



استفاده از مصالح تراشه‌های آسفالت و تایرهای فرسوده به عنوان محصور کننده در ستون‌های سنگی

حورا بیکدلی^۱، مرتضی جیریایی شراهی^{۱*}، بیت‌الله بدرلو^۲، علی گلابچی فرد^۳

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

۲- دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

۳- دانشگاه آزاد اسلامی اراک، اراک، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۸

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۳۱

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۷

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۱۹

کلمات کلیدی:

ستون سنگی

ظرفیت باربری

تراشه آسفالت

تایر فرسوده

محیط زیست

خلاصه: در این مقاله، روشی سازگار با محیط زیست و مقرون به صرفه برای بهسازی خاک‌های رسی نرم ارائه می‌شود. در این روش تراشه‌های آسفالت به عنوان جایگزینی برای مصالح دانه‌ای طبیعی و لاستیک‌های فرسوده به عنوان محصور کننده جایگزینی برای ژئوتکستایل استفاده می‌شود. مزیت این روش از نظر زیست محیطی این است که از مواد و مصالح بازیافتی در بهسازی خاک‌ها استفاده می‌شود. در مدل‌سازی آزمایشگاهی، سلول واحد شامل ستون سنگی منفرد با تراشه‌های آسفالت بوده و محصور کردن آن به وسیله تایرهای فرسوده از طریق قرار دادن این تایرها بر روی یکدیگر و پر کردن فضای مرکزی آن‌ها با مصالح دانه‌ای در نظر گرفته شده است. تراشه‌های آسفالت به صورت وزنی با مقادیر صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد با سنگدانه‌های طبیعی ستون جایگزین شده است. آزمایش‌های ظرفیت باربری بر روی نمونه‌های محصور شده و محصور نشده ستون سنگی بر روی ترکیبات مختلف مصالح دانه‌ای انجام شده است. نتایج آزمایش‌های ظرفیت باربری نشان داد که محصور کردن ستون سنگی با تایرهای فرسوده ظرفیت باربری را ۲۷ تا ۸۷ درصد افزایش داده است. همچنین با افزایش درصد تراشه بازیافتی آسفالت ظرفیت باربری ستون سنگی تغییر می‌یابد به صورتی که با افزایش درصد آسفالت از صفر تا ۲۵ درصد ظرفیت باربری به میزان کم افزایش و پس از آن، با افزایش درصد آسفالت تا ۱۰۰ درصد ظرفیت باربری به مقدار کم کاهش یافته است. میزان تغییر ظرفیت باربری در اثر استفاده از تراشه‌های آسفالت حداکثر ۲۷ درصد مشاهده شد که نشان می‌دهد این مصالح می‌توانند جایگزین مناسبی برای سنگدانه‌های طبیعی بوده و علاوه بر افزایش ظرفیت باربری خاک و مرتفع نمودن بخشی از مشکلات زیست محیطی ناشی از دپوی مصالح دور ریز، کاهش هزینه‌های بهسازی خاک را سبب شوند.

۱- مقدمه

از میان روش‌های مختلف بهسازی خاک، ستون سنگی یکی از موثرترین و در عین حال، مقرون به صرفه‌ترین، روش‌ها شناخته می‌شود. این روش برای خاک‌های رسی، سیلت نرم و ماسه سیلتهی سست مناسب است [۱]. خاک‌های رسی با مقاومت برشی زهکشی نشده بین ۷-۵۰ کیلوپاسکال قابل بهسازی با روش ستون سنگی هستند [۲]. ستون‌های سنگی افزایش ظرفیت باربری خاک و کاهش

نشست آن را به دنبال خواهند داشت [۳].

تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه مدل‌سازی آزمایشگاهی ستون سنگی، با هدف ارائه روش‌هایی جهت بهبود عملکرد آن انجام شده است. آمبیلی و گاندی [۴] و همینطور فتاح و همکارانش [۳] با مدل‌سازی سلول واحد در آزمایشگاه به بررسی رفتار بار - نشست ستون سنگی منفرد و گروهی پرداختند.

یکی از مسائل مرتبط با ستون سنگی، گسیختگی آن تحت

1 Ambily and Gandhi

2 Fattah et al.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: email



استفاده از پلی پروپیلن ضایعاتی خرد شده، به عنوان جایگزینی برای سنگدانه‌های ستون سنگی مقاومت برشی آن را بهبود بخشیدند.

امروزه انباشته شدن تایرهای فرسوده در محل‌های دفن زباله، به مشکل زیست محیطی مهمی در جوامع تبدیل شده و ضرورت استفاده مجدد از آن‌ها را در قالب کاربردهای جدیدتر افزایش می‌دهد. ویژگی‌های منحصر به فردی نظیر مقاومت بالا، چگالی پایین، و مقاومت اصطکاکی بالا، تایرها را به عنوان یک منبع مهندسی با ارزش مورد توجه قرار داده است. از طرفی با توجه به خرابی‌های ایجاد شده در رویه‌های آسفالتی، در بسیاری موارد، این مصالح از سطح راه تراشیده شده و در صورت عدم استفاده مجدد در راهسازی، در اطراف راه دپو می‌شوند. این مواد ضایعاتی یکی از عوامل اصلی آلودگی محیط زیست بوده و ذخیره و دپوی آن‌ها، سطح قابل توجهی از زمین‌های با ارزش را اشغال می‌کند. رویه‌های آسفالتی پس از تراشیده شدن، به خاطر داشتن بافت دانه‌ای می‌توانند به جای دانه‌های شن و ماسه در زمینه‌های مختلف مهندسی عمران مورد استفاده مجدد قرار گیرند. مهندسی ژئوتکنیک دارای پتانسیل بالایی در به کارگیری مجدد این مصالح، به منظور کاهش مشکلات زیست محیطی، است [۱۵].

یکی از روش‌های به کارگیری مجدد تایرهای فرسوده، استفاده از خرده‌های تایر به عنوان جایگزین سنگدانه‌های ستون سنگی است. آیوتیرمن و سومیا^{۱۲} [۱۶]، و همچنین شریعت‌مداری و همکارانش [۱۵] با جایگزینی درصد‌های مختلفی از حجم مصالح ستون سنگی با خرده‌های تایر به بررسی ظرفیت باربری ستون سنگی دارای خرده تایر پرداختند و دریافتند که ۲۰ درصد جایگزینی سنگدانه با تایر، دارای بیشترین ظرفیت باربری نسبت به سایر درصد‌های جایگزینی است و ظرفیت باربری را نسبت به ستون سنگی معمولی ۳۰-۳۶ درصد افزایش می‌دهد.

