

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده عمران

رشته‌ی مهندسی ژئوتکنیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

ارزیابی رفتار و ظرفیت باربری ستون‌های شنی مخلوط شده با درصد‌ها و
سایزهای مختلف خرده لاستیک با استفاده از دستگاه مدلسازی فیزیکی بزرگ
مقیاس

نگارنده: محمد همدانی

اساتید راهنما:

دکتر محسن کرامتی

اردیبهشت ماه ۱۴۰۰

تقدیم بہ

پدر و مادر عزیزم کہ، ہموارہ در تمامی مراحل زندگی، پشتیبان و مشوق من بودہ اند.

شکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم از تمامی زحمات استاد گران قدرم، جناب دکتر محسن کرامتی نهایت شکر را داشته

باشم. چرا که همواره با کمک‌های بی‌دریغ، قوت قلبی برای من بوده‌اند. امیدوارم که همواره موفق و پیروز

وسلامت باشند.

تعهد نامه

اینجانب محمد همدانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ارزیابی رفتار و ظرفیت باربری ستون های شنی مخلوط شده با درصدها و سازه های مختلف خرده لاستیک با استفاده از دستگاه مدلسازی فیزیکی بزرگ مقیاس تحت راهنمایی دکتر محسن کرامتی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

سالانه در جهان حجم زیادی لاستیک فرسوده بر محیط زیست تحمیل می گردد که این امر مشکلات زیست محیطی بسیار زیادی به وجود می آورد. تاکنون تحقیقات متعددی جهت بررسی تأثیر خرده لاستیک ها در صنایعی مانند، جاده سازی، ساختمانی، خودروسازی، صنایع دریایی، ورزش، دامداری و کشاورزی و آبرسانی صورت گرفته است. با وجود اینکه مزیت استفاده از لاستیک اعم از خرد شده یا نشده در بهبود خواص خاک به طور کلی به اثبات رسیده است اما تحقیقات در زمینه های مختلف همچنان ادامه دارد. در این مطالعه با مدل سازی فیزیکی ستون های شنی مخلوط شده با درصد ها و سایز های مختلف خرده لاستیک در آزمایشگاه، تأثیر این اختلاط ها بر رفتار و ظرفیت باربری ستون های شنی و بهترین درصد اختلاط خرده لاستیک مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله نخست آزمایشات اولیه به منظور شناخت خصوصیات مصالح مورد استفاده صورت گرفت که این آزمایش های اولیه شامل آزمایش تعیین وزن مخصوص حداقل و حداکثر، چگالی دانه های جامد و آزمایش دانه بندی به منظور پی بردن به توزیع اندازه دانه ها در نمونه خاک و غیره بود و در مرحله دوم جهت یافتن میزان چسبندگی و اصطکاک داخلی آزمایش هایی توسط دستگاه برش مستقیم جعبه بزرگ صورت گرفت تا مقاومت برشی اختلاط ها مورد بررسی قرار گیرد و در پایان به منظور شبیه سازی شرایط بارگذاری و تأمین شرایط مدل سازی فیزیکی با مقیاس نیمه واقعی، از یک دستگاه مدل سازی فیزیکی بزرگ مقیاس که قابلیت بارگذاری های استاتیکی، دینامیکی دارد و مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آزمایش ها نشان داد که با افزودن خرده لاستیک سایز متوسط تا ۴۰ درصد، ظرفیت باربری ستون شنی تا حدود ۱۷ درصد افزایش پیدا کرده است و با افزایش خرده لاستیک بیش از ۴۰ درصد شاهد کاهش ظرفیت باربری بودیم. افزودن خرده لاستیک بیش از این مقدار به مخلوط، به علت کاهش رفتار اصطکاکی دانه های شن با یکدیگر رفتار مصالح به سمت مصالح الاستیک رفته و این مسئله باعث کاهش ظرفیت باربری می شود؛ بنابراین بهینه ترین ظرفیت باربری ستون شنی حاوی خرده لاستیک نسبت به ظرفیت باربری ستون شنی بدون خرده لاستیک، اختلاط ۴۰ درصد خرده لاستیک سایز متوسط می باشد که در اختلاط ۴۰ درصد خرده لاستیک سایز متوسط، در ۲۰ میلی متر نشست ستون شنی حدود ۷۶ درصد، در ۴۰ میلی متر نشست حدود ۵۱ درصد و در ۶۰ میلی متر نشست حدود ۱۷ درصد افزایش ظرفیت باربری را شاهد بودیم.

واژه های کلیدی: ژئوتکنیک زیست محیطی، ستون شنی، خرده لاستیک، مدل سازی فیزیکی بزرگ مقیاس، ظرفیت باربری، برش مستقیم جعبه بزرگ

فهرست مطالب

۱	فصل ۱: کلیات
۱-۱-۱	مقدمه..... ۲
۱-۲-۱	بیان مسئله و اهمیت موضوع..... ۲
۱-۳-۱	جنبه محیط زیستی استفاده از لاستیک در بهسازی خاک..... ۴
۱-۴-۱	ضرورت انجام تحقیق..... ۴
۱-۵-۱	اهداف تحقیق..... ۸
۱-۶-۱	روش انجام تحقیق..... ۸
۱-۷-۱	فصل بندی مطالب..... ۹

۱۱	فصل ۲: مروری بر ادبیات فنی
۱-۲-۱	مقدمه..... ۱۲
۱-۲-۲	روش های عمومی بهسازی و تثبیت خاک..... ۱۲
۱-۳-۲	ستون شنی..... ۱۳
۱-۳-۲-۱	کاربرد ستون شنی..... ۱۴
۱-۳-۲-۲	تاریخچه ستون های شنی (ستون سنگی)..... ۱۴
۱-۳-۳-۲	تعریف..... ۱۷
۱-۳-۴-۲	انواع مدهای خرابی در ستون های شنی..... ۱۹
۱-۳-۵-۲	انواع روش های ساخت ستون شنی..... ۲۰
۱-۳-۵-۲-۱	روش ستون های شنی ارتعاشی..... ۲۰
۱-۳-۵-۲-۲	روش تراکم ارتعاشی جابجایی یا روش خشک..... ۲۲

- ۲-۳-۵-۳- روش تراکم ارتعاشی جایگزینی یا روش تر..... ۲۳
- ۲-۳-۵-۴- روش ستون شنی کوبشی..... ۲۴
- ۲-۳-۵-۵- گستره کاربرد روش‌های ساخت ستون شنی..... ۲۵
- ۲-۴- مطالعات پیشین ستون شنی ۲۶
- ۲-۵- تاریخچه و مطالعات پیشین لاستیک فرسوده و خرده‌لاستیک ۳۳
- ۲-۶- مطالعات پیشین ستون شنی با خرده لاستیک ۴۵
- ۲-۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری تحقیقات مرتبط ۵۰

فصل ۳: روش تحقیق ۵۳

- ۳-۱- مقدمه..... ۵۴
- ۳-۲- مواد و مصالح مصرفی..... ۵۴
- ۳-۲-۱- خاک بستر مورد استفاده..... ۵۴
- ۳-۲-۲- مصالح ستون شنی ۵۸
- ۳-۲-۳- خرده لاستیک..... ۵۹
- ۳-۳- آزمایش برش مستقیم جعبه بزرگ ۶۰
- ۳-۳-۱- معرفی دستگاه برش مستقیم جعبه بزرگ ۶۰
- ۳-۳-۲- روش انجام آزمایش برش مستقیم ۶۱
- ۳-۴- دستگاه مدل‌سازی فیزیکی بارگذاری بزرگ‌مقیاس ۶۲
- ۳-۵- آماده‌سازی نمونه‌ها برای انجام آزمایش مدل‌سازی فیزیکی ۶۵
- ۳-۵-۱- وسایل مورد نیاز ۶۵
- ۳-۵-۲- ساخت مدل فیزیکی در محفظه دستگاه مدل‌سازی فیزیکی ۶۶

- ۳-۵-۳- عملیات بارگذاری ستون شنی ۶۷
- ۳-۵-۴- آماده سازی مخلوط سنگدانه-خرده لاستیک ۶۷
- ۳-۶- برنامه آزمایشات برش مستقیم و مدل سازی فیزیکی ۶۸
- ۳-۶-۱- علائم اختصاری ۷۰

فصل ۴: نتایج و تفسیر آن‌ها ۷۱

- ۴-۱- مقدمه ۷۲
- ۴-۲- نتایج آزمایش‌های مرجع ۷۲
- ۴-۲-۱- آزمایشات مرجع دستگاه برش مستقیم جعبه بزرگ ۷۲
- ۴-۲-۲- آزمایشات مرجع دستگاه مدل سازی فیزیکی بزرگ مقیاس ۷۴
- ۴-۳- بررسی نتایج آزمایش‌های برش مستقیم جعبه بزرگ ۷۶
- ۴-۳-۱- بررسی پارامترهای مقاومتی آزمایش‌های برش مستقیم جعبه بزرگ ۷۷
- ۴-۳-۲- تکرارپذیری نتایج و خطاهای دستگاه برش مستقیم جعبه بزرگ ۸۷
- ۴-۴- بررسی نتایج آزمایش‌های مد سازی فیزیکی بزرگ مقیاس ۸۷
- ۴-۴-۱- ارزیابی درصد های اختلاط خرده لاستیک بر ظرفیت باربری ستون شنی در ۶۰ میلی متر نشست ۸۸
- ۴-۴-۲- ارزیابی اندازه خرده لاستیک بر ظرفیت باربری و نشست ستون شنی ۹۲
- ۴-۴-۳- ارزیابی اثر درصد های اختلاط خرده لاستیک بر ظرفیت باربری در ۲۰ و ۴۰ میلی متر نشست ستون شنی ۹۸
- ۴-۴-۴- بررسی خطاهای مؤثر در نتایج آزمایش مدل سازی فیزیکی بزرگ مقیاس ۱۰۱

۴-۴-۵- تکرارپذیری نتایج آزمایش مدل سازی فیزیکی بزرگ مقیاس..... ۱۰۲

۴-۵- مقایسه نتایج مطالعه حاضر با نتایج سایر محققین..... ۱۰۳

فصل ۵: جمع بندی و پیشنهادات ۱۰۵

۵-۱- مقدمه..... ۱۰۶

۵-۲- نتیجه گیری..... ۱۰۶

۵-۳- پیشنهادات برای تحقیقات آتی..... ۱۱۰

پیوست ۱۱۱

مراجع ۱۱۹

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) انباشت لاستیک‌های ضایعاتی در محیط‌زیست ۵
- شکل (۲-۱) دود غلیظ آتش‌سوزی شهریار و جاده خاوران ۶
- شکل (۳-۱) آتش‌سوزی مرکز انباشت لاستیک در شهر اوهایو ۷
- شکل (۱-۲) استفاده از ستون شنی در زیر تانکرها ۱۶
- شکل (۲-۲) استفاده از ستون شنی در بزرگراه pacific ۱۶
- شکل (۳-۲) استفاده از ستون شنی در بزرگراه pacific ۱۷
- شکل (۴-۲) ستون سنگی و خاک اطراف به‌عنوان سلول واحد ۱۸
- شکل (۵-۲) انواع مدهای خرابی در ستون‌های شنی ۲۰
- شکل (۶-۲) میله مرتعش یا ویبراتور ۲۱
- شکل (۷-۲) مفهوم پدیده تراکم در خاک‌های دانه‌ای ۲۱
- شکل (۸-۲) مراحل اجرای روش تراکم ارتعاشی ۲۲
- شکل (۹-۲) مراحل ساخت ستون‌های شنی جابه‌جایی - روش خشک تغذیه از پایین ۲۳
- شکل (۱۰-۲) مراحل ساخت ستون‌های شنی جایگزینی - روش مرطوب تغذیه از بالا ۲۴
- شکل (۱۱-۲) مراحل ساخت ستون‌های سنگی کوبشی ۲۵
- شکل (۱۲-۲) گستره کاربرد روش‌های تراکم ارتعاشی و جایگزینی ارتعاشی در خاک‌ها ۲۶
- شکل (۱۳-۲) نمودار بار نشست ستون شنی با نسبت طول به قطرهای متفاوت ۲۷
- شکل (۱۴-۲) مکانیسم اعمال بار به ستون سنگی ۲۸

- شکل (۱۵-۲) آزمایش بارگذاری ستون شنی (a) ستون در حال بارگذاری (b) کل ناحیه در حال بارگذاری ۲۹
- شکل (۱۶-۲) تأثیر مقاومت برشی خاک روی ستون شنی ۲۹
- شکل (۱۷-۲) تأثیر مقاومت برشی بر روی نسبت ظرفیت باربری ستون شنی به مقاومت برشی ۳۰
- شکل (۱۸-۲) تأثیر فاصله به قطر روی ستون شنی ۳۰
- شکل (۱۹-۲) دستگاه بارگذاری کومار ۳۱
- شکل (۲۰-۲) تغییرات تنش برشی با جابه‌جایی افقی در درصد‌های مختلف خرده لاستیک ۳۸
- شکل (۲۱-۲) تغییرات جابه‌جایی افقی در برابر جابه‌جایی قائم در مخلوط‌هایی با درصد‌های مختلف خرده لاستیک ۳۸
- شکل (۲۲-۲) دانه‌بندی خرده لاستیک، رس و ماسه‌بادی ۳۹
- شکل (۲۳-۲) تأثیر خرده لاستیک در وزن نمونه‌ها ۳۹
- شکل (۲۴-۲) تأثیر درصد‌های اختلاط خرده لاستیک در بهبود ظرفیت رس و ماسه‌بادی ۴۰
- شکل (۲۵-۲) خصوصیات مصالح ۴۱
- شکل (۲۶-۲) دانه‌بندی مصالح ۴۱
- شکل (۲۷-۲) اثر خرده لاستیک در وزن نمونه‌ها ۴۲
- شکل (۲۸-۲) منحنی جابه‌جایی افقی - تنش برشی ۴۲
- شکل (۲۹-۲) منحنی تنش نرمال - تنش برشی ۴۲
- شکل (۳۰-۲) منحنی تنش نرمال - تنش برشی ۴۳
- شکل (۳۱-۲) مدل‌سازی ستون شنی و خاک اطراف در جعبه دستگاه ادومتر ۴۶

- شکل (۳۲-۲) تأثیر بهبود درصدهای مختلف خرده لاستیک در ستون شنی..... ۴۷
- شکل (۳۳-۲) پوش گسیختگی برای خرده لاستیک سایز متوسط با شن..... ۴۸
- شکل (۳۴-۲) نمونه مصالح دانه‌ای با درصدهای مختلف تراشه آسفالت..... ۴۹
- شکل (۳۵-۲) تأثیر لاستیکی..... ۴۹
- شکل (۳۶-۲) a: ستون شنی محصور نشده b: ستون شنی محصور شده با تأثیر..... ۴۹
- شکل (۱-۳) ماسه فیروزکوه مصرفی..... ۵۵
- شکل (۲-۳) منحنی دانه‌بندی ماسه..... ۵۵
- شکل (۳-۳) شن مصرفی..... ۵۸
- شکل (۴-۳) منحنی دانه‌بندی شن..... ۵۸
- شکل (۵-۳) ابعاد خرده لاستیک از ریز تا درشت..... ۵۹
- شکل (۶-۳) کارخانه بازیافت ضایعات لاستیکی در مشهد..... ۵۹
- شکل (۷-۳) دستگاه برش مستقیم جعبه بزرگ..... ۶۱
- شکل (۸-۳) آماده‌سازی نمونه برش مستقیم جعبه بزرگ..... ۶۲
- شکل (۹-۳) نمای کلی دستگاه مدل‌سازی فیزیکی بارگذاری بزرگ‌مقیاس..... ۶۳
- شکل (۱۰-۳) شمایی از دستگاه مدل‌سازی فیزیکی بزرگ‌مقیاس..... ۶۴
- شکل (۱۱-۳) a) صفحه فلزی بارگذاری b) اهرم کوبش ستون شنی c) اهرم کوبش ماسه..... ۶۶
- شکل (۱۲-۳) ساخت مدل فیزیکی در محفظه دستگاه مدل‌سازی فیزیکی..... ۶۷
- شکل (۱۳-۳) نمونه اختلاط شن و خرده لاستیک..... ۶۸
- شکل (۱-۴) نمودار تنش برشی-جاب‌جایی افقی در شن خالص..... ۷۳

- شکل (۲-۴) پوش گسیختگی شن خالص ۷۳
- شکل (۳-۴) نمودار بار- نشست ستون شنی بدون خرده لاستیک ۷۵
- شکل (۴-۴) نمودار عملکرد دستگاه ۷۵
- شکل (۵-۴) نمودار تأثیر افزایش خرده لاستیک بر وزن نمونه‌ها ۷۷
- شکل (۶-۴) پوش گسیختگی مخلوط شن و ۲۰٪ خرده لاستیک سایز ریز ۷۸
- شکل (۷-۴) پوش گسیختگی مخلوط شن و ۴۰٪ خرده لاستیک سایز ریز ۷۸
- شکل (۸-۴) پوش گسیختگی مخلوط شن و ۶۰٪ خرده لاستیک سایز ریز ۷۹
- شکل (۹-۴) پوش گسیختگی مخلوط شن و ۲۰٪ خرده لاستیک سایز متوسط ۷۹
- شکل (۱۰-۴) پوش گسیختگی مخلوط شن و ۴۰٪ خرده لاستیک سایز متوسط ۸۰
- شکل (۱۱-۴) پوش گسیختگی مخلوط شن و ۶۰٪ خرده لاستیک سایز متوسط ۸۰
- شکل (۱۲-۴) پوش گسیختگی مخلوط شن و ۲۰٪ خرده لاستیک سایز درشت ۸۱
- شکل (۱۳-۴) پوش گسیختگی مخلوط شن و ۴۰٪ خرده لاستیک سایز درشت ۸۱
- شکل (۱۴-۴) پوش گسیختگی مخلوط شن و ۶۰٪ خرده لاستیک سایز درشت ۸۲
- شکل (۱۵-۴) میزان چسبندگی مخلوط در درصدهای مختلف خرده لاستیک ۸۳
- شکل (۱۶-۴) افزایش اصطکاک داخلی مخلوط شن-خرده لاستیک نسبت به شن خالص ۸۴
- شکل (۱۷-۴) نمودار تنش برشی - جابه‌جایی برای درصدهای مختلف خرده لاستیک سایز ریز تحت
سربار قائم ۱۰۰ کیلو پاسکال ۸۵
- شکل (۱۸-۴) نمودار تنش برشی - جابه‌جایی برای درصدهای مختلف خرده لاستیک سایز متوسط
تحت سربار قائم ۱۰۰ کیلو پاسکال ۸۵

- شکل (۴-۱۹) نمودار تنش برشی - جابه‌جایی برای درصدهای مختلف خرده لاستیک سایز درشت
 ۸۶.....تحت سربار قائم ۱۰۰ کیلو پاسکال
- شکل (۴-۲۰) مقایسه نمودار نشست- بار برای ستون شنی با خرده لاستیک سایز ریز
 ۸۹.....
- شکل (۴-۲۱) مقایسه نمودار نشست- بار برای ستون شنی با خرده لاستیک سایز متوسط
 ۹۰.....
- شکل (۴-۲۲) مقایسه نمودار نشست- بار برای ستون شنی با خرده لاستیک سایز درشت
 ۹۱.....
- شکل (۴-۲۳) نمودار مقایسه نشست- بار ستون شنی با ۲۰٪ خرده لاستیک
 ۹۳.....
- شکل (۴-۲۴) نمودار مقایسه نشست- بار ستون شنی با ۴۰٪ خرده لاستیک
 ۹۳.....
- شکل (۴-۲۵) نمودار مقایسه نشست- بار ستون شنی با ۶۰٪ خرده لاستیک
 ۹۴.....
- شکل (۴-۲۶) نمودار مقایسه نشست- بار ستون شنی با ۱۰۰٪ خرده لاستیک
 ۹۴.....
- شکل (۴-۲۷) نمودار تغییرات ظرفیت باربری ستون شنی دارای خرده لاستیک سایز ریز
 ۹۵.....
- شکل (۴-۲۸) نمودار تغییرات ظرفیت باربری ستون شنی دارای خرده لاستیک سایز متوسط
 ۹۶.....
- شکل (۴-۲۹) نمودار تغییرات ظرفیت باربری ستون شنی دارای خرده لاستیک سایز درشت
 ۹۶.....
- شکل (۴-۳۰) نمودار مقایسه تغییرات ظرفیت باربری ستون شنی دارای خرده لاستیک در سه سایز
 ۹۷.....
- شکل (الف-۱) دیتالاگر و سنسورها
 ۱۱۲.....
- شکل (الف-۲) نرم‌افزار vira data soft
 ۱۱۳.....
- شکل (الف-۳) شماتیک عملکرد دستگاه برش مستقیم جعبه بزرگ
 ۱۱۳.....
- شکل (ب-۱) محفظه‌ی آزمایش و قاب بارگذاری
 ۱۱۴.....
- شکل (ب-۲) تابلو برق دستگاه و جزئیات
 ۱۱۵.....
- شکل (ب-۳) سیستم پاورپک
 ۱۱۶.....

شکل (ب-۴) اجزا سیستم اکچویتیور ۱۱۷

شکل (ب-۵) سیستم جمع‌آوری داده (دیتالاگر) ۱۱۷

شکل (ب-۶) سیستم کامپیوتری کنترل، قرائت و ثبت داده‌ها ۱۱۸

فهرست جداول

- جدول (۱-۲) اطلاعات به دست آمده از آزمایش های محمود غزوی و همکاران ۳۲
- جدول (۲-۲) اطلاعات به دست آمده از آزمایش های فتاحی ۳۳
- جدول (۳-۲) مشخصات خرده لاستیک ۴۶
- جدول (۴-۲) اطلاعات نمونه های ساخته شده توسط شریعتمداری و همکاران ۴۶
- جدول (۵-۲) خلاصه ای از مطالعات پیشین ستون شنی با خرده لاستیک ۵۱
- جدول (۱-۳) ارزیابی حداقل چگالی خاک ماسه ۵۶
- جدول (۲-۳) ارزیابی حداکثر چگالی خاک ماسه ۵۶
- جدول (۳-۳) اطلاعات نمونه آزمایش چگالی دانه های جامد ۵۷
- جدول (۴-۳) چگالی دانه های جامد ۵۷
- جدول (۵-۳) مشخصات ماسه مورد استفاده (ماسه فیروزکوه) ۵۷
- جدول (۶-۳) برنامه آزمایش برش مستقیم جعبه بزرگ روی شن و خرده لاستیک ۶۹
- جدول (۷-۳) برنامه آزمایشات مدل سازی فیزیکی بزرگ مقیاس ۷۰
- جدول (۱-۴) مشخصات وزنی نمونه های آزمایش برش مستقیم جعبه بزرگ ۷۶
- جدول (۲-۴) تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در مخلوط شن با سائزها و نسبت های مختلف خرده لاستیک ۸۲
- جدول (۳-۴) نتایج آزمایش مدل سازی بزرگ مقیاس روی ستون شنی حاوی درصدهای مختلف خرده لاستیک سائز ریز در ۶۰ میلی متر نشست ۸۹

- جدول (۴-۴) نتایج آزمایش مدل سازی فیزیکی بزرگ مقیاس روی ستون شنی حاوی درصد های مختلف خرده لاستیک سایز متوسط در ۶۰ میلی متر نشست ۹۰
- جدول (۵-۴) نتایج آزمایش مدل سازی فیزیکی بزرگ مقیاس روی ستون شنی با درصد های مختلف خرده لاستیک سایز درشت در ۶۰ میلی متر نشست ۹۱
- جدول (۶-۴) نتایج آزمایش مدل سازی فیزیکی بزرگ مقیاس روی ستون شنی بر اساس سایز خرده لاستیک ۹۲
- جدول (۷-۴) نتایج آزمایش مدل سازی فیزیکی بزرگ مقیاس در ۲۰ میلی متر نشست ۹۹
- جدول (۸-۴) نتایج آزمایش مدل سازی فیزیکی بزرگ مقیاس در ۴۰ میلی متر نشست ۱۰۰

فصل ۱

کلیات

۱-۱- مقدمه

افزایش روزافزون جمعیت و رشد زیرساخت‌ها در شهرها و کلان‌شهرها و مشکل کمبود زمین مناسب برای احداث سازه‌های موردنیاز و همچنین افزایش ارزش اقتصادی زمین موجب شده است صنعت ساختمان‌سازی به دنبال زمین‌های ارزان‌قیمت برای احداث ساختمان باشد، در نتیجه انسان مجبور به استفاده از زمین‌هایی با کیفیت مهندسی پایین‌تر شده است. در چنین شرایطی برای احداث یک سازه مناسب باید به روش‌هایی، شاخص‌های یک خاک نامناسب را ارتقا داد تا در برابر تنش‌های وارده عملکرد مناسبی داشته باشد [۱]. در پایان‌نامه پیش رو با انجام مطالعات آزمایشگاهی سعی بر آن شد که نتایج آن راهنمای مناسب برای مهندسان و اجرای پروژه‌های گوناگون باشد.

۲-۱- بیان مسئله و اهمیت موضوع

جهت احداث سازه‌ها در مناطق ساحلی و خاک‌های لایه‌ای سست، ماسه‌ای و رسی استفاده از روش‌هایی به‌منظور بهسازی مقاومت و سختی خاک که زمانی از نظر اقتصادی به‌صرفه نبود، در حال حاضر به دلیل افزایش شدید قیمت زمین قابل توجه می‌باشد. امروزه روش‌های متعددی برای اصلاح خصوصیات فیزیکی و رفتار مکانیکی خاک‌های نامناسب موجود است [۱]. روش‌های مذکور شامل: تراکم، تحکیم، تسلیح، پیش بارگذاری، تزریق، تثبیت با افزودن مواد شیمیایی و غیره می‌باشد. ستون‌های شنی به‌عنوان تسلیح کننده خاک بشمار می‌آید و باعث کاهش نشست کل، نشست نسبی، افزایش ظرفیت باربری، افزایش سرعت تحکیم، افزایش پایدار شیب‌ها و کاهش پتانسیل روانگرایی می‌شود.

رشد وسایل نقلیه در سال‌های اخیر به‌شدت رو به افزایش است. تا سال ۲۰۳۰ تخمین زده می‌شود، تعداد کل وسایل نقلیه در جهان به ۲ میلیارد برسد و از این‌رو تعداد وسایل نقلیه اسقاط شده نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه سالانه مقدار زیادی لاستیک فرسوده تولید می‌شود [۲].

در حال حاضر در ایالات متحده حدود ۲ میلیارد لاستیک فرسوده وجود دارد که با رشد ۲۰۰ تا ۲۵۰

میلیون لاستیک در سال به رشد خود ادامه می‌دهند که در این میان فقط کمتر از ۱۰ درصد آن بازیافت می‌شود [۳].

دفن زباله یا سوزاندن لاستیک‌ها یک تهدید جدی زیست‌محیطی ایجاد می‌کند و محل دفن زباله برای لاستیک‌ها باید با دقت و به‌شدت کنترل شود زیرا لاستیک‌های فرسوده باعث تولید شیرابه لاستیک می‌شوند و در صورت نفوذ این شیرابه‌ها به آب‌های زیرزمینی خطر بزرگی برای سلامت انسان‌ها و سایر موجودات دربردارد؛ بنابراین، دفع لاستیک فرسوده به یک مشکل جهانی و زیست‌محیطی تبدیل شده است. در این حالت، یافتن راه‌های مفید جدید برای بازیافت ضایعات لاستیک ضروری است [۴].

لاستیک‌های فرسوده به دلیل مقاومت کششی بالا، استحکام خوب، دوام و مقاومت در برابر پیری زیاد و وزن کم آن‌ها توسط رشته مهندسی موردتوجه قرار گرفته است [۵]. به همین جهت محققان ثابت کرده‌اند که لاستیک‌های فرسوده را می‌توان در پروژه‌های مختلف مهندسی عمران مانند تقویت خاک [۶]، جاده‌سازی [۷] و پایبنداری شیب‌ها [۸] استفاده نمود. همچنین لاستیک به‌عنوان یک ماده پایدار، ضمن تقویت خواص خاک، هزینه تقویت را بسیار کاهش می‌دهد [۹]. لاستیک‌های فرسوده به علت ویژگی‌های مناسبی از جمله سختی بالا، هدایت الکتریکی خوب، قابلیت کشش زیاد و ظرفیت جذب انرژی خوبی ک دارند، می‌توانیم به عنوان جایگزین مصالح مصرفی در کارهای ژئوتکنیکی استفاده کنیم و از مشکلات زیست‌محیطی لاستیک‌های فرسوده جلوگیری کنیم. بطوریکه لاستیک‌های فرسوده را به قطعات نواری یا ذرات ریز تبدیل می‌کنند و سپس برای استفاده با خاک مخلوط می‌شوند. به همین جهت در این مطالعه با مدل‌سازی فیزیکی ستون‌های شنی مخلوط شده با درصد‌ها و سائزهای مختلف خرده لاستیک در آزمایشگاه سعی بر یافتن میزان تأثیر خرده لاستیک بر ستون‌های شنی و بهترین درصد اختلاط خرده لاستیک با ستون شنی داریم.

