واکنش شیمیایی ماده RRP و نحوه

عملکرد آن در خاک (گرلینگ، ۲۰۱۶)

سابقه اجرایی مناسبی از کاربرد این ماده در طول زمان، در کشورهای مختلف، در زیرساخت های حمل و نقل و سدسازی وجود دارد. برای مثال، در تثبیت بستر راه در کشورهایی همچون آلمان، لیتوانی، روسیه، کرواسی، صربستان، ترکیه، مغولستان، اردن، ویتنام، اوگاندا و بسیاری کشورهای دیگر استفاده شده است. در زمینه احداث فرودگاه، سدسازی و ساخت راه آهن نیز در ترکیه، یوگسلاوی سابق و برخی کشورهای آفریقایی استفاده هایی شده است. در ایران نیز به صورت قطعات آزمایشی در محل باسکول دفن زباله تهران، تعریض راه بین شهری محور ارومیه- اشنویه و در محل ازدها بولاغی و نیز بخش هایی از جنوب کشور راه ساخته شده است (گرلینگ، ۲۰۱۶). فلسفه اصلی به- کارگیری این ماده، استفاده حداکثری از خاک محل و کاهش حمل مصالح می باشد. عمده نتایج حاصل از کاربرد ماده RRP در انواع راه ها، محوطه ها، فرودگاه ها و سدسازی شامل: افزایش پارامترهای مقاومتی، تسریع

مشابه تثبیت با آهک می باشد. چنانچه از مخلوط سیمان و آهک نیز به وفور در تثبیت خاک استفاده شده است. نتایج بررسی ها نشانگر افزایش در مقاومت فشاری، دوام، مقاومت تک محوری، سختی، CBR، کاهش دامنه خمیری، رطوبت بهینه و تنش دینامیک می باشد (کای و همکاران، ۲۰۲۰؛ سلارو و همکاران، ۲۰۱۲؛ ژائو و همکاران، ۲۰۱۷؛ لازورنکو و همکاران، ۲۰۱۹؛ مالکاتی و همکاران، ۲۰۲۰؛ آلوواتویا و همکاران، ۲۰۱۹؛ فانیکومار و راجو، ۲۰۲۰؛ پراتیکو و پوپالا، ۲۰۱۲؛ سئل-سانچز و همکاران، ۲۰۱۵؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ ژانگ و جیانگ، ۲۰۲۰). تثبیت خاک با استفاده از سایر مواد شیمیایی جهت دستیابی به اهداف مشخص برای انواع خاک ها مورد مطالعه قرار گرفته است. از جمله، تثبیت با باقیمانده کاربرد کلسیم و خاکستر بیوماس باعث افزایش مقاومت فشاری و مقاومت فشاری محدود نشده، مدول ارتجاعی، CBR و کاهش تغییر شکل ارتجاعی (محمدی نیا و همکاران، ۲۰۱۹)، تثبیت خاک با سرباره کوره آهن گدازه موجب افزایش قابل توجه CBR و مشخصات فیزیکی و مقاومتی و کاهش قابلیت تورم (یادو و تریپاتی، ۲۰۱۳؛ لوپز و همکاران، ۲۰۱۴؛ ایندراراتنا و همکاران، ۲۰۱۹) تثبیت با کائولین باعث افزایش مقاومت سیکلیک و شاخص خمیری و کاهش مقاومت برشی (ایندراراتنا و همکاران، ۲۰۲۰-الف)، تثبیت رس با لیگنوسولفونات باعث افزایش مشخصات فیزیکی و مقاومتی (Ta'negonbadi, B. and Noorzad, R.2018)، تثبیت رس با پلیمر موجب افزایش مقاومت فشاری و دوام (میرزابابی و همکاران، ۲۰۱۷) خواهد شد.

Reynolds Road Packer 2-3-5 (RRP-235) مایعی قهوه ای رنگ و اسیدی، ساخت کشور آلمان است که از طریق جانشینی یونی کلئیدهای رسی موجب بهبود خواص آنها می شود. با افزودن این ماده به خاک رسی، ضخامت لایه آب دوگانه کاهش یافته و خصوصیات خمیری و تورمی خاک بهبود می یابد.

به دست آوردن نتایج آزمایشگاهی، حذف لایه زیربالاست و نیز بخشی از بالاست مطالعه گردیده و امکان قرارگیری تراورس به صورت مستقیم روی خاک رسی بررسی گردد. در این خصوص، نمونه‌های متنوعی برای آزمایش‌های مختلف، با درصدهای ماده افزودنی مشخص، ساخته و تحت آزمایش قرار گرفته است. در گام اول، مشخصات مقاومتی خاک از جمله تراکم، رطوبت بهینه، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مشخصات برش مورد بررسی قرار گرفت. در گام دوم، رفتار و پاسخ‌های دینامیک خاک تثبیت‌شده با استفاده از آزمون جعبه بالاست مورد بررسی قرار گرفته است و در این بخش با تعیین نشست، سختی و میرایی خاک، رفتار آن مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

۲. روش‌شناسی تحقیق

برای انجام آزمایش میدانی و ساخت نمونه‌ها در آزمایشگاه، از خاک محور راه‌آهن ارومیه- مراغه و از محل ایستگاه ارومیه نمونه‌برداری شده است. این مسیر شامل خط بالاستی می‌باشد که به واسطه شرایط محیطی و سطح آب‌های زیرزمینی، بارش‌های سالانه، وجود انواع خاک‌های رسی و نیز تردد قطار دچار تغییرشکل‌های قائم و افقی گردیده و هندسه خط را دچار تغییرشکل نموده است.

از این رو، با نمونه‌برداری از خاک محل، مجموع آزمایش‌های فیزیکی، بارگذاری استاتیک و بارگذاری دینامیک روی خاک مورد نظر با درصدهای مختلف ماده RRP، با هدف بررسی رفتار و تعیین درصد بهینه به‌کارگیری این ماده، مطابق جدول ۱ صورت گرفته است.

در اجرای عملیات، کاهش حمل مصالح و استفاده حداکثری از مصالح موجود، کاهش نفوذپذیری، کاهش ضخامت لایه‌های زیرسازی و روسازی، عدم نیاز به رویه در راه‌های با ترافیک کمتر، کاهش نشست‌های نامتقارن، کاهش رشد گیاهان، کاهش آب‌شستگی، کاهش عملیات نگهداری زمستانی، کاهش نیاز به ماشین‌آلات و کاهش صدمات زیست‌محیطی می‌باشد. یک تفاوت عمده تثبیت خاک رس با استفاده از ماده RRP در مقایسه با سایر تثبیت‌کننده‌ها، از جمله آهک و سیمان، امکان تثبیت دوباره آن بعد از عمل‌آوری است. سیمان و آهک فقط یکبار عمل نموده و در صورت شکست امکان ترمیم ندارد. در حالی که ماده RRP تأثیر همیشگی داشته و تا زمان وجود مواد آن در اطراف کلونید رس، می‌تواند راه را تثبیت نماید و همچنین با نفوذ مواد در خاک با عمق بیشتر، به مرور زمان ضخامت لایه بیشتر می‌شود (گرلینگ، ۲۰۱۶).

برخلاف سابقه نسبتاً طولانی استفاده از این ماده در انواع زیرساخت‌های عمرانی کشورهای مختلف، کار تحقیقاتی عمده‌ای در زمینه به‌کارگیری این ماده در زیرساخت‌های ریلی و در تثبیت بسترهای رسی سست در خطوط ریلی صورت نگرفته است. با توجه به قدرت باربری کم خاک رسی و تغییرات زیاد در فصول مختلف سال با توجه به شرایط جوی و برخی مشکلات دیگر مانند جذب آب زیاد، تورم و تغییر حجم در رطوبت‌های مختلف، امکان قرارگیری تراورس به صورت مستقیم روی خاک رس وجود ندارد. در راستای استفاده از خاک محل، کاهش هزینه‌های حمل، اثرات زیست‌محیطی و نیز افزایش قدرت باربری خاک، کاهش تغییرات آن در فصول مختلف سال، ارائه روسازی جدید بالاستی با مصرف بالاست کمتر نسبت به روسازی معمولی بالاستی، در این تحقیق، از بستر رسی تثبیت‌شده با ماده RRP به عنوان هدف اصلی تحقیق استفاده شده و سعی می‌گردد تا با شناخت خصوصیات مهندسی خاک تثبیت‌شده با ماده RRP و

جدول ۱. آزمایش‌های انجام شده روی خاک رسی تثبیت شده با ماده RRP

آزمایش	استاندارد مورد استفاده	درصد حجمی ماده RRP نسبت به خاک				
		0	9.09E-03	1.52E-02	2.12E-02	2.73E-02
درصد رطوبت بهینه	ASTM D 698-78	✓	✓	✓	✓	---
مقاومت فشاری	ASTM C39	✓	✓	✓	✓	✓
مقاومت کششی	ASTM C496	✓	✓	✓	✓	✓
مقاومت برشی	ASTM D3080	✓	✓	✓	✓	---
جعبه بالاست	----	---	✓	✓	✓	---