در این میان تعدادی از محققان با ترکیبی از راهکارهای فوق سعی در ارائه روش‌هایی سازگار با محیط زیست برای افزایش ظرفیت باربری ستون سنگی ارائه داده اند. سیوا و همکارانش^{۱۳} [۱۷] با استفاده از سرباره سیلیکا منگنز به عنوان جایگزین مصالح ستون سنگی به همراه محصور کردن آن به وسیله ژئوتکستایل نشان دادند که این روش می‌تواند ظرفیت باربری ستون سنگی را به میزان ۴۷ درصد

بارگذاری است. بارکسدل و باکوس^۱ [۱۱] انواع گسیختگی در ستون سنگی را در سه طبقه معرفی کردند: گسیختگی ناشی از حباب زدگی^۲، گسیختگی برشی و گسیختگی پانچ. گسیختگی ناشی از حباب زدگی توسط گرین‌وود^۳ [۵] و وانگ^۴ [۶]، گسیختگی برشی توسط مدهف و ویتکار^۵ [۷] و گسیختگی پانچ توسط ابوشی^۶ [۸] و همکارانش مورد مطالعه قرار گرفته است. طبق پژوهش وانگ ستون سنگی، صرف نظر از اتکایی یا اصطکاکی بودن آن، اگر دارای نسبت طول به قطر بیش از ۳ باشد، تحت حباب زدگی دچار گسیختگی می‌شود. تاکنون پژوهش‌هایی در جهت کاهش اثرات حباب زدگی در ستون انجام شده و در آن‌ها از ورق‌های ژئوتکستایل برای محصور کردن ستون سنگی و به دنبال آن، کاهش حباب زدگی و افزایش ظرفیت باربری ستون استفاده شده است. قضاوی و نظری افشار [۱۰ و ۹]. از جمله محقق‌هایی هستند که با به کارگیری ورق‌های ژئوتکستایل به عنوان مسلح کننده افقی و عمودی، در تمام طول ستون یا نیمی از آن، ثابت کردند که این روش بهسازی، باعث افزایش ظرفیت باربری ستون سنگی تا حدود ۴۰ درصد و کاهش اثرات حباب زدگی می‌شود. میراندا و همکارانش^۷ [۱۱] نحوه انتقال بار از خاک نرم به ستون سنگی محصور شده با دو نوع ژئوتکستایل را با هم مقایسه کردند. دنبات و دی^۸ [۱۲]، علاوه بر محصور کردن ستون سنگی به وسیله ژئوتکستایل، با استفاده از ورق‌های ژئوگرید، به مسلح کردن بستر ماسه‌ای که برای انتقال بهتر بار به ستون سنگی و افزایش سرعت زهکشی به کار می‌رود، پرداختند و نشان دادند که این روش، تاثیر قابل توجهی در بهبود ظرفیت باربری ستون سنگی دارد.

در دهه اخیر، استفاده از مواد بازیافتی در ستون سنگی به عنوان افزودنی و جایگزین مصالح دانه ای ستون، به منظور کاهش مشکلات زیست محیطی ناشی از جمع آوری و نگهداری آن‌ها، توجه تعدادی از محققان را به خود جلب کرده است. از این میان، مارتو و همکارانش^۹ [۱۳] با استفاده از ته خاکستر^۱ و موزامیر حسن^{۱۱} [۱۴] با

- 1 Barksdale and Bachus
- 2 Bulging
- 3 Greenwood
- 4 Wong
- 5 Madhav and Vitkar
- 6 Aboshi et al.
- 7 Miranda et al.
- 8 Debnath and Dey
- 9 Marto et al.
- 10 Bottom ash
- 11 Muzamir Hasan

12 Ayothiraman and Soumya
13 Siva et al.

در رطوبت ۲۵ درصد آماده شد.

در این پژوهش، از سنگدانه‌های تمیز مورد استفاده در ساخت آسفالت با دانه‌بندی ۲-۱۰ میلی‌متر به عنوان سنگدانه‌های تمیز استفاده شده و از جایگزینی آن با درصد‌های وزنی ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد از تراشه‌های آسفالت، سایر نمونه‌ها ساخته شده‌اند. نام اختصاری این نمونه‌ها به صورت RAPx در نظر گرفته شده است. RAP^۲ مخفف رویه آسفالتی بازیافتی و x درصد آسفالت موجود در نمونه را نشان می‌دهد. به عنوان مثال RAP25 نمونه‌ای دارای ۲۵ درصد آسفالت و ۷۵ درصد سنگدانه تمیز است. تصویر این نمونه‌ها در شکل ۱ آمده است. چگالی جامد نمونه سنگدانه تمیز یا RAP0، برابر ۲/۷ است. سایر مشخصات نمونه‌ها در جدول ۲ و نمودار دانه‌بندی خاک رس و مصالح دانه‌ای در شکل ۲ آمده است. وزن مخصوص خشک حداقل و حداکثر هر یک از مصالح مطابق ASTM D4254 و ASTM D4253 به دست آمده و با انتخاب تراکم نسبی ۷۰ درصد، وزن مخصوص خشک طبیعی نمونه به دست آمده است. لازم به ذکر است با توجه به روش‌های موجود اجرایی ستون سنگی، در عمل تراکم نسبی ستون‌های سنگی اجرا شده حدود ۷۰ درصد است.

۲-۱-۲- مشخصات تایر

از آنجا که کوچک‌ترین اندازه تایر موجود، رینگ به قطر ۱۳ اینچ (۳۲۵ میلی‌متر) دارد، امکان استفاده از تایرهای واقعی در مدل‌سازی کوچک مقیاس وجود ندارد. به همین دلیل، در این پژوهش از تایرهای کوچک چرخ کاستور استفاده شد. تایرهای به کار رفته در این پژوهش دارای قطر خارجی، قطر داخلی و عرض به ترتیب ۱۶۰، ۷۸ و ۵۰ میلی‌متر هستند. جنس لاستیک این تایرها مانند تایر واقعی خودرو است، در ساختمان آن‌ها نخ و روی رینگ آن‌ها سه عدد مفتول فولادی پیچیده شده است. تایرهای به کار رفته دارای چگالی ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مدول یانگ ۴ مگا پاسکال، ضریب پواسون ۰/۴۹، مقاومت کششی نهایی ۱/۵ مگاپاسکال و حداکثر کرنش ۰/۴۲ است. تصویر این تایرها در شکل ۳ آمده است.

۲-۲- تجهیزات و روند آزمایش

۲-۲-۱- آزمایش بارگذاری سلول واحد

در این پژوهش، برای بارگذاری سلول واحد، از دستگاه بارگذاری با حلقه نیرو به ظرفیت ۳۰ kN و حداکثر نشست ۳۵ میلی‌متر استفاده

افزایش دهد. همچنین موزامدر و همکارانش^۱ [۱۸]، با محصور کردن ستون سنگی دارای خرده تایر به وسیله ژئوگرید، نشان دادند که جایگزین کردن بیش از ۴۰ درصد از سنگدانه‌های ستون با خرده تایر و محصور کردن آن با ژئوگرید، باعث افزایش ظرفیت باربری به بیش از ۱۰۰ درصد خواهد شد.

با وجود پژوهش‌های فراوانی که در زمینه اصلاح عملکرد ستون سنگی و به کارگیری مصالح دور ریز به عنوان پرکننده ستون سنگی، انجام شده است، همچنان برخی از روش‌ها مورد بررسی قرار نگرفته‌اند مانند استفاده از تراشه‌های آسفالت در ستون سنگی. رویه‌های آسفالتی پس از تراشیده شدن، به شکل شن و ماسه درآمد و می‌توان از آن‌ها به عنوان جایگزینی برای سنگدانه‌های ستون سنگی استفاده کرد. همچنین، تایرها به دلیل هندسه حلقه مانند، این قابلیت را دارند که به عنوان پوششی برای محصور کردن ستون سنگی به کار روند. با چیدن حلقه‌های لاستیک بر روی یکدیگر، فضای مرکزی آن‌ها به شکل یک استوانه توخالی درآمد و می‌توان آن را با مصالح دانه‌ای به شکل ستون سنگی پر کرده و متراکم نمود. با این کار به دلیل افزایش برابری سستی سلول واحد و محصور شدن ستون سنگی و به دنبال آن کاهش حباب زدگی، ظرفیت باربری ستون سنگی افزایش خواهد یافت.