۳-۱- جنبه محیط زیستی استفاده از لاستیک در بهسازی خاک

در حال حاضر استفاده از لاستیک‌های فرسوده طیف گسترده‌ای را در مهندسی عمران در برمی‌گیرد. تقریباً در همه‌ی موارد، لاستیک فرسوده جایگزین برخی از مواد دیگری جهت تقویت پارامترها می‌شود و همچنین استفاده از لاستیک‌های فرسوده در مهندسی عمران باعث کاهش ذخایر لاستیک‌های فرسوده می‌شود که این امر موجب کاهش لاستیک خای فرسوده در محیط‌زیست می‌گردد.

در تحقیقات انجام‌شده بر روی لاستیک‌های فرسوده نشان داده است که انبار لاستیک فرسوده باعث تولید مواد شیمیایی و مضرى مانند منگنز و آهن می‌شود. نتایج آزمایش‌های داوونز در سال ۱۹۹۶ نشان می‌دهد که فلزات در pH پایین شسته می‌شوند، درحالی‌که مواد آلی در pH بالا شسته می‌شوند بنابراین توصیه می‌شود لاستیک‌های زائد حاوی تسمه‌های استیل فقط در محیط‌هایی استفاده شوند که خاک و آب‌های زیرزمینی دارای pH خنثی باشند تا شیرابه‌ها را به حداقل برسانند [۱۰]. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده روی خرده لاستیک بدون تسمه استیل نشان می‌دهد که برای سلامتی انسان و محیط‌زیست خطری ندارد [۱۱].

۴-۱- ضرورت انجام تحقیق

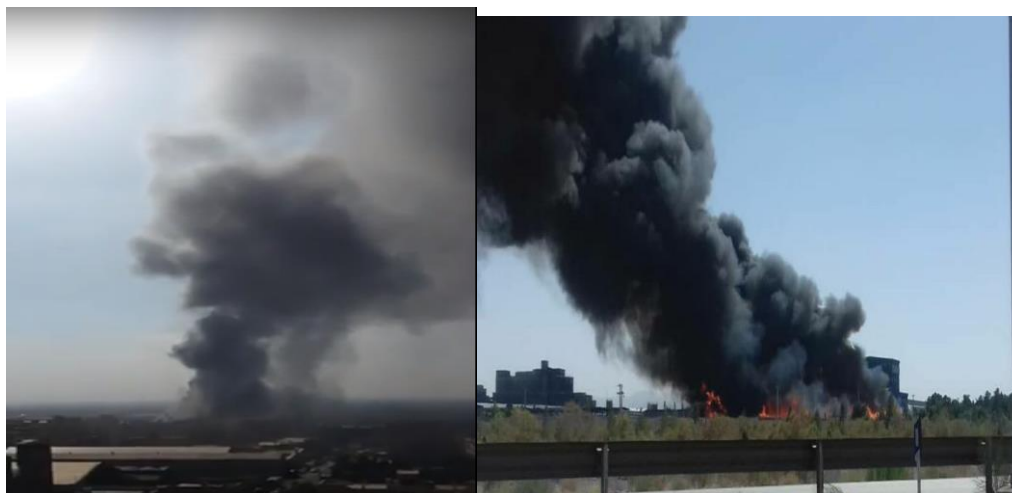
با توجه به افزایش تولید خودرو در کشور، استفاده از اتومبیل افزایش یافته است که یکی از آسیب‌های زیست‌محیطی این موضوع تولید تایلرهای فرسوده‌ای است که برای محیط‌زیست و سلامت عمومی جوامع تهدید جدی بشمار می‌آید. سالانه در جهان حجم زیادی لاستیک فرسوده بر محیط‌زیست تحمیل می‌شود حدود ۵۰۰ میلیون لاستیک فرسوده در سراسر ایالات متحده [۱۲] و ۲۸ میلیون تایلر در سراسر کانادا [۱۳] انباشته‌شده است شکل (۱-۱). انباشتگی تایلرهای فرسوده در گورستان‌های زباله، زباله‌دانی‌های غیرقانونی، زمین‌های خالی، ساختمان‌های متروکه و کناره جاده‌ها چهره ناخوشایند مکان‌های جمع‌آوری و دفن تایلرهای فرسوده همراه با خطرهای بالقوه حاصل از احتراق آن‌ها باعث

اعتراض گروه‌های طرفدار محیط‌زیست نسبت به روش‌های جمع‌آوری و دفن این زباله‌ها شده است. سوزاندن لاستیک باعث ایجاد ترکیبات متعددی از آلاینده‌ها حاصل می‌شود که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به گرم شدن زمین، اکسیدهای گوگرد، اکسیدهای نیتروژن، اکسیدهای کربن، هیدروکربن‌های فرار، دی‌اکسیدها، فوران‌ها، فلزات سنگین و غیره اشاره نمود. این اقدام علاوه بر اثرات مخرب بر محیط زیستی، در کوتاه‌مدت و بلندمدت اثرات حاد بر سلامتی انسان دارند که شدت این اثرات منفی وابسته به زمان قرار گرفتن در معرض آلاینده‌ها و غلظت آن‌ها متفاوت می‌باشد. از مهم‌ترین عوارض می‌توان به تحریکات پوستی، چشمی و تأثیرات سوء تنفسی و غیره اشاره نمود. در گذشته روش دفن لاستیک روشی متداول بوده که استفاده از این روش روزبه‌روز رو به کاهش است، مهم‌ترین خطری که انباشتگی کنترل نشده مقادیر زیاد تایلر ایجاد می‌کند، قابلیت آتش‌گیری آن‌هاست که این تایلرها در هوای آزاد گازی به نام متان از خود متصاعد می‌کنند که پتانسیل بالای آتش‌سوزی دارد که برای محیط‌زیست بسیار زیان‌آور است. خاموش کردن آتشی که در توده‌های انبوه تایلر ایجاد می‌شود اگر غیرممکن نباشد کار آسانی نیست و این امر دودهای سمی تولید می‌کند که می‌تواند آب‌های زیرزمینی محل را آلوده کند [۱۴].



شکل (۱-۱) انباشت لاستیک‌های ضایعاتی در محیط‌زیست [۱۲]

سال ۱۳۸۱ در جاده خاوران تهران حادثه آتش‌سوزی رخ داد که تعداد بی‌شماری تایلر در آتش سوخت و باعث ایجاد دود غلیظ و آلودگی هوا شد و همچنین در شهریور ۱۳۹۹ آخرین آتش‌سوزی انبار لاستیک‌های فرسوده دیو شده در ایران رخ داد که یک واحد بازیافت در شهرستان شهریار در آتش سوخت شکل (۲-۱) [۱۵].



شکل (۲-۱) دود غلیظ آتش‌سوزی شهریار و جاده خاوران [۱۵]

در سال ۲۰۰۳ نشریه soil waste report گزارش داد، سال ۱۹۹۱ در اوهایو نیز چنین حادثه‌ای رخ داد که ۲۶ میلیون حلقه لاستیک فرسوده آتش گرفت. این آتش‌سوزی ۵ روزه طول انجامید و ستونی سیاه از دود که از فاصله ۶۰ مایلی قابل مشاهده بود، ایجاد نمود شکل (۳-۱). در این آتش‌سوزی حدود ۷۵۰ تن خاکی که بر روی آتش ریخته شد، آلوده به روغن و مواد شیمیایی خطرناکی شد که از تایلرهای در حال سوختن تراوش می‌کرد که موجب شد مبلغ گزافی صرف جابجایی و پاک‌سازی آن شود. همچنین از تایلرهای در حال سوختن، روغنی خارج و وارد نهری که در همان نزدیکی بود شد و سبب مرگ هزاران ماهی در رودخانه سانداسکی شد و همچنین باعث بیماری‌هایی نظیر تب زرد و مالاریا شد. به همین جهت از سال ۱۹۹۶ مجلس قانون‌گذاری ایالت اوهایو، به ازای هر تایلری که فروخته می‌شود ۵۰ سنت مالیات تصویب نمود [۱۶].



شکل (۳-۱) آتش‌سوزی مرکز انباشت لاستیک در شهر اوهایو [۱۶]

بر اساس گزارش تحلیل وضعیت صنعت لاستیک خودرو در اسفند سال ۱۳۹۵، جمعیت حدود ۸۰ میلیون نفری ایران در هر سال حدود ۳۰ میلیون حلقه تایر مصرف می‌کنند. از انبار تایرهای فرسوده تنها ۲۵ درصد وزنی آن در صنایع بازیافت لاستیک مورداستفاده قرار می‌گیرد و مابقی آن‌ها در محیط‌زیست انباشت می‌شود. بر اساس همین گزارش، آمار تولید لاستیک داخل کشور در اسفند سال ۱۳۹۵، ۲۷۰ الی ۲۸۰ هزار تن است که نیاز کشور در آن سال ۳۴۰ هزار تن بوده که میزان کسری از طریق واردات جبران می‌گردید [۱۷].

تاکنون تحقیقات متعددی جهت بررسی خرده لاستیک‌ها (به‌تنهایی و همراه با خاک) توسط آزمایش‌های برش مستقیم و سه محوری صورت گرفته است. باوجود اینکه مزیت استفاده از لاستیک اعم از خردشده یا نشده در بهبود خواص خاک به‌طور کلی به اثبات رسیده است اما تحقیقات در زمینه‌های مختلف همچنان ادامه دارد [۱۸-۱۹-۲۰]. یکی از این زمینه‌ها ستون‌های شنی هستند که کمتر همراه با خرده لاستیک و شن موردتحقیق واقع شده که در این مطالعه با ساخت مدل‌های آزمایشگاهی سعی بر یافتن تأثیر خرده لاستیک بر ستون‌های شنی (سنگی) که خود یکی از روش‌های مسلح کننده خاک هستند، شده است.

۱-۵- اهداف تحقیق

با توجه به اینکه سوزاندن و یا دفن لاستیک‌ها دارای آثار مخرب زیست‌محیطی است در میان تمام راه‌های مطرح‌شده برای رهایی از زباله‌های لاستیکی، مهم‌ترین، سالم‌ترین و به‌صرفه‌ترین راه، بازیافت آن‌ها می‌باشد؛ زیرا نه تنها به محیط‌زیست لطمه‌ای وارد نمی‌کند، بلکه از مصرف بسیاری از منابع و سوخت‌های فسیلی جلوگیری می‌کند و باعث صرفه‌جویی در انرژی می‌شود. در این پایان‌نامه حل مشکل زیست‌محیطی لاستیک‌های فرسوده و همچنین افزایش ظرفیت باربری ستون شنی، با استفاده از خرده لاستیک مورد بررسی قرار گرفته است. از این‌رو می‌توان اهداف پژوهش انجام‌شده را به‌صورت زیر بیان نمود:

- ۱- امکان‌سنجی استفاده از خرده لاستیک به‌عنوان مسلح‌کننده، در ستون شنی
- ۲- بررسی میزان تأثیر استفاده از خرده لاستیک بر روی پارامتر چسبندگی خاک
- ۳- بررسی میزان تأثیر استفاده از خرده لاستیک بر روی پارامتر اصطکاک داخلی خاک
- ۴- بررسی میزان تأثیر استفاده از خرده لاستیک بر روی ظرفیت باربری ستون شنی
- ۵- تعیین درصد اختلاط بهینه خرده لاستیک جهت بیشترین تأثیر بر روی عملکرد بهینه ستون شنی

۱-۶- روش انجام تحقیق

در پایان‌نامه فوق روش مطالعاتی به‌صورت آزمایشگاهی و مدل‌سازی فیزیکی بزرگ‌مقیاس می‌باشد. در مرحله نخست آزمایش‌های اولیه به‌منظور شناخت خصوصیات مصالح مورد استفاده صورت گرفت که این آزمایشات اولیه شامل آزمایش تعیین وزن مخصوص حداقل و حداکثر، چگالی دانه‌های جامد و آزمایش دانه‌بندی به‌منظور پی بردن به توزیع اندازه دانه‌ها در نمونه خاک و غیره می‌باشد و در مرحله دوم جهت

یافتن میزان چسبندگی، اصطکاک داخلی و در نهایت مقاومت برشی خاک آزمایش‌هایی توسط دستگاه برش مستقیم جعبه بزرگ آزمایش‌هایی صورت گرفت و در پایان به منظور شبیه‌سازی شرایط بارگذاری و تأمین شرایط مدل‌سازی فیزیکی با مقیاس نیمه واقعی، از یک دستگاه مدل‌سازی فیزیکی بزرگ‌مقیاس که قابلیت بارگذاری‌های استاتیکی، دینامیکی دارد و مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آن‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

۷-۱- فصل‌بندی مطالب

مطالب پایان‌نامه در ۵ فصل طبقه‌بندی شده است. در فصل اول به بیان اهداف و لزوم انجام پژوهش پرداخته می‌شود. در فصل دوم به تحقیقات و مطالعات پیشینی که تاکنون بر روی ستون شنی و خرده لاستیک انجام شده اشاره می‌شود. فصل سوم به بررسی خصوصیات مصالح مصرفی، معرفی دستگاه‌ها و آزمایش‌های انجام شده پرداخته خواهد شد. در فصل چهارم شرح و جزئیات مربوط به نتایج به دست آمده می‌پردازیم و در فصل پنجم نیز نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی جهت مطالعات آتی مورد بحث قرار خواهد گرفت.

فصل ۲:

مروری بر ادبیات فنی

۲-۱- مقدمه

در کمتر پروژه عمرانی است که نگرانی از جنس بستر پروژه عمرانی از جهت دارا بودن ویژگی‌های مکانیکی و شیمیایی لازم، دغدغه‌ای را برای مهندسان ایجاد نکرده باشد. در پروژه‌های کلان ساختمانی، راه‌سازی، سدسازی، تونل و غیره مهندسان به‌ناچار بسترهایی از جنس‌های مختلف (خاکی و سنگی) با مقاومت‌ها و پارامترهای مختلفی روبرو می‌شوند. خاک‌های مختلف خواص مکانیکی، تورم‌زایی، ظرفیت باربری و نشست پذیری مختلفی دارند. بعضاً با توجه به گستره‌ی پروژه‌ها امکان اجرای یک‌لایه غیراقتصادی با ضوابط اجرایی و مالی پروژه همخوانی ندارد، لذا شناخت انواع خاک‌های مشکل‌ساز در پروژه و تثبیت آن‌ها با مصالح مناسب اهمیت فراوانی پیدا می‌کند. روش‌های مختلف جهت بهسازی خاک با توجه به اهمیت پروژه، جنس خاک اولیه، وسعت منطقه موردنظر جهت بهسازی، دسترسی محلی به مصالح، تجهیزات و نیروهای متخصص، مسائل زیست‌محیطی، تجارب مهندسان، مسائل اقتصادی و زمان مجاز برای تکمیل پروژه انتخاب می‌شوند. خاک‌ها می‌بایست با روش مناسب و با توجه به نقاط ضعف آن بهسازی شوند [۲۱]. با توجه به کاربری لاستیک‌های فرسوده در مسلح کردن خاک و بهبود خواص خاک، در فصل پیش رو را با معرفی انواع روش‌های بهسازی ازجمله معرفی ستون شنی و مطالعاتی که توسط محققان رو ستون شنی و لاستیک صورت گرفته است شروع و در ادامه به بررسی میزان تأثیر خرده لاستیک در ستون شنی می‌پردازیم.

۲-۲- روش‌های عمومی بهسازی و تثبیت خاک

به‌منظور انتخاب روش مناسب بهسازی خاک باید یک مقایسه معنادار بین مشخصات فنی پروژه و شرایط اقتصادی پروژه صورت گیرد.

جهت بهسازی و تثبیت خاک با توجه به شرایط پروژه، می‌توان از روش‌های زیر انتخاب نمود [۲۱].

- حفاری و برداشت، جابه‌جایی و جایگزینی
- تراکم سطحی
- تراکم دینامیکی
- تراکم ویبره‌ای در عمق
- انفجار
- پیش فشردگی از طریق پیش بارگذاری
- تزریق
- استفاده از مواد افزودنی
- سیستم‌های حرارتی
- تسلیح خاک (مسلح کردن خاک)

۲-۳- ستون شنی

روش ستون شنی برای بهسازی خاک‌های سست از جمله خاک‌های ماسه‌ای و رسی به‌منظور بهسازی پارامترهای خاک موجود استفاده می‌شود. بهسازی خاک به روش ستون‌های شنی از طریق تسریع در تثبیت خاک ضعیف به دلیل کوتاه شدن مسیر زهکشی و افزایش ظرفیت باربری حاصل می‌شود [۲۲]. امروزه ستون شنی را به چندین روش که در ادامه فصل معرفی خواهد شد اجرا می‌شود ولی به‌طور کلی اساس کار به‌صورت می‌باشد که با حفر چاه‌های با قطر، عمق و فواصل معین و پر نمودن چاه‌ها توسط خاک‌های درشت‌دانه یا مصالح سنگریزه و تراکم نمودن آن‌ها ستون شنی تشکیل می‌شود. با ایجاد این ستون‌ها درصدی از حجم خاک نامرغوب را با ستون‌های شنی جایگزین می‌شود که موجب بهبود خواص خاک موردنظر می‌گردد [۲۳].

۲-۳-۱- کاربرد ستون شنی

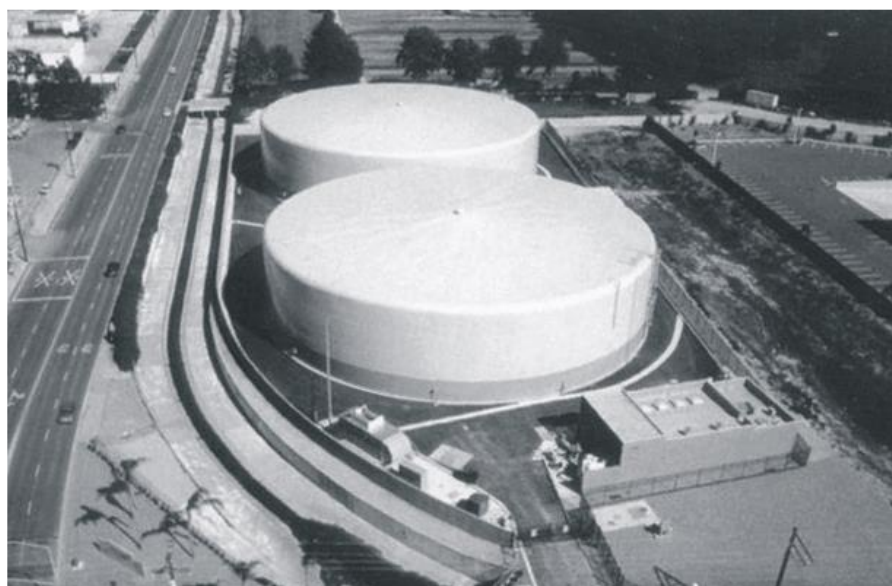
ستون شنی با کاربردهای متنوع در بهسازی خاک به عنوان یک تکنیک موفق جهت حصول اطمینان شرایط زیر شناخته شده است [۲۴]:

- ۱- بهبود پایداری شیروانی‌های طبیعی و یا خاک‌ریزها
- ۲- افزایش سختی خاک
- ۳- افزایش ظرفیت باربری خاک
- ۴- کاهش میزان نشست کل و تفاضلی
- ۵- بهبود شرایط زهکشی به دلیل نفوذپذیری مصالح شنی و همچنین کاهش پتانسیل روانگرایی

۲-۳-۲- تاریخچه ستون‌های شنی (ستون سنگی)

ظاهراً اجرای روش ستون شنی در سال ۱۸۳۰ توسط یک پیمانکار بهسازی خاک فرانسوی بر روی خاک محلی اجرا شده است [۲۳]. ستون شنی از حدود سال‌های ۱۹۳۰ در اروپا که از سال ۱۹۵۰ به طور گسترده‌ای در اروپا مورد استفاده قرار گرفت و ۱۹۷۲ در آمریکا و سایر نقاط جهان جهت اصلاح عمیق خاک‌های دانه‌ای، چسبنده و مخلوط توسط مهندسان مورد استفاده قرار گرفته است. این روش که ماهیتی فیزیکی - مکانیکی دارد، امروزه توسط پیمانکاران متعددی در سرتاسر جهان به خوبی و با موفقیت اجرا می‌گردد. این روش به حدی در عرصه مهندسی ژئوتکنیک جاافتاده که علاوه بر اشاره به آن در بسیاری از مراجع علمی به عنوان یکی از کارآمدترین روش‌های بهسازی خاک می‌باشد و موسسه آژادراه‌های آمریکا (FWHA) نیز آئین‌نامه‌ای را تحت عنوان "طراحی و ساخت ستون‌های شنی" در مورد تئوری، روش‌های طراحی و اجرای این روش در سال ۱۹۸۳ منتشر کرده است [۲۵]. تا پیش از سال ۱۹۸۲ روش ستون شنی در ۲۱ مورد از پروژه‌های بهسازی خاک فعال در آمریکا به طور موفق در زمینه‌های ذیل اجرا شدند:

- ۱- تقویت بستر خاکریزی در پروژه‌های راه‌سازی، اجرای تقاطع‌های غیر هم‌سطح و پل‌ها با استفاده از روش ستون شنی.
 - ۲- بهسازی لایه‌های خاکی محل احداث امکانات جاده‌ای مانند استراحتگاه‌های بین جاده‌ای و یا کانال‌های محل عبور تأسیسات با استفاده از روش ستون شنی.
 - ۳- بهسازی خاک محل احداث کتابخانه ۷ طبقه، داروخانه ۲ طبقه، انبار، تأسیسات کشتی‌سازی، تأسیسات فاضلاب، پارکینگ و ساختمان‌های گوناگون اداری با استفاده از روش ستون شنی.
 - ۴- بهسازی خاک محل احداث منابع ذخیره LNG و یا منابع آب با ظرفیت ۵ میلیون مترمکعب با استفاده از روش ستون شنی.
 - ۵- بهسازی خاک محل احداث اسکله و یا تأسیسات ریلی با استفاده از روش ستون شنی.
- موارد استفاده از روش اجرای ستون شنی در بهسازی خاک، مقاوم‌سازی خاک و یا تحکیم خاک در اروپا نسبت به آمریکا و کانادا بیشتر بوده است. در بیش از ۴۰ مورد از پروژه‌های بهسازی خاک محل اجرای پل‌ها در انگلستان از روش ستون شنی استفاده شده است. در فرانسه روش ستون شنی در مقاوم‌سازی لایه رسی در پروژه پل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت و در اروپا روش ستون شنی بیشتر در بهسازی خاک شالوده سازه‌هایی چون انبار، منابع ذخیره و ساختمان‌ها مورد استفاده قرار گرفت در حالی که در آمریکا این روش عمدتاً در تقویت خاک‌ریزها مورد استفاده قرار می‌گرفت [۲۶]. اشکال (۱-۲)، (۲-۲) و (۳-۲) نمونه استفاده از ستون شنی را نمایش می‌دهد.



شکل (۱-۲) استفاده از ستون شنی در زیر تانکرها [۲۶]



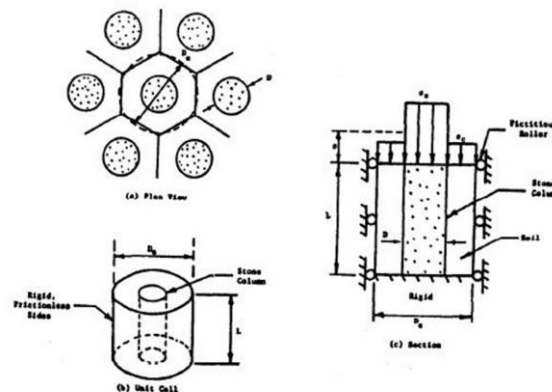
شکل (۲-۲) استفاده از ستون شنی در بزرگراه pacific [۲۶]



شکل (۳-۲) استفاده از ستون شنی در بزرگراه Pacific [۲۶]

۳-۳-۲- تعریف

در سال ۱۹۹۵ پرایپ، مفهوم سلول واحد را تعیین میزان نشست پی قرار گرفته بر روی ستون شنی تعریف نمود که در این تعریف ستون شنی و مساحتی از خاک اطراف آن با توجه به فاصله میان ستون‌های شنی برای تحلیل در نظر گرفته می‌شود. به دلیل تقارن هندسه ستون شنی و بارگذاری تغییر شکل‌های جانبی در مرز سلول برابر صفر می‌باشد زیرا در واقعیت تمام ستون‌های شنی به صورت هم‌زمان بارگذاری می‌شوند. رفتار تمام سلول‌های خاک-ستون به جز مرزهای مساحت بارگذاری شده یکسان می‌باشد، به همین جهت تنها تحلیل یک سلول کفایت می‌کند شکل (۴-۲) [۲۷].



شکل (۲-۴) ستون سنگی و خاک اطراف به عنوان سلول واحد [۲۷]

به دلیل اینکه حجم خاک جایگزین شده با مصالح شنی اثر بسیار مهمی در کاهش نشست و افزایش ظرفیت باربری دارد به همین جهت نسبتی با نام نسبت مساحت جایگزین تعریف شده است [۲۷].

$$as = \frac{A}{A_s}$$

as نسبت مساحت جایگزین شده

A مساحت کل سلول واحد

A_s مساحت ستون شنی

از آنجاکه زمان نشست ستون شنی و خاک اطراف آن بعد از بارگذاری حدوداً یکسان است، به همین جهت بار وارده به نسبت سختی تقسیم می شود. به همین جهت ضریب تمرکز تنش به صورت مقابل تعریف می شود [۲۷].

$$n = \frac{\sigma_s}{\sigma_c}$$

σ_s تنش در ستون سنگی

σ_c تنش در ستون خاک چسبنده اطراف

تنش اعمالی بر روی سلول واحد به صورت زیر تعریف می شود:

$$\sigma = \sigma_s a_s + \sigma_c (1 - a_s)$$

با حل معادله‌ی فوق و استفاده از ضریب تمرکز تنش روابط زیر بدست می‌آید:

$$\sigma_c = \frac{\sigma}{[1+(n-1)a_s]} = \mu_c \sigma$$

$$\sigma_s = \frac{n\sigma}{[1+(n-1)a_s]} = \mu_s \sigma$$

که μ_c و μ_s نسبت تنش به ترتیب در سنگ و رس است

همان‌طور که در فرمول‌های ذکر شده مشاهده می‌گردد ضریب تمرکز تنش برای محاسبه تنش در ستون شنی نیاز می‌باشد که این پارامتر باید توسط نتایج اندازه‌گیری‌های تنش در خاکریزهای مقیاس کامل تخمین زده شود و یا توسط به‌وسیله تئوری الاستیک با در نظر گرفتن جابجایی یکسان ستون شنی و خاک اطرافش مقدار ضریب تمرکز تنش را محاسبه نمود. ضریب تمرکز تنش تابع ضریب پواسون و مدول گسیختگی می‌باشد [۲۷]. در رابطه فوق تمرکز تنش را از ۲۵ تا بالای ۵۰۰ محاسبه می‌کند درحالی‌که در سال ۱۹۸۳ بارکسدل و باچوس [۲۸] ضریب تمرکز تنش را عددی در محدوده ۲ تا ۵ محاسبه نمود در نتیجه محاسبه ضریب μ برای خاک‌های رسی سست توصیه نمی‌گردد.