۲-۱-۲. معرفی مصالح و مشخصات آنها

۲-۱-۱-۲. معرفی خاک مورد استفاده و مشخصات آن

راه آهن ارومیه - مراغه از نوع بالاستی می باشد که بخشی از مسیر آن در حاشیه دریاچه ارومیه واقع شده است. عمده مصالح منطقه از خاک ریزدانه و بخصوص خاک رسی می باشد. وجود چشمه ها، تغییرات سطح آب زیرزمینی و بارش های فصلی تأثیر به سزایی در تغییرات ظرفیت باربری خاک دارد. لذا، محل مناسبی برای مطالعه میدانی روی خاک رس تثبیت شده با ماده RRP است. از آنجایی که ماده RRP روی ذرات ریزتر از ۰/۰۶ میلی متر تأثیر می گذارد، لذا مقدار رس کوچکتر از آن بسیار حائز اهمیت است. با توجه به نمودار دانه بندی (شکل ۳)، این مقدار برای خاک مورد استفاده در حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد است. آزمایش های هیدرومتری، دانه بندی و رطوبت بهینه تراکم روی خاک بدون ماده افزودنی انجام گرفت که حد روانی، حد پلاستیک، شاخص پلاستیک، درصد رد شده از الک به قطر ۶۰ میکرون و حداکثر وزن مخصوص تر و خشک به ترتیب برابر ۴۴، ۲۵، ۱۹، ۴۳٪ و ۲/۴۲ و ۲/۱۷ گرم

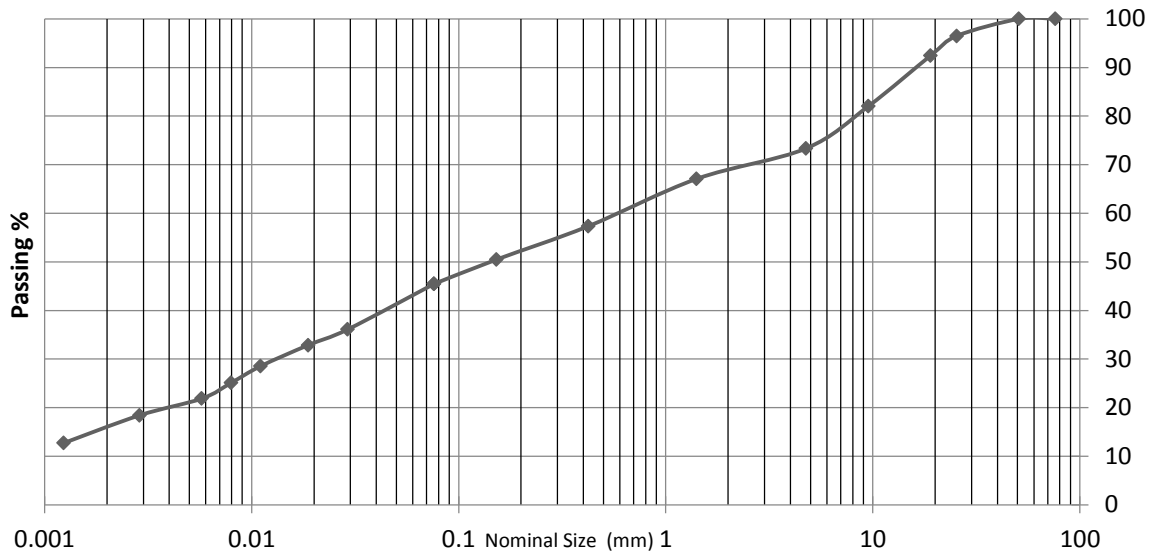
بر سانتی متر مکعب به دست آمد و نوع خاک ماسه رس - دار (SC) می باشد.

۲-۱-۲-۲. آزمایش های مکانیکی و بحث در مورد آنها

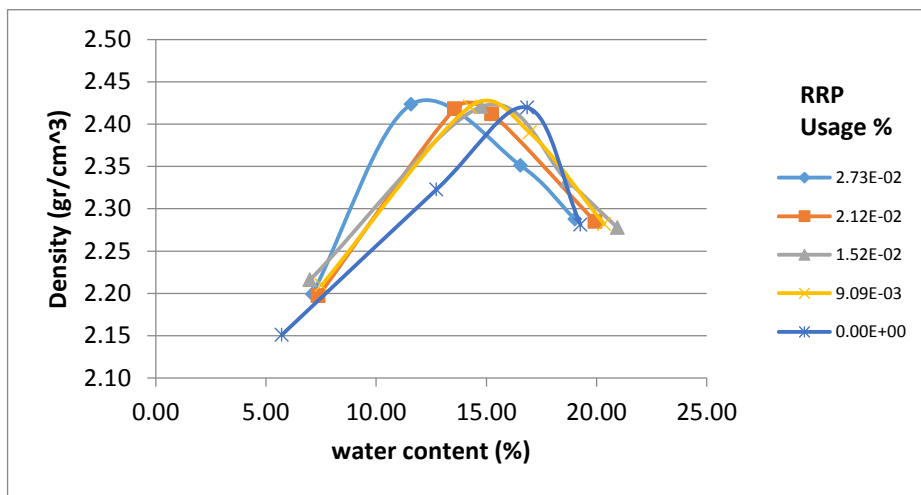
برای تمامی آزمایش ها، نمونه خاک بدون اختلاط با ماده RRP و نیز با مقادیر مختلف ماده RRP ساخته و تحت آزمایش قرار گرفته است.

رطوبت بهینه تراکم:

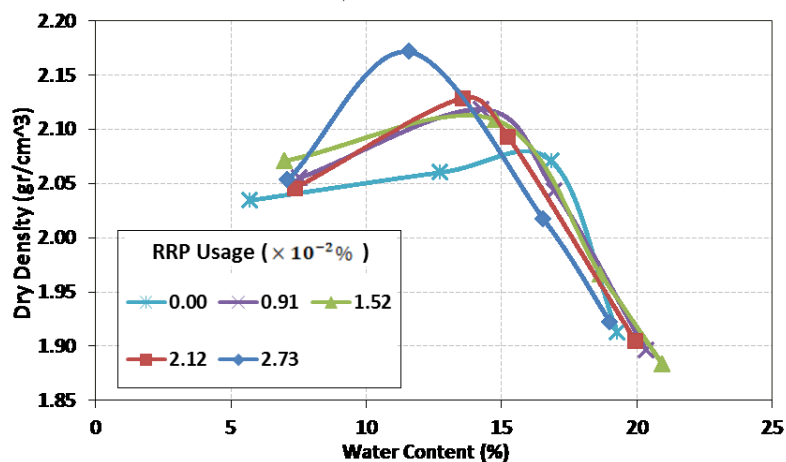
برای انجام این آزمایش، مطابق استاندارد ASTM D 698-78 عمل گردیده و نمونه ها ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج به دست آمده (شکل ۴) نشان می دهد که میزان ماده RRP تأثیر مثبتی در تراکم داشته و با افزایش استفاده از آن، میزان رطوبت بهینه را کاهش می دهد. این عملکرد دور از انتظار نبوده و ناشی از آزادسازی آب موجود در کلوئیدهای رس می باشد که با افزایش هرچه بیشتر ماده RRP و آزادسازی بیشتر آب های سطحی کلوئیدهای رسی، رطوبت مورد نیاز برای تراکم بهینه کاهش پیدا می کند. لذا این عامل باعث افزایش وزن مخصوص خشک خاک با افزایش مصرف ماده RRP شده است (شکل ۵).



شکل ۳. نمودار دانه بندی خاک مورد استفاده



شکل ۴. نمودار درصد رطوبت بهینه تراکم و حداکثر وزن مخصوص تر



شکل ۵. نمودار درصد رطوبت بهینه تراکم و حداکثر وزن مخصوص خشک

بهبود وضعیت روسازی بالاستی خطوط ریلی با استفاده از بسترهای رسی نرم تثبیت شده به کمک افزودنی RRP



شکل ۷. دستگاه جک بتن شکن



شکل ۸. نمونه مکعبی با $2.12E-02$ درصد RRP پس از بارگذاری و شکستن آن

نمونه‌ها در ۶ درصد مختلف ماده RRP و از هر کدام ۴ سری نمونه ساخته شده و در سنین مختلف تحت آزمایش قرار گرفتند. با افزایش میزان ماده RRP، ابتدا مقاومت افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر ماده RRP مقاومت کاهش می‌یابد و سپس با مصرف بیش از حد ماده RRP مقاومت دوباره افزایش می‌یابد و این الگو در سنین مختلف به صورت مشابه تکرار شده است. البته، مطابق توصیه‌های شرکت تولیدکننده، حداکثر میزان منطقی و اقتصادی استفاده از ماده RRP کمتر از $2.73E-02$ درصد می‌باشد. بیشترین مقاومت کسب شده در سنین مختلف مربوط به نمونه با $1.52E-02$ درصد ماده RRP می‌باشد. این مقدار با توصیه‌های

مقاومت فشاری:

برای انجام مقاومت فشاری از استاندارد ASTM C39 تبعیت شده است. نمونه‌ها با ۶ درصد مختلف ماده RRP و از هر نمونه چهار سری ساخته شده است تا کسب مقاومت با گذشت زمان مطالعه گردد. نمونه‌ها در ابعاد $15 \times 15 \times 15$ سانتی‌متر به صورت مکعبی، در پنج لایه، با ۵۶ ضربه در هر لایه توسط چکش با وزن $4/54$ کیلوگرم ساخته و با جک بتن‌شکن با سرعت $0/3$ مگاپاسکال بر ثانیه بارگذاری شده و نمونه‌ها شکسته شدند. شکل ۶ نمونه با $9.09E-03$ درصد ماده RRP برای آزمایش در سن ۱۰ روز را نشان می‌دهد. همچنین، شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب نمونه داخل دستگاه جک و پس از شکسته شدن را نمایش می‌دهند.