در این پژوهش، عملکرد درصد‌های وزنی مختلف تراشه‌های آسفالت به عنوان جایگزینی برای سنگدانه‌ها و عملکرد تایر به عنوان محصور کننده ستون سنگی، طی آزمایش‌های برش مستقیم و بارگذاری سلول واحد متشکل از خاک رس و ستون سنگی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مدل‌سازی آزمایشگاهی

۲-۱-۲- مشخصات مصالح

۲-۱-۱-۲- مشخصات خاک رس و مصالح دانه‌ای

مشخصات خاک رس در جدول ۱ آمده است. برای به دست آوردن رطوبت متناظر با مقاومت برشی زهکشی نشده ۷ کیلوپاسکال، تعدادی آزمایش تک محوری بر روی نمونه استوانه‌ای با قطر ۳۸ و طول ۷۶ میلی‌متر انجام شد. از آنجا که مقاومت برشی زهکشی نشده در رطوبت ۲۵ درصد برابر ۷/۸ کیلوپاسکال به دست آمد، خاک رس

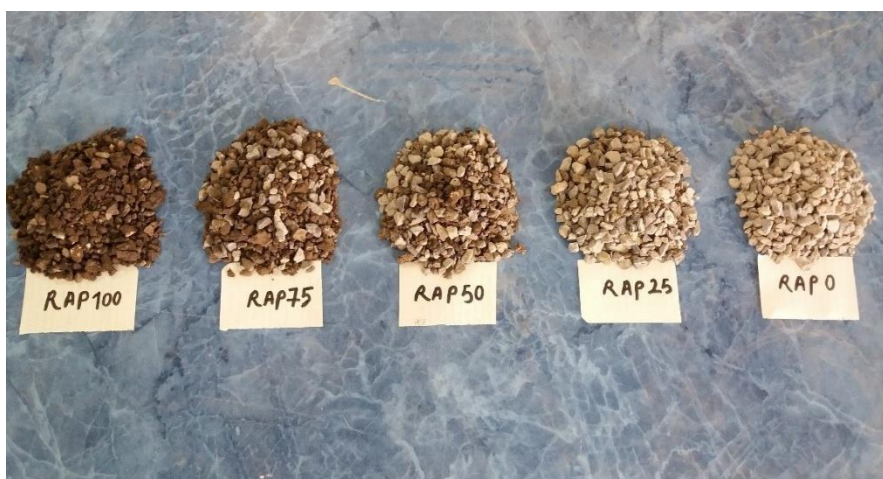
¹ Reclaimed Asphalt Pavement

² Bulging failure

¹ Muzamder et al.

جدول ۱. مشخصات خاک رس
Table 1. Properties of clay

استاندارد	مقدار	پارامتر
ASTM D4318-00	۲۸	حد روانی (%)
ASTM D4318-00	۲۰	حد خمیری (%)
ASTM D4318-00	۸	شاخص خمیری (%)
ASTM D698-00	۱۷	رطوبت بهینه (%)
ASTM D698-00	۱۷ (kN/m ³)	وزن مخصوص خشک حداکثر
-	۱۸ (kN/m ³)	وزن مخصوص در رطوبت ۲۵٪
ASTM D2166-00	۷/۸ (kpa)	مقاومت برشی زهکشی نشده
ASTM D2487-06	CL	نوع خاک در طبقه بندی متحد



شکل ۱. نمونه مصالح دانه‌ای با درصدهای مختلف تراشه آسفالت
Fig.1. Sample of aggregates with different percentages of RAP

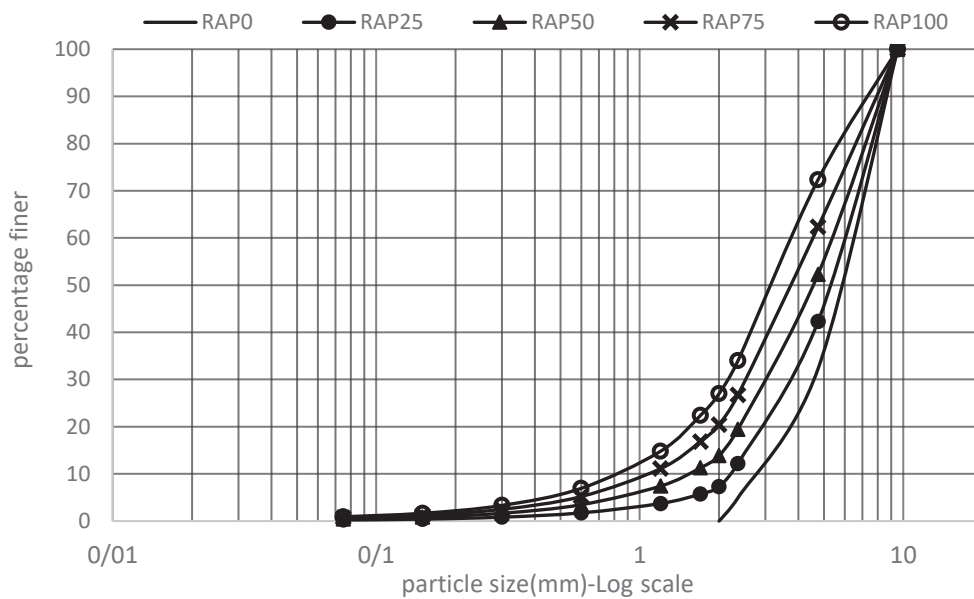
آزمایش‌های بارگذاری سلول واحد انجام شده شامل آزمایش بارگذاری خاک رس مسلح نشده، آزمایش‌های بارگذاری ستون سنگی با درصدهای مختلف جایگزینی آسفالت به صورت محصور نشده و تکرار آن‌ها به صورت محصور شده با تایر قطر ستون سنگی در تمام آزمایش‌ها به اندازه قطر داخلی تایر، یعنی ۷۸ میلی‌متر و طول تمام ستون‌ها ۳۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در این حالت نسبت طول به قطر ستون سنگی برابر ۳/۸۵ است. بر اساس پژوهش وانگ [۶]، اگر ستون سنگی دارای نسبت طول به قطر بیشتر از ۳ باشد، دچار گسیختگی حباب زدگی^۲ می‌شود. در نتیجه، حباب زدگی، گسیختگی کنترل کننده ستون‌های سنگی در این پژوهش، است.