۲-۳-۴- انواع مدهای خرابی در ستون‌های شنی

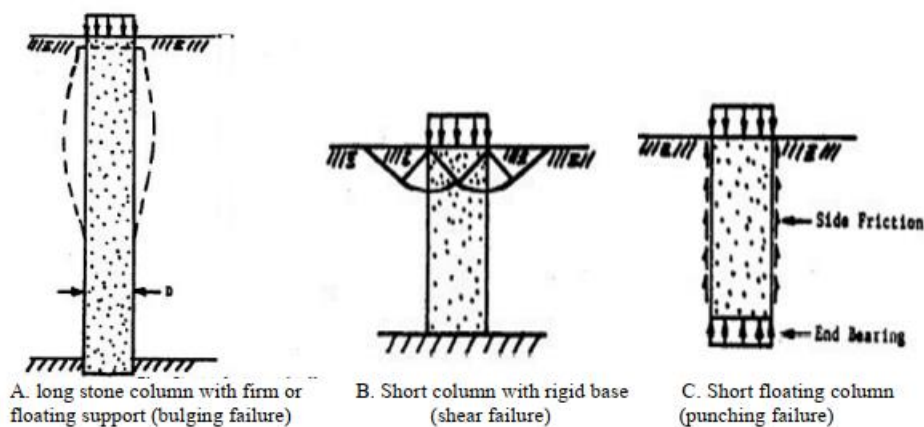
جهت استفاده بهینه از ستون شنی باید انواع حالت‌های خرابی ستون شنی را درک کنیم، به همین جهت در ستون‌های شنی منفرد سه نوع خرابی می‌تواند اتفاق بیافتد [۲۴]:

۱- انبساط جانبی: انبساط جانبی معمولاً برای ستون‌های شنی با طول بیشتر از ۴ الی ۶ برابر قطر ستون شنی و در عمق $D/2$ الی $D/3$ از سطح زمین اتفاق می‌افتد. علت این نوع خرابی در ستون شنی، عدم حمایت نیروی جانبی کافی خاک اطراف از ستون شنی می‌باشد.

۲- گسیختگی کلی: گسیختگی کلی در ستون‌های شنی کوتاهی که طول آن‌ها کمتر از ۲ الی ۳ برابر

قطر است و بر روی بستر محکمی احداث شده، اتفاق می افتد. در این حالت پس بارگذاری می توان تورم را در اطراف ستون مشاهده نمود

۳- لغزش: لغزش در ستون های شنی کوتاهی که طول آن ها کمتر از ۲ الی ۳ برابر قطر است و بر روی خاک نرم احداث شده و بر روی هیچ لایه سختی نباشد پدیده پانچ اتفاق می افتد. شکل (۲-۵) انواع گسیختگی ستون شنی نشان داده شده است [۲۴].



شکل (۲-۵) انواع مدهای خرابی در ستون های شنی [۲۴]

۲-۳-۵- انواع روش های ساخت ستون شنی

بهسازی یک خاک سست با ستون شنی می تواند با روش های متفاوتی همچون حفاری، جایگزینی و تراکم انجام پذیرد.

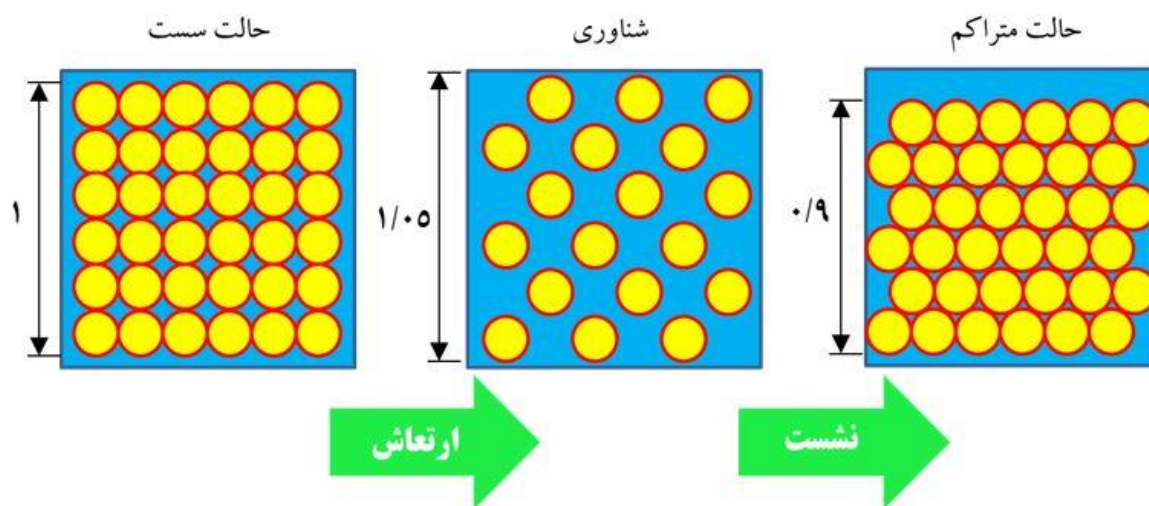
۲-۳-۵-۱- روش ستون های شنی ارتعاشی

این روش ابتدا در سال ۱۹۳۰ به عنوان یک روش اقتصادی جهت متراکم نمودن خاک های دانه ای در اروپا معرفی گردید. در این روش خاک های دانه ای سست تحت اثر ایجاد لرزش به متراکم ترین حالت خود قرار می گیرند. در این روش میله مرتعش شکل (۲-۶) به همراه جت آب به داخل خاک نفوذ

می‌کند، به‌طوری‌که ذرات خاک در اثر مجاورت میله مرتعش کننده از هم جدا شده و تنش مؤثر بین آن‌ها به صفر می‌رسد و در داخل آب به حالت شناور درمی‌آیند که در نتیجه این ذرات به متراکم‌ترین حالت خود قرار می‌گیرند و تراکم به‌دست آمده به دلیل قرارگیری دانه‌ها در کنار یکدیگر بدون اعمال تنش خاصی صورت می‌پذیرد شکل (۷-۲) مفهوم پدیده تراکم در خاک‌های دانه‌ای را نمایش می‌دهد [۲۹].



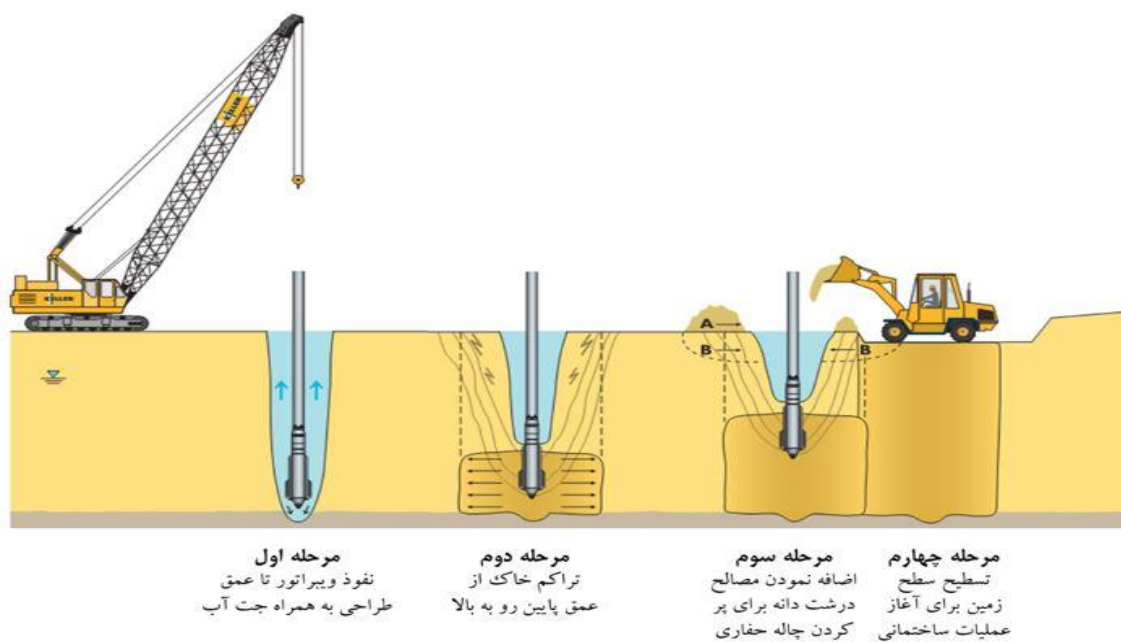
شکل (۶-۲) میله مرتعش یا ویبراتور [۲۹]



شکل (۷-۲) مفهوم پدیده تراکم در خاک‌های دانه‌ای [۲۹]

در شکل (۸-۲) مرحله به مرحله اجرای تراکم ارتعاشی را نمایش می‌دهد که میله مرتعش تحت اثر وزن

خود و جت آب یا هوا به داخل خاک نفوذ می‌کند و بعد از حدود ۲ دقیقه از قرارگیری ویبراتور در پایین‌ترین نقطه، ویبراتور به اندازه ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متر بالا آمده و سپس عملیات تراکم تکرار می‌شود و مصالح دانه‌ای از سطح زمین در داخل گودال ریخته می‌شود. حداکثر عمق اجرایی این روش حدود ۳۰ متر است.



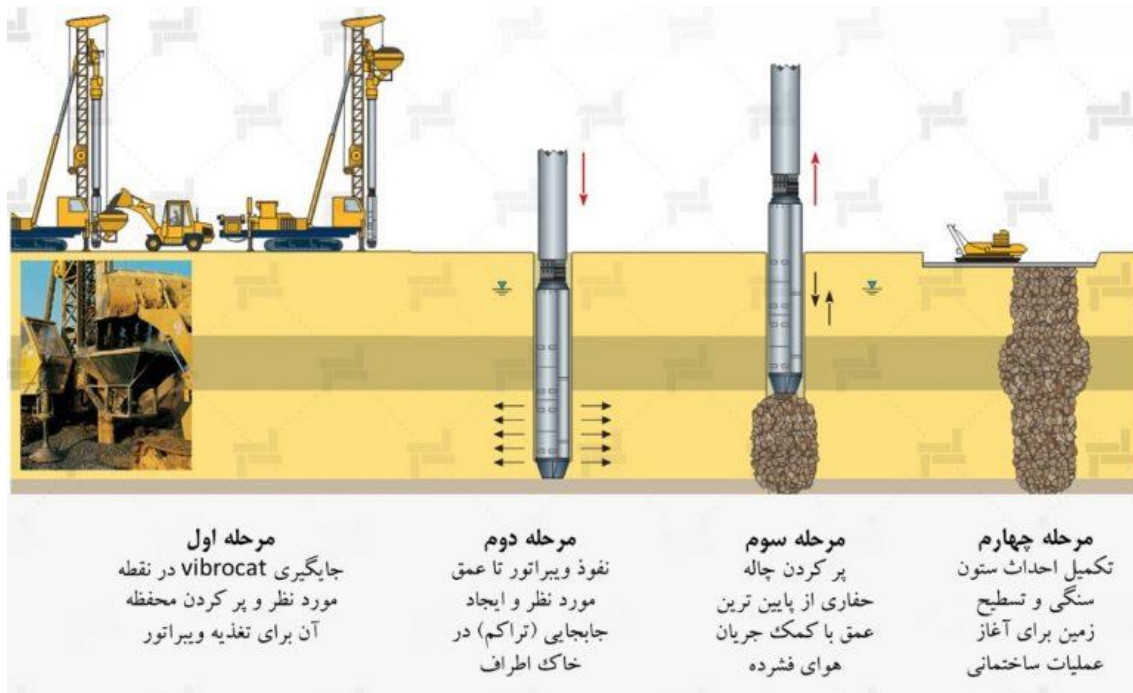
شکل (۲-۸) مراحل اجرای روش تراکم ارتعاشی [۲۹]

۲-۳-۵-۲- روش تراکم ارتعاشی جابجایی یا روش خشک

در روش ارتعاشی جابه‌جایی در خاک‌های رسی غیر حساس انجام می‌شود. این روش در شرایطی استفاده می‌شود که چاله پایدار باقی بماند و خطر نفوذ آب زیرزمینی به داخل آن وجود نداشته باشد. جابجایی خاک اطراف در اثر ایجاد تراکم موجب افزایش مقاومت خاک بین ستون‌های سنگی خواهد شد.

حفاری این روش توسط جتینگ هوا صورت می‌گیرد و چاه تا عمق موردنظر حفاری می‌شود و سپس سنگریزها به دو صورت تغذیه از بالا یا تغذیه از کف ریخته می‌شود و هم‌زمان عمل ویبره زدن انجام

می‌شود شکل (۲-۹)، این کار تا رسیدن سنگریزه‌ها به سطح زمین ادامه می‌یابد [۲۹]. نکته قابل توجه همانند شکل (۲-۹) این می‌باشد که در جاهایی که خاک ضعیف می‌باشد یک برآمدگی از مصالح به علت ایجاد تراکم توسط مصالح ستون شنی ایجاد می‌شود.

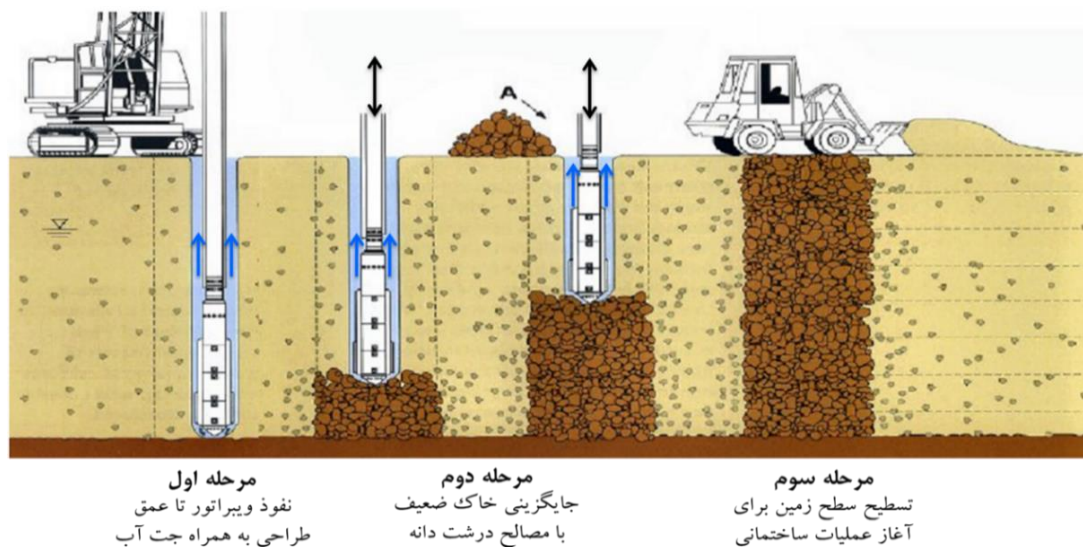


شکل (۲-۹) مراحل ساخت ستون‌های شنی جابه‌جایی - روش خشک تغذیه از پایین [۲۹]

۲-۳-۵-۳- روش تراکم ارتعاشی جایگزینی یا روش تر

روش تراکم ارتعاشی یکی از متداول‌ترین روش‌های اجرای ستون شنی می‌باشد که در خاک‌های رسی عادی تحکیم یافته، سیلت‌های اشباع و خاک‌های آبرفتی استفاده می‌شود. در این روش مصالح دانه‌ای جایگزین توده‌ی خاک ضعیف می‌شود. به دلیل ناپایدار بودن چاه حفاری شده بایستی از سیستم جت آب استفاده شود تا خاک حفاری شده با فشار به بیرون رانده شده و گل ناشی از مصالح ریزدانه، سرتاسر جداره را تحت پوشش قرار داده و پایداری آن را تأمین نماید.

در این روش حفاری توسط جتینگ آب صورت می‌گیرد. یک میله مرتعش، لرزش لازم به خاک می‌دهد و هم‌زمان جریان آب نیز کمک می‌کند که میله مرتعش با وزن خود به داخل خاک نفوذ کند و جدار حفره ایجادشده پایدار بماند. در این روش، آب با فشار از طریق ویبراتور خارج‌شده و موجب روانگرایی موقت در خاک اطراف می‌شود و در هنگام نفوذ، خاک اطراف متراکم می‌شود و دانه‌های سست خاک محل کنده‌شده و با جریان آب به سطح زمین می‌آیند. پس از رسیدن به عمق موردنظر، مصالح مناسب دانه‌ای (شن یا سنگ شکسته) به درون فضای ایجادشده ریخته می‌شود و هم‌زمان میله مرتعش به‌مرور و آرام بالا آورده می‌شود تا مصالح ریخته شده را متراکم و جایگزین کند. همانند شکل (۲-۱۰) پس از بیرون آوردن کاوشگر، خاک محل متراکم شده است و افزایش مقاومت یا کاهش نشست و یا رفع مشکل روانگرایی حاصل می‌گردد. لازم به ذکر است که از ماسه نمی‌توان در ساخت ستون‌ها با استفاده از روش‌تر استفاده کرد زیرا میزان زیاد جریان آب رو به بالا رسیدن ذرات ماسه سبک را به کف گودال مشکل و یا غیرممکن می‌سازد [۲۹].

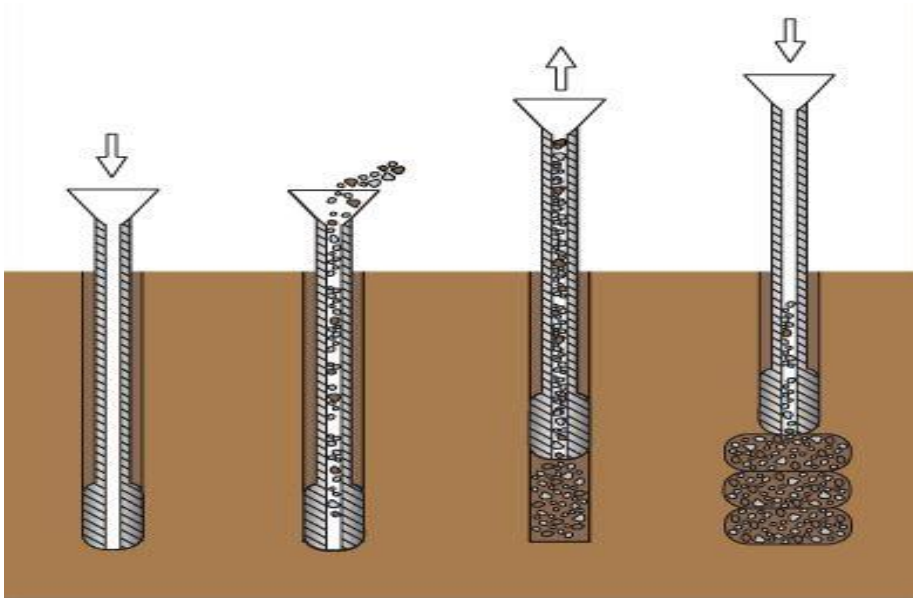


شکل (۲-۱۰) مراحل ساخت ستون‌های شنی جایگزینی - روش مرطوب تغذیه از بالا [۲۹]

۲-۳-۵-۴- روش ستون شنی کوبشی

این روش به‌طور خاص در خاک‌های رسی غیر حساس کاربرد دارد. همانند شکل (۲-۱۱) در این روش

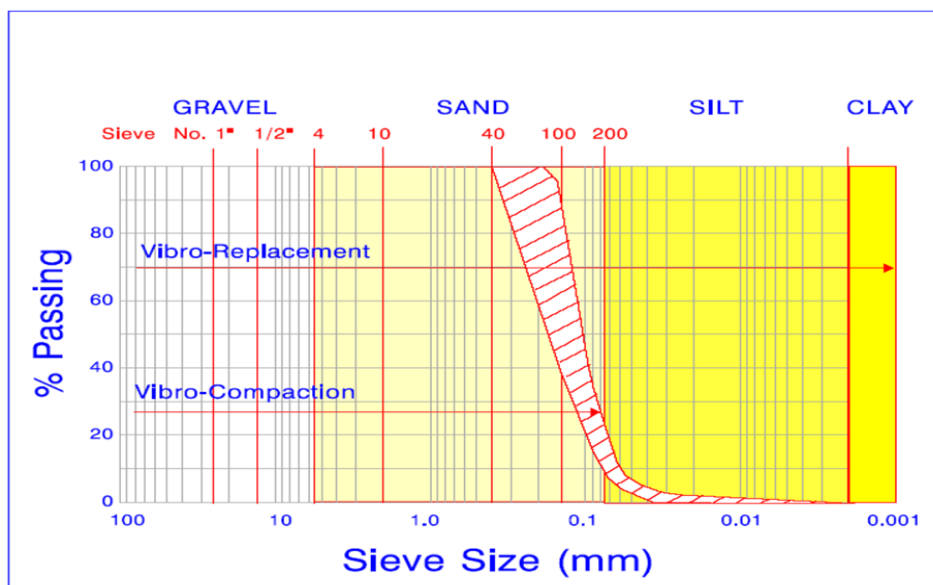
ابتدا چاله حفاری شده و مصالح دانه‌بندی شده درون چاله ریخته می‌شود و سپس توسط چکش ویژه مصالح کوبیده می‌گردد. چکش ویژه می‌تواند به صورت دستی یا از نوع هیدرولیکی باشد که چکش هیدرولیکی می‌تواند انرژی معادل ۱ الی ۲ پوند - فوت در هر مرحله از ضربه وارد کند.



شکل (۲-۱۱) مراحل ساخت ستون‌های سنگی کوبشی [۲۹]

۲-۳-۵-۵- گستره کاربرد روش‌های ساخت ستون شنی

شکل (۲-۱۲) گستره کاربرد مؤثر هر یک از این روش‌ها را بسته به منحنی دانه‌بندی خاک محل نشان می‌دهد:



شکل (۲-۱۲) گستره کاربرد روش‌های تراکم ارتعاشی و جایگزینی ارتعاشی در خاک‌ها [۲۹]

۲-۴- مطالعات پیشین ستون شنی

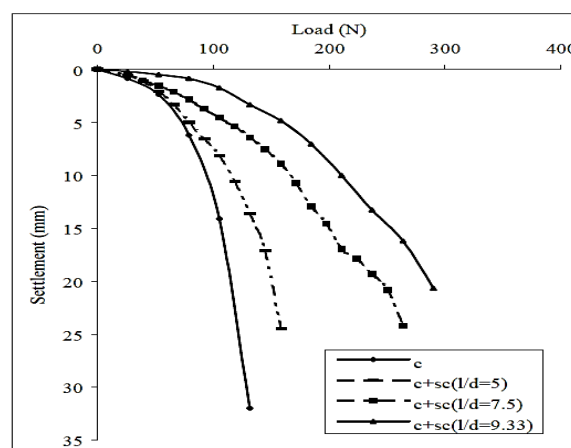
مطالعات بسیاری در طول تاریخ در زمینه‌های مختلف ستون‌های شنی صورت گرفته است که در این قسمت به مواردی از آن‌ها اشاره خواهیم نمود.

باچوس و بارکسدل در سال ۱۹۸۳ بر روی تأثیر مجاورت دو ستون شنی تحقیقاتی انجام دادند. در این تحقیق با انجام آزمایش‌هایی بر روی گروه ستون شنی با چیدمان مربعی 2×3 به نتایجی دست یافتند که ستون شنی مجاور باعث افزایش فشار همه‌جانبه و در نتیجه کاهش انبساط جانبی خواهد شد. ستون‌های شنی به‌طور معمول با نسبت طول به قطر ۴ الی ۶ اجرا و همچنین چه ستون با تکیه‌بر یک‌لایه سخت و چه به‌صورت شناور اجرا شود، معمولاً گسیختگی از نوع انبساط جانبی رخ می‌دهد به همین جهت رابطه‌های موجود برای تعیین ظرفیت باربری ستون شنی عموماً با فرض انبساط جانبی می‌باشند [۳۰].

در سال ۱۹۹۲ و ۱۹۸۳ هان و مونفاخ [۳۱-۳۲] با انجام آزمایشاتی به این نتیجه رسیدند که ستون شنی در خاک‌های سست رسی باعث کاهش نشست می‌شود. هان در سال ۱۹۹۲ به این نتیجه رسیدند

که میزان نشست برای دو ساختمان یکسان، یکی بناشده بر روی خاک مسلح شده به ستون شنی و دیگری بر روی همان خاک بدون ستون شنی در یک زمان یکسان نشست به ترتیب به ۶۶ و ۹۵ درصد رسیده است [۳۱]. مونهاخ در سال ۱۹۸۳ با اندازه‌گیری میزان فشار آب حفره‌ای در زیر یک خاک‌ریز متوجه شد در همان زمانی که محدوده خاک مسلح به ستون شنی ۱۰۰٪ نشست خود را انجام داده است در محدوده دیگر در زیر خاک‌ریز بدون اجرای ستون شنی درجه نشست تنها به ۲۵٪ رسیده است [۳۲].

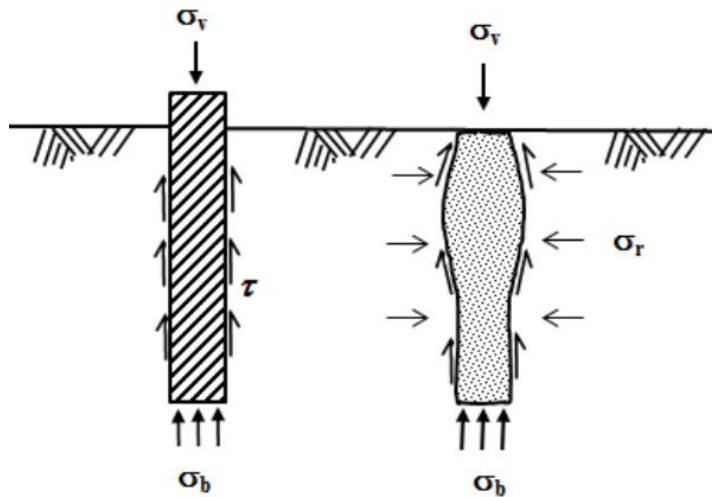
در سال ۲۰۰۴ ملرویزی و ایل‌پاروتی ستون‌های شنی با سه نسبت طول به قطر ۵، ۵/۷ و ۹/۳۳ را مدل‌سازی نمودند و نمودار نیرو - جابه‌جایی شکل (۲-۱۳) به دست آمد. مشاهدات نشان داد که با رخ دادن انبساط جانبی نشست به سرعت افزایش می‌یابد که این بدان معنی می‌باشد که خاک بهبودیافته نسبت به خاک سست رفتار شکننده‌تری دارند. همچنین ظرفیت باربری خاک بهبودیافته با ستون شنی نسبت به خاک عادی به ترتیب نسبت طول به قطرهای بیان‌شده برابر ۱/۷، ۱/۶۶ و ۱/۴۲ شده است [۳۳].



شکل (۲-۱۳) نمودار بار نشست ستون شنی با نسبت طول به قطرهای متفاوت [۳۳]

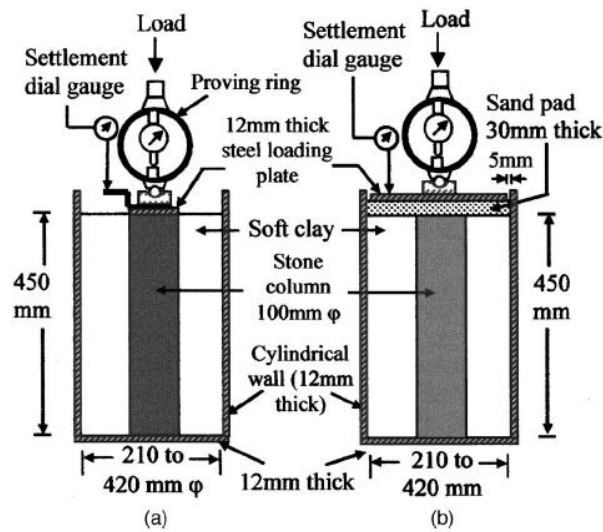
در سال ۲۰۰۷ مک کیب و همکاران به نتایجی دست یافتند که هنگامی ستون شنی تحت فشار و بار قرار می‌گیرد، ستون شنی تنش‌های ایجادشده را به وسیله اطراف و انتهای ستون شنی به خاک انتقال می‌دهد و حالت اصلی گسیختگی ستون شنی زمانی رخ می‌دهد که شکم‌دادگی در ستون سنگی ایجاد

شود شکل (۱۴-۲) [۳۴].



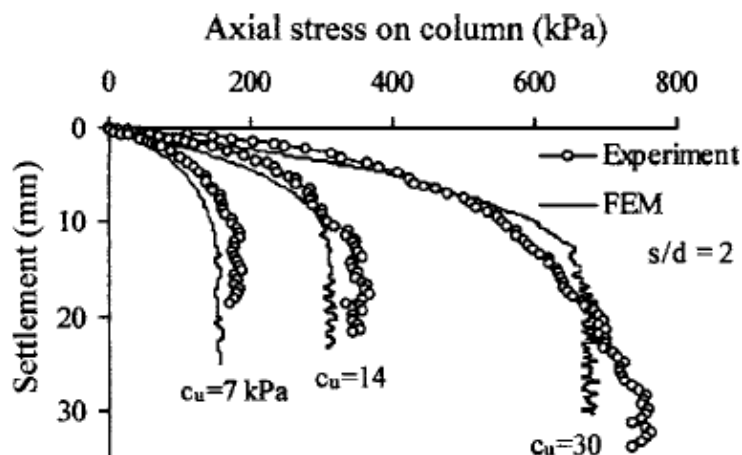
شکل (۱۴-۲) مکانیسم اعمال بار به ستون سنگی [۳۴]

در سال ۲۰۰۷ آمبلی و گاندی با تغییر شرایط بارگذاری، فاصله ستون‌ها و مقاومت برشی خاک سست عملکرد ستون شنی تک و گروه ستون شنی را هم به صورت آزمایشگاهی و هم به کمک روش المان محدود مورد مطالعه قرار داد. وی ستون شنی را در تانک بارگذاری همانند شکل مدل سازی کردند شکل (۱۵-۲). در تمام آزمایش‌ها قطر ستون شنی ۱۰۰ میلی متر و ارتفاع تانک ۵۰۰ میلی متر و قطر تانک از ۲۱۰ تا ۸۳۵ میلی متر برای تعبیه فضای سلول واحد استفاده شده است. نمونه طوری ساخته شده است که نسبت طول به قطر ۴,۵ باشد که این عدد کمترین مقدار برای بسیج شدن تمام مقاومت محوری در ستون شنی است. در آزمایش‌های مربوط به ستون شنی تک بارگذاری تنها بر روی ستون و در آزمایش‌های مربوط به گروه ستون شنی برای تعیین سختی زمین بار به کل سطح اعمال شده است [۳۵].