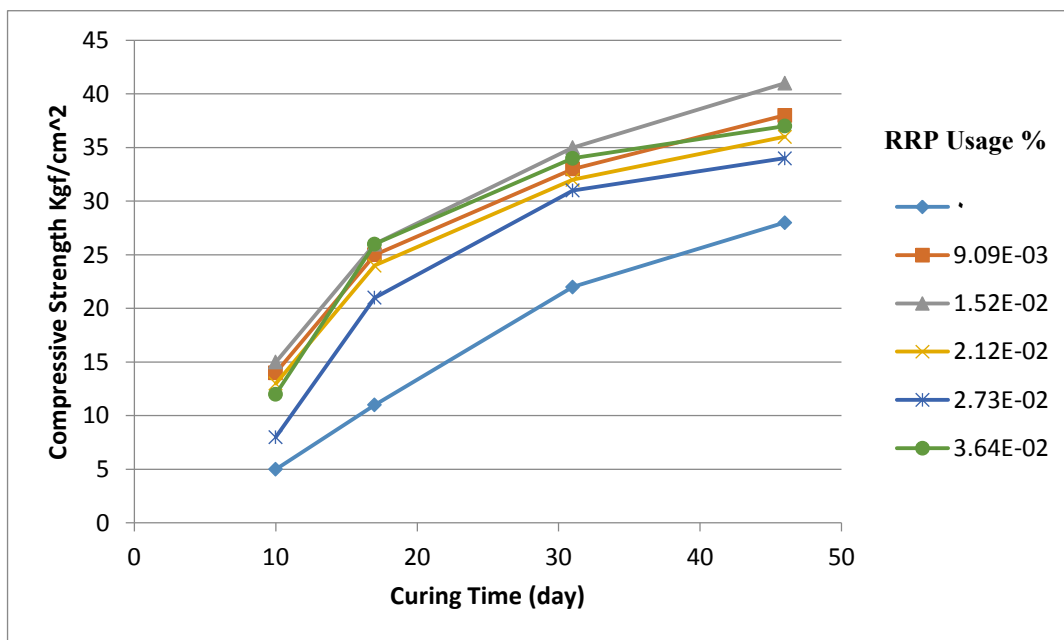


شکل ۶. نمونه ساخته شده با $9.09E-03$ درصد RRP برای آزمایش در سن ۱۰ روز

زمان است. با افزایش سن نمونه‌ها، مقاومت فشاری نیز بیشتر شده است. شکل ۹، نحوه کسب مقاومت در سنین مختلف برای درصدهای مختلف ماده RRP را نشان می‌دهد که بعد از ۲۰ تا ۳۰ روز عمل‌آوری، شیب افزایش مقاومت کم شده و حدود ۹۰٪ مقاومت نهایی خود را کسب کرده است. به نظر می‌رسد که بعد از ۴۶ روز عمل‌آوری، مقاومت به مقدار نهایی خود نزدیک شده و تغییر چندانی نخواهد داشت. البته طبق اظهارات شرکت تولیدکننده، کسب مقاومت می‌تواند تا یک سال نیز ادامه داشته باشد که با افزایش بارگذاری و تکرار بارهای وارده از سوی ترافیک عبوری افزایش می‌یابد. وجود زهکشی نامناسب، بارش نزولات جوی و کاهش دما به دمای انجماد قبل از تراکم از جمله عوامل طولانی کردن فرایند تراکم و کسب مقاومت می‌باشد.

شرکت تولیدکننده هماهنگی داشته و آن را تصدیق می‌کند.

عامل مهم دیگر در کسب مقاومت، عمل‌آوری نمونه‌ها می‌باشد. برای عمل‌آوری بعد از تراکم نیاز به عملیات خاصی نیست و فقط خشک شدن نمونه باعث کسب مقاومت می‌گردد. نمونه‌های ساخته شده در سنین ۱۰، ۱۷، ۳۱ و ۴۶ روز تحت آزمایش قرار گرفتند. انتخاب این سنین برای بارگذاری بر اساس میزان خشک شدن و وضعیت ظاهری نمونه‌ها بوده است. چنانچه، نمونه‌ها پس از ۴۶ روز عمل‌آوری به طور کامل خشک شده بودند. در روزهای ابتدایی اختلاط ماده RRP با خاک، مقاومت فشاری تفاوت چندانی با نمونه بدون این ماده نداشت. حال آنکه با بیشتر شدن زمان عمل‌آوری، این فاصله بیشتر می‌شد که ناشی از عملکرد ماده RRP روی خاک و تثبیت آن در طول



شکل ۹. کسب مقاومت نمونه‌های مختلف با گذشت زمان

درصدی دارد. کمترین میزان افزایش نیز مربوط به نمونه 2.73E-02 درصد ماده RRP با ۲۱٪ افزایش مقاومت است. میزان ماده RRP مناسب به درصد ریزدانه

همانگونه که در شکل ۹ مشخص است، بیشترین مقاومت کسب شده مربوط به نمونه در سن ۴۶ روز با 1.52E-02 درصد ماده RRP است که افزایش ۴۶

بهبود وضعیت روسازی بالاستی خطوط ریلی با استفاده از بسترهای رسی نرم تثبیت شده به کمک افزودنی RRP

نمودن شرایط زهکشی برای خروج آب اضافی و خشک شدن نمونه‌ها کافی است. با توجه به اینکه نمونه‌ها در سن ۴۶ روز کاملاً خشک شده بودند، در آن سن تحت آزمایش قرار گرفتند. شکل‌های ۱۰ و ۱۱، نمونه‌های پس از انجام آزمایش را نشان می‌دهند.



شکل ۱۰. نمونه استوانه‌ای پس انجام آزمایش کشش غیرمستقیم برزیلی

کوچکتر از ۰/۰۶ میلی‌متر بستگی دارد. با افزایش ریزدانه‌ها، مقدار نیاز به ماده RRP بیشتر خواهد شد و با کاهش آن نیز کاهش خواهد یافت.

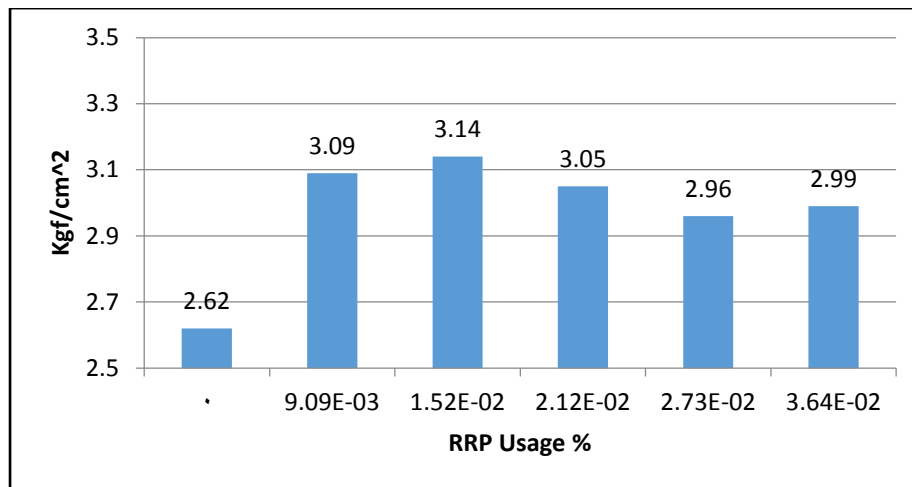
با بررسی الگوی رفتاری نمونه‌ها در سنین مختلف عمل‌آوری و نیز درصدهای مختلف ماده RRP، میزان بهینه مورد نیاز برای این نوع خاک در آزمایش مقاومت فشاری، $1.52E-02$ درصد تعیین می‌گردد.

مقاومت کششی:

برای اندازه‌گیری مقاومت کششی خاک، از آزمایش کشش غیرمستقیم برزیلی با استاندارد ASTM C496 استفاده شده است. نمونه‌ها در قالب استوانه‌ای به ابعاد 15×30 سانتی‌متر در پنج لایه با ۵۶ ضربه در هر لایه توسط چکش $4/54$ کیلوگرم متراکم شده است. برای عمل‌آوری نمونه‌ها، پس از اختلاط با ماده RRP و قبل از تراکم، حداقل ۲۴ ساعت زمان لازم است تا فعل و انفعالات شیمیایی صورت پذیرد. بعد از تراکم، عملیات خاصی برای عمل‌آوری مورد نیاز نبوده و صرفاً مهیا



شکل ۱۱. نمونه استوانه‌ای پس انجام آزمایش کشش



شکل ۱۲. تغییرات مقاومت کششی بر حسب درصد RRP در سن ۴۶ روز

نمونه‌ها با درصد‌های مختلف افزودنی اختلاط و پس از عمل‌آوری، در قالب مخصوص متراکم شده و در روز بعد مورد آزمایش قرار گرفت. بر اساس اظهارات شرکت تولیدکننده مبنی بر امکان بارگذاری مسیر و آزادسازی ترافیک بلافاصله بعد از اجرا، سن آزمایش برش روز بعد از ساخت انتخاب شده است. ابعاد نمونه‌ها برابر ۶×۶×۲ سانتی‌متر است که با بارهای قائم ۲، ۴ و ۶ کیلوگرم تحت آزمایش قرار گرفته است.