شده است. از یک قالب استوانه‌ای به قطر ۲۲۸، طول ۳۳۰ و ضخامت ۲۵ میلی‌متر برای ساخت سلول واحد و از یک صفحه فولادی به قطر ۲۲۰ و ضخامت ۲۰ میلی‌متر برای بارگذاری آن استفاده شده است. تعیین اندازه سلول واحد بر اساس پارامتری به نام "نسبت ناحیه اصلاح شده" صورت گرفته است. این نسبت بیانگر نسبت مساحت ستون سنگی به مساحت سلول واحد است. از آنجا که دستورالعمل FHWA مربوط به ستون‌های سنگی بازه ۰/۱ الی ۰/۴ را برای این نسبت پیشنهاد می‌کند می‌توان با انتخاب قطر ستون سنگی و نسبت ناحیه اصلاح شده، مساحت سلول واحد را به دست آورد. در شکل ۴، تصویر دستگاه و قالب بارگذاری آمده است.

جدول ۲. مشخصات مصالح دانه‌ای

Table 2. Properties of aggregates

استاندارد	مقدار					پارامتر
	RAP0	RAP25	RAP50	RAP75	RAP100	
ASTM D4253-00	۱۷/۲۳	۱۷/۲۳	۱۶/۹۸	۱۶/۹۵	۱۶/۵۸	وزن مخصوص خشک حداکثر (kN/m^3)
ASTM D4254-00	۱۴/۸۵	۱۴/۷۱	۱۴/۵۶	۱۴/۵۲	۱۳/۹۵	وزن مخصوص خشک حداقل (kN/m^3)
-	۱۶/۴۴	۱۶/۳۹	۱۶/۱۷	۱۶/۱۴	۱۵/۶۹	وزن مخصوص (kN/m^3)
ASTM D2487-06	۲/۳	۲/۹	۳/۴	۴/۳	۴/۳	ضریب یکنواختی (C_u)
ASTM D2487-06	۱/۱۰	۱/۰۷	۱/۱۸	۱/۱۲	۱/۴۰	ضریب خمیدگی (C_c)
ASTM D2487-06	GP	GP	SP	SP	SP	طبقه‌بندی متحد



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی خاک رس و مصالح دانه‌ای

Fig. 2. Particle size distribution for clay and aggregates

وزن شده و پس از ریختن در قالب به وسیله یک چکش فلزی به وزن ۷/۵ کیلوگرم برای رسیدن به ضخامت مورد نظر، متراکم گردید. سپس همین کار برای ۶ لایه به ضخامت ۵۰ میلی‌متر، تا پر شدن کامل قالب، تکرار گردید. برای ایجاد ستون سنگی محصور نشده در بستر رسی، از یک لوله

برای هر آزمایش ۱۶-۲۲ کیلوگرم خاک رس برای رسیدن به رطوبت ۲۵ درصد با آب مخلوط شد. برای ساخت سلول واحد متشکل از خاک رس مسلح نشده، پس از چرب کردن دیواره داخلی قالب به وسیله گریس، خاک رس مرطوب مورد نیاز برای یک لایه به ضخامت ۳۰ میلی‌متر با توجه به وزن مخصوص ۱۸ کیلونیوتن بر متر مکعب



شکل ۳. تایر لاستیکی
Fig. 3. Model tires

رسیدن به ضخامت ۵۰ میلی‌متر متراکم گردید. این کار ۵ مرتبه دیگر تا پر شدن قالب ادامه یافت.

سپس مقدار مورد نیاز مصالح دانه‌ای برای لایه‌ای به ضخامت ۵۰ میلی‌متر با توجه به وزن مخصوص‌هایی که در جدول ۲ آمده است، توزین شده و پس از ریختن در لوله فلزی، توسط چکشی به وزن ۲/۵ کیلوگرم متراکم شد. برای پر شدن قالب، این کار ۵ مرتبه دیگر تکرار گردید. پس از متراکم نمودن هر لایه از مصالح دانه‌ای، لوله فلزی به مقدار حدودی ۴۰ میلی‌متر از قالب خارج شد و پس از آن لایه بعدی مصالح ریخته شد. این کار برای تسهیل خارج کردن لوله در انتهای کار، انجام شد.

برای ایجاد ستون سنگی محصور شده توسط تایر، به کمک چیدن تایرها بر روی یکدیگر، فضای مورد نیاز برای ریختن مصالح دانه‌ای ایجاد شد. بدین منظور، با چیدن ۶ تایر به عرض ۵۰ میلی‌متر، بر روی یکدیگر ستون سنگی به طول ۳۰۰ میلی‌متر ساخته شد. به دلیل کمبود فضا و عدم دسترسی به قسمت‌های انتهایی قالب پس از پر شدن آن، فضای خالی داخل فاق تایرها، قبل از قرارگیری در قالب، با توجه به وزن مخصوص مورد نظر، با مصالح دانه‌ای پر گردید. ریختن خاک رس مرطوب در قالب به ترتیبی که ذکر شد و قرار دادن تایرها در فضای مرکزی قالب به طور همزمان انجام شد. پس از پر شدن قالب، فضای مرکزی تایرها با توجه به وزن مخصوص مورد نظر، در ۶ لایه ۵۰ میلی‌متری پر و با استفاده از وزنه ۲/۵ کیلوگرمی مشابه



شکل ۴. قالب و دستگاه بارگذاری سلول واحد
Fig. 4. Mold and unit cell loading device

فلزی به قطر خارجی ۷۸ میلی‌متر استفاده شده است. پس از چرب کردن دیواره داخلی قالب و قسمت داخلی و خارجی لوله به وسیله گریس و ریختن لایه رس به ضخامت ۳۰ میلی‌متر در قالب و متراکم کردن آن، لوله فلزی در مرکز قالب قرار داده شد و در اطراف آن، خاک رس مورد نیاز برای یک لایه به ضخامت ۵۰ میلی‌متر با توجه به وزن مخصوص مورد نظر وزن شده و توسط یک چکش ۱ کیلوگرمی برای



(ب)

(الف)

شکل ۵. الف: ستون سنگی محصور نشده ب: ستون سنگی محصور شده با تایر
Fig. 5. (a) non-encased stone column; (b) tire-encased stone column

بر اساس این جدول، صرف نظر از محصور شدن یا نشدن ستون سنگی، ۲۵ درصد جایگزینی تراشه آسفالت در نمونه، نسبت به سایر درصد‌های جایگزینی عملکرد بهتری نشان داد. پس از آن با افزایش درصد آسفالت، ظرفیت باربری به مقدار حداکثر ۲۳ درصد کاهش یافته است. محصور کردن ستون سنگی به وسیله تایر، صرف نظر از درصد آسفالت، به صورت قابل ملاحظه ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد و دارای بازدهی بیشتر از ۱ است. بر اساس این جدول محصور کردن ستون سنگی متشکل از سنگدانه‌های طبیعی به وسیله تایر، باعث افزایش ظرفیت باربری آن به میزان ۵۴٪ می‌گردد. این در حالی است که افزایش ظرفیت باربری به واسطه محصور نمودن ستون سنگی با ژئوتکستایل در پژوهش دبنات و دی [۱۲] حدود ۶۰٪ و در پژوهش قضاوی و نظری افشار [۱۰ و ۹] حدود ۴۰٪ است. از مقایسه نتایج به دست آمده از این پژوهش‌ها و پژوهش حاضر با توجه به نزدیک بودن درصد‌های افزایش ظرفیت باربری ناشی از محصور شدگی توسط ژئوتکستایل و تایر، می‌توان دریافت که حلقه‌های تایر می‌توانند جایگزین مناسبی برای ژئوتکستایل به عنوان محصور کننده ستون سنگی باشند. در این میان، نمونه دارای ۲۵ درصد تراشه آسفالت و محصور شده با تایر، عملکرد بهتری نسبت

به ستون سنگی محصور نشده متراکم شد. در شکل ۵ ستون سنگی محصور نشده و محصور شده با تایر قبل از بارگذاری آمده است. تمامی نمونه‌ها قبل از بارگذاری به مدت ۲۴ ساعت جهت یکنواخت شدن رطوبت، با پوشش پلاستیکی ضخیم دو لایه در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند. میزان رطوبت خاک، قبل و بعد از بارگذاری مورد آزمایش قرار گرفت و بیشترین میزان اختلاف رطوبت با رطوبت مورد نظر، ۱/۵ درصد بود. بارگذاری سلول واحد با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه تا نشست ۳۲ میلی‌متر انجام شد و قرائت بار به ازای هر ۱ میلی‌متر صورت گرفت.