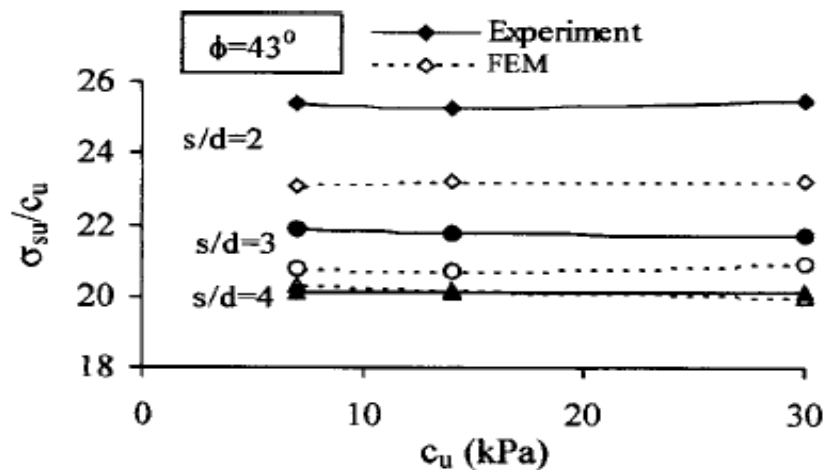


شکل (۲-۱۵) آزمایش بارگذاری ستون شنی (a) ستون در حال بارگذاری (b) کل ناحیه در حال بارگذاری [۳۵]

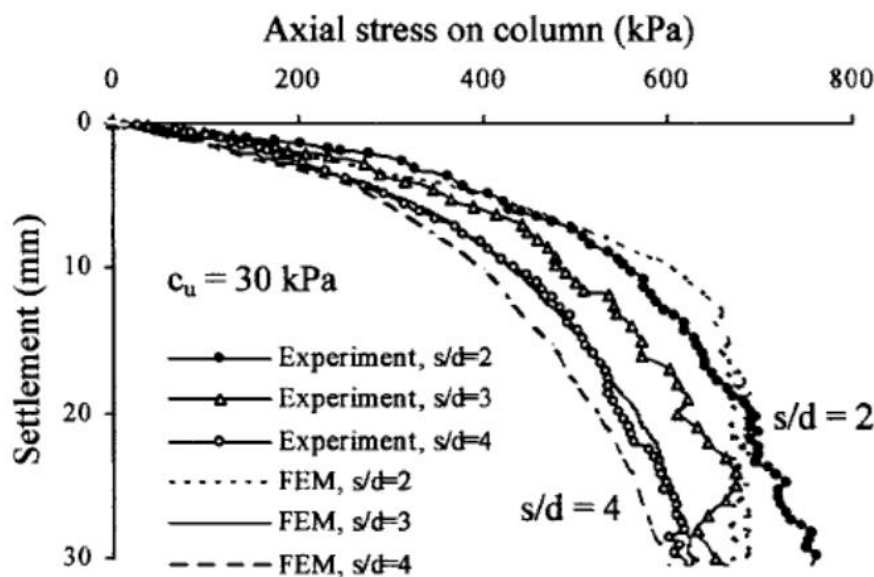
آن‌ها با انجام آزمایش‌ها به این نتیجه رسید که با افزایش فاصله ستون‌های شنی تا نسبت $s/d=3$ ظرفیت ستون کاهش و نشست افزایش می‌یابد. با بیشتر شدن این نسبت تغییرات این دو پارامتر قابل‌اغماض است. همچنین در به نسبت فاصله به قطر ثابت افزایش مقاومت برشی خاک اطراف باعث افزایش ظرفیت باربری ستون شنی می‌شود درحالی‌که نسبت مقاومت برشی خاک به ظرفیت باربری ستون شنی برای یک نسبت فاصله به قطر ستون شنی، ثابت می‌ماند اشکال (۲-۱۶) (۲-۱۷) (۲-۱۸) [۳۵].



شکل (۲-۱۶) تأثیر مقاومت برشی خاک روی ستون شنی [۳۵]



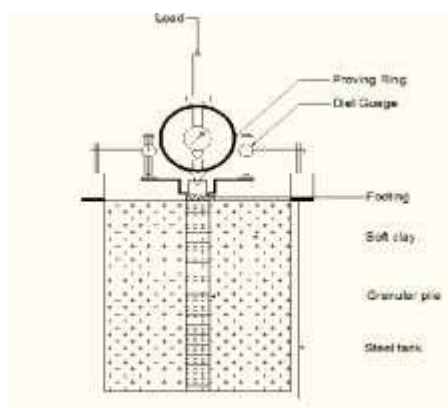
شکل (۱۷-۲) تأثیر مقاومت برشی بر روی نسبت ظرفیت باربری ستون شنی به مقاومت برشی [۳۵]



شکل (۱۸-۲) تأثیر فاصله به قطر روی ستون شنی [۳۵]

در سال ۲۰۱۱ دب و همکاران، بر روی خاک رسی سست و خاک رس بهبودیافته با ستون شنی به همراه ماسه‌ی مسلح شده به ژئوگرید، آزمایش بارگذاری انجام دادند. آن‌ها مشاهده نمودن که خاک بهسازی شده با ستون شنی در مقایسه با خاک مسلح نشده اولیه در یک نشست مساوی، حضور ستون شنی باعث افزایش ۶۹٪ ظرفیت باربری می‌شود. همچنین مشاهده کرده است که انبساط جانبی در ستون شنی در ارتفاع ۱/۲ قطر ستون شنی و مقطعی به عرض ۱/۲۴ قطر ستون شنی رخ می‌دهد [۳۶].

در سال ۲۰۱۳ راکش کومار و همکاران با بررسی نمونه‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه تک‌ستون شنی دریافتند که ستون شنی میزان نشست پی را کم کرده و ظرفیت باربری را تا حدود ۳ برابر افزایش می‌دهد، با استفاده از ژئوگرید ظرفیت باربری حدود $5/4$ تا $8/4$ برابر افزایش می‌یابد شکل (۲-۱۹). در این مقاله نسبت طول به قطر نمونه‌ها ۵، ۶، ۸ در نظر گرفته شده که با زیاد شدن قطر ستون سنگی، ظرفیت باربری ستون افزایش یافته است [۳۷].



شکل (۲-۱۹) دستگاه بارگذاری کومار [۳۷]

در سال ۲۰۱۷ محمد فتاح و همکاران، در این مطالعه، یک معادله عمومی با انجام تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS (بسته آماری برای علوم اجتماعی) از کار تجربی حاضر و مطالعات قبلی به دست آمد. این معادله برای تخمین ظرفیت باربری گروه ستون‌های شنی شناور نصب شده در خاک رس از مقاومت‌های برشی زهکشی نشده بین (۴ تا ۲۵) کیلو پاسکال و با نسبت‌های مختلف و نسبت‌های D/L ایجاد شده با روش مهار شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. این معادله نشان می‌دهد که مهم‌ترین پارامتر در پیش‌بینی ظرفیت باربری ستون‌های شنی، q_u ، مقدار جایگزینی منطقه است که در آن q_u به‌طور قابل توجهی با کاهش فاصله بین ستون‌ها افزایش می‌یابد [۳۸].

در سال ۲۰۱۸ محمود غزوی و همکاران، چند آزمایش آزمایشگاهی بر روی ستون‌های شنی تقویت شده با قطرهای ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌متر و گروه‌های ستون‌های شنی با قطر ۶۰ میلی‌متر انجام شده است جدول (۲-۱). نتایج نشان می‌دهند که ظرفیت تحمل ستون‌های شنی با استفاده از لایه تقویت افقی

افزایش می‌یابد. همچنین، آن‌ها برآمدگی جانبی ستون‌های شنی را از طریق اصطکاک و اثر به هم پیوسته

آن‌ها با سنگدانه‌های ستون شنی کاهش می‌دهند [۳۹]

جدول (۱-۲) اطلاعات به دست آمده از آزمایش‌های محمود غزوی و همکاران [۳۹]

Stiffness of Reinforcement J (kN/m)	Vertical space between reinforcing sheets (S _r)	L.R			R.L.F		
		Stone column diameter (cm)			Stone column diameter (cm)		
		60	80	100	60	80	100
OSC	-	1.36	1.51	1.76	-	-	-
35	D	1.41	1.57	1.82	1.04	1.04	1.03
	0.5D	1.46	1.61	1.88	1.07	1.07	1.07
	0.25D	1.56	1.72	2.09	1.15	1.14	1.19
250	D	1.57	1.76	2.05	1.15	1.17	1.16
	0.5D	1.89	2.09	2.41	1.39	1.38	1.37
	0.25D	2.45	2.69	3.04	1.80	1.78	1.73
1000	D	1.71	2.00	2.39	1.26	1.32	1.36
	0.5D	2.71	3.04	3.53	1.99	2.01	2.01
	0.25D	4.08	4.71	5.55	3.00	3.12	3.15
5000	D	1.80	2.24	2.75	1.32	1.48	1.56
	0.5D	4.09	5.04	5.95	3.01	3.34	3.38
	0.25D	6.29	7.88	9.72	4.63	5.22	5.52

در سال ۲۰۱۹ زو و همکاران، یک سری آزمایش سه محوری بزرگ بر روی ستون‌های شنی با ژئوتکستایل و بدون ژئوتکستایل انجام دادند. در این مطالعه شانزده سری آزمایش با چهار نوع ژئوتکستایل مختلف بر روی چهار نوع ستون شنی با ابعاد ۳۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر تحت فشار جانبی ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که استفاده از ژئوتکستایل‌ها را می‌توان به عنوان یک کمک به چسبندگی ظاهری یا فشار جانبی ستون‌های شنی معمولی در نظر گرفت. رابطه تنش - کرنش ستون‌های شنی مهار شده به عنوان برهم‌نهی یک مدل هایپر بولیک و یک مدل خطی برای مدل‌سازی رفتارهای ستون شنی به کار برده شده توصیف شد [۴۰].

در سال ۱۳۹۰ سید مرتضی مرندی و سید حجت اله موسوی در آنالیز عددی ستون‌های شنی مسلح شده با ژئوگرید نشان دادند که: ظرفیت باربری و سختی ستون شنی مسلح شده به قفسه ژئوگرید، افزایش پیدا کرده است، قفسه ژئوگرید کمانش جانبی ستون را به حداقل رسانده است، عملکرد ستون

شنی با مصالح ریز بهتر از مصالح درشت تر می باشد، افزایش سختی قفسه، نشست را کاهش می دهد و فشار محدود کننده ایجاد شده در ستون شنی را زیاد می کند و مدول الاستیک، نقش بسزایی در افزایش ظرفیت باربری ستون شنی دارد [۴۱].

در سال ۱۳۹۰ فتاحی تحقیقی بر روی تأثیر قطر و روکش ژئوسینتتیک بر روی ظرفیت باربری ستون شنی انجام داده است. در این تحقیق با مدل سازی ستون شنی تک با قطرهای مختلف ۲۰، ۴۰ و ۶۰ در دو حالت بدون ژئوسینتتیک و با ژئوسینتتیک، در بستر رسی سست، در دستگاه سه محوری به این نتیجه رسید که با افزایش قطر نمونه ظرفیت باربری ستون شنی افزایش می یابد بطوریکه سرعت افزایش مقاومت با افزایش نشست کاهش می یابد. همچنین ستون شنی مسلح شده با روکش ژئوسینتتیک نسبت به حالت بدون روکش ژئوسینتتیک با قطر یکسان، نشست کمتر و مقاومت بیشتری از خود نشان داده است. مقدار افزایش مقاومت ستون شنی های مسلح شده به ستون شنی ساده در جدول (۲-۲) قابل رؤیت است [۴۲]:

جدول (۲-۲) اطلاعات به دست آمده از آزمایش های فتاحی [۴۲]

بر اساس ۲۰ میلی متر نشست	بر اساس ۱۰ میلی متر نشست	بر اساس ترسیم در دستگاه لگاریتمی	قطر اسمی نمونه ها (mm)
۵۳/۰۱	۲۶/۰۹	۷۴/۷۰	۲۰
۶۰/۱۰	۸۰/۴۹	۹۶/۷۳	۴۰
۹۳/۲۷	۸۹/۶۶	۱۳۰/۸۳	۶۰

۲-۵- تاریخچه و مطالعات پیشین لاستیک فرسوده

وخرده لاستیک

استفاده از عناصر و اجزای کمکی جهت تقویت و بهسازی خاک های مسئله دار از گذشته مورد توجه بشر بوده است. اواسط دهه ۷۰ میلادی اولین بار از لاستیک های فرسوده و زائد در مهندسی عمران جهت

ساخت موج شکن مصنوعی از استفاده شد. سپس از سال ۱۹۹۲ به بعد از خرده لاستیک فرسوده برای خاکریز راه‌ها و خاکریزهای سبک پشت دیوارها مورد آزمایش قرار گرفتند. تا پایان سال ۱۹۹۵ استفاده از لاستیک در مهندسی عمران تقریباً به میزان مصرف یک میلیون حلقه در سال افزایش یافت. امروز بهره‌برداری از مواد لاستیکی در قالب‌های مختلف مانند خرده لاستیک، به دلیل جنبه‌های اقتصادی و محیط زیستی آن، در مهندسی ژئوتکنیک رایج می‌باشد [۴۳]. استفاده از لاستیک وسیع می‌باشد که مواردی از استفاده لاستیک و خرده لاستیک بیان شده است.

۱- صنایع جاده‌سازی: پوشش سطح جاده‌ها به جای آسفالت، زیرا خرده لاستیک به دلیل خاصیت اکوستیکی دارای عمر بیشتر و هزینه کمتری است و صدای کمی را ایجاد می‌کند و کمتر ترک خورده و در گرما ذوب نمی‌شود و ترمز خودروها بر روی آن عملکرد بهتری دارد. آب‌بندی شکاف سطح جاده‌ها، تولید لایه‌های ضد آب و لایه‌های جاذب صدا، تولید علائم ترافیکی و ضربه‌گیرها که دارای هزینه کمتر و عمر بیشتری است و به دلیل خاصیت ارتجاعی در هنگام تصادفات آسیب‌های کمتری به وسایل نقلیه وارد می‌کند. تولید سرعت‌گیرهای خیابان و پوشش مقاطع جاده‌ها با ریل راه‌آهن.

۲- صنایع ساختمانی: فونداسیون و پایه‌ها، استفاده از تایرهای خردشده در کارهای عمرانی از اهمیت فراوانی برخوردار است. افزودن لاستیک بازیافتی به بتن، باعث بالا بردن مقاومت آن در برابر آتش و جلوگیری از خرد شدن آن می‌شود. در کف‌پوش‌های صنعتی و پوشش گذرگاه‌ها، عمر مفید ۲۰ سال هستند و به دلیل خواص بیومکانیکی و حالت نیمه ارتجاعی خستگی کمتری ایجاد می‌کنند. پوشش بام ساختمان‌ها و عایق ساختمانی، تولید چسب درزگیر، کانال‌های هوا، پوشش سطح زمین بازی بچه‌ها، به منظور افزایش امنیت در هنگام بازی می‌توان کف‌پوش‌ها را با استفاده از خرده‌های تایر تهیه کرد.

۳- صنایع تولید لاستیک و پلاستیک: فوم‌های قابل انعطاف، پوشش استخرها، تخت کفش،

تسمه نوار نقاله

۴- صنایع خودروسازی: تولید تایر، روکش کاری تایر، کفپوش و گلگیر خودروها، نوار دور

درب و شیشه خودروها، انواع واشر، سیستم‌های ترمز اصطکاکی، سپرهای ضربه‌گیر خودرو

۵- صنایع دریایی: ضربه‌گیرهای اسکله و لنگرگاه‌ها، شناور دریایی، کفپوش‌های غیر لغزنده

۶- ورزش: پوشش زمین‌های ورزشی دومیدانی، گلف و تنیس، چمن مصنوعی، میادین

اسب‌دوانی

۷- دامداری، کشاورزی و آبرسانی: شلنگ‌های لاستیکی و سیستم‌های آبرسانی، گلدان‌های

لاستیکی، ظروف تغذیه دام، انواع فنس‌های محوطه سیلوهای حبوبات و غیره.

در سال ۱۹۹۶ مسعد و همکاران به بررسی تأثیر خرده لاستیک با سایز حداکثر ۴/۷۵ میلی‌متر با ماسه آواتا پرداختند که مخلوط این آزمایشات شامل ۵۰ درصد خرده لاستیک و ۵۰ درصد ماسه آواتا تحت تنش همه‌جانبه ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ کیلو پاسکال مورد آزمایش سه محوره CD قرار دادند و نتایج نشان داد که منحنی تنش انحرافی - کرنش در ماسه خالص دارای نقطه اوج مشخصی می‌باشد ولی در منحنی تنش انحرافی - کرنش خرده لاستیک خالص نشان داد که با افزایش کرنش، تنش انحرافی افزایش می‌یابد که این امر بیانگر این است که نمونه خرده لاستیک خالص سخت‌شوندگی کرنشی را از خود بروز داده است. آزمایشات مخلوط این دو نشان داد با افزایش تنش همه‌جانبه، تنش انحرافی افزایش می‌یابد و هرچند نقطه اوج نمونه‌ها نسبت حالت ماسه خالص دارای وضوح‌تر است ولی نقطه اوج مشخصی را نشان می‌دهد. همچنین آن‌ها با انجام آزمایشات نفوذپذیری در مخلوط تحت تنش‌های ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ کیلو پاسکال به این نتیجه رسیدند که ضریب نفوذپذیری مخلوط در تنش‌های همه‌جانبه بالا بیشتر از ماسه می‌باشد ولی در تنش‌های پایین تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای وجود ندارد. در نتیجه مسعد و همکارانش نتیجه گرفتند که می‌توان از مخلوط خرده لاستیک و ماسه آواتا

به عنوان احداث خاکریز جاده‌ها یا خاکریز پشت دیوار حائل بر روی خاک سست استفاده نمود [۴۴]. در سال ۱۹۹۹ لی و همکاران یکسری آزمایش‌های سه محوره روی مخلوط ماسه و خرده لاستیک و همچنین روی خرده لاستیک خالص تحت تنش‌های ۲۸، ۹۷ و ۱۹۳ کیلو پاسکال انجام دادند و نتایج آن‌ها نشان داد رابطه خطی بین تنش انحرافی و کرنش محوری برای خرده لاستیک خالص وجود دارد و همچنین استفاده از خرده لاستیک در مخلوط علاوه بر کاهش وزن، مقاومت برشی آن افزایش پیدا می‌کند. در نتیجه استفاده از مخلوط خرده لاستیک و خاک از جهت پایداری مصالح مناسب است و استفاده مجدد از لاستیک‌های فرسوده در پروژه‌های عمرانی یکی از بهترین روش‌ها از نظر محیط‌زیست می‌باشد [۴۵].

در سال ۲۰۰۴ زورنبرگ و همکاران جهت یافتن نسبت بهینه خرده لاستیک آزمایشات سه محوره بزرگ مقیاس بر روی مخلوط خرده لاستیک و خاک دانه‌ای انجام دادند و نتایج ذیل به دست آمد:

۱- با افزایش خرده لاستیک تا ۳۵ درصد مقاومت برشی نمونه افزایش می‌یابد و درصد بهینه اختلاط را ۳۵ درصد ارائه نمودند.

۲- وجود خرده لاستیک در نمونه‌ها تأثیر قابل توجهی روی کرنش حجمی و رفتار تنش - کرنش دارد بطوریکه در نمونه‌هایی با خرده لاستیک کمتر از ۳۵ درصد دارای رفتار انبساطی و در مابقی نمونه‌های اختلاط دارای رفتار انقباضی می‌باشد [۴۶].

در سال ۲۰۰۵ گاتلند و همکارانش طی انجام ۹ سری آزمایش CD بر روی خرده لاستیک و بررسی اثرات خرده لاستیک بر روی رفتار تنش - کرنش مخلوط‌های گوناگون مطالعه کردند که نتایج آن‌ها به شرح ذیل می‌باشد [۴۷]:

۱- درصد اختلاط خرده لاستیک تأثیر قابل توجهی بر روی مقاومت برشی دارد. همچنین آن‌ها برای رسیدن به مقاومت برشی حداکثر، درصد اختلاط ۳۴ درصد را پیشنهاد کردند.

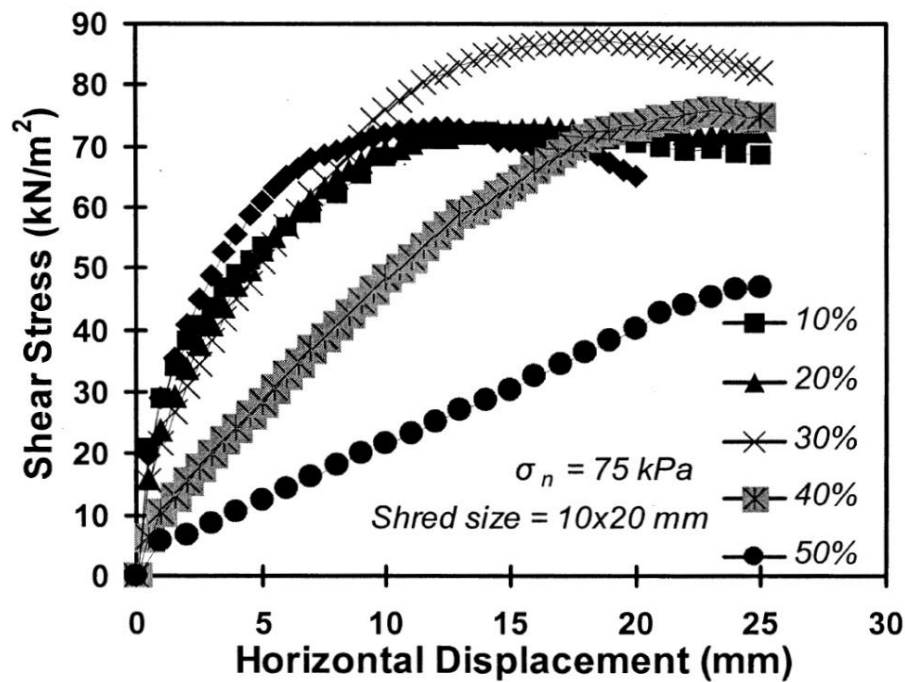
۲- رابطه خطی در نمونه‌های خالص خرده لاستیک بین تنش و کرنش وجود دارد

۳- زاویه اصطکاک داخلی برای ماسه ۴۱ و برای خرده لاستیک ۲۵ به دست آمده است. در سال ۲۰۰۶ راتو و همکاران با انجام آزمایش‌های سه محوری رفتار خرده لاستیک به تنهایی را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از ۵ نمونه‌هایی با ابعاد ۳۸، ۱۹، ۹/۵ و ۲ میلی‌متر بود استفاده نمودند. فشار محدودکننده در آزمایش سه محوری در حدود ۵۵-۳۴/۵ کیلو پاسکال بوده است. نتایج آزمایشات انجام گرفته به شرح ذیل می‌باشد [۴۸]:

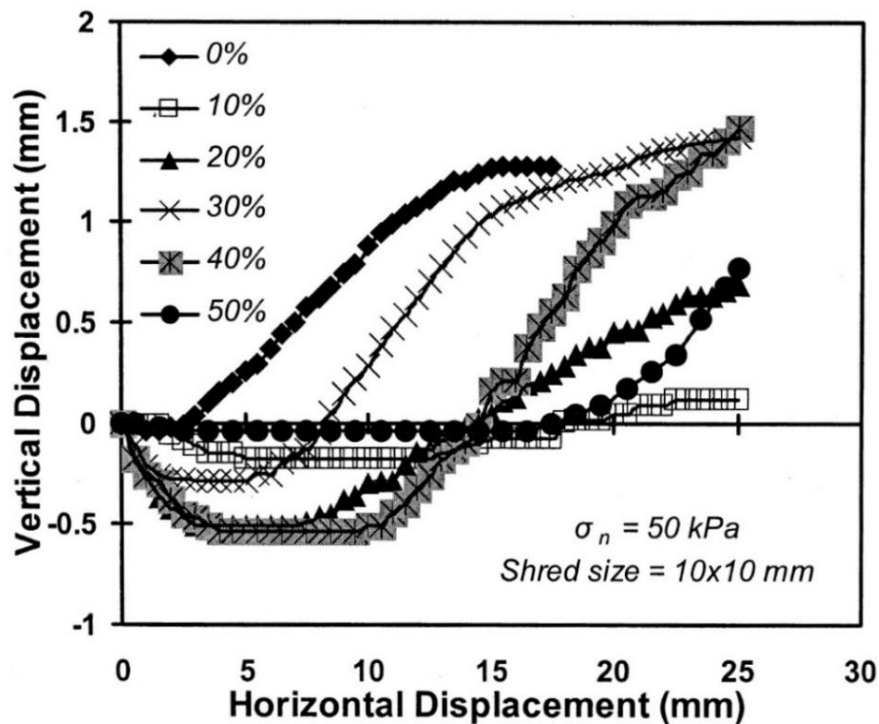
- ۱- زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها در محدوده ۴۰-۶۰ درجه بوده است.
- ۲- در تمامی نمونه‌ها، اتساع قابل ملاحظه‌ای مشاهده شده است.
- ۳- تحت فشار تحکیمی ۵۵ کیلو پاسکال تقریباً ۳۰ درصد کرنش حجمی ایجاد می‌شود.
- ۴- نمونه‌های مسلح به ابعاد ۳۸ میلی‌متر و نیز تراشه‌هایی که به صورت دانه‌ای با ابعاد ۱۹ میلی‌متر و ۹،۵ میلی‌متر بوده‌اند، تحت فشار محدودکننده حدود ۴۰ کیلو پاسکال، چسبندگی مشاهده نشده است و پوش گسیختگی آن‌ها به صورت خطی به دست آمده است.
- ۵- مدول یانگ در محدوده ۸۴۰-۴۲۰ کیلو پاسکال بوده است.
- ۶- پس از حدود ۵ درصد کرنش محوری، میزان مقاومت اصطکاکی به حد نهایی خود می‌رسد. در سال ۲۰۱۰ وینات و سینق با انجام آزمایش‌های برش مستقیم روی ماسه و خرده لاستیک به این نتیجه رسیدند که با افزایش خرده لاستیک به ماسه تا ۳۰ درصد باعث افزایش مقاومت برشی می‌گردد و افزایش خرده لاستیک بیش از ۳۰ درصد منجر به کاهش مقاومت برشی می‌شود و همچنین درصد بهینه اختلاط را ۳۰ درصد عنوان کردند شکل (۲-۲۰) [۴۹].
- همچنین با بررسی پارامترهای ϕ و C ناشی از پوش گسیختگی موهر - کلمب نشان می‌دهد که با افزایش درصد خرده لاستیک به مخلوط میزان چسبندگی افزایش می‌یابد و مقدار ϕ مخلوط خرده لاستیک و ماسه حدود ۲ تا ۶ درجه بیشتر از نمونه ماسه خالص است [۴۹].
- با بررسی تغییرات جابه‌جایی برش در برابر جابه‌جایی افقی به این نتیجه رسیدند که ابتدا حالت انقباضی

پیدا می‌کند و سپس حجم نمونه افزایش پیدا می‌کند. با افزایش تنش قائم مقدار افزایش حجم کاهش

می‌کند شکل (۲۱-۲). [۴۹]