شکل ۱۳. نمونه خاک پس از انجام برش مستقیم

پس از انجام تست روی تمامی نمونه‌ها، نتایج نموداری و مشخصات چسبندگی و ضریب اصطکاک

در این آزمایش نیز همانند مقاومت فشاری، نمونه‌ها با درصد‌های مختلف ماده RRP مطابق جدول ۱ ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفتند. در این آزمایش نیز الگوی کسب مقاومت با توجه به میزان ماده RRP همانند مقاومت فشاری می‌باشد. از آنجایی که مقاومت فشاری و کششی ارتباط مستقیم باهم دارند، لذا این عملکرد منطقی به نظر می‌رسد.

بیشترین مقاومت مربوط به نمونه با 1.52E-02 درصد ماده RRP به میزان ۳/۱۴ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع با افزایش حدود ۲۱ درصدی نسبت به نمونه بدون ماده RRP و کمترین میزان افزایش مقاومت مربوط به نمونه با 2.73E-02 درصد ماده RRP است که نسبت به نمونه بدون RRP افزایش ۱۳ درصدی دارد.

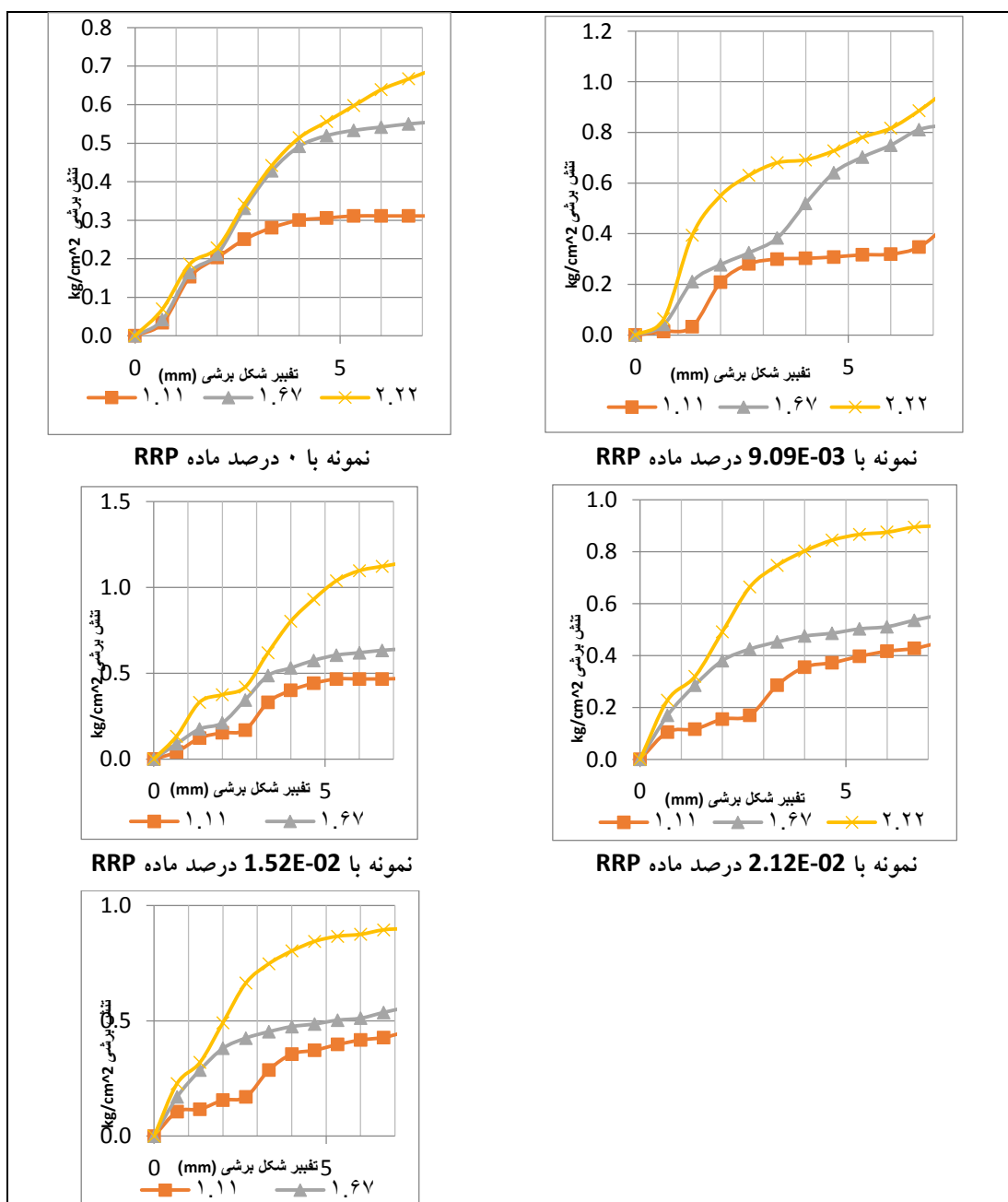
با مقایسه درصد‌های افزایش مقاومت کششی با مقاومت فشاری، مشخص می‌گردد که تأثیر ماده RRP در مقاومت کششی حدوداً نصف مقاومت فشاری است. **مقاومت برشی:**

مقاومت برشی یکی دیگر از مشخصه‌هایی است که مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام آزمایش برش مستقیم از استاندارد ASTM D3080 تبعیت شده است.

داخلی است. علت آن می تواند ناشی از تأثیر آزادسازی آب لایه دوگانه خاک و لزجت ناشی از ماده RRP باشد. سپس، با افزایش میزان ماده RRP مقدار ضریب چسبندگی افزایش و متناسب با آن نیز نمودار زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته است. ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی معیارهای مناسبی برای درک مقاومت برشی نمی باشند و باید نمودارهای مور-کولمب ترسیم و مقدار تنش برشی حداکثر به دست آید.

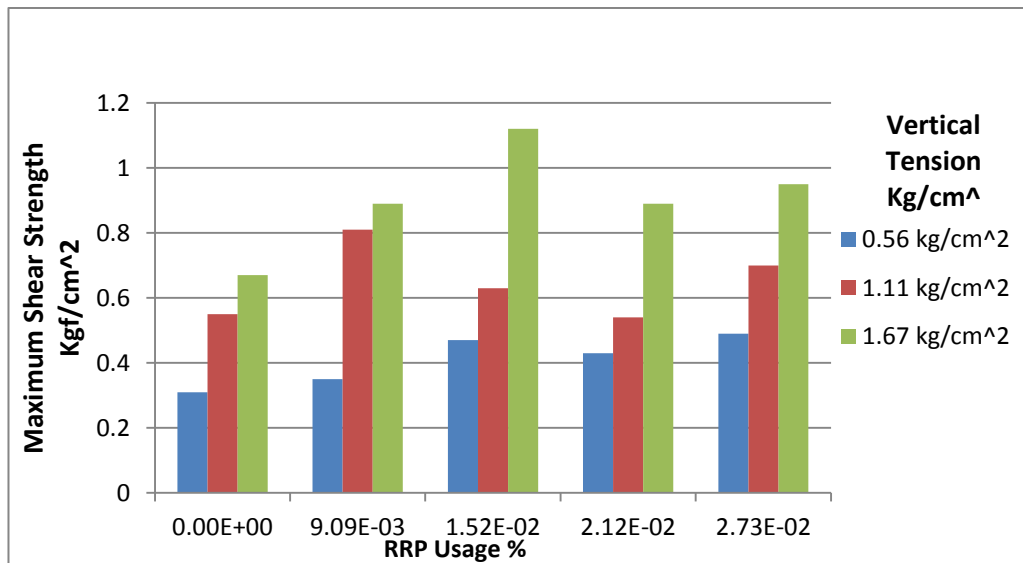
داخلی خاک به دست آمد. سپس، نمودارهای تنش برشی- تغییرشکل برشی ترسیم گردیدند. شکل ۱۴ مربوط به درصدهای مختلف ماده RRP می باشد.