۳-نتایج و بحث

۳-۱- ظرفیت باربری ستون سنگی

در جدول ۳ مقدار درجه بهسازی هر یک از نمونه‌ها آمده است. درجه بهسازی به صورت نسبت ظرفیت باربری ستون سنگی مورد نظر در نشست ۳۲ میلی‌متر به ظرفیت باربری ستون سنگی با مصالح RAP0، در نظر گرفته شده است [۱۵]. در این جدول، علامت E^۱ به کار رفته در کنار نام اختصاری نمونه، به معنای محصور شده است.

1 Encased

می‌شود اما در درصد‌های بالاتر تراشه‌های آسفالت، قیر باعث کاهش اندکی در میزان مقاومت ستون سنگی می‌شود. ستون سنگی علاوه بر افزایش ظرفیت باربری، قادر به افزایش سرعت زهکشی نیز می‌باشد. از این رو، مصالح پرکننده آن، معمولاً دارای دانه بندی یکنواخت بوده تا با ایجاد محیطی متخلخل، تسهیل زهکشی را موجب شود. دانه بندی متخلخل دارای حفره‌هایی است که ممکن است مسیر انتقال نیرو را قطع کنند.

در این پژوهش با جایگزین کردن ۲۵ درصد از مصالح ستون سنگی با خرده‌های آسفالت، بر اساس نمودار شکل ۱، حدود ۷ درصد مصالح ریزدانه کوچک‌تر از ۲ میلی‌متر به نمونه اضافه شده است. وجود این ریزدانه‌ها می‌تواند مسیرهای انتقال نیرو را کامل کرده و با ایجاد قفل و بست بیشتر بین ذرات درشت دانه، افزایش ظرفیت باربری را سبب شود. از این رو ظرفیت باربری ستون سنگی دارای ۲۵ درصد آسفالت افزایش یافته است. اما با افزایش درصد آسفالت، درصد ریزدانه کوچک‌تر از ۲ میلی‌متر، تا ۲۷ درصد افزایش یافته و به دلیل کاهش سختی مصالح ستون، ظرفیت باربری آن کاهش یافته است. همچنین وجود قیر در مصالح آسفالتی اصطکاک بین دانه‌ها کاهش می‌یابد.

به منظور درک بهتر ارتباط بین درصد تراشه آسفالت و ظرفیت باربری، نمودار شکل ۶ رسم شده است. شیب ملایم این نمودار در مقادیر آسفالت بالاتر از ۲۵ درصد نشان می‌دهد که افزایش درصد

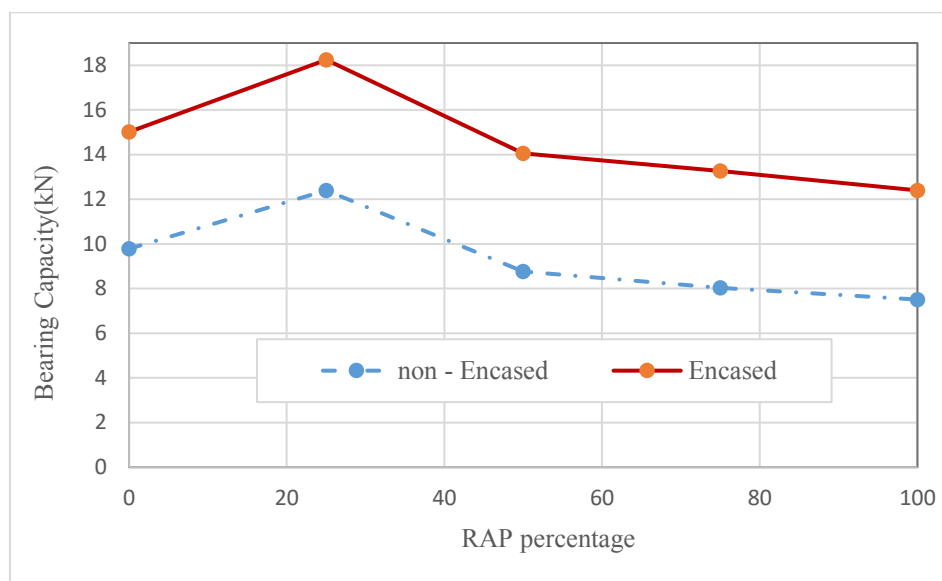
به سایر نمونه‌ها دارد و افزایش ظرفیت باربری در این نمونه به میزان ۸۷ درصد مشاهده می‌شود.

از آنجا که تراشه‌های آسفالت از مصالح دانه‌ای تمیز و قیر تشکیل شده‌اند، انتظار می‌رود که رفتار مشابهی نسبت به مصالح تمیز از خود نشان دهند. در نتیجه علت تفاوت عملکرد تراشه‌های آسفالت با مصالح تمیز را می‌توان در وجود قیر و تفاوت میزان ریزدانه موجود در آن‌ها و به دنبال آن تفاوت سختی ترکیب ساخته شده از آن‌ها، جستجو کرد. وجود قیر از یک طرف باعث کاهش اصطکاک می‌شود و از طرف دیگر باعث تراکم بهتر مصالح ستون سنگی می‌شود. درصد کم از تراشه‌های آسفالت به عنوان مثال ۲۵ درصد، قیر باعث تراکم بهتر نمونه‌ها