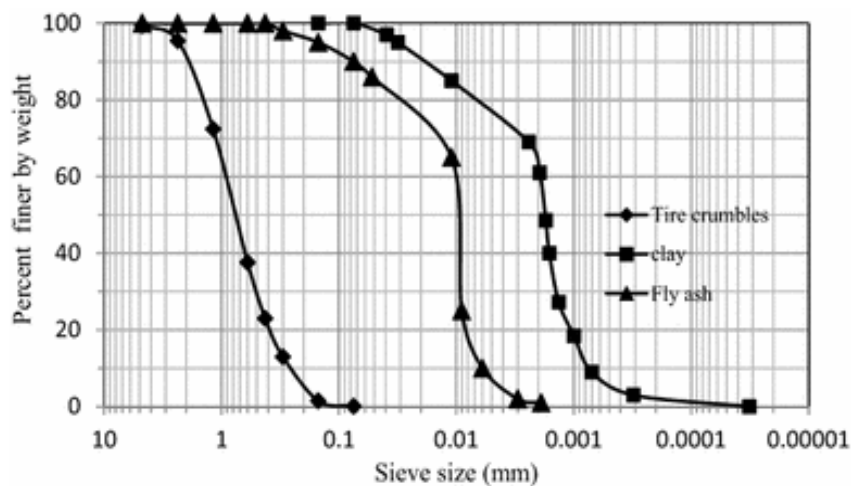


شکل (۲۰-۲) تغییرات تنش برشی با جابه‌جایی افقی در درصد‌های مختلف خرده لاستیک [۴۹]

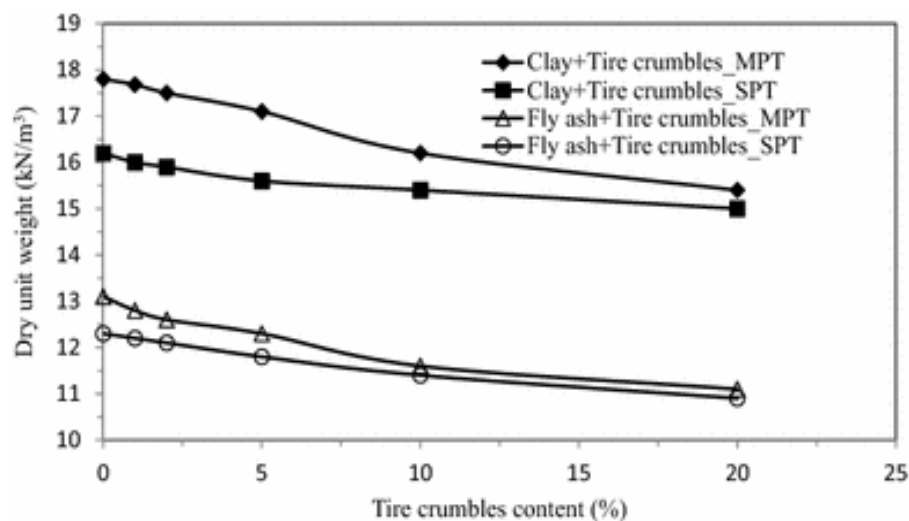


شکل (۲۱-۲) تغییرات جابجایی افقی در برابر جابجایی قائم در مخلوط‌هایی با درصد‌های مختلف خرده لاستیک [۴۹]

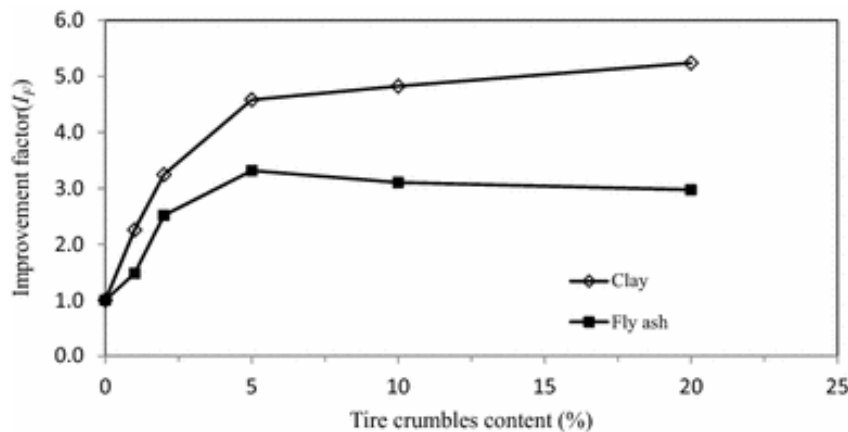
در سال ۲۰۱۵ آکاش پریادرسی با انجام آزمایشات CBR سعی بر یافتن تأثیر درصدهای مختلف خرده لاستیک به عنوان مواد افزودنی بر روی دو ماده خاک رس و خاکستر بادی کردند. نتایج شکل (۲-۲۲) نشان داد افزودن خرده لاستیک باعث کاهش وزن خشک نمونه‌ها گردید و همچنین نتایج شکل (۲-۲۳) نشان داده است که مخلوط خرده لاستیک با خاکستر بادی می‌تواند بار بیشتری نسبت به مخلوط خرده لاستیک با خاک رس حفظ کند، بطوریکه بهبود مقدار CBR با افزودن خرده لاستیک برای خاک رس ۵ برابر و خاکستر بادی ۳ برابر است شکل (۲-۲۴) [۵۰].



شکل (۲-۲۲) دانه‌بندی خرده لاستیک، رس و ماسه‌بادی [۵۰]



شکل (۲-۲۳) تأثیر خرده لاستیک در وزن نمونه‌ها [۵۰]



شکل (۲-۲۴) تأثیر درصدهای اختلاط خرده لاستیک در بهبود ظرفیت رس و ماسه‌بادی [۵۰]

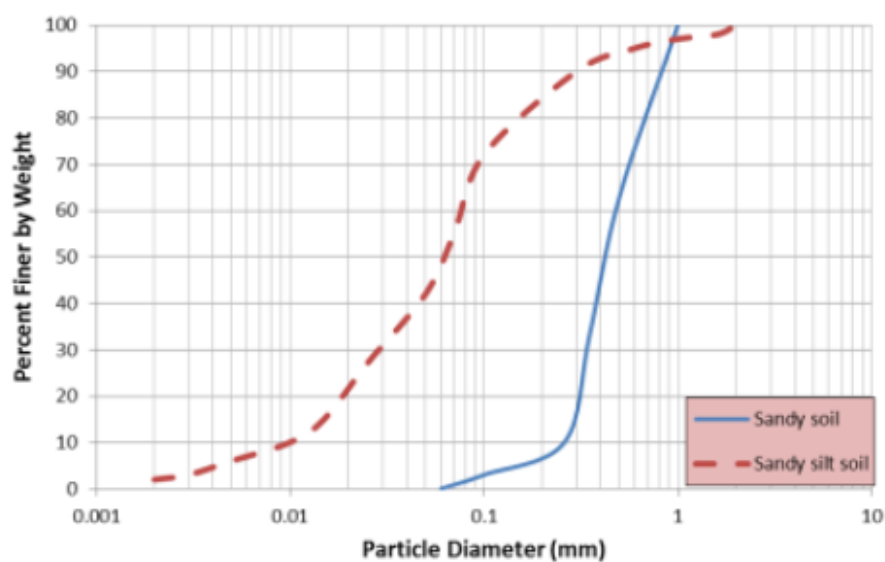
در سال ۲۰۱۷ یاداو و همکاران، تأثیر الیاف‌های لاستیک بازیافتی بر روی برخی از خواص ژئوتکنیکی خاک رس برای ۳ درصد مختلف سیمان (۰٪، ۳٪، ۶٪) و ۵ درصد مختلف لاستیک (۰٪، ۲٫۵٪، ۵٪، ۷٫۵٪، ۱۰٪) مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که مخلوط کردن الیاف لاستیکی، مقاومت فشاری تک‌محوره و استحکام کششی را در خاک رس تثبیت‌شده با سیمان کاهش می‌دهد و مقاومت در برابر نفوذ رس تثبیت‌شده با سیمان، با افزایش الیاف لاستیکی کاهش می‌یابد و با افزایش میزان سیمان و الیاف لاستیک فشار تورمی خاک رس کاهش می‌یابد [۵۱].

در سال ۲۰۱۷ تاجدینی و همکاران، پارامترهای مقاومت برشی خاک رس کائولینیت تقویت‌شده با ۲ سایز و درصدهای وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ خرده لاستیک را تحت تنش‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال مورد ارزیابی قرار دادند. آزمایش‌های سه محوری زهکشی شده و زهکشی نشده بر روی خاک تقویت‌شده با لاستیک انجام شد و نتایج نشان دادند که افزودن خرده لاستیک باعث بهبود پارامترهای مقاومت برشی مانند چسبندگی، زاویه اصطکاک، سختی و شکل‌پذیری خاک مسلح می‌شود [۵۲].

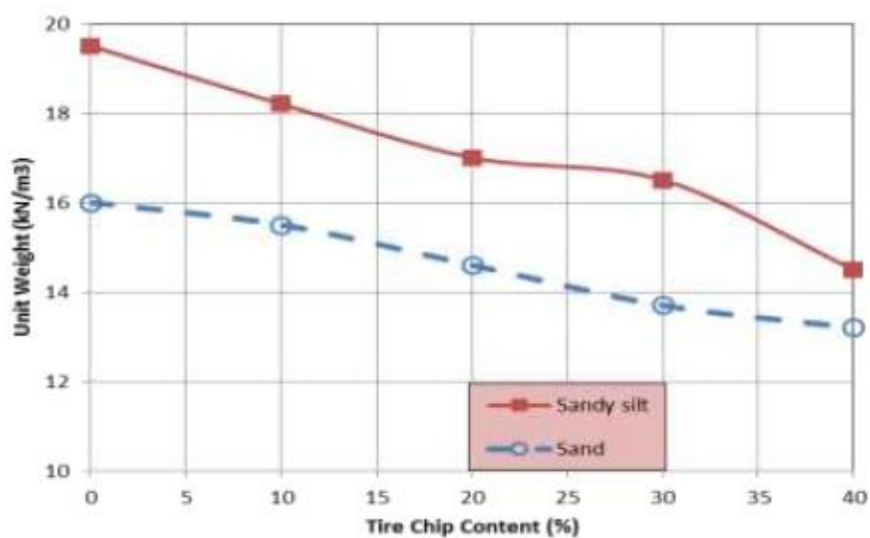
در سال ۲۰۱۸ خالد احمد داود یک مطالعه تجربی برای بررسی تأثیر استفاده از لاستیک فرسوده بر ویژگی برشی، تغییر شکل‌پذیری و قابلیت انعطاف‌پذیری انجام شد؛ که مشخصات مصالح استفاده‌شده در شکل‌های (۲-۲۵) و (۲-۲۶) ارائه شده است. با انجام آزمایشات و ارائه نتایج در شکل (۲-۲۷) به این نتیجه رسید که وزن نمونه‌ها با افزودن خرده لاستیک کاهش می‌یابد [۵۳].

Property	Sandy soil	Sandy silt soil
Specific gravity	2.68	2.71
Minimum dry density (kN/m^3)	14.5	
Maximum dry density (kN/m^3)	16	17.5
Uniformity coefficient, C_u	1.96	
Curvature coefficient, C_c	0.84	
Liquid limit		18
Plastic limit		15
Plasticity index		3
Optimum water content %		13

شکل (۲-۲۵) خصوصیات مصالح [۵۳]

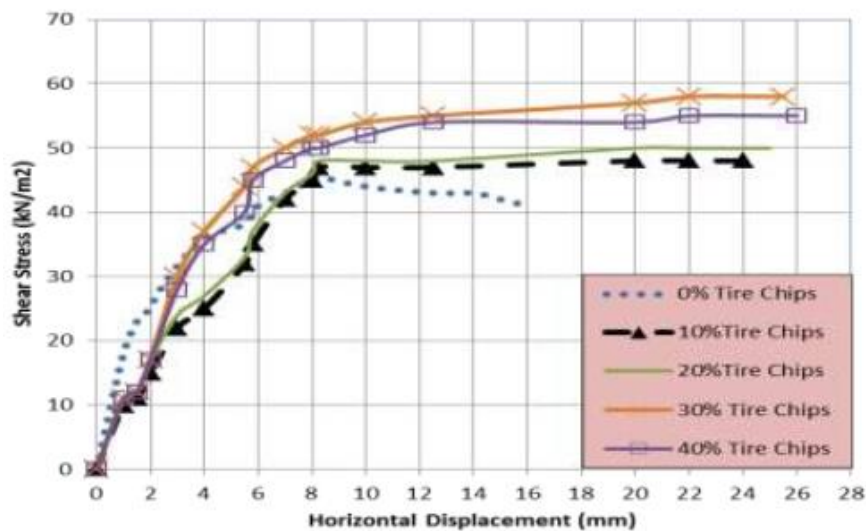


شکل (۲-۲۶) دانه‌بندی مصالح [۵۳]



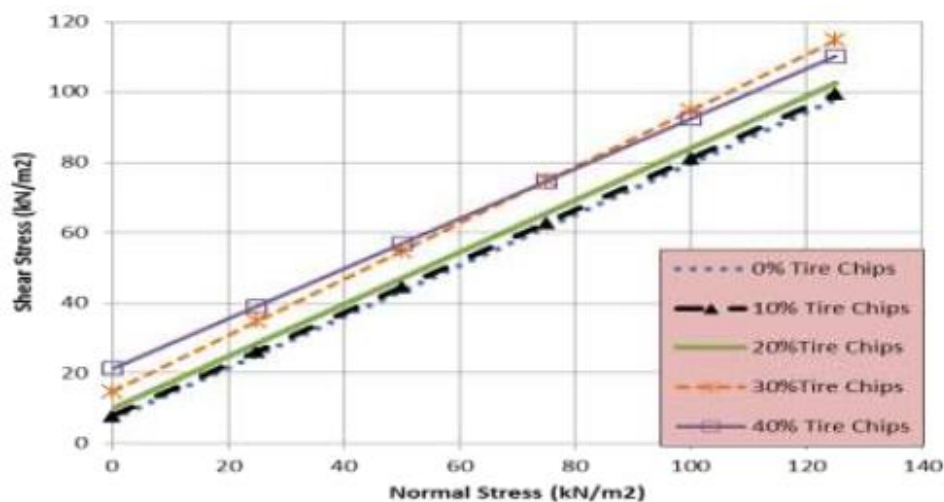
شکل (۲-۲۷) اثر خرده لاستیک در وزن نمونه‌ها [۵۳]

تنشی برابر ۵۰ کیلو پاسکال به مخلوط خرده لاستیک سایز ۳,۵ میلی‌متر با ماسه اعمال شد شکل (۲-۲۸). منحنی تنش برشی و جابه‌جایی را نشان می‌دهد در جابه‌جایی‌های زیاد، ماسه مخلوط شده با ۳۰ درصد خرده لاستیک مقاومت بیشتری نسبت به سایر اختلاط‌ها را دارا می‌باشد [۵۳].

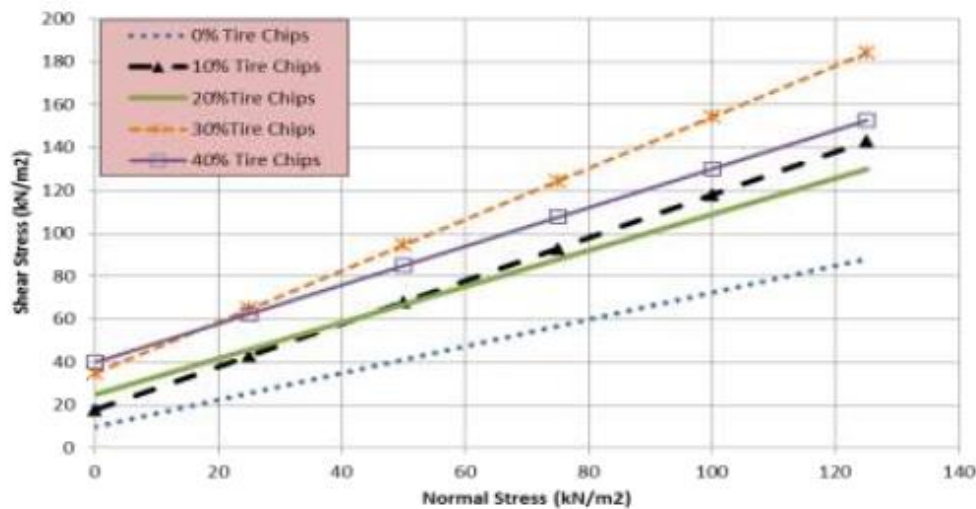


شکل (۲-۲۸) منحنی جابه‌جایی افقی - تنش برشی [۵۳]

در شکل‌های (۲-۲۹) و (۲-۳۰) نمودار تنش برشی به تنش نرمال برای ماسه و ماسه سیلیت دار را نمایش می‌دهد که نمونه ۳۰ درصد خرده لاستیک بهینه‌ترین اختلاط می‌باشد [۵۳].



شکل (۲-۲۹) منحنی تنش نرمال - تنش برشی [۵۰]



شکل (۳۰-۲) منحنی تنش نرمال - تنش برشی [۵۳]

در سال ۲۰۲۰ ژونگنیان یانگ و همکاران در یک مقاله مروری سعی بر یافتن اثر خرده لاستیک بر بهسازی خاک پرداخته است. او با بیان اینکه محققان زیادی با استفاده از آزمون سه محوری، آزمون نسبت بار کالیفرنیا، آزمون برش مستقیم، آزمون تحکیم و غیره عملکرد خاک را با مخلوط خرده لاستیک بررسی نموده‌اند که نتایج اصلی تحقیق به شرح زیر است [۵۴]:

۱- ظرفیت باربری و مقاومت برشی خاک تقویت شده با خرده لاستیک در درجات مختلف بهبود یافته است. برای شن و ماسه، افزودن لاستیک با خاصیت ارتجاعی خوب می‌تواند دررفتگی بین ذرات شن و ماسه را مهار کند، انسجام خاصی به دست آورد و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی شن را به‌طور مؤثری بهبود بخشد.

۲- خرده لاستیک می‌تواند به‌طور مؤثری ویژگی‌های تغییر شکل خاک منسجم را بهبود بخشد. برای خاک لاستیکی منبسط شده، لاستیک می‌تواند ذرات خاک را احاطه کرده و ویژگی‌های انبساط و انقباض خاک را کاهش دهد. وقتی ذرات خرده لاستیک با اندازه ذرات مشابه به خاک اضافه می‌شوند، یک ساختار شبکه به هم پیوسته برای افزایش انسجام ایجاد می‌شود.

۳- درصد بهینه خرده لاستیک به عوامل مهمی چون نوع خاک و مشخصات مصالح گوناگون می‌باشد.

۴- خاک تقویت شده با لاستیک راهی جدید برای بازیابی و استفاده مجدد از لاستیک های زائد فراهم می کند. تراکم لاستیک کم است و می توان از آن به عنوان پرکننده سبک استفاده کرد تا پس از مخلوط شدن با خاک های مختلف، میزان نشست را کاهش دهد. همچنین، لاستیک دارای قابلیت کشش زیاد و ظرفیت جذب انرژی خوبی است که می تواند در بالشتک ایزوله، آستر دفن زباله، تکیه گاه خاک ریز و سایر پروژه ها مورد استفاده قرار گیرد.

۵- خاک تقویت شده با خرده لاستیک، به عنوان نوع جدیدی از مصالح ژئوتکنیکی، فاقد استاندارد عمومی پذیرفته شده است.

در سال ۱۳۹۲ ملک خانی نیز به منظور بررسی رفتار مخلوط خرده لاستیک (ابعاد ۱ تا ۵ میلی متر) و ماسه آزمایشات سه محوری CD با تراکم نسبی ۵۰٪ بر روی مخلوط های حاوی ۰، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درصد حجمی خرده لاستیک، تحت ۵ تنش همه جانبه ی ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ کیلو پاسکال انجام داد. در این آزمایش ها دانه بندی ماسه و پودر لاستیک نزدیک به هم بودند. آزمایش وزن مخصوص نشان داد که در یک تنش تحکیمی ثابت با افزایش درصد لاستیک مقدار تغییر حجم پس از تحکیم افزایش می یابد. همچنین وزن مخصوص حداقل و حداکثر با افزودن پودر لاستیک تحت تأثیر قرار گرفته و مقدار آن ها کاهش می یابد و در تمامی نمونه های دارای خرده لاستیک مشاهده کردند با افزایش کرنش محوری تنش انحرافی افزایش یافته تا به مقدار حداکثر خود در انتهای آزمایش برسد. اصطکاک داخلی برای مخلوط ۱۵ درصد بیشترین مقدار را دارا است و بیش از آن کاهش اصطکاک را خواهیم داشت. همچنین تا مقدار ۲۰٪ افزودن لاستیک مقاومت برشی ماسه را افزایش داده که این مقدار را می توان به عنوان درصد بهینه افزودن پودر لاستیک در نظر گرفت. همچنین مقداری چسبندگی بعد از افزودن لاستیک مشاهده نمود که آن را چسبندگی ظاهری توصیف کرد و روند خاصی برای آن متصور نشد [۵۵].

۲-۶- مطالعات پیشین ستون شنی با خرده لاستیک

در دهه اخیر، استفاده از خرده لاستیک و لاستیک فرسوده در ستون شنی به عنوان افزودنی و جایگزینی مصالح ستون شنی، به منظور کاهش مشکلات زیست محیطی ناشی از جمع آوری و نگهداری لاستیک های فرسوده و همچنین بهبود پارامترهای خاک بستر، توجه تعداد بسیاری از محققان را به خود جلب نموده و در این بخش به بررسی چندی از مطالعات می پردازیم.

در سال ۲۰۱۵ آیوسیرامان و سومیا دامنه استفاده از خرده های لاستیک به عنوان دانه های تشکیل دهنده ستون های شنی مورد بررسی قرار دادند. آزمایشات با استفاده از خرده های لاستیک به ابعاد ۱۰ میلی متر و سنگ دانه شنی که از الک استاندارد هند (۱۲/۵ میلی متر) عبور می کند و روی الک ۱۰ میلی متری IS نگهداری می شد، انجام پذیرفت. پانزده آزمایش بر روی ستون های شنی ساخته شده از نسبت های مختلف مخلوط سنگ دانه (S) و خرده های لاستیک (T)، در یک خاک رس کائولینیتی انجام شد. نتایج مطالعه آنها نشان داد که مخلوط های 60%T+40%S و 40%T+60%S در ستون های شنی ظرفیت باربری مشابه ستون شنی که فقط با استفاده از سنگ دانه (100%S) ساخته شده است، ایجاد می کنند. این به وضوح نشان می دهد که خرده های لاستیک می توانند به عنوان جایگزینی سنگ دانه ها تا حدود ۴۰-۶۰ درصد در ساخت ستون های شنی استفاده شوند [۵۶].

در سال ۲۰۱۸ شریعتمداری و همکاران، تأثیر لاستیک های فرسوده خرد شده با اندازه های کوچک، متوسط و بزرگ با ابعاد ارائه شده در جدول (۲-۳) به عنوان مواد جایگزین بر روی ستون های شنی را به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند شکل (۲-۳۱). در این مطالعه سیزده سری آزمایش برش مستقیم جعبه بزرگ و ادمتر در نسبت های متفاوت حجمی از سنگریزه و خرده لاستیک مطابق جدول (۲-۴) بررسی شده است [۵۷].

جدول (۳-۲) مشخصات خرده لاستیک [۵۷]

Tire group	Size	Shape	Aspect Ratio
Fine	2-4.75 mm	Granular	2
Medium	4.75-9.5 mm	Planar	2
Larg	9.5-19 mm	Cubic	2

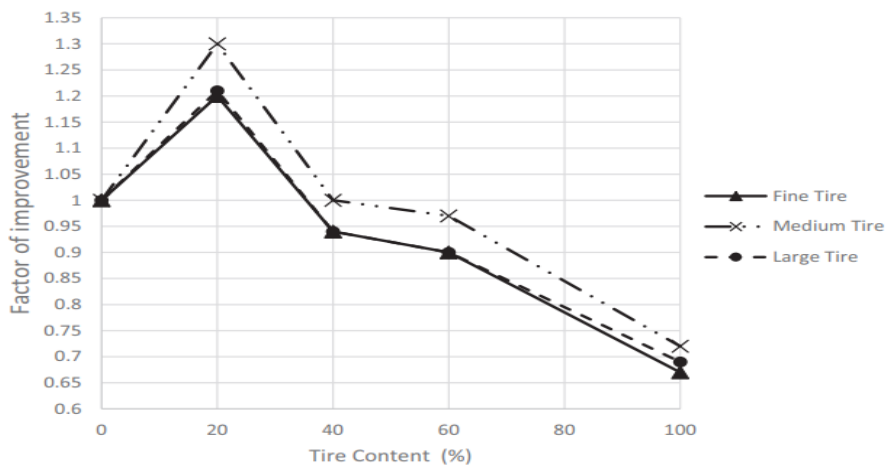


شکل (۳-۱) مدل سازی ستون شنی و خاک اطراف در جعبه دستگاه اودومتر [۵۷]

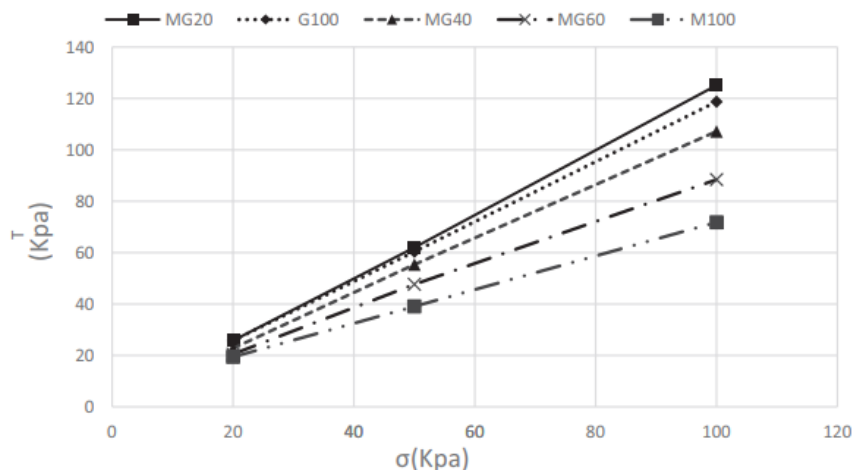
جدول (۴-۲) اطلاعات نمونه های ساخته شده توسط شریعتمداری و همکاران [۵۷]

Symbol	Size of the tire	Tire content (%)	Gravel content (%)
G00	–	0	100
F100	Fine	100	0
FG20	Fine	20	80
FG40	Fine	40	60
FG60	Fine	60	40
M100	Medium	100	0
MG20	Medium	20	80
MG40	Medium	40	60
MG60	Medium	60	40
L100	Large	100	0
LG20	Large	20	80
LG40	Large	40	60
LG60	Large	60	40

نتایج حاصل از شکل (۳۲-۲) نشان می‌دهد هنگامی که ستون شنی شامل ۲۰ درصد خرده لاستیک بوده ظرفیت باربری افزایش می‌یابد درحالی که برای نسبت‌های اختلاط بیشتر از ۲۰ درصد ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. علاوه بر این استفاده از ۲۰ درصد حجمی خرده لاستیک ظرفیت باربری را ۱۵ الی ۳۰ درصد افزایش می‌دهد بدون اینکه تغییر قابل توجهی در نفوذپذیری مشاهده شود. همچنین اصطکاک داخلی ماسه غیر مسلح ۴۹/۴ است و بالاترین زاویه اصطکاک با استفاده از ۲۰ درصد خرده لاستیک ساینده متوسط به شکل مسطح به دست می‌آید که برابر با ۵۲ است شکل (۳۳-۲). آن‌ها گزارش دادند که خرده لاستیک متوسط بهترین عملکرد را نسبت به حالت‌های دیگر دارد و از لحاظ زیست‌محیطی و اقتصادی بهترین حالت برای افزایش ظرفیت باربری ستون شنی است [۵۷].