یکی از مهمترین شاخصه های خاک، ضرایب چسبندگی و اصطکاک داخلی آن می باشد. با افزودن ماده RRP به خاک، ضریب چسبندگی آن کاهش یافته و در نتیجه زاویه اصطکاک داخلی بیشتر شده است. چنانچه نمونه با $1.52E-02$ درصد ماده RRP دارای کمترین ضریب چسبندگی و بیشترین زاویه اصطکاک



نمونه با $2.73E-02$ درصد ماده RRP

شکل ۱۴. نمودار تنش برشی حداکثر بر حسب کرنش برشی



شکل ۱۵. تنش برشی حداکثر برای نمونه‌ها با درصدهای مختلف ماده RRP تحت سربار قائم متفاوت

افزایش بیشتر ماده RRP، دوباره افزایش می‌یابد. این رفتار تغییرات تنش برشی در برابر مقدار ماده RRP کاملاً مشابه الگوی رفتاری خاک در آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی است. مقدار $1.52E-02$ درصد ماده RRP برای آزمایش برش مستقیم به عنوان مقدار بهینه انتخاب می‌گردد.

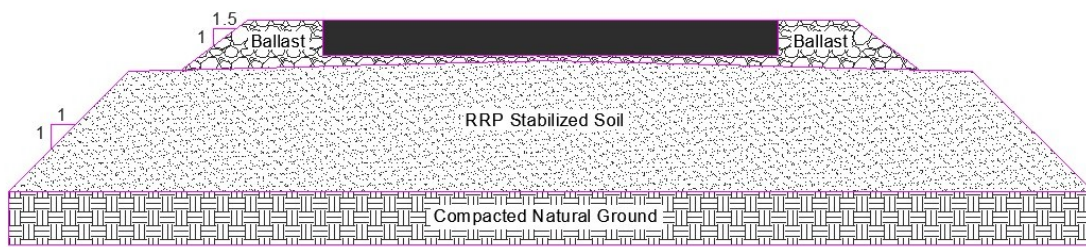
ضخامت لایه بالاست و قرارگیری تراورس به صورت مستقیم روی خاک تثبیت‌شده با ماده RRP، از آزمایش جعبه بالاست استفاده شده است. از آنجایی که این دستگاه نیروهای وارده بر لایه بالاست را شبیه سازی می‌کند، یکی از بهترین آزمایش‌هایی است که می‌تواند تأثیر ماده افزودنی در برابر بارهای دینامیک را مورد مطالعه قرار دهد.

با ترسیم نمودارهای تنش برشی - تنش قائم برای تنش‌های بارگذاری قائم متفاوت، الگوی مشابه مقاومت فشاری و مقاومت کششی برای میزان مصرف ماده RRP و مقاومت حاصله به دست می‌آید. همانگونه که در شکل ۱۶ مشخص است، با افزایش میزان RRP، تنش برشی حداکثر بیشتر می‌شود. سپس، با افزایش درصد ماده RRP، تنش برشی حداکثر کاهش یافته و سپس با

۳-۱-۲. آزمایش‌های دینامیک

برای شناسایی بهتر خصوصیات خاک تثبیت‌شده با ماده RRP در مقابل بارهای دینامیک وارده از واگن، انجام آزمایش‌های دینامیک الزامی می‌باشد. با تغییر مصالح استفاده شده در خط، سختی آن تغییر کرده و رفتار متفاوتی از لحاظ میرایی، سختی و نشست از خود نشان خواهد داد. برای بررسی پاسخ‌های دینامیک و پیگیری ایده تحقیق جهت حذف لایه زیربلاست و کاهش

بهبود وضعیت روسازی بالاستی خطوط ریلی با استفاده از بستری رسی نرم تثبیت شده به کمک افزودنی RRP

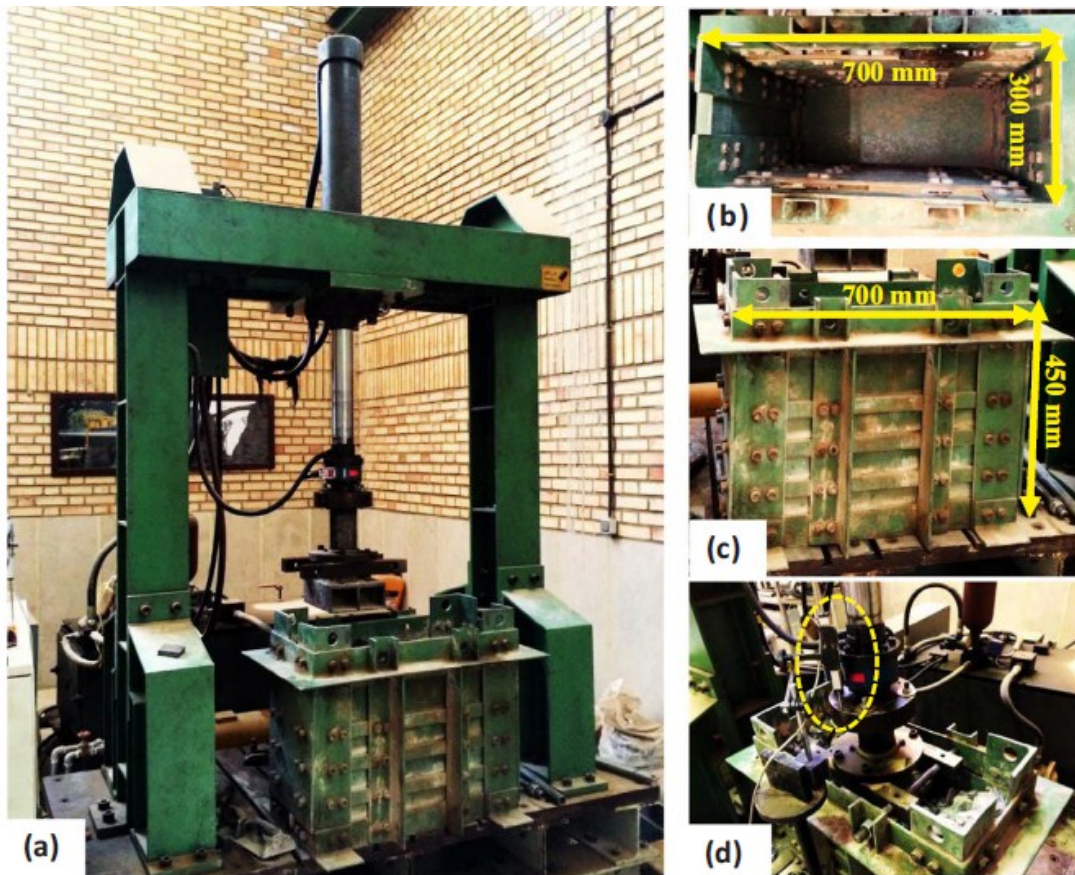


شکل ۱۶. مقطع شماتیک خط بالاستی با بستر تثبیت شده با ماده RRP

۱۰۰۰۰۰ سیکل وارد می‌کند. با استفاده از نرم افزار طراحی شده برای این دستگاه می‌توان مقدار بار وارده، فرکانس آن و تعداد سیکل بارگذاری را تغییر داد. با استفاده از حسگرهای موجود می‌توان تغییر شکل‌ها و میزان نیروی وارده را اندازه گرفت. نتایج حاصل توسط دیتالاگر TMR-7200 ذخیره می‌گردد.

۲-۲. معرفی دستگاه جعبه بالاست

دستگاه جعبه بالاست در دانشگاه علم و صنعت ایران ساخته شده و استفاده می‌گردد (شکل ۱۷). این دستگاه شامل پمپ هیدرولیکی با امکان کنترل از طریق کامپیوتر می‌باشد که توسط یک جک به بالاست متراکم شده در داخل جعبه مخصوص با ابعاد $30 \times 45 \times 70$ سانتی‌متر، توسط پیستونی به ابعاد 22×22 سانتی‌متر، نیروی قائم ۲۷ کیلونیوتن با فرکانس ۳ هرتز به صورت دینامیک در



شکل ۱۷. دستگاه جعبه بالاست آزمایشگاه روسازی IUST (اسمعیلی و همکاران، ۲۰۱۷)

نشست:

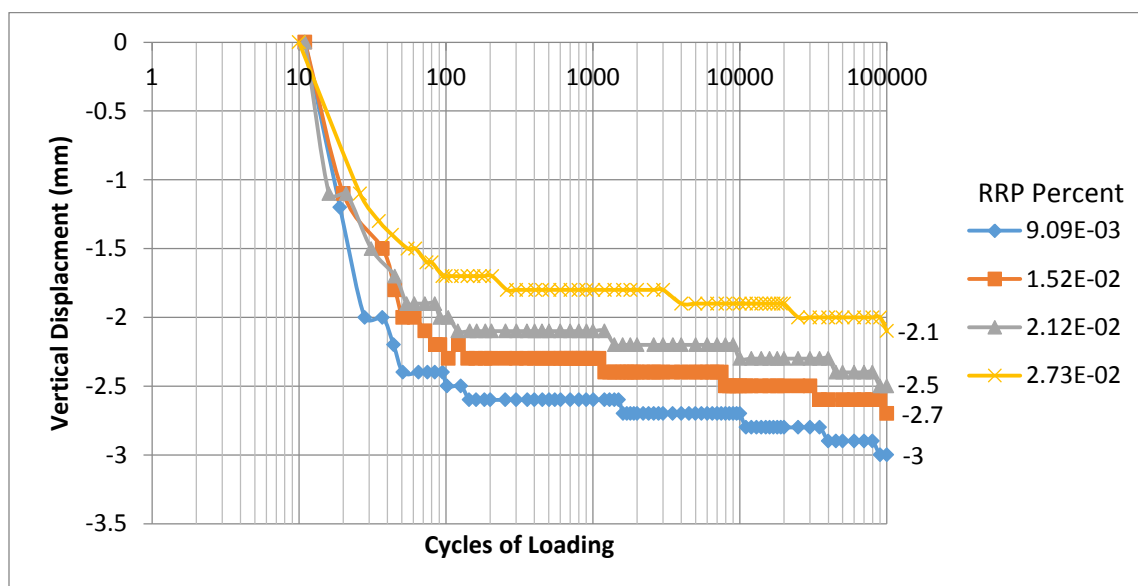
یکی از مشکلات خطوط بالاستی، نشست‌های بزرگ و نامتقارن می‌باشد که باعث تغییرات محسوس در هندسه خط می‌شود. جبران این عامل مستلزم هزینه زیاد برای عملیات نگهداری و تعمیر است. با پیگیری ایده تحقیق جهت قرارگیری تراورس به صورت مستقیم روی خاک تثبیت شده می‌تواند تأثیر به‌سزایی در کاهش نشست و نیز هزینه‌های نگهداری و تعمیر داشته باشد. با انجام آزمایش جعبه بالاست روی نمونه‌های ساخته شده مشخص گردید که با افزایش میزان استفاده از ماده RRP میزان نشست کمتر شده است (شکل ۱۹). چنانچه $9.09E-03$ درصد ماده RRP دارای بیشترین نشست و $2.73E-02$ درصد ماده RRP دارای کمترین نشست است. واضح است که با افزایش ماده افزودنی، بار سطحی در اطراف کلوئیدهای رسی افزایش پیدا کرده و باعث افزایش قدرت باربری و کاهش نشست خاک خواهد شد. ولی استفاده بیش از حد ماده افزودنی صرفه اقتصادی ندارد. چنانچه با 300 درصد ماده RRP میزان نشست حدود 50% کاهش یافته است.

با توجه به وجود خاک متراکم در نمونه‌ها و نیاز به زمان برای عمل‌آوری، از جعبه‌های کمکی برای ساخت نمونه استفاده شده است. قالب‌های هم‌اندازه و متناسب با جعبه اصلی ساخته و نمونه‌های مختلف با درصد‌های متفاوت ماده RRP با هم ترکیب شده و عمل‌آوری گردید (شکل ۱۸). سپس، با استفاده از صفحه فلزی و نیروی دستگاه جعبه بالاست متراکم گردید. سپس، به نمونه‌های ساخته شده برای کسب مقاومت و زهکشی لازم زمان داده شد. پس از آماده شدن نمونه‌ها، در سنین هم‌زمان مورد آزمایش قرار گرفتند. تأثیر افزودنی ماده RRP بر خاک از منظر دینامیک در سه بخش نشست، سختی و میرایی بررسی می‌شود.



شکل ۱۸. نمونه‌های آزمایش جعبه بالاست با درصد‌های

مختلف ماده RRP

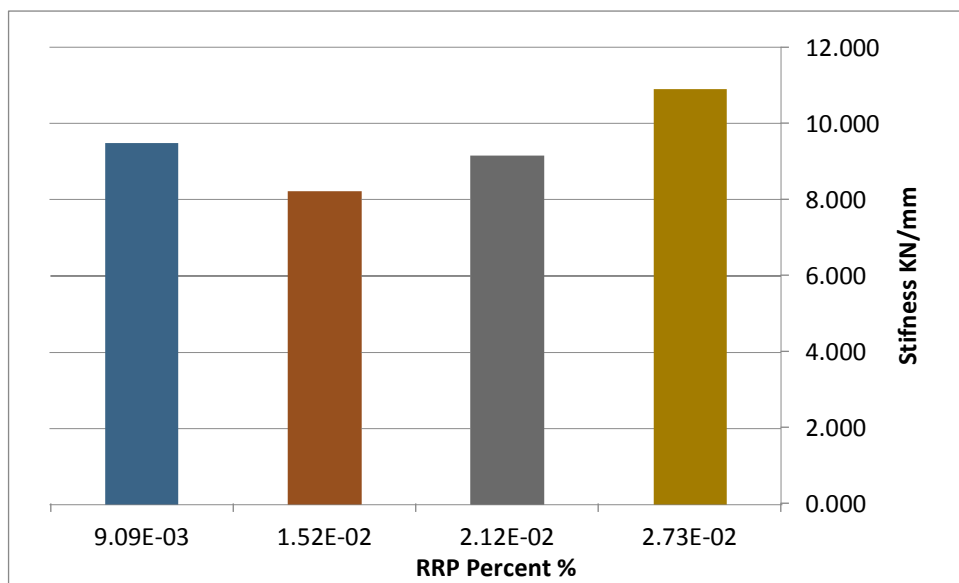


شکل ۱۹. نشست قائم در برابر سیکل‌های بارگذاری

سختی:

2.73E-02 درصد ماده RRP دارای بیشترین سختی است. این عامل می تواند ناشی از عملکرد ماده RRP و تأثیر بار سطحی بوجود آمده در سطح ذرات رسی باشد که ضمن ایجاد پایداری و مقاومت در برابر بارهای وارده، باعث کاهش انتقال ارتعاش شده و افزایش میرایی را به همراه دارد. از سوی دیگر، هرچه ضریب چسبندگی خاک کمتر باشد، میرایی آن بیشتر خواهد بود (قزوینیان و همکاران، ۱۳۹۱).

تغییر در نوع مصالح در خطوط ریلی باعث تغییر در سختی خط خواهد شد. با توجه به جایگذاری خاک تثبیت شده به جای بالاست، نیاز به مطالعه و بررسی سختی خط جدید می باشد. با بررسی سختی نمونه ها مشخص گردید که با افزایش ماده افزودنی، در ابتدا سختی کاهش پیدا می کند و سپس با افزایش ماده RRP سختی افزایش می یابد (شکل ۲۰). نمونه با 1.52E-02 درصد ماده RRP دارای کمترین سختی و نمونه با



شکل ۲۰. سختی نمونه ها با درصدهای مختلف RRP

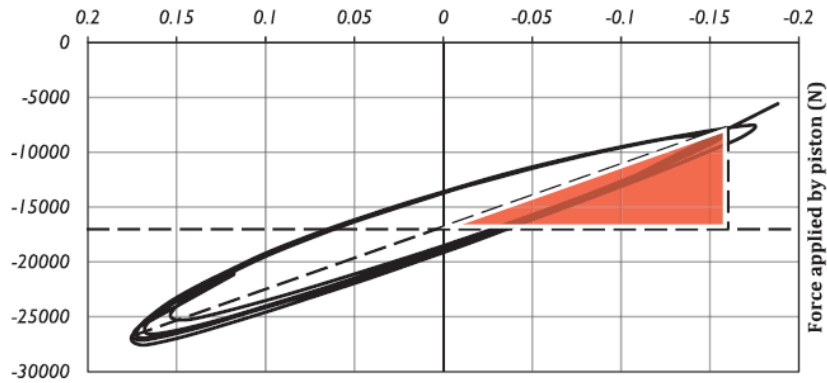
در شکل ۲۱، مساحت ناحیه قرمز رنگ معرف انرژی تلف شده و مساحت منحنی معرف انرژی وارده است. با ترسیم نمودار نیرو-جابجایی (شکل ۲۲) و بررسی نتایج حاصل از میرایی در آزمایش جعبه بالاست (شکل ۲۳) مشخص می شود که نمونه با 1.52E-02 درصد ماده RRP دارای بیشترین میزان میرایی و نمونه با 2.73E-02 درصد ماده RRP دارای کمترین میزان میرایی است.

میرایی:

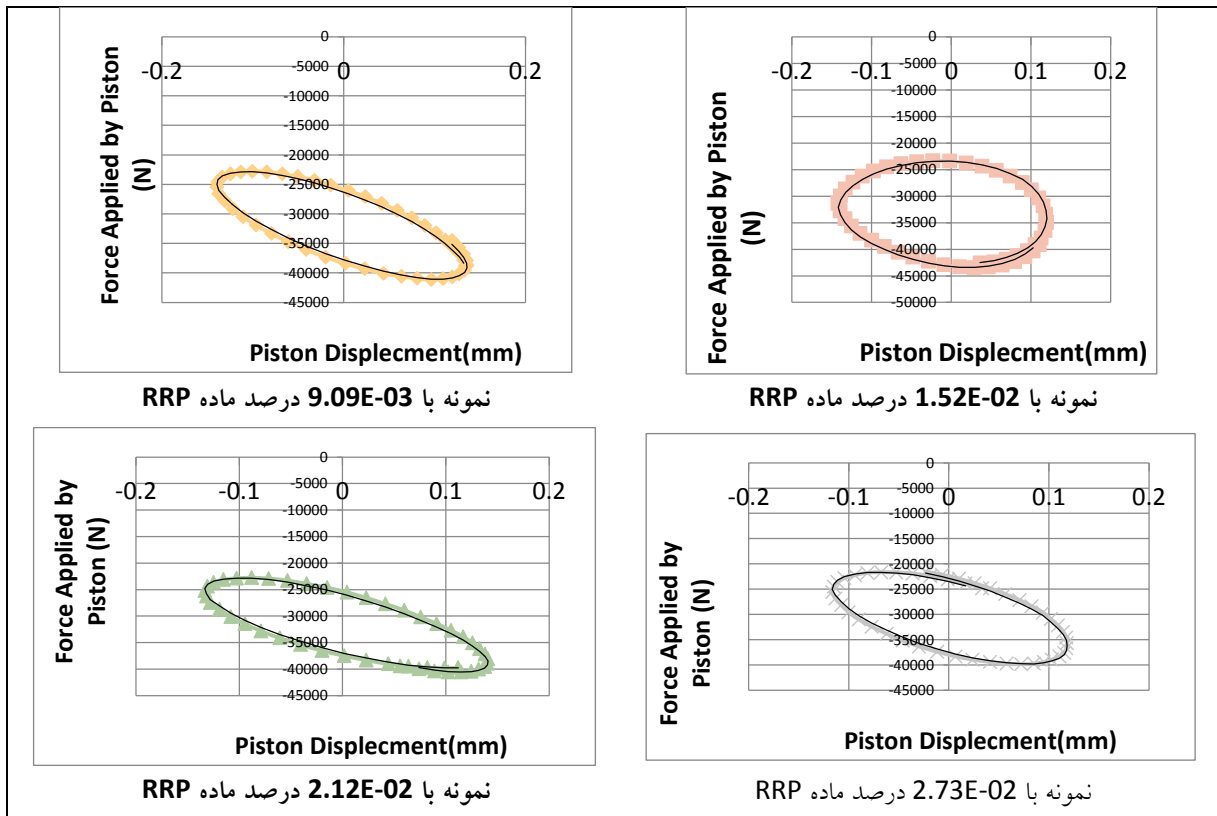
میرایی با استفاده از تقسیم انرژی از دست رفته بر انرژی وارده مطابق فرمول (۱) به دست می آید (اسمعیلی و همکاران، ۲۰۱۷)

$$\varepsilon = \frac{\Delta E}{2\pi k x^2} \quad (1)$$

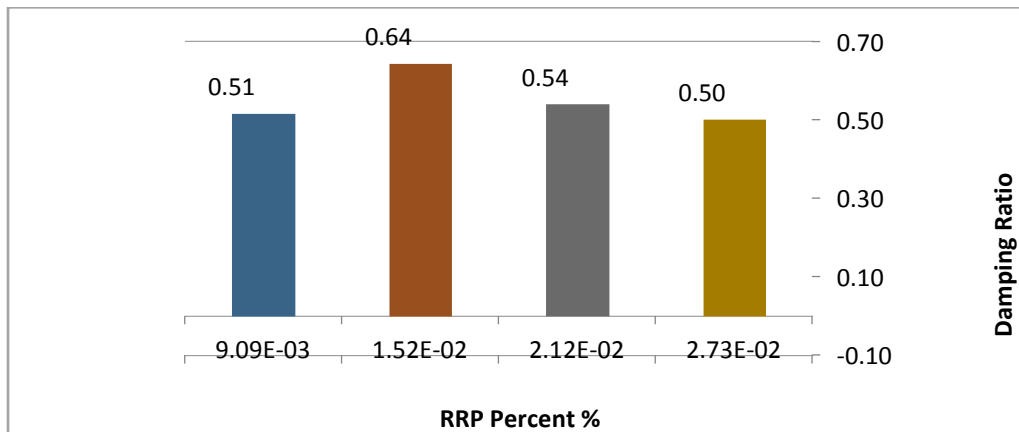
که ΔE انرژی تلف شده، k سختی نمونه و x تغییر شکل نمونه است.



شکل ۲۱. نحوه محاسبه میرایی با استفاده از نمودار نیرو - جابجایی پیستون (اسمعیلی و همکاران، ۲۰۱۷)



شکل ۲۲. نمودار نیرو - جابجایی در ۱۰۰۰۰۰ سیکل



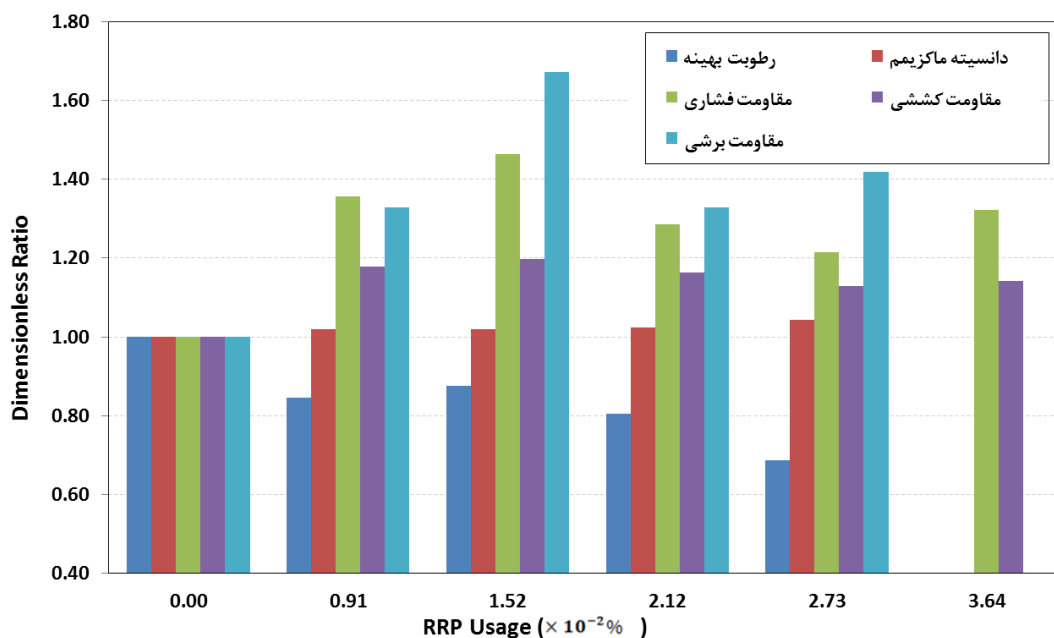
شکل ۲۳. میرایی نمونه‌ها با درصدهای مختلف ماده RRP

درصد بهینه ماده RRP:

برای آزمایش دینامیک، از دستگاه جعبه بالاست با اعمال بار سیکلیک استفاده شده است که از سه جنبه میرایی، سختی و نشست مورد بررسی قرار گرفت. از لحاظ میرایی و سختی، نمونه با $1.52E-02$ درصد ماده RRP دارای بهترین عملکرد می‌باشد. از لحاظ نشست، با افزایش میزان استفاده از ماده افزودنی، مقدار نشست کاهش یافته است چنانچه نمونه با $2.73E-02$ درصد ماده RRP کمترین میزان نشست را داشته است. ولی با در نظر گرفتن موارد اقتصادی و اهمیت میرایی و سختی، نمونه با $1.52E-02$ درصد ماده RRP به عنوان مقدار بهینه انتخاب می‌گردد.

با جمع بندی نتایج آزمایش‌های دینامیک و استاتیک، نمونه با $1.52E-02$ درصد ماده RRP به عنوان میزان بهینه برای این نوع خاک رس با ۴۰ تا ۵۰ درصد ریزدانه رد شده از الک به قطر ۶۰ میکرون انتخاب می‌شود.

آزمایش‌ها در دو دسته استاتیک و دینامیک با انواع مقادیر ماده افزودنی مورد آزمایش قرار گرفت که نتایج نموداری به صورت نسبی در شکل ۲۴ مشاهده می‌گردد. در آزمایش‌های استاتیک که شامل رطوبت بهینه تراکم، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت برشی می‌باشد، نمونه‌های با $1.52E-02$ درصد ماده RRP دارای بهترین عملکرد در بین سایر مقادیر افزودنی می‌باشند. چنانچه در هر بخش مشاهده گردید، الگوی کسب مقاومت و میزان ماده افزودنی ثابت بوده و در ابتدا با افزایش درصد ماده RRP مقاومت بیشتر شده و با مصرف بیشتر ماده افزودنی، میزان مقاومت کاهش یافته و سپس با افزایش بیش از حد مصرف ماده RRP دوباره مقاومت افزایش می‌یابد. البته با افزایش مصرف ماده RRP رطوبت بهینه تراکم کمتر شده است.



شکل ۲۴: مقایسه نتایج آزمایش‌های دینامیکی و مکانیکی انجام شده

تراورس به صورت مستقیم روی آن مورد مطالعه قرار گرفته است. نمونه‌های مختلفی با درصدهای متفاوت ماده افزودنی ساخته شده و با استفاده از آزمایش‌های

۳. نتیجه گیری

در این تحقیق، تأثیر جایگزینی بخشی از بالاست با بستر رسی تثبیت شده با استفاده از افزودنی RRP و قرارگیری

چسبندگی و بیشترین زاویه اصطکاک داخلی است. با ترسیم دواير مور-کلمب و تحلیل آنها مشخص گردید که نمونه با $1.52E-02$ درصد ماده RRP در اکثر مواقع دارای بیشترین تنش برشی است و الگوی کسب مقاومت در برابر مقدار ماده RRP همانند مقاومت فشاری و کششی است.