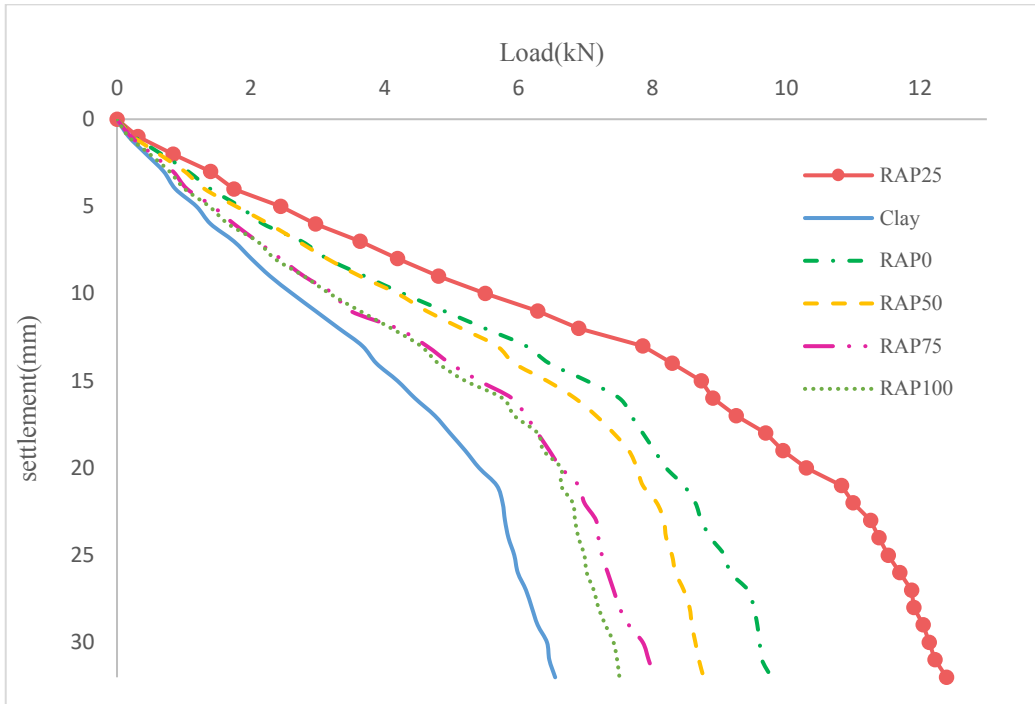
جدول ۳. درجه بهسازی نمونه‌های محصور نشده و محصور شده با تایلر

Table 3. Factor of improvement of non-encased and tire-encased stone columns

درجه بهسازی	نام اختصاری نمونه	درجه بهسازی	نام اختصاری نمونه
۱/۵۴	ERAP0	۱	RAP0
۱/۸۷	ERAP25	۱/۲۷	RAP25
۱/۴۴	ERAP50	۰/۹۰	RAP50
۱/۳۶	ERAP75	۰/۸۳	RAP75
۱/۲۷	ERAP100	۰/۷۷	RAP100

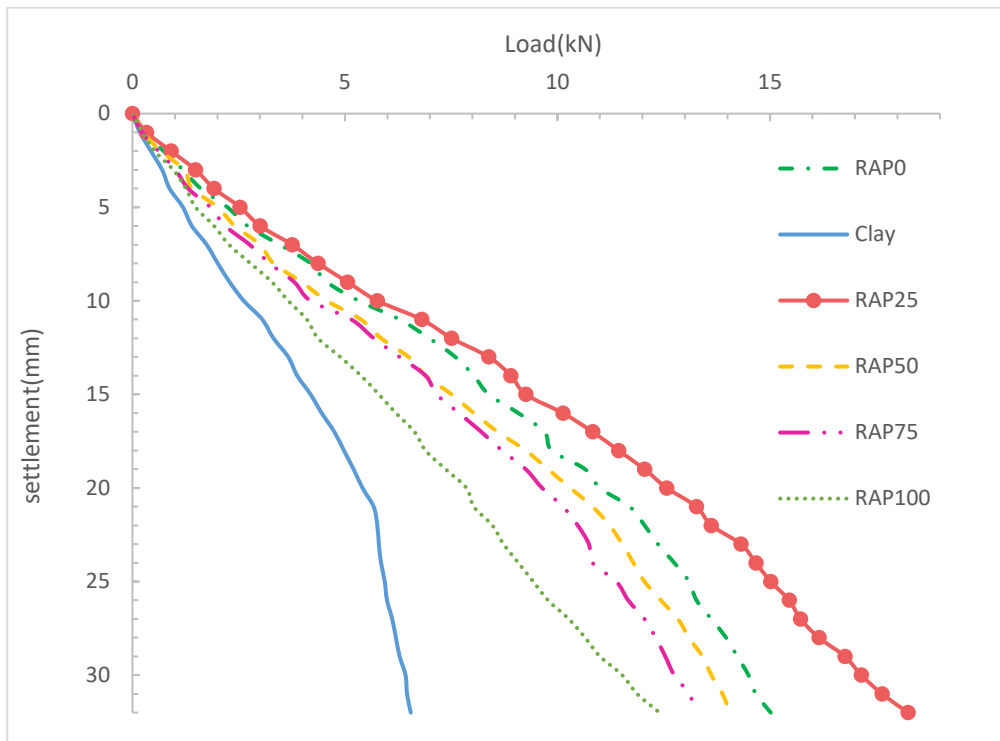


شکل ۶. نمودار تغییرات ظرفیت باربری در مقابل تغییرات درصد آسفالت
Fig. 6. Bearing capacity of stone column vs RAP percentage



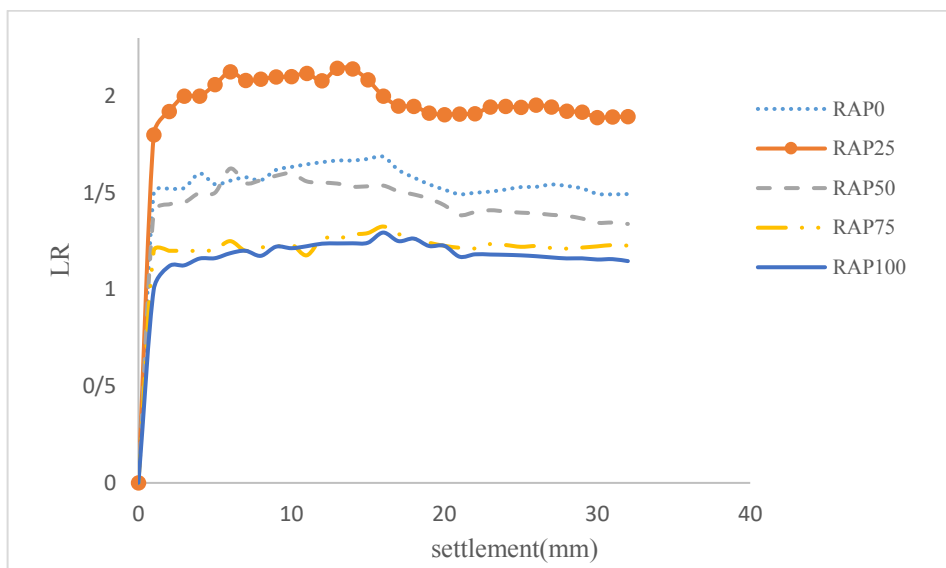
شکل ۷. نمودار بار - نشست نمونه‌های محصور نشده