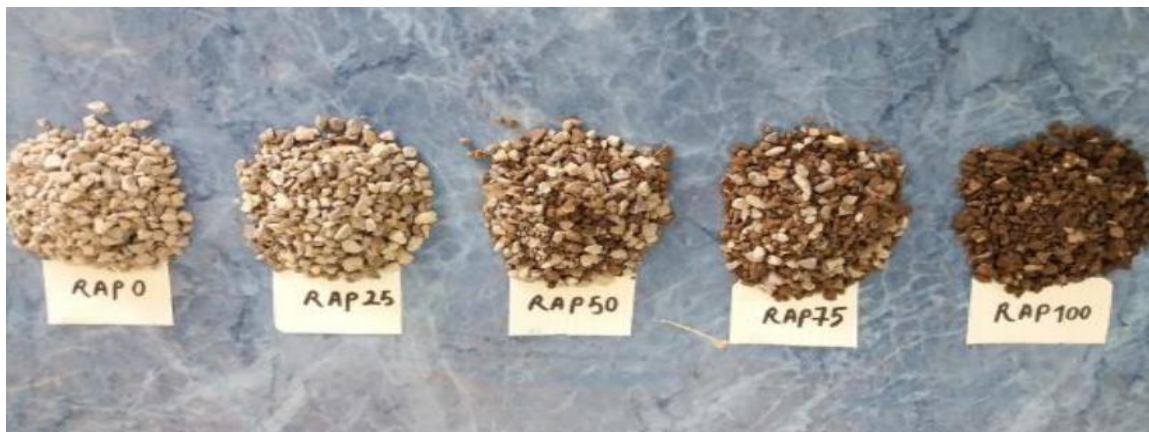
شکل (۳۲-۲) تأثیر بهبود درصدهای مختلف خرده لاستیک در ستون شنی [۵۷]



شکل (۲-۳۳) پوش گسیختگی برای خرده لاستیک سایز متوسط با شن [۵۷]

در سال ۲۰۱۸ موزامدر و همکاران ستون شنی معمولی و ستون شنی مخلوط شده با خرده لاستیک را با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و نسبت طول به قطر ۴/۵ مدل‌سازی نمودند. در این مطالعه از خرده لاستیک با اندازه ۱۰ و ضخامت ۲ تا ۳ میلی‌متر استفاده شد و آزمایشات برش مستقیم جعبه بزرگ برای نسبت‌های مختلف خرده لاستیک و خاک انجام شد تا خواص مقاومت برشی آن ارزیابی شود. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که و ستون‌های شنی ساخته‌شده از نسبت‌های مختلف مخلوط سنگ‌دانه‌ها و خرده لاستیک، ظرفیت حمل بار بیشتری نسبت به بستر سفالی اصلی دارند. همچنین نتایج نشان داد جایگزین کردن بیش از ۴۰ درصد از سنگ‌دانه‌های ستون شنی با خرده لاستیک و محصور کردن آن با ژئوگرید، باعث افزایش ظرفیت باربری به بیش از ۱۰۰ درصد گردید [۵۸].

در سال ۲۰۲۰ حورا بیکدلی و همکاران با استفاده از تراشه‌های آسفالت به‌عنوان جایگزینی برای مصالح دانه‌ای طبیعی و لاستیک‌های فرسوده، ستون شنی را در خاک رس مدل‌سازی نمودند. در این مدل‌سازی آزمایشگاهی، ستون شنی توسط تایلرهای فرسوده از طریق از طریق قرار دادن این تایلرها بر روی یکدیگر و پر کردن فضای مرکزی آن‌ها با مصالح دانه‌ای در نظر گرفته‌شده و ترانسه‌های آسفالت با دانه‌بندی ۲ الی ۱۰ میلی‌متر به‌صورت وزنی با مقادیر ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد با سنگ‌دانه‌های طبیعی ستون شنی جایگزین شده است شکل (۲-۳۴). تایلرهای به‌کاررفته در این پژوهش دارای قطر خارجی، قطر داخلی و عرض به ترتیب ۱۶۰، ۷۸ و ۵۰ میلی‌متر هستند شکل (۲-۳۵) [۵۹].

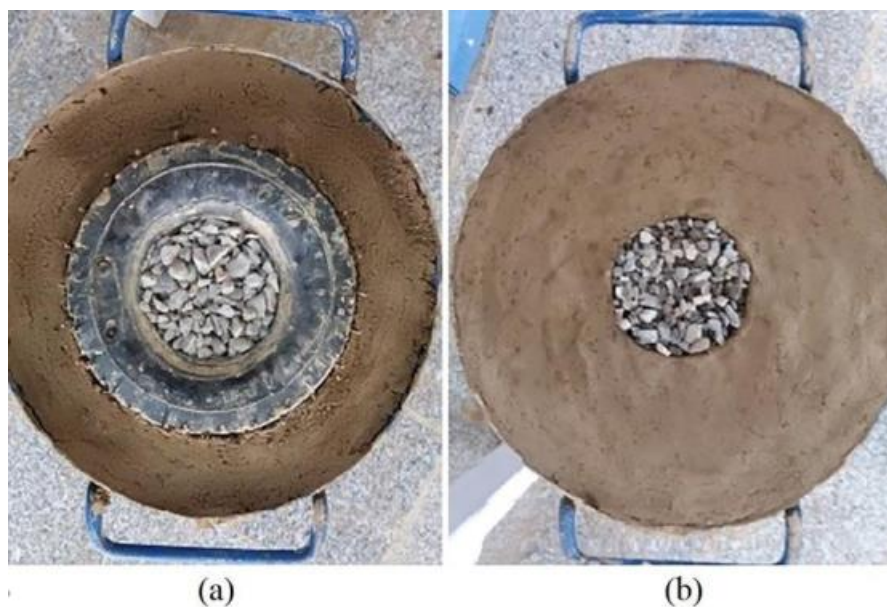


شکل (۳۴-۲) نمونه مصالح دانه‌ای با درصدهای مختلف تراشه آسفالت [۵۹]



شکل (۳۵-۲) تایر لاستیکی [۵۹]

در آزمایش از دستگاه بارگذاری سلول واحد (تک‌محوره) استفاده گردیده است شکل (۳۶-۲) [۵۹].



شکل (۳۶-۲) a: ستون شنی محصور نشده b: ستون شنی محصور شده با تایر [۵۹]

نتایج این تحقیق به شرح ذیل به دست آمده است [۵۹]:

۱- میزان تقویت مقاومت برشی و ظرفیت باربری ستون‌های شنی بستگی به میزان درصد آسفالت

موجود در آن‌ها دارد.

- ۲- با محصور نمودن ستون شنی به وسیله تایر لاستیکی، صرف نظر از درصد آسفالت موجود در ترکیب، درجه بهسازی از ۱ بیشتر شده که نشان می‌دهد تایرهای لاستیکی به عنوان محصورکننده باعث افزایش ظرفیت باربری در ستون شنی می‌شود.
- ۳- در ستون‌های شنی 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.
- ۴- صرف نظر از محصور شدن یا نشدن ستون شنی، وجود ۲۰ درصد تراشه آسفالت در ستون شنی 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.
- ۵- افزایش درصد آسفالت باعث بروز رفتار نرم در مصالح شده و از شکست ترد جلوگیری می‌کند.

۲-۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری تحقیقات مرتبط

در ابتدای فصل دوم ستون شنی معرفی و تحقیقاتی که توسط محققان در این زمینه صورت گرفته بود به صورت اختصار بیان شد و سپس به بررسی مطالعاتی که بر روی خرده لاستیک و لاستیک فرسوده در بهسازی خاک صورت گرفته پرداختیم و آخر به بررسی مطالعات پیشین استفاده از ستون شنی به همراه خرده لاستیک در بهسازی خاک پرداخته شد. لازم به ذکر می‌باشد مطالعات صورت گرفته بیشتر از موارد ذکر شده در این پایان‌نامه می‌باشد.

در جدول (۲-۵) خلاصه‌ای از مطالعات پیشین ستون شنی با خرده لاستیک ارائه شده است.

جدول (۲-۵) خلاصه‌ای از مطالعات پیشین ستون شنی با خرده لاستیک

محقق	مصالح	نتیجه
آیوسیرامان و سومیا ۲۰۱۵	شن و خرده لاستیک	خرده‌های لاستیک می‌توانند به‌عنوان جایگزینی سنگ‌دانه‌ها تا حدود ۴۰-۶۰ درصد در ساخت ستون‌های شنی استفاده شوند.
شریعتمداری و همکاران ۲۰۱۸	شن، رس و خرده لاستیک	- جایگزین کردن ۲۰ درصد حجمی از سنگ‌دانه‌های ستون شنی با خرده لاستیک بهینه‌ترین اختلاط بدست آمد. - چسبندگی همواره در تمام نمونه‌ها افزایش می‌یابد. - سازگار با محیط‌زیست می‌باشد و هزینه اجرا کمتری دارد.
موزامدر و همکاران ۲۰۱۸	خرده لاستیک، ژئوگرید و شن	- استفاده از خرده لاستیک ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد. - جایگزین کردن بیش از ۴۰ درصد از سنگ‌دانه‌های ستون شنی با خرده تایر و محصور کردن آن با ژئوگرید، باعث افزایش ظرفیت باربری به بیش از ۱۰۰ درصد گردید.
حورا بیکدلی و همکاران ۲۰۲۰	لاستیک فرسوده، تراشه اسفالت، شن و رس	- تایرهای لاستیکی به‌عنوان محصورکننده باعث افزایش ظرفیت باربری در ستون شنی می‌شود. - وجود ۲۰ درصد تراشه آسفالت در ستون شنی باعث افزایش ظرفیت باربری می‌گردد. - در ستون‌های شنی محصورشده با تایر با افزایش نشست، تغییر شکل تایرها و در نتیجه تنش‌های بسیج شده داخلی در تایرها افزایش می‌یابد و به‌این‌ترتیب باعث افزایش ظرفیت باربری ستون می‌شود.

همان‌طور که در جدول (۲-۶) مشاهده می‌گردد، تاکنون اکثر تحقیقات بر روی مخلوط خرده لاستیک، شن و خاک رس در مقیاس کوچک صورت گرفته و درواقع تحقیقی روی خرده لاستیک، شن و ماسه فیروزکوه با مقیاس بزرگ در دستگاه مدلسازی فیزیکی بزرگ مقیاس صورت نپذیرفته است. به همین جهت مخلوط خرده لاستیک و شن در بستر ماسه فیروزکوه در مقیاس بزرگ می‌تواند نمونه مناسبی برای آزمایش و مطالعه باشد. در پایان‌نامه فوق با مدل‌سازی فیزیکی بزرگ مقیاس ستون شنی با ابعاد و درصدهای مختلف خرده لاستیک در بستر ماسه فیروزکوه، سعی بر یافتن میزان تأثیر خرده لاستیک بر ظرفیت باربری ستون شنی و همچنین رفتار آن داریم.

فصل ۳:

روش تحقیق

۳-۱- مقدمه

در پژوهش حاضر از روش آزمایشگاهی جهت یافتن تأثیر ستون‌های شنی مخلوط شده با درصد‌ها و سائزهای مختلف خرده لاستیک بر ظرفیت باربری و رفتار آن‌ها استفاده شده است. بدین صورت که ستون شنی موردنظر با مخلوط شن و درصد‌ها و سائزهای مختلف خرده لاستیک به منظور مسلح نمودن ماسه فیروزکوه در باکس دستگاه مدل‌سازی فیزیکی بزرگ‌مقیاس، مدل‌سازی شده است. در این فصل به بیان روش تحقیق و مسائل مربوط به نحوه انجام آزمایش‌ها پرداخته شده است. بر این اساس ابتدا تئوری آزمایش‌های شناسایی مصالح استفاده شده بیان شده و سپس تئوری آزمایش‌های اصلی ارائه شده است.

۳-۲- مواد و مصالح مصرفی

مصالح مورد استفاده در این مطالعه شامل ماسه فیروزکوه جهت ساخت بستر، شن جهت ساخت ستون شنی و سه سائز خرده لاستیک به عنوان مسلح کننده و مصالح جایگزین در این پژوهش استفاده شده است که جهت بررسی و تعیین مشخصات فیزیکی و مهندسی آن‌ها آزمایش‌هایی صورت گرفته که در ادامه شرح داده شده‌اند.

۳-۲-۱- خاک بستر مورد استفاده

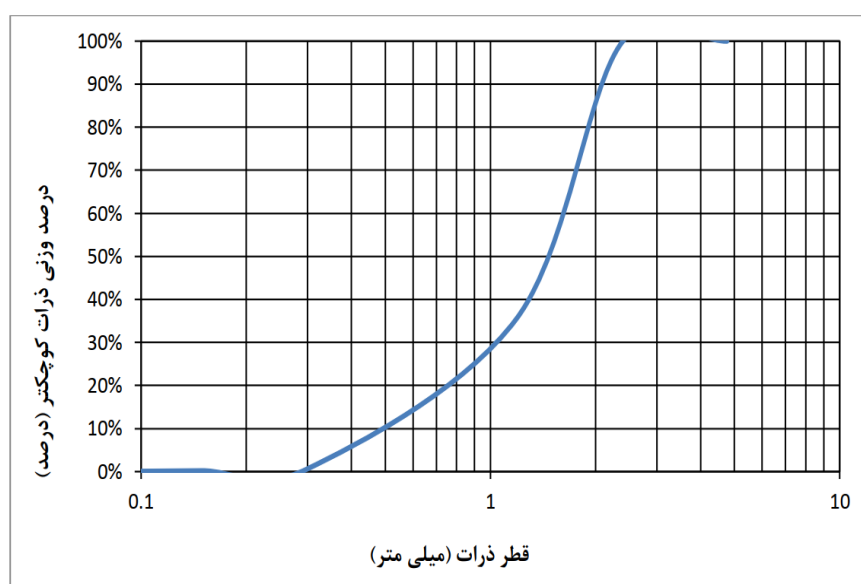
در این پژوهش خاک بستر مورد استفاده ماسه فیروزکوه (D11) می‌باشد که ماسه فیروزکوه نوعی از ماسه سیلیکاته است شکل (۳-۱). شناسایی پارامترهای شاخص ماسه فیروزکوه را به کمک آزمایش‌های مختلف از قبیل دانه‌بندی، تعیین وزن مخصوص حداقل و حداکثر و غیره انجام شد.



شکل (۱-۳) ماسه فیروزکوه مصرفی

۳-۱-۲-۱- آزمایش دانه‌بندی

آزمایش دانه‌بندی خاک، یکی از آزمایش‌های مهم مکانیک خاک می‌باشد که هدف آن تعیین توزیع اندازه دانه‌های مصالح است. آزمایش دانه‌بندی بر اساس استاندارد ASTM D422 انجام گرفته است [۶۰] بطوری که جهت اطمینان از صحت نتایج، سه مرتبه آزمایش تکرار شد و نمودار دانه‌بندی آن را در شکل (۲-۳) ارائه شده است.



شکل (۲-۳) منحنی دانه‌بندی ماسه

۳-۲-۱-۲- آزمایش تعیین وزن مخصوص حداقل و حداکثر خاک مصرفی

طبق استاندارد ASTM D4254 و ASTM D4253 جهت محاسبه وزن مخصوص حداقل و حداکثر باید ماسه را دو حالت درون استوانه ریخت و چگالی ماسه محاسبه شود [۶۱، ۶۲]. همچنین با استفاده از پارامترهای به دست آمده می توان دانسیته نسبی ماسه را محاسبه نمود.

با توجه به اینکه حجم و وزن استوانه که برابر است با $26663/38$ سانتی متر مکعب و $17/1$ کیلوگرم است نتایج جداول (۱-۳) و (۲-۳) ارائه گردید.

جدول (۱-۳) ارزیابی حداقل چگالی خاک ماسه

مرتبۀ	وزن استوانه + ماسه (kg)	چگالی حداقل (gr/cm^3)
1	55/77	1/34
2	56/35	1/36
3	56/06	1/35
میانگین چگالی های حداقل = $1/35 \text{ gr}/\text{cm}^3$		

جدول (۲-۳) ارزیابی حداکثر چگالی خاک ماسه

مرتبۀ	وزن استوانه + ماسه (kg)	چگالی حداقل (gr/cm^3)
1	63/57	1/34
2	63	1/59
3	63/28	1/60
میانگین چگالی های حداکثر = $1/60 \text{ gr}/\text{cm}^3$		

۳-۲-۱-۳- آزمایش تعیین چگالی دانه های جامد

جهت تعیین چگالی دانه های جامد از استاندارد ASTM C127 برای مصالح استفاده شد که نتایج آن در جداول (۳-۳) و (۴-۳) ارائه گردید [۶۳].

جدول (۳-۳) اطلاعات نمونه آزمایش چگالی دانه‌های جامد

جرم ماسه (gr)	جرم آب + ماسه (gr)	جرم بالن + آب + ماسه (gr)	جرم آب هم حجم ماسه (gr)	حجم ماسه (cm ³)
۵۰	۶۰۷/۴	۶۳۸/۵	۱۸/۹	۷۸/۹

جدول (۴-۳) چگالی دانه‌های جامد

s(gr/cm ³) _s	دمای آب (C°)	α	w (gr/cm ³) _w	G _s
۲/۶۵	۲۴	۰/۹۹۹۱	۱	۲/۶۵

۳-۲-۱-۴- جمع‌بندی نتایج خصوصیات ماسه فیروزکوه

پس از انجام آزمایش‌های فوق مشاهده گردید ماسه فیروزکوه با دانه‌بندی یکنواخت و بد دانه‌بندی

شده (SP) می‌باشد و خلاصه‌ای از پارامترهای به‌دست‌آمده در جدول (۵-۳) ارائه شده است.

جدول (۵-۳) مشخصات ماسه مورد استفاده (ماسه فیروزکوه)

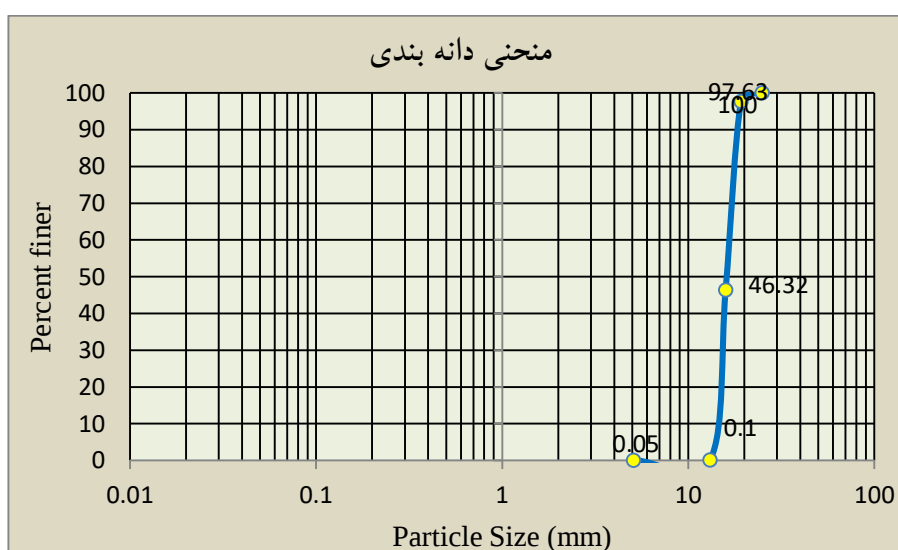
ویژگی	مقدار
D ₅₀ (mm)	۱/۱
C _u	۱/۵۷
C _c	۱/۱۷
G _s	۲/۶۵
e _{min}	۰/۶۶
e _{max}	۰/۹۶
(γ_d) _{max} (ton/m ³)	۱/۶۰
(γ_d) _{min} (ton/m ³)	۱/۳۵

۳-۲-۲- مصالح ستون شنی

در پژوهش حاضر جهت ساخت ستون شنی از مصالح شن استفاده شده است و به همین دلیل آن را ستون شنی خطاب می‌کنیم شکل (۳-۳). دانه‌بندی شن مورد استفاده در شکل (۳-۴) ارائه شده که با انجام آزمایش چگالی دانه‌های جامد شن، مقدار G_s برابر $2/65$ و تیزگوشگی 60% به دست آمد. همچنین آزمایش وزن مخصوص حداکثر و حداقل مطابق استاندارد ASTM و ASTM D4253 انجام شد [۶۱، ۶۲] و وزن مخصوص حداکثر و حداقل شن به ترتیب برابر $1/75$ و $1/41$ حاصل شد.



شکل (۳-۳) شن مصرفی



شکل (۳-۴) منحنی دانه‌بندی شن

۳-۲-۳- خرده لاستیک

مصلح افزودنی به شن در این پژوهش جهت ساخت ستون شنی، خرده لاستیک با ابعاد متفاوت می‌باشد. خرده لاستیک مورد استفاده در این تحقیق دارای جنس و کیفیت یکسان و در سه سایز ۲-۴/۷۵، ۹/۵۱-۴/۷۵ و ۹/۵۱-۱۲/۷ میلی‌متر تقسیم‌بندی شده است که این سه سایز متفاوت را به ترتیب ریز، متوسط و درشت نام‌گذاری می‌کنیم و در شکل (۳-۵) تصاویر خرده لاستیک در سه سایز نمایش داده شده است.



شکل (۳-۵) ابعاد خرده لاستیک از ریز تا درشت

آزمایش تعیین چگالی دانه‌های جامد طبق استاندارد ASTM D854 بر روی خرده لاستیک انجام شد که مقدار آن برابر ۱/۱۱ به دست آمد [۶۴] که این خرده لاستیک‌ها از کارخانه‌ی بازیافت ضایعات لاستیکی در مشهد با دانه بندی ذکر شده تهیه گردید شکل (۳-۶).



شکل (۳-۶) کارخانه بازیافت ضایعات لاستیکی در مشهد

۳-۳- آزمایش برش مستقیم جعبه بزرگ

آزمایش برش مستقیم یکی از آزمایش‌های مهم در مهندسی ژئوتکنیک (مکانیک خاک و پی) به منظور تعیین پارامترهای مقاومتی خاک می‌باشد که مطابق با استاندارد ASTM D3080 این آزمایشات انجام شد [۶۵]. در این آزمایش‌ها، ابتدا خاک تحت تنش قائم معینی تحکیم یافته و سپس ضمن ثابت نگه داشتن تنش قائم، تنش برشی با سرعت تنظیم شده به نمونه خاک وارد می‌شود تا نمونه گسیخته شود. آزمایشات با سه تنش قائم مختلف انجام و بدین ترتیب در دستگاه مختصات "تنش برشی - تنش قائم" سه نقطه به دست می‌آید که با ترسیم بهترین خط عبوری از این نقاط، پارامترهای مقاومتی خاک (چسبندگی و اصطکاک داخلی) تعیین می‌گردند.

در آزمایش برش مستقیم با توجه به اینکه شرایط تنش تطابق زیادی با شرایط واقعی ندارد، همچنین برش در امتداد یک سطح افقی از قبل تعیین شده رخ می‌دهد، این آزمایش در مقایسه با آزمایش سه محوری دقت کمتری برخوردار می‌باشد ولی از لحاظ اقتصادی آزمایش برش مستقیم کم هزینه تر می‌باشد.

۳-۳-۱- معرفی دستگاه برش مستقیم جعبه بزرگ

در این تحقیق جهت تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک از دستگاه برش مستقیم جعبه بزرگ ساخت شرکت نیک آزما استفاده گردیده است. در این آزمایش، ماسه فیروزکوه و شن در حالت غیرمسلح و مسلح با درصد‌های مختلف خرده لاستیک مورد بررسی قرار گرفته است. ابعاد جعبه برش $15 \times 30 \times 30$ سانتی متر و جک بارگذاری قائم به صورت پنوماتیک متصل به یک کمپرسور هوا، می‌باشد. شکل (۳-۷) شمای کلی دستگاه را نشان می‌دهد. توضیحات تکمیلی دستگاه در پیوست الف ارائه شده است.



شکل (۷-۳) دستگاه برش مستقیم جعبه بزرگ

۳-۲- روش انجام آزمایش برش مستقیم

دستگاه برش مستقیم، عملیات برش را به صورت کرنش کنترل انجام می دهد. پس از آماده سازی تجهیزات آزمایش، مراحل تهیه و ساخت نمونه ها شروع می شود. ابتدا پیچ های جعبه برش بسته و سنگ متخلخل داخل آن قرار داده می شود و ابعاد آن توسط کولیس اندازه گیری شده تا حجم جعبه برش محاسبه گردد. با داشتن وزن مخصوص های متناسب با تراکم ۷۵ درصد در نظر گرفته شده برای این تحقیق، وزن مخلوط مورد نیاز برای پر کردن جعبه برش را محاسبه کرده و پس از محاسبه، درصد اختلاط مورد نظر از خرده لاستیک و ماسه را ایجاد و مصالح را در سه مرحله درون قالب ریخته می شود و هر لایه با استفاده از اهرم کوبش متناسب با درصد تراکم، متراکم می شود. لازم به ذکر است ضخامت لایه ها باید طوری در نظر گرفته شوند که لایه دوم کل ناحیه برش دستگاه را پوشش دهد، بدین منظور باید سعی شود وسط این لایه دقیقاً در محل مرز برش (محل اتصال دونیمه) قرار گیرد.

پس از تراز نمودن بازوی دستگاه، سنسورها صفر شده و پیچ جعبه برش باز می شود. در انتها با تنظیم دستگاه روی سرعت مشخص و تعیین یکی از سربارهای قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال، عملیات

برش، با سرعت ۲/۰۶۷ میلی‌متر بر دقیقه آغاز شده و زمانی خاتمه می‌یابد که لودسل ثابت مانده یا به

عقب بازگردد. شکل (۸-۳)



شکل (۸-۳) آماده‌سازی نمونه برش مستقیم جعبه بزرگ

۳-۴- دستگاه مدل‌سازی فیزیکی بارگذاری بزرگ‌مقیاس

تاکنون از ابعاد متفاوتی برای مدل نمودن ستون شنی در آزمایشگاه استفاده شده است. هر چه ستون شنی مدل‌سازی شده در آزمایشگاه دارای مقیاس کوچک‌تر باشند دقت اندازه‌گیری باید افزایش یابد به گونه‌ای که بتوان نیروی محوری کوچک وارد به ستون شنی و همچنین جابه‌جایی‌های کوچک ستون شنی را به دقت اندازه‌گیری نمود. بنابراین جهت دستیابی به این مهم نیاز به وسایل اندازه‌گیری با دقت بسیار بالا می‌باشد که هزینه‌ی بالایی دارند به همین جهت در این پژوهش از دستگاه مدل‌سازی فیزیکی بزرگ‌مقیاس که در ادامه معرفی خواهد شد، مورد استفاده قرار گرفته است.

دستگاه مدل سازی فیزیکی بارگذاری بزرگ مقیاس بدون شک یکی از دستگاه های مفید به منظور شناخت صحیح رفتار بار-نشست پی واقع بر خاک می باشد. دستگاه مدل سازی فیزیکی بارگذاری بزرگ مقیاس بدون شک می تواند افق های جدیدی از مطالعه سازه های ژئوتکنیکی را برای محققین بگشاید. شکل (۳-۹) و (۳-۱۰) نما و شمای کلی دستگاه برش مستقیم جعبه بزرگ می باشد.

مزایای مهم این دستگاه شامل موارد زیر می باشد:

۱- قابلیت اعتماد بالا به نتایج به دست آمده

۲- رفع محدودیت ها مدل سازی فیزیکی

۳- سیستماتیک بودن دستگاه

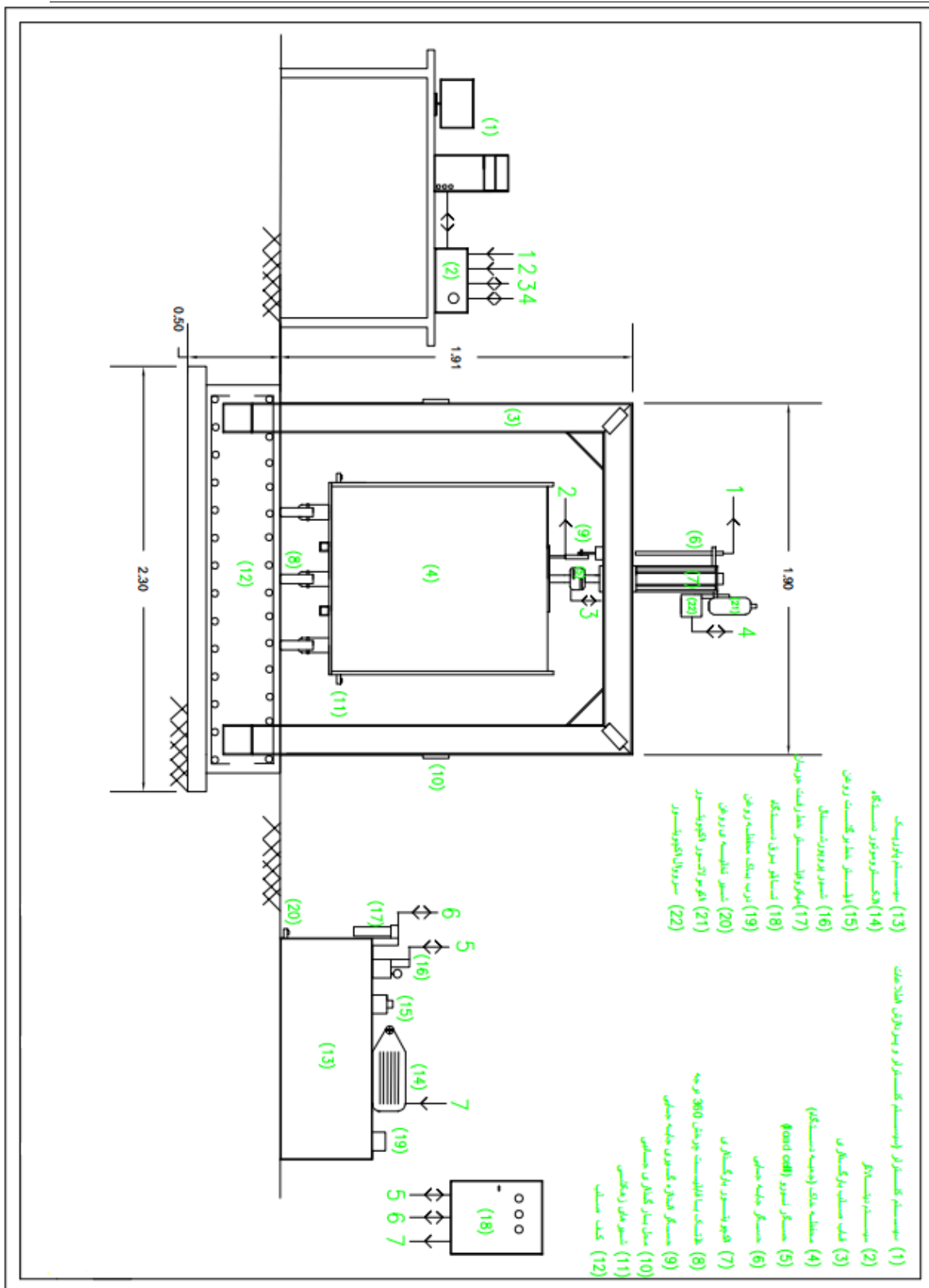
۴- کاهش هزینه ها

۵- کاهش خطای انسانی

توضیحات تکمیلی دستگاه در پیوست ب ارائه شده است.