- با افزایش میزان اختلاط ماده RRP در آزمایش جعبه بالاست، نشست نمونه کمتر شده است. با افزایش ۳۰۰ درصدی ماده RRP، حدود ۵۰٪ نشست کاهش یافته است. همچنین، نمونه $1.52E-02$ درصد ماده RRP دارای بیشترین میزان میرایی و کمترین مقدار سختی است.

- رفتار و خصوصیات مهندسی بستر رسی خطوط ریلی تثبیت شده با ماده RRP بهبود می یابد و می توان سیستم نوینی از روسازی بالاستی با استفاده از این روش توسعه داد.

بیشترین تأثیر افزودنی RRP به ترتیب بر مقاومت برشی با ۶۷ درصد، مقاومت فشاری با ۴۶ درصد، رطوبت بهینه تراکم با ۳۱ درصد، نشست با ۲۸ درصد، میرایی با ۲۵ درصد و در نهایت وزن مخصوص بدون تغییر بوده است.

استاتیک و دینامیک مورد آزمایش قرار گرفته است تا میزان بهینه ماده افزودنی مشخص شود. همچنین، با استفاده از آزمایش های مکانیکی، تأثیر RRP روی مشخصات مقاومتی خاک مورد بررسی قرار گرفته است. عمده نتایج حاصله به شرح زیر می باشد:

- با افزودن ماده RRP به خاک رس، مقاومت فشاری آن بین ۲۱ تا ۴۶ درصد افزایش پیدا می کند که با این مقدار افزایش امکان قرارگیری تراورس روی خاک تثبیت شده مهیا می گردد. با انجام آزمایش مقاومت فشاری، درصد مناسب اختلاط ماده RRP، $1.52E-02$ درصد و نیز عمر عمل آوری آن در حدود ۴۶ روز مشخص گردید.

- با انجام آزمایش مقاومت کششی به روش آزمایش کشش غیر مستقیم برزیلی، مشخص گردید که الگوی افزایش مقاومت و نیز درصد مناسب اختلاط ماده RRP مشابه نمونه های مقاومت فشاری است. با افزودن ماده RRP، مقاومت کششی بین ۱۳ تا ۲۰ درصد افزایش می یابد و نمونه با $1.52E-02$ درصد ماده RRP دارای بهترین عملکرد بوده است.

- با استفاده از آزمایش برش مستقیم، ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برای انواع نمونه ها به دست آمد. نمونه ای که دارای بیشترین مقاومت فشاری و کششی بود، دارای کمترین میزان ضریب

۴. مراجع

اسمعیلی، م.، نصرآزادانی، م. و سعادت راد، ا. ۱۳۸۹. "بررسی اثر ژئوسنتتیک ها بر افزایش مدول خط آهن براساس نتایج بارگذاری میدانی و مقایسه آن با نتایج تحلیل عددی". مهندسی حمل و نقل، ۱(۳): ۱۳-۲۶.

قزوینیان، ع.، نجاتی، ح. و سرافرازی، و. ۱۳۹۱. "بررسی تأثیر خواص مکانیکی محیط های ژئوتکنیکی بر میرایی امواج لرزه ای". کنفرانس ملی زلزله و آسیب پذیری اماکن و شریان های حیاتی.

فرزانه، ا.، مصدق، ع.، ۱۳۹۰. "بررسی آزمایشگاهی تثبیت خاک بستر راه کرمان-زنگی آباد با استفاده از چهار ماده آهک، ZAMI، ZAMII و RRP، نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری، دوره ۴۵، شماره ۱، صفحات ۲۳-۳۳.

Cai, Y., Xu, L., Liu, W., Shang, Y., Su, N. and Feng, D. 2020. "Field test study on the dynamic response of the cement-improved expansive soil subgrade of a heavy-haul railway". Soil Dyn. Earthq. Eng., 128: 105878. doi:https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105878

- Celauro, B., Bevilacqua, A., Bosco, D. L. and Celauro, C. 2012. "Design procedures for soil-lime stabilization for road and railway embankments. Part 1- Review of design methods". Soc. Behav. Sci., 53: 755-764. doi: 10.1016/j.sbspro.2012.09.925
- Esmaeili, M., Aela, P. and Hosseini, A. 2017. "Experimental assessment of cyclic behavior of sand-fouled ballast mixed with tire derived aggregates". Soil Dyn. Earthq. Eng., doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.03.033
- Gerling, T. 2016 . RRP GmbH.
- Indraratna, B., Ngo, T. N. and Ferreira, F. B. 2019. "Advancements in track technology: use of artificial inclusions for stabilising transport infrastructure". 13th Australia Newzealand Conference on Geomechanics, Costa-Martinez and Lehane (Eds.), Australian Geomechanics Society, Sydney, Australia.
- Indraratna, B., Korkitsuntornsansan, W. and Nguyen, T. T. 2020a. "Influence of kaolin content on the cyclic loading response of railway subgrade". Transport. Geotech., 22: 100319. doi:https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100319
- Indraratna, B., Qi, Y., Tawk, M., Heitor, A., Rujikiatkamjorn, C. and Navaratnarajah, S. K. 2020b. "Advances in ground improvement using waste materials for transportation infrastructure". Proc. Inst. Civ. Eng. - Ground Improvement. doi:https://doi.org/10.1680/jgrim.20.00007
- Lazorenko, G., Kasprzhitskii, A., Khakiev, Z. and Yavna, V. 2019. "Dynamic behavior and stability of soil foundation in heavy haul railway tracks: A review". Constr. Build. Mater., 205: 111-136. doi:DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.184
- Li, Y., Ling, X., Su, L., An, L., Li, P. and Zhao, Y. 2018. "Tensile strength of fiber reinforced soil under freeze-thaw condition". Cold Reg. Sci. Technol., 146: 53-59. doi:https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.11.010
- López, V. O., Manso, J. M., Cuesta, I. I. and González, J. J. 2014. "The long-term accelerated expansion of various ladle-furnace basic slags and their soil-stabilization applications". Constr. Build. Mater., 68: 455-464. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.023
- Malkanthi, S. N., Balthazaar, N. and Perera, A. A. D. A. J. 2020. "Lime stabilization for compressed stabilized earth blocks with reduced clay and silt". Case Stud. Constr. Mater., 12: e00326. doi:https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00326
- Mirzababaei, M., Arulrajah, A. and Ouston, M. 2017. "Polymers for stabilization of soft clay soils". Proced. Eng., 189, 25-32. doi:doi: 10.1016/j.proeng.2017.05.005
- Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Phummiphan, I., Horpibulsuk, S. and Mirzababaei, M. 2019. "Flexural fatigue strength of demolition aggregates stabilized with alkali-activated calcium carbide residue". Constr. Build. Mater., 199: 115-123. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.031
- Oluwatuyia, O. E., Ojurib, O. O. and Khoshghalb, A. 2019. "Cement-lime stabilization of crude oil contaminated kaolin clay". J. Rock Mech. Geotech. Eng. doi:https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.07.010
- Phanikumar, B. R. and Raju, E. R. 2020. "Compaction and strength characteristics of an expansive clay stabilised with lime sludge and cement". Soils Found. doi:https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.01.007
- Praticò, F. G. and Puppala, A. J. 2012. "Lime and cement treatments of subgrades in southern Italy: Facing interports issues and challenges". Proced. Soc. Behav. Sci., 53: 389-398. doi:doi: 10.1016/j.sbspro.2012.09.890
- Sol-Sánchez, L. M., Pirozzolo, L., Moreno-Navarro, F. and Rubio-Gámez, M. C. 2015. "Advanced characterisation of bituminous sub-ballast for its application in railway tracks: The influence of temperature". Constr. Build. Mater., 101: 338-346. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.102
- Ta'negonbadi, B. and Noorzad, R. 2018. "Physical and geotechnical long-term properties of lignosulfonate-stabilized clay: An experimental investigation". Transport. Geotech. doi:https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.09.001
- Trinh, V. N., Tang, A. M., Cui, Y. J., Dupla, J. C., Canou, J., Calon, N., . . . and Schoen, O. 2012. "Mechanical characterisation of the fouled ballast in ancient railway track substructure by large-scale triaxial tests". Soils Found., 52(3): 511-523. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.sandf.2012.05.009
- Wang, T. L., Song, H. F., Yue, Z. R., Hu, T. F. and Sun, T. C. 2019. "Freeze-thaw durability of cement-stabilized macadam subgrade and its compaction quality index". Cold Reg. Sci. Technol., 160: 13-20. doi:https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.01.005
- Yadu, L. and Tripathi, R. K. 2013. "Effect of granulated blast furnace slag in the eng. behavior of stabilized soft soil". Proced. Eng., 51: 125-131. doi:doi: 10.1016/j.proeng.2013.01.019

- Zhao, G., She, W., Yang, G., Pan, L., Cai, D., Jiang, J. and Hu, H. 2017. "Mechanism of cement on the performance of cement stabilized aggregate for high speed railway roadbed". *Constr. Build. Mater.*, 144: 347-356. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.194>
- Zhang, C. and Jiang, G. 2020 . "Full-scale model testing of the dynamic response of lime-stabilized weathered red mudstone subgrade under railway excitation". *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 130: 105999. doi:<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105999>