Fig. 7. Load-settlement variation of non-encased stone columns



شکل ۸. نمودار بار - نشست نمونه‌های محصور شده با تایلر

Fig. 8. Load-settlement variation of fire-encased stone columns



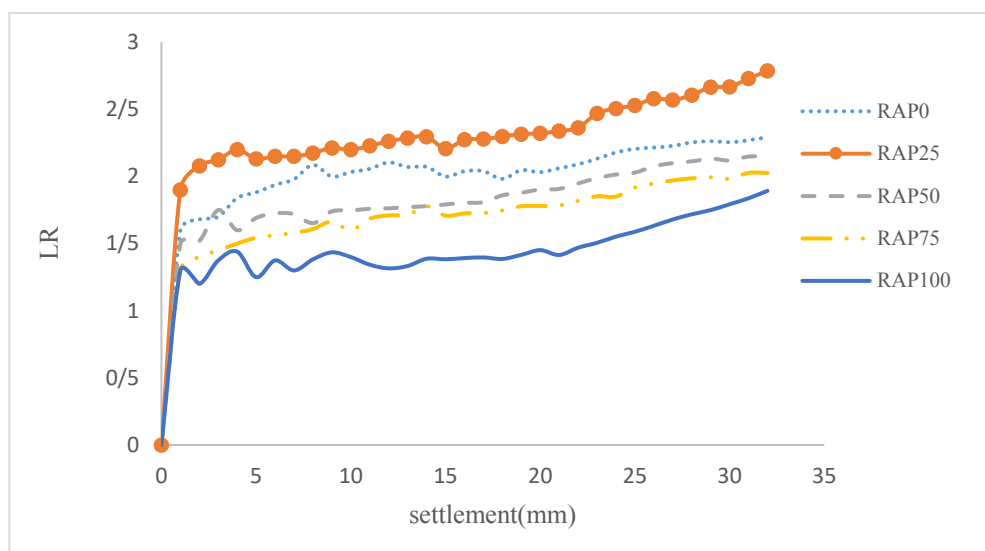
شکل ۹. نمودار نسبت بار در مقابل نشست برای نمونه‌های محصور نشده
Fig. 9. Variation of load-ratio vs settlement of non-encased stone columns

رفتار نرم شده و از شکست ترد جلوگیری می‌کند. در ستون‌های سنگی محصور شده با تایر، با ادامه بارگذاری و افزایش نشست، تایر فشرده تر می‌شود. قسمت فاق تایر تحت فشار بوده و قسمت عرض آن، از داخل تحت فشار افقی مصالح سنگی و از بیرون آن تحت فشار خاک رسی می‌باشد. از آنجا که سختی مصالح ستون از خاک رس بسیار بیشتر است، بار وارده به طور ناهمسان بین خاک و ستون تقسیم شده و مصالح سنگی نیروی بیشتری را نسبت به خاک رس متحمل می‌شوند. بنابراین، برآیند نیرو در عرض تایر به سمت بیرون آن قرار گرفته و سبب ایجاد کشش در این ناحیه از تایر می‌شود.

با افزایش کرنش در لاستیک تایر خودرو، تنش فشاری و کششی در آن افزایش می‌یابد [۱۹]. با افزایش نشست در ستون سنگی، میزان کرنش کششی و فشاری در نواحی مختلف تایر افزایش یافته و سبب افزایش تنش فشاری و کششی بسیج شده در لاستیک می‌شود. در نتیجه با افزایش نشست در ستون سنگی محصور شده با تایر، به جای کاهش نرخ افزایش بار در ستون، هنگام نزدیک شدن به نشست نهایی، افزایش مقاومت به سیر صعودی خود ادامه داده است. به عبارت دیگر با افزایش نشست تایر نقش بیشتری در تحمل بار ایفا می‌نماید. عدم وقوع حباب زدگی نیز به علت محصور شدگی کامل ستون، می‌تواند به این رفتار ستون‌های محصور شده کمک کرده

آسفالت، باعث کاهش قابل توجهی در ظرفیت باربری ستون سنگی نمی‌شود. به طوری که ظرفیت باربری با افزایش درصد آسفالت از ۵۰ تا ۱۰۰ درصد، تنها به میزان ۱۲ درصد برای نمونه‌های محصور نشده و ۱۷ درصد برای نمونه‌های محصور شده، باعث کاهش درجه بهسازی می‌شود. بنابراین با توجه به تغییر کم در مقدار ظرفیت باربری نسبت به ستون سنگی معمولی، می‌توان نتیجه گرفت که تراشه‌های آسفالت قابلیت جایگزینی کامل با سنگدانه‌های طبیعی را نیز دارا می‌باشند.

نمودار بار - نشست نمونه‌های محصور نشده و محصور شده به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ آمده است. از مقایسه این دو نمودار می‌توان دریافت که شیب مماس بر نمودار ستون‌های محصور نشده، با افزایش نشست، کاهش یافته و تا رسیدن به نشست نهایی، به خطی صاف نزدیک شده است. اما نمودار ستون‌های محصور شده با کاهش ناچیزی در شیب نمودار، به روند صعودی خود ادامه داده اند. همچنین از بررسی نمودارهای این دو شکل می‌توان دریافت که با اضافه شدن تراشه‌های آسفالت شیب نمودارها تغییر می‌یابد به نحوی که شیب نمودار ستون‌های سنگی با تراشه‌های آسفالت در لحظه رسیدن به نشست ۳۰ میلی‌متر هنوز مایل است و قائم نشده است این مطلب نشان می‌دهد که ستون سنگی با تراشه آسفالت قادر به تحمل تغییر شکل بیشتری نسبت به ۳۰ میلی‌متر و مقاومت نهایی بیشتری خواهد بود. بنابراین اضافه شدن درصد تراشه‌های آسفالت باعث بروز



شکل ۱۰. نمودار نسبت بار در مقابل نشست برای نمونه‌های محصور نشده

Fig. 10. Variation of load-ratio vs settlement of fire-encased stone columns

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر روشی محیط زیست دوستانه برای بهسازی خاک‌های نرم و ضعیف معرفی شد. در این روش استفاده از تراشه‌های آسفالت به عنوان مصالح دانه‌ای ستون سنگی و همچنین استفاده از تایرهای فرسوده به عنوان محصور کننده ستون سنگی معرفی شد. این روش به دفن مهندسی مواد دور ریز کمک می‌کند، بخشی از مشکلات زیست محیطی را مرتفع می‌سازد، هزینه‌های بهسازی خاک را به دلیل استفاده از مصالح بازیافتی کاهش می‌دهد و به حفظ منابع طبیعی به دلیل استفاده کمتر از سنگدانه‌های تمیز، کمک می‌کند. در این پژوهش تاثیر تراشه‌های آسفالت به عنوان جایگزینی برای مصالح دانه‌ای ستون سنگی مورد بررسی قرار گرفت. تراشه‌های آسفالت با درصد‌های وزنی ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد با سنگدانه‌های طبیعی جایگزین شدند و عملکرد آن‌ها تحت آزمایش بارگذاری قائم سلول واحد مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به منظور افزایش ظرفیت باربری ستون سنگی، از تایرهای لاستیکی برای محصور کردن آن استفاده شد و تاثیر آن بر ظرفیت باربری ستون سنگی بررسی گردید. در ادامه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها پرداخته شده است:

- ۱- میزان تقویت مقاومت برشی و ظرفیت باربری ستون‌های سنگی بستگی به درصد آسفالت موجود در آن‌ها دارد.
- ۲- با محصور نمودن ستون سنگی به وسیله تایر لاستیکی، صرف

باشد.