شکل (۳-۹) نمای کلی دستگاه مدل سازی فیزیکی بارگذاری بزرگ مقیاس



شکل (۳-۱۰) شمایی از دستگاه مدل‌سازی فیزیکی بزرگ‌مقیاس

۳-۵- آماده سازی نمونه ها برای انجام آزمایش مدل سازی

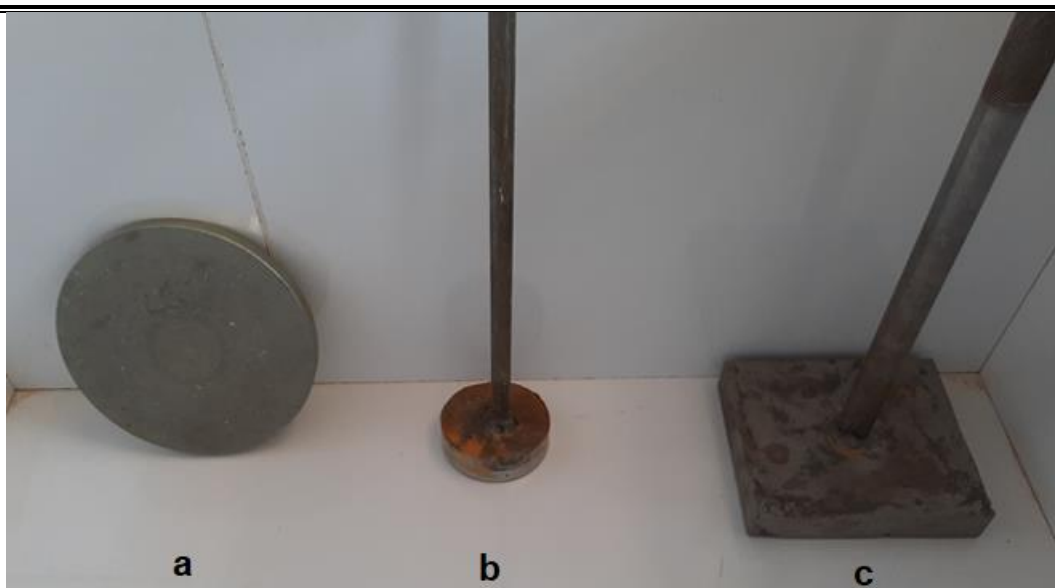
فیزیکی

در این تحقیق، ستون شنی موردنظر به صورت منفرد و در بستر ماسه فیروزکوه مدل سازی شده است. ستون شنی ساخته شده با قطر ۱۲۵ میلی متر و ارتفاع نیم متر می باشد که ماسه فیروزکوه اطراف آن را احاطه کرده است.

۳-۵-۱- وسایل مورد نیاز

به منظور ساخت ستون شنی و بارگذاری نمونه از تجهیزات زیر استفاده شده است شکل (۳-۱۱).

- ۱- لوله پلیکا: لوله پلیکا به ارتفاع نیم متر و به قطر ۱۲۵ میلی متر مورد استفاده قرار گرفته است.
- ۲- صفحه فلزی بارگذاری: این صفحه فلزی دایره ای دارای قطر ۱۳۰ میلی متر و وزن ۱۷۶۶ گرم جهت بارگذاری ستون شنی.
- ۳- اهرم کوبش ستون شنی: اهرمی به وزن ۱۶۵۰ گرم و قطر ۶۸ میلی متر و ارتفاع ۱۲۷ سانتی متر جت کوبش و متراکم نمودن سطح ماسه.
- ۴- اهرم کوبش ماسه: اهرمی به وزن ۳۹۳۳ گرم برای کوبش و متراکم نمودن ستون شنی.
- ۵- تراز: یک عدد تراز جهت تراز نمودن لوله پلیکا روی سطح ماسه.



شکل (۳-۱) (a) صفحه فلزی بارگذاری (b) اهرم کوبش ستون شنی (c) اهرم کوبش ماسه

۳-۵-۲- ساخت مدل فیزیکی در محفظه دستگاه مدل سازی فیزیکی

جهت ساخت ستون شنی در محفظه در ابتدای امر ماسه های موجود در محفظه دستگاه را تا عمق نیم متر از بالا خالی کرده و سطح ماسه را صاف می کنیم و در ادامه لوله پلیکا را قرار می دهیم به طوری که لوله روی سطح ماسه تراز باشد. نیم متر ماسه خالی شده را در ۵ مرحله، هر مرحله ۱۰ سانتی متر پر می کنیم و سطح آن را صاف و سپس با اهرم کوبش ماسه، ماسه را متراکم می کنیم.

در ادامه مخلوط آماده شده از شن و خرده لاستیک را در ۵ مرحله، در هر مرحله ۱۰ سانتی متر داخل لوله پلیکا را از مخلوط آماده شده پر می کنیم و لوله را به اندازه ۱۰ سانتی متر به آرامی و بدون اینکه فاصله ای بین ماسه فیروزکوه و ستون شنی به وجود آید بیرون میکشیم، سپس توسط اهرم کوبش مصالح ریخته شده داخل لوله پلیکا را متراکم می کنیم و به همین صورت اینکار را در ۵ مرحله تا انتها تکرار می کنیم شکل (۳-۱۲).



شکل (۱۲-۳) ساخت مدل فیزیکی در محفظه دستگاه مدل سازی فیزیکی

۳-۵-۳- عملیات بارگذاری ستون شنی

پس از مدل سازی فیزیکی در داخل محفظه دستگاه، صفحه های فلزی دایره ای شکل که قطر آن ۱۳۰ میلی متر می باشد را به صورتی روی ستون شنی قرار می گیرد که هیچ گونه بیرون زدگی از اطراف ستون نداشته باشد و دقیقاً مرکز صفحه در مرکز ستون شنی قرار گیرد. این صفحه بدین منظور روی ستون قرار داده شدند تا نیرو تنها به ستون شنی اعمال شود. در نهایت محفظه دستگاه را به صورتی تنظیم می کنیم که نیروی بارگذاری دقیقاً به مرکز صفحه وارد و سپس پیستون بارگذاری به آرامی روی نمونه هدایت و نمونه جهت بارگذاری آماده می گردد. بارگذاری با نرخ جابه جایی ۱۰ میلی متر بر دقیقه بر روی نمونه وارد شد تا نشست کل ستون شنی به ۶۰ میلی متر برسد که این مقدار برای تمام نمونه ها یکسان در نظر گرفته شده است.

۳-۵-۴- آماده سازی مخلوط سنگدانه-خرده لاستیک

برای آماده سازی نمونه ها، ابتدا سنگدانه های موجود را سرند کرده بطوریکه از سنگدانه هایی با ابعاد ۱۹/۰۶ الی ۱۳/۲ برای ساخت نمونه مورد استفاده قرار گرفته است. برای ساخت نمونه های مورد نظر سه سایز از خرده لاستیک را با درصدهای حجمی ۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ با سنگدانه طوری مخلوط

گردید که باعث توزیع یکنواخت و همگن خرده لاستیک و شن شد و کنترل همگن بودن اختلاط بصورت چشمی صورت گرفت تا مصالح موردنیاز جهت مدل سازی فیزیکی بزرگ مقیاس همانند شکل (۳-۱۳) آماده شود.



شکل (۳-۱۳) نمونه اختلاط شن و خرده لاستیک

۳-۶- برنامه آزمایشات برش مستقیم و مدل سازی فیزیکی

همان طور مشاهده می شود در جداول (۳-۶) و (۳-۷) برنامه آزمایشات صورت گرفته توسط دستگاه برش مستقیم جعبه بزرگ و مدل سازی فیزیکی بزرگ مقیاس ارائه شده است.

جدول (۳-۶) برنامه آزمایش برش مستقیم جعبه بزرگ روی شن و خرده لاستیک

شماره آزمایش	نام اختصاری	سایز خرده لاستیک	درصد اختلاط خرده لاستیک با شن	سر بار قائم (kPa)
1	G-50	-	0	50
2	G-100			100
3	G-150			150
4	G&20%ST-50	سایز ریز	20	50
5	G&20%ST-100			100
6	G&20%ST-150			150
7	G&40%ST-50		40	50
8	G&40%ST-100			100
9	G&40%ST-150			150
10	G&60%ST-50		60	50
11	G&60%ST-100			100
12	G&60%ST-150			150
13	G&20%MT-50	سایز متوسط	20	50
14	G&20%MT-100			100
15	G&20%MT-150			150
16	G&40%MT-50		40	50
17	G&40%MT-100			100
18	G&40%MT-150			150
19	G&60%MT-50		60	50
20	G&60%MT-100			100
21	G&60%MT-150			150
22	G&20%LT-50	سایز درشت	20	50
23	G&20%LT-100			100
24	G&20%LT-150			150
25	G&40%LT-50		40	50
26	G&40%LT-100			100
27	G&40%LT-150			150
28	G&60%LT-50		60	50
29	G&60%LT-100			100
30	G&60%LT-150			150

جدول (۷-۳) برنامه آزمایشات مدل سازی فیزیکی بزرگ مقیاس

شماره آزمایش	نام اختصاری	سایز خرده لاستیک	درصد خرده لاستیک در مخلوط	درصد سنگ دانه در مخلوط
1	G	-	0	100
2	G&20%ST	سایز ریز	20	80
3	G&40%ST		40	60
4	G&60%ST		60	40
5	G&100%ST		100	0
6	G&20%MT	سایز متوسط	20	80
7	G&40%MT		40	60
8	G&60%MT		60	40
9	G&100%MT		100	0
10	G&20%LT	سایز درشت	20	80
11	G&40%LT		40	60
12	G&60%LT		60	40
13	G&100%LT		100	0

۳-۶-۱- علائم اختصاری

علائم اختصاری مورداستفاده در این پایان نامه به شرح ذیل می باشد:

G اختصار Gravel به معنای شن

ST اختصار Small Tire به معنای خرده لاستیک سایز ریز

MT اختصار Medium Tire به معنای خرده لاستیک سایز متوسط

LT اختصار Large Tire به معنای خرده لاستیک سایز درشت

به عنوان مثال نشان اختصاری G&60%ST-50 بیانگر مخلوط شن با ۶۰ درصد خرده لاستیک سایز ریز

تحت سربار قائم ۵۰ کیلو پاسکال و یا نشان اختصاری G&40%LT بیانگر مخلوط شن با ۴۰ درصد

خرده لاستیک سایز درشت می باشد.

فصل ۴:

نتایج و تفسیر آن ها

۴-۱- مقدمه

در این فصل تلاش شده است نتایج حاصل از آزمایش‌های برش مستقیم جعبه بزرگ و آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی بزرگ‌مقیاس که در فصل سوم به‌طور کامل شرح داده شده‌اند، بیان گردد و نتایج موردبررسی و تحلیل قرار گیرد. نتایج آزمایش‌ها به همراه جدول و نمودار مربوطه و همچنین تحلیل آزمایش‌ها ارائه شده است و نتایج حاصل شده با آزمایش‌های مرجع و نتایج تحقیقات دیگر محققین در این زمینه مقایسه شده‌اند.

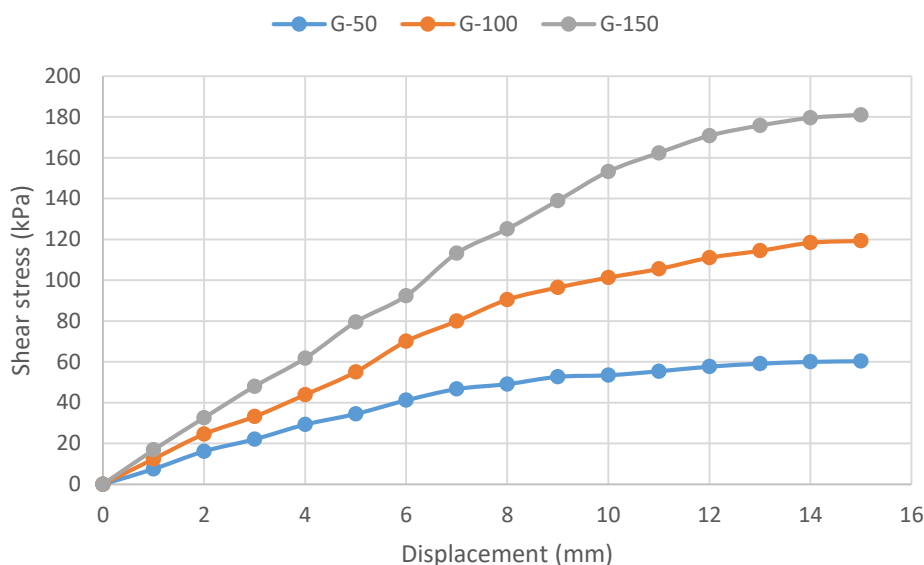
۴-۲- نتایج آزمایش‌های مرجع

در ابتدا نتایج یکسری آزمایشات مرجع موردنیاز جهت مقایسه راحت‌تر آزمایش‌ها و تأثیر استفاده از خرده لاستیک در دستگاه برش مستقیم جعبه بزرگ و دستگاه مدل‌سازی فیزیکی بزرگ‌مقیاس ارائه شده است که به‌وسیله این آزمایش‌ها بتوان تأثیر استفاده از خرده لاستیک را در ستون شنی بیان نمود.

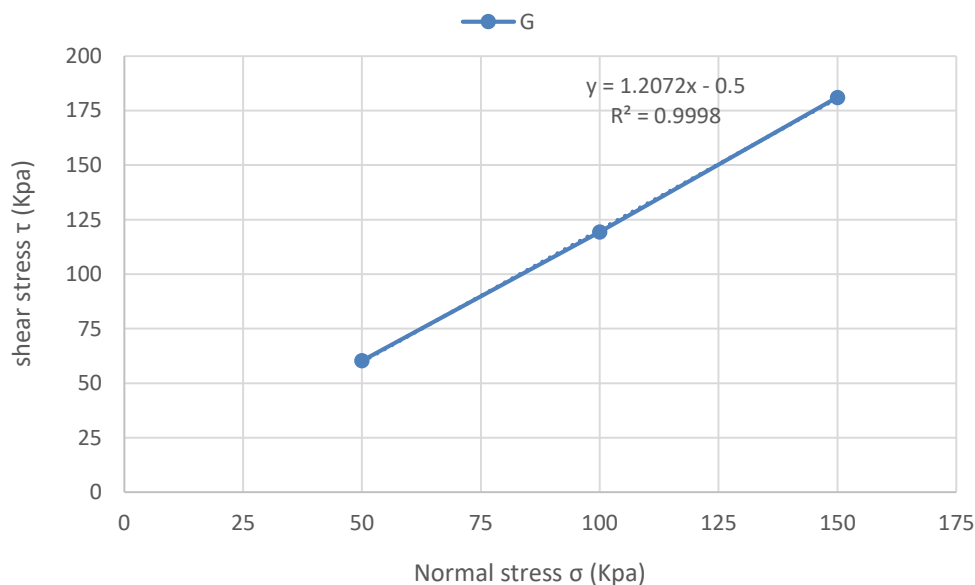
۴-۲-۱- آزمایشات مرجع دستگاه برش مستقیم جعبه بزرگ

در این بخش جهت مقایسه نتایج آزمایشات برش مستقیم جعبه بزرگ، آزمایش انجام شده بر روی مصالح شنی بدون خرده لاستیک به‌عنوان آزمایش مرجع انتخاب شده است. به این منظور در شکل (۴-۱) نمودار تنش برشی-جاب‌جایی افقی و همچنین در شکل (۴-۲) پوش گسیختگی برش مستقیم برای شن خالص تحت سه سربار قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال رسم شده است. اصطکاک داخلی مصالح شن حدود ۵۱ درجه و چسبندگی صفر کیلو پاسکال محاسبه شده است که با مقایسه این نتیجه

با نتایج آزمایشات مخلوط شن و خرده لاستیک می‌توان تأثیر خرده لاستیک را ارزیابی نمود.



شکل (۴-۱) نمودار تنش برشی-جاب‌جایی افقی در شن خالص



شکل (۴-۲) پوش گسیختگی شن خالص

با توجه به نمودار تنش برشی و جاب‌جایی شکل (۴-۱)، تأثیر افزایش سربار قائم بر مقاومت برشی خاک را نمایش می‌دهد که با افزایش سربار قائم، مقاومت خاک افزایش پیدا می‌کند و همچنین با توجه به نمودار پوش گسیختگی شکل (۴-۲) به‌دست‌آمده برای نمونه شن خالص، مشاهده می‌گردد که چسبندگی و اصطکاک داخلی در تراکم موردنظر و در سه سربار ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰۰ به دلیل دانه‌ای بودن

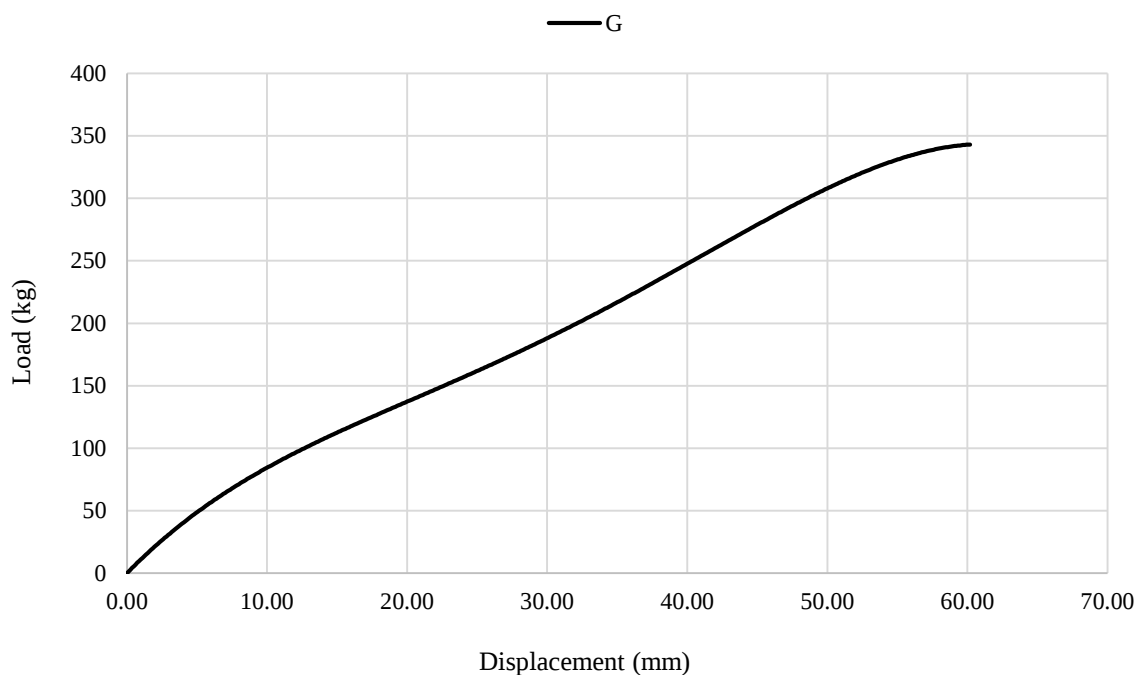
مصالح ترتیب صفر کیلو پاسکال و ۵۰ درجه بدست آمد که این اصطکاک داخلی زیاد ناشی از، تیزگوشگی ۶۰ درصدی مصالح و تراکم نسبی بالا می باشد.

۴-۲-۲- آزمایشات مرجع دستگاه مدل سازی فیزیکی بزرگ مقیاس

جهت مقایسه نتایج آزمایشگاهی دستگاه مدل سازی فیزیکی بزرگ مقیاس از یک نمونه ی مدل سازی شده با شن خالص استفاده گردید. در بارگذاری نمونه مدل سازی شده، نیرویی به صورت استاتیکی با نرخ جابه جایی ۱۰ میلی متر بر دقیقه به منظور رسیدن به جابه جایی ۶۰ میلی متری اعمال گردید. همان طور که در شکل (۳-۴) مشاهده می شود، ستون شنی تا رسیدن به جابه جایی ۱۷ میلی متر افزایشی تقریباً ۱۴۰ کیلوگرمی نیرو را تجربه می کند سپس به علت جابه جا شدن و لغزش سنگ دانه های ستون شنی میزان افزایش نرخ بار مقداری کاهش یافته و نمودار با شیب ملایم افزایش می یابد ولی در کل می توان گفت برآیند نمودار به صورت خطی می باشد و ستون شنی حداکثر ۳۵۰ کیلوگرم بار در ۶۰ میلی متر نشست، بار گرفته است.

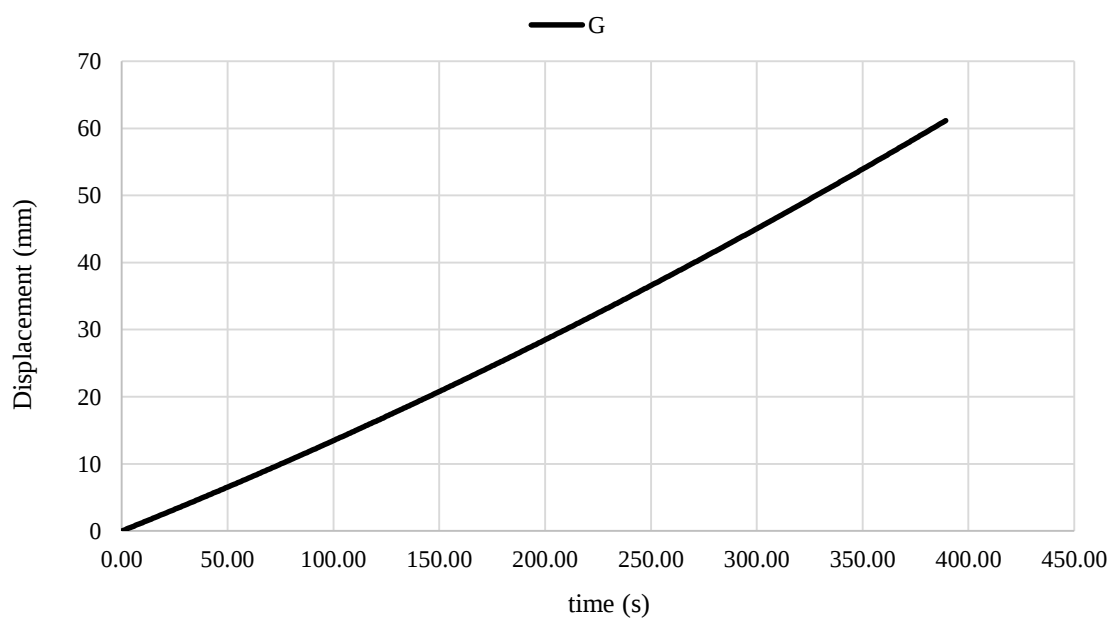
همچنین جهت رسم بهتر نتایج نمودارهای دستگاه مدل سازی فیزیکی بزرگ مقیاس از نرم افزار Origin جهت حذف نویزها و داده های پرت استفاده شد و سپس توسط نرم افزار اکسل، Polynomial نمودارها رسم گردید.

با مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایشات مخلوط شن و خرده لاستیک با نمونه ی شن خالص می توان عملکرد خرده لاستیک در ستون شنی را ارزیابی نمود.



شکل (۳-۴) نمودار بار- نشست ستون شنی بدون خرده لاستیک

شکل (۴-۴) عملکرد موتور دستگاه مدلسازی فیزیکی بزرگ مقیاس را نشان می‌دهد که بیانگر قدرت بالای موتور جهت اعمال بار یکنواخت در زمان می‌باشد. این نمودار برای همه‌ی آزمایشات مدلسازی برقرار می‌باشد.



شکل (۴-۴) نمودار عملکرد دستگاه

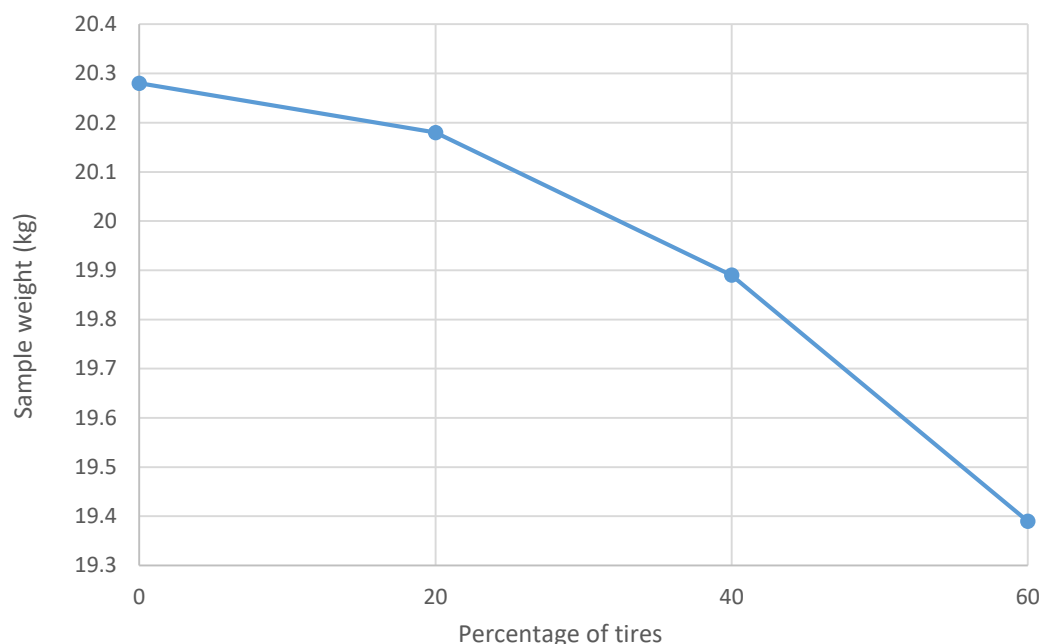
۴-۳- بررسی نتایج آزمایش‌های برش مستقیم جعبه بزرگ

همان‌طور که در فصل ۳ نیز اشاره گردید آزمایش‌های برش مستقیم جعبه بزرگ با سربارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال بر روی شن و مخلوط شن و خرده لاستیک با درصد اختلاط حجمی ۲۰، ۴۰، ۶۰ درصد و با استفاده از سه سایز خرده لاستیک ریز، متوسط و درشت در تراکم ۷۵٪ صورت گرفت.

همان‌طور که در جدول (۴-۱) مشاهده می‌شود به دلیل وزن مخصوص کمتر خرده لاستیک نسبت به دانه‌های شن، با افزایش درصد خرده لاستیک در نمونه‌ها شاهد کاهش وزن مخلوط هستیم که در شکل (۴-۵) نتایج روی نمودار ارائه شده است.