یکی از پارامترهایی که برای تحلیل رفتار ستون سنگی مورد استفاده قرار می‌گیرد، نسبت بار نامیده می‌شود، که آن را به صورت LR نشان می‌دهند. این پارامتر برای یک میزان نشست مشخص، از تقسیم کردن مقدار بار تحمل شده توسط خاک بهسازی شده با ستون سنگی بر بار تحمل شده توسط خاک رس بهسازی نشده به دست می‌آید [۱۰]. در شکل‌های ۹ و ۱۰، نمودار نسبت بار در مقابل نشست، به ترتیب برای ستون‌های محصور نشده و محصور شده آمده است. همانطور که انتظار می‌رفت، نمودار نسبت بار نمونه‌های محصور نشده تا نشستی مشخص به مقدار تقریبی ۱۵ میلی‌متر صعودی بوده و پس از آن به دلیل نزدیک شدن به حالت گسیختگی، میزان افزایش بار کاهش یافته و نمودار سیر نزولی در پیش گرفته است. اما در نقطه مقابل، نمودار نمونه‌های محصور شده به دلایلی که در قسمت قبل گفته شد، از ابتدا صعودی بوده و در ادامه نیز سیر صعودی را با شیب بیشتری ادامه داده است. در این نمودارها نمونه RAP25 دارای بیشترین نسبت بار بوده و به میزانی بالاتر از نمودار سایر نمونه‌ها قرار گرفته است. از مقایسه نمودارها مشاهده می‌شود که تاثیر محصور کننده باعث افزایش قابل توجه L.R. می‌شود.

matrix ترکیب
max حداکثر
min حداقل
opt بهینه

مراجع

- [1] R. Barksdale, R. Bachus, Design and construction of stone columns, vol. I, Turner-Fairbank Highway Research Center, 1983.
- [2] I. Indian Standard, Design and construction for ground improvement—Guidelines. Part 1: Stone columns, IS, 15284 (2003) 267-290.
- [3] M.Y. Fattah, M.A. Al-Neami, A.S. Al-Suhaily, Estimation of bearing capacity of floating group of stone columns, Engineering science and technology, an international journal, 20(3) (2017) 1166-1172.
- [4] A. Ambily, S.R. Gandhi, Behavior of stone columns based on experimental and FEM analysis, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 133(4) (2007) 405-415.
- [5] D. Greenwood, Mechanical improvement of soils below ground surface, in: Inst Civil Engineers Proc, London/UK/, 1970.
- [6] H. Wong, Vibroflotation-its effect on weak cohesive soils, Civil Engineering (London), 82 (1975) 44-76.
- [7] M. Madhav, P. Vitkar, Strip footing on weak clay stabilized with a granular trench or pile, Canadian Geotechnical Journal, 15(4) (1978) 605-609.
- [8] H. Aboshi, The compozer, a method to improve characteristics of soft clays by inclusion of large diameter sand columns, in: Proc. of 1st Int. Conf. on Soil Reinforcement, 1979, pp. 211-216.
- [9] J.N. Afshar, M. Ghazavi, Experimental studies on bearing capacity of geosynthetic reinforced stone columns, Arabian Journal for Science and Engineering, 39(3) (2014) 1559-1571.
- [10] M. Ghazavi, J.N. Afshar, Bearing capacity of geosynthetic encased stone columns, Geotextiles and Geomembranes, 38 (2013) 26-36.

نظر از درصد آسفالت موجود در ترکیب، درجه بهسازی از ۱ بیشتر شده که نشان می‌دهد تایرهای لاستیکی به عنوان محصور کننده باعث افزایش ظرفیت باربری در ستون سنگی می‌شوند.

۳- در ستون‌های سنگی محصور شده با تایر با افزایش نشست، تغییر شکل تایرها و در نتیجه تنش‌های بسیج شده داخلی در تایرها افزایش می‌یابد و به این ترتیب باعث افزایش ظرفیت باربری ستون می‌شود. همچنین محصور کنندگی تایرها باعث عدم وقوع گسیختگی حباب زدگی می‌شود.

۴- صرف نظر از محصور شدن یا نشدن ستون سنگی، وجود ۲۵ درصد تراشه آسفالت در ستون سنگی باعث افزایش ظرفیت باربری آن نسبت به ستون دارای سنگدانه طبیعی می‌شود. اما با افزایش درصد آسفالت از ۲۵ به ۱۰۰ درصد، ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. با این حال بیشترین میزان کاهش ظرفیت باربری به واسطه افزایش درصد آسفالت تنها ۲۳ درصد بوده که نشان می‌دهد خرده‌های آسفالت می‌توانند جایگزین محیط زیست دوستانه‌ای برای مصالح ستون سنگی باشند.

۵- افزایش درصد آسفالت باعث بروز رفتار نرم در مصالح شده و از شکست ترد جلوگیری می‌کند.

فهرست علائم

C_c	ضریب خمیدگی
C_u	مقاومت برشی زهکشی نشده، kpa و ضریب یکنواختی
D_r	تراکم نسبی %
G_s	چگالی
LL	حد روانی %
LR	نسبت بار
PI	شاخص خمیری %
PL	حد خمیری %
γ_d	وزن مخصوص خشک، kN/m^3
ω	درصد رطوبت %

- (2018) 700-709.
- [16] R. Ayothiraman, S. Soumya, Model tests on the use of tyre chips as aggregate in stone columns, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 168(3) (2015) 187-193.
- [17] S.S.G. Prasad, Y. Harish, P. Satyanarayana, Stabilization of Marine Clays with Geotextile Reinforced Stone Columns Using Silica-Manganese Slag as a Stone Column Material, International Journal of Computational Engineering Research (IJCER), 5(09) (2015) 05-12.
- [18] T. Mazumder, A. Rolaniya, R. Ayothiraman, Experimental study on behaviour of encased stone column with tyre chips as aggregates, Geosynthetics International, 25(3) (2018) 259-270.
- [19] P. Baranowski, P. Bogusz, P. Gotowicki, J. Małachowski, Assessment of mechanical properties of offroad vehicle tire: Coupons testing and FE model development, Acta mechanica et automatica, 6 (2012) 17-22.
- [11] M. Miranda, A. Da Costa, J. Castro, C. Sagaseta, Influence of geotextile encasement on the behaviour of stone columns: Laboratory study, Geotextiles and Geomembranes, 45(1) (2017) 14-22.
- [12] P. Debnath, A.K. Dey, Bearing capacity of geogrid reinforced sand over encased stone columns in soft clay, Geotextiles and Geomembranes, 45(6) (2017) 653-664.
- [13] A. Marto, M. Hasan, M. Hyodo, A.M. Makhtar, Shear strength parameters and consolidation of clay reinforced with single and group bottom ash columns, Arabian Journal for Science and Engineering, 39(4) (2014) 2641-2654.
- [14] M. bin Hasan, N. binti Yusuf, A.M.H. Kassim, Strength of Soft Clay Reinforced with Group Crushed Polypropylene (PP).
- [15] N. Shariatmadari, S. Zeinali, H. Mirzaeifar, M. Keramati, Evaluating the effect of using shredded waste tire in the stone columns as an improvement technique, Construction and Building Materials, 176

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Bikdeli, M. jiryaei Sharahi, B. Badarloo, A. Golabchifard, *Experimental investigation of using reclaimed asphalt pavement aggregate in scrap tire encased stone column*, Amirkabir J. Civil Eng., 53(10) (2022) 4505-4518.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18232.6860](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18232.6860)