جدول (۴-۱) مشخصات وزنی نمونه‌های آزمایش برش مستقیم جعبه بزرگ

ردیف	نام اختصاری آزمایش	درصد خرده لاستیک	وزن خرده لاستیک (kg)	وزن شن (kg)	وزن مخلوط (kg)
۱	G	۰	۰	20.28	20.28
۲	G&20%MT	۲۰	1.22	18.96	20.18
۳	G&40%MT	۴۰	2.25	17.64	19.89
۴	G&60%MT	۶۰	3.07	16.32	19.39

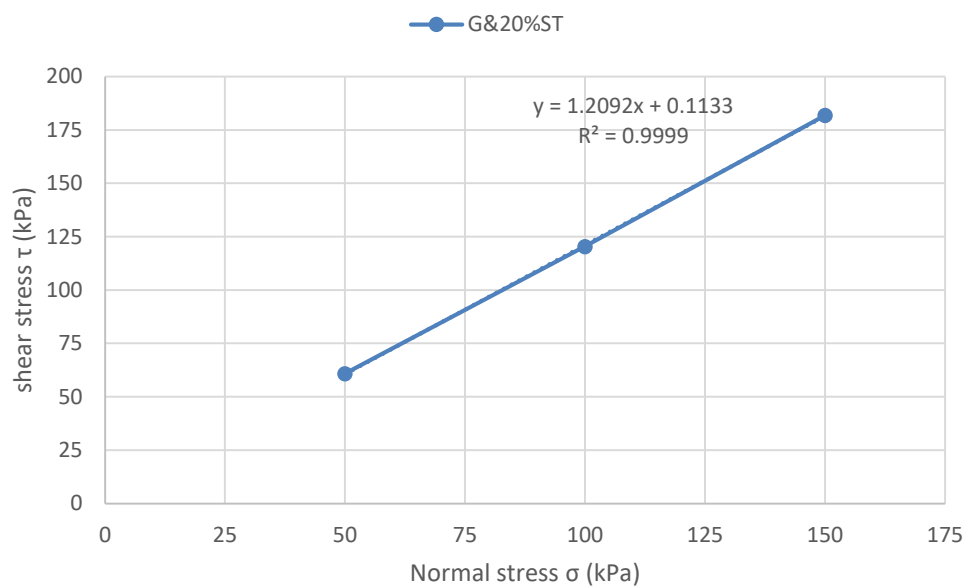


شکل (۴-۵) نمودار تأثیر افزایش خرده لاستیک بر وزن نمونه‌ها

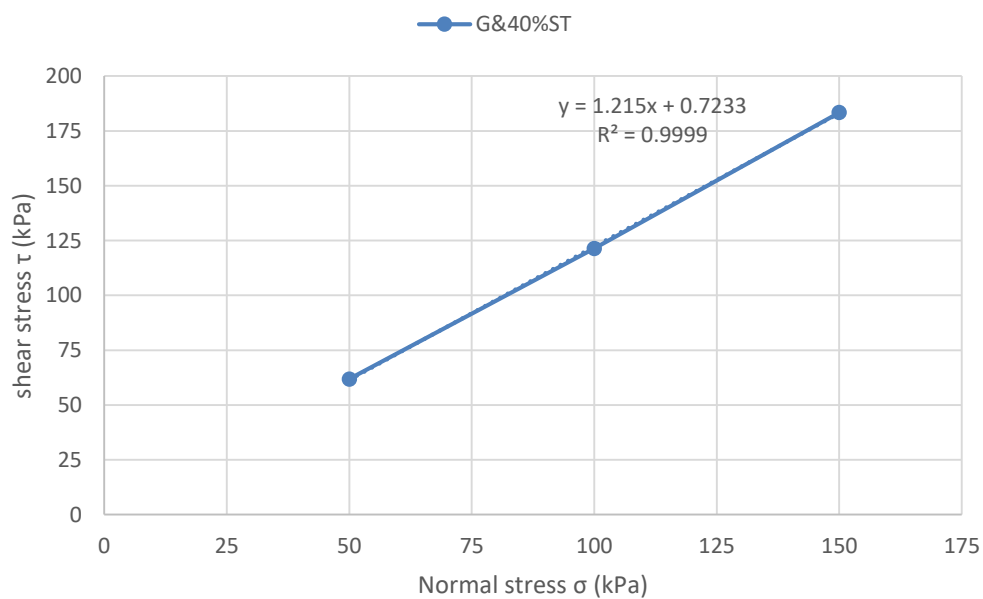
۴-۳-۱- بررسی پارامترهای مقاومتی آزمایش‌های برش مستقیم جعبه بزرگ

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های یک خاک مقاومت برشی آن می‌باشد که آزمایش برش مستقیم باهدف تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک، نظیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی صورت می‌گیرد. خاک‌های دانه‌ای دارای خاصیت اصطکاکی اندکی می‌باشند، به‌طوری‌که در هر نقطه تماس، مقاومت در برابر لغزش متناسب با نیروی عمودی می‌باشد. در نتیجه هنگامی که میزان تنش سربار به نمونه افزایش پیدا کند، مقاومت نهایی نیز افزایش پیدا خواهد کرد که با توجه به اینکه گیرایی و جفت و بست بین دانه‌ها در مقاومت نهایی تأثیر می‌گذارد، با افزایش تنش سربار، قفل‌شدگی و مقاومت نهایی افزایش می‌یابد.

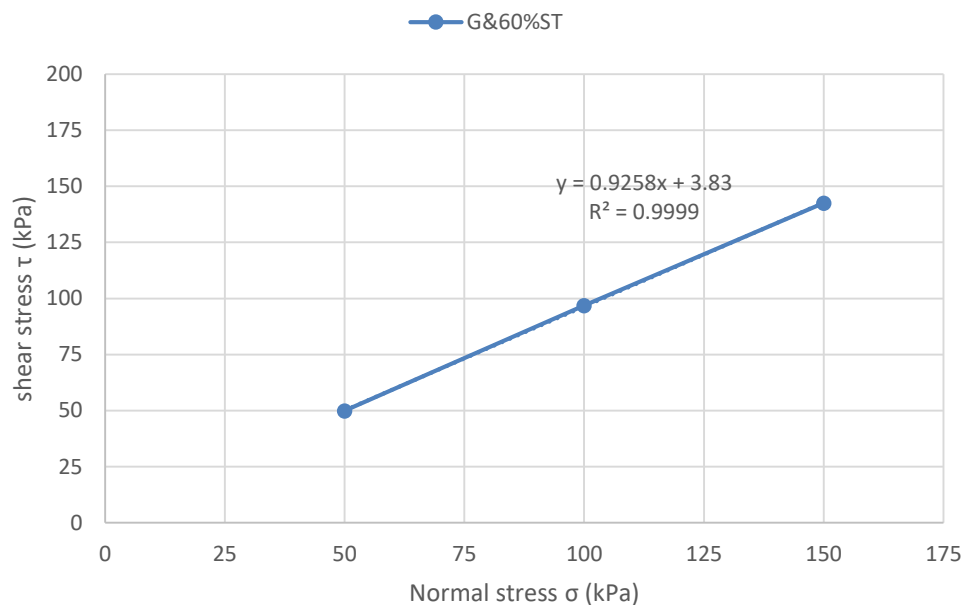
در اشکال (۴-۶) الی (۴-۱۴) نمودار پوش گسیختگی آزمایش‌ها ارائه شده و سپس در جدول (۴-۲) پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مصالح محاسبه گردیده و ارائه شده است.



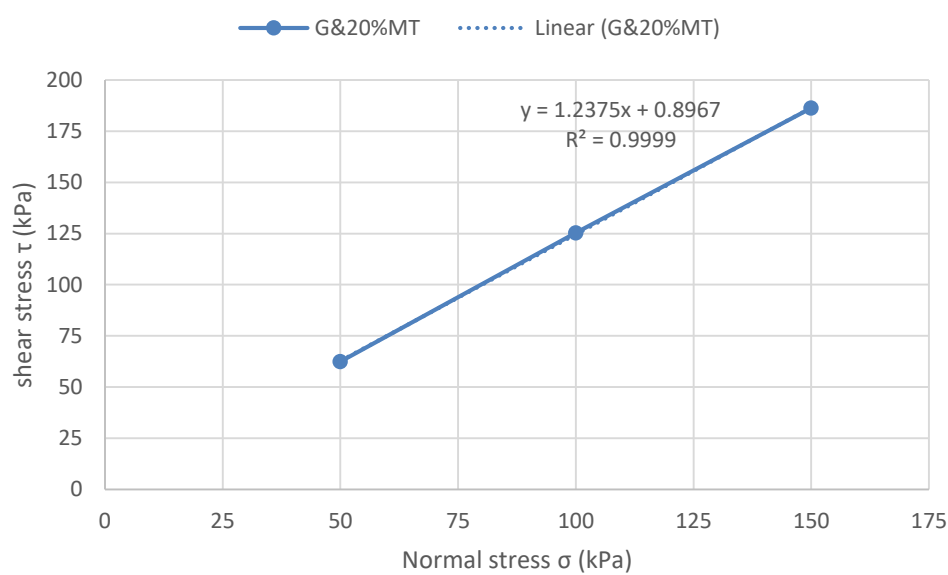
شکل (۴-۶) پوش گسیختگی مخلوط شن و ۲۰٪ خرده لاستیک سایز ریز



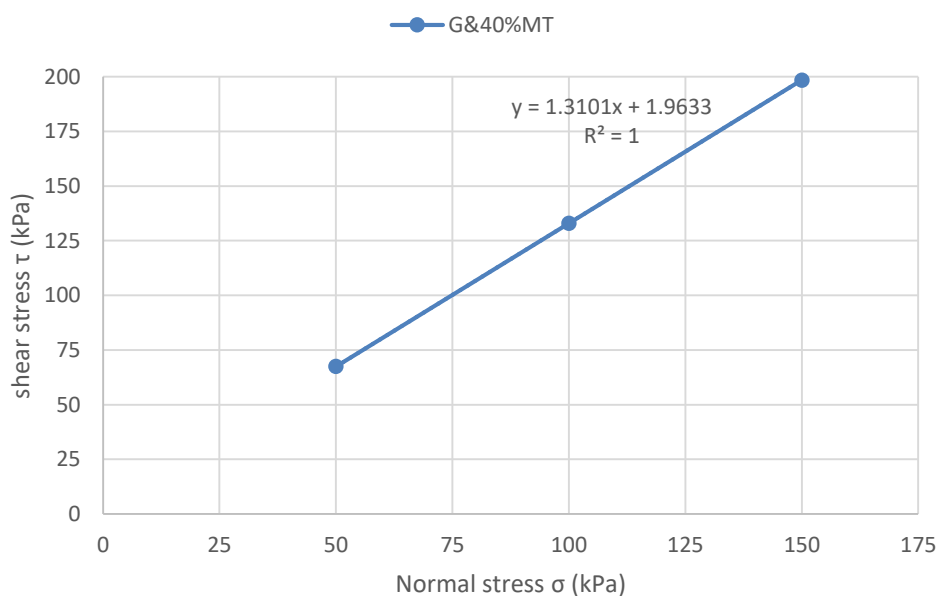
شکل (۴-۷) پوش گسیختگی مخلوط شن و ۴۰٪ خرده لاستیک سایز ریز



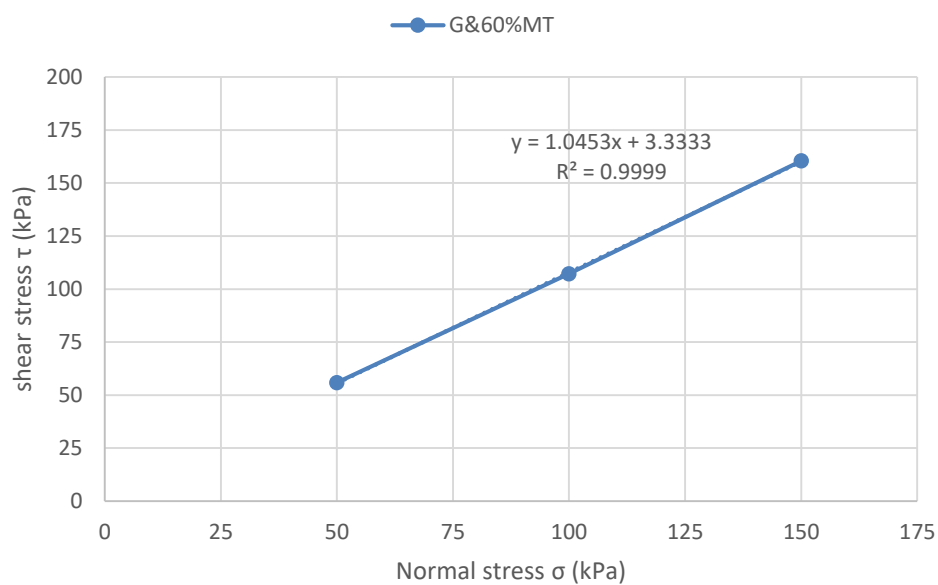
شکل (۸-۴) پوش گسیختگی مخلوط شن و ۶۰٪ خرده لاستیک سایز ریز



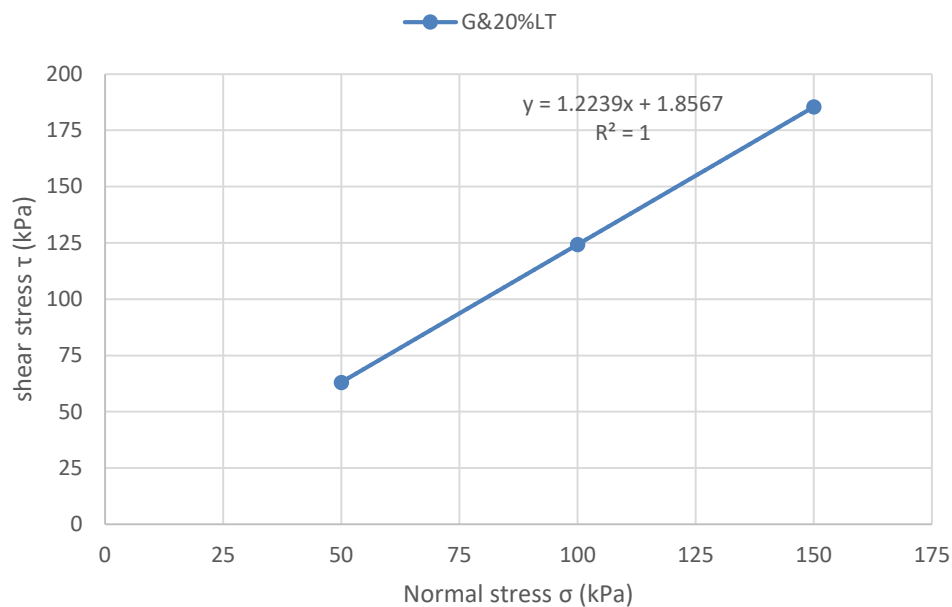
شکل (۹-۴) پوش گسیختگی مخلوط شن و ۲۰٪ خرده لاستیک سایز متوسط



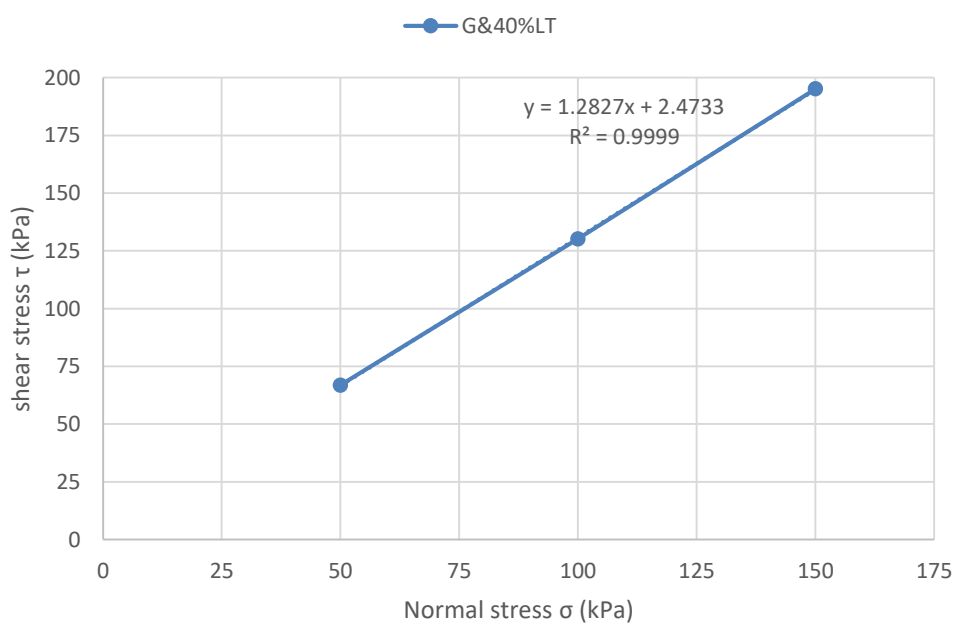
شکل (۱۰-۴) پوش گسیختگی مخلوط شن و ۴۰٪ خرده لاستیک سایز متوسط



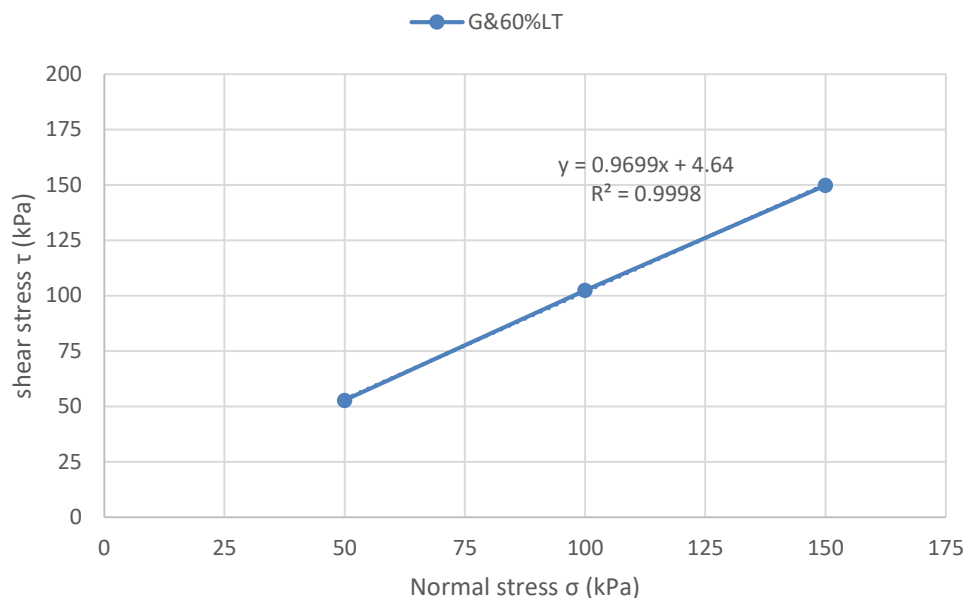
شکل (۱۱-۴) پوش گسیختگی مخلوط شن و ۶۰٪ خرده لاستیک سایز متوسط



شکل (۱۲-۴) پوش گسیختگی مخلوط شن و ۲۰٪ خرده لاستیک سایز درشت



شکل (۱۳-۴) پوش گسیختگی مخلوط شن و ۴۰٪ خرده لاستیک سایز درشت



شکل (۴-۱۴) پوش گسیختگی مخلوط شن و ۶۰٪ خرده لاستیک سائز درشت

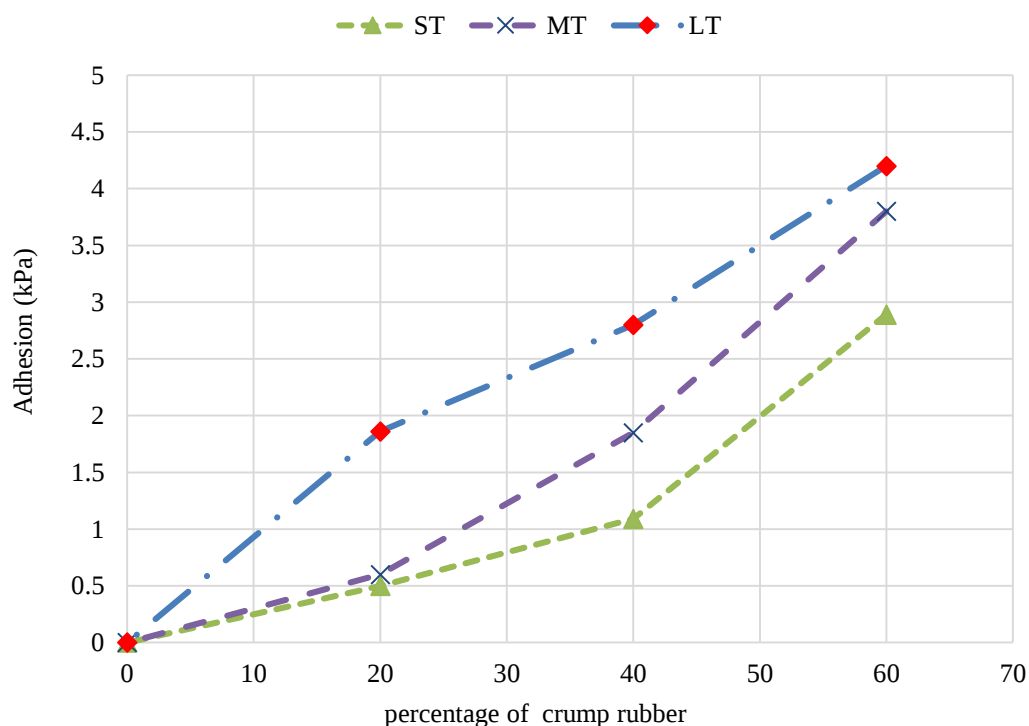
با استفاده از شیب و عرض از مبدأ حاصل از رسم پوش گسیختگی، می‌توان چسبندگی و اصطکاک داخلی نمونه‌ها را محاسبه نمود که نتایج حاصل رسم پوش گسیختگی برای مخلوط‌های شن با سائزها و درصد‌های مختلف خرده لاستیک در جدول (۴-۲) ارائه شده است.

جدول (۴-۲) تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در مخلوط شن با سائزها و نسبت‌های مختلف خرده لاستیک

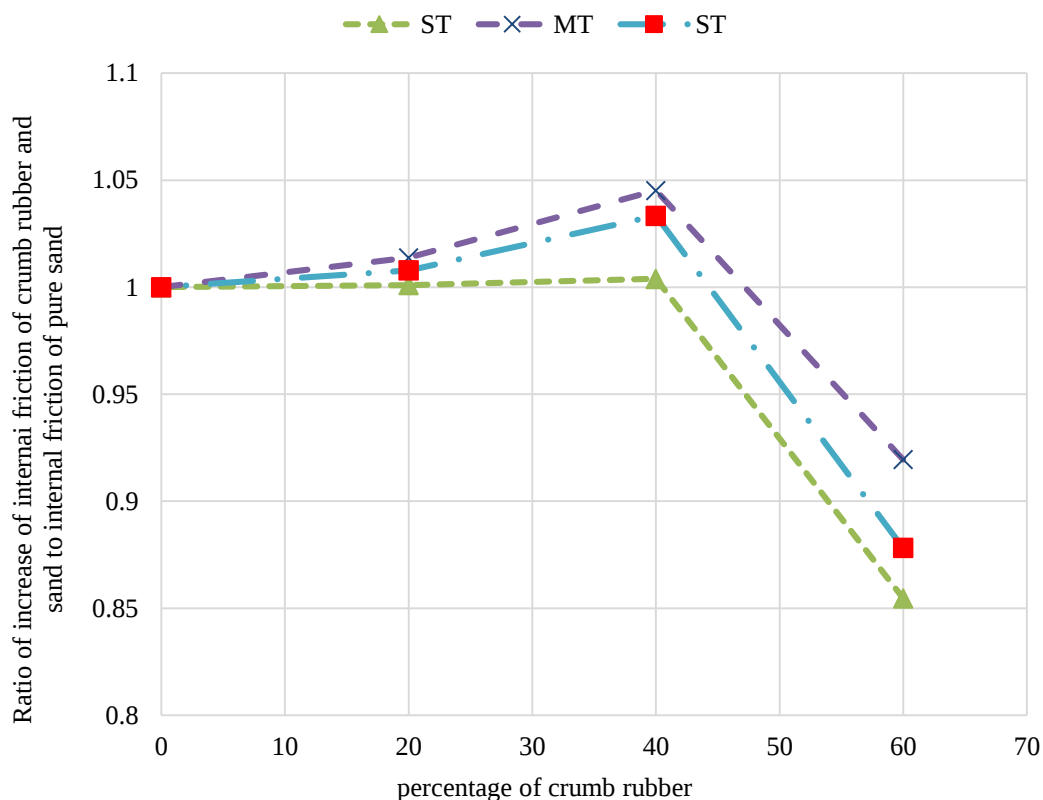
ردیف	نام اختصاری آزمایش	سائز خرده لاستیک	درصد خرده لاستیک	چسبندگی (kPa)	اصطکاک داخلی (°)
1	G	-	0	0	50.9
2	G&20%ST	ریز	20	0.5	50.95
3	G&40%ST		40	1.09	51.1
4	G&60%ST		60	2.89	43.5
5	G&20%MT	متوسط	20	0.6	51.6
6	G&40%MT		40	1.85	53.2
7	G&60%MT		60	3.8	46.8
8	G&20%LT	درشت	20	1.86	51.3
9	G&40%LT		40	2.8	52.6
10	G&60%LT		60	4.2	44.7

همان‌طور که در جدول (۴-۲) مشاهده می‌شود، افزایش خرده لاستیک باعث افزایش مداوم چسبندگی در تمام سائیزهای خرده لاستیک می‌شود و همچنین تأثیر خرده لاستیک بر اصطکاک داخلی به این صورت می‌باشد که تا مقدار بهینه خرده لاستیک روند افزایشی داشته و سپس مقدار آن کاهش می‌یابد که این مقدار افزایش‌ها بسیار ناچیز می‌باشند و ممکن است ناشی از خطای انسانی باشد به همین جهت می‌توان از این درصد افزایش ناچیز صرف نظر نمود.

در اشکال (۴-۱۵) و (۴-۱۶) به ترتیب نمودار تأثیر خرده لاستیک روی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مشاهده می‌گردد که چسبندگی به‌طور دائم در حال افزایش می‌باشد ولی اصطکاک داخلی تا اختلاط حدود ۴۰ درصد خرده لاستیک با شن افزایش یافته و سپس پس از آن با شیب بیشتری شروع به کاهش نموده است.

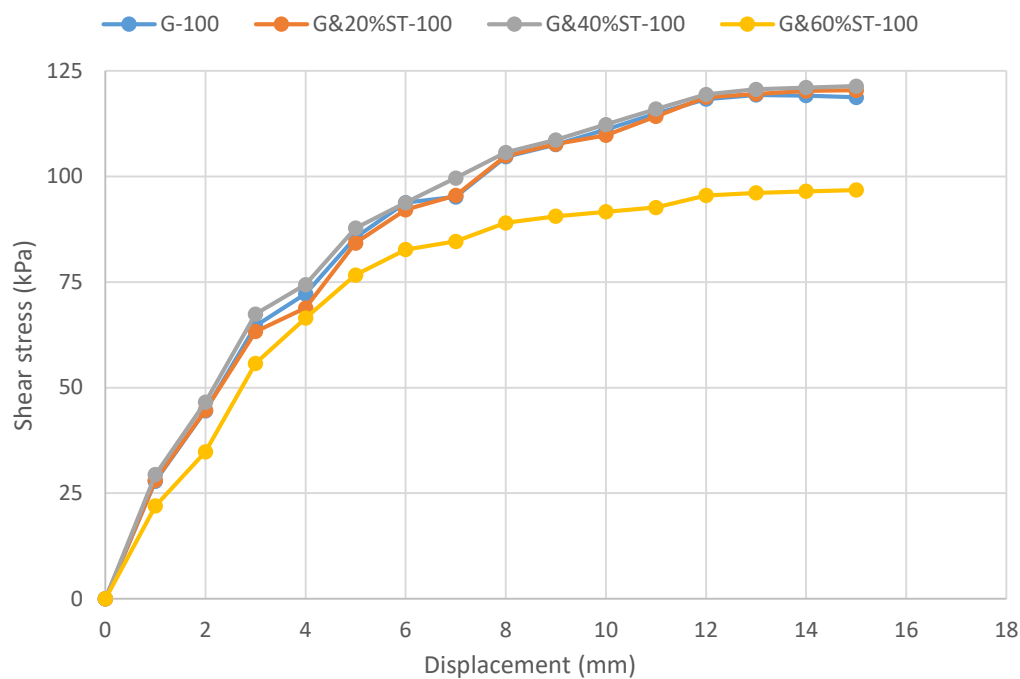


شکل (۴-۱۵) میزان چسبندگی مخلوط در درصدهای مختلف خرده لاستیک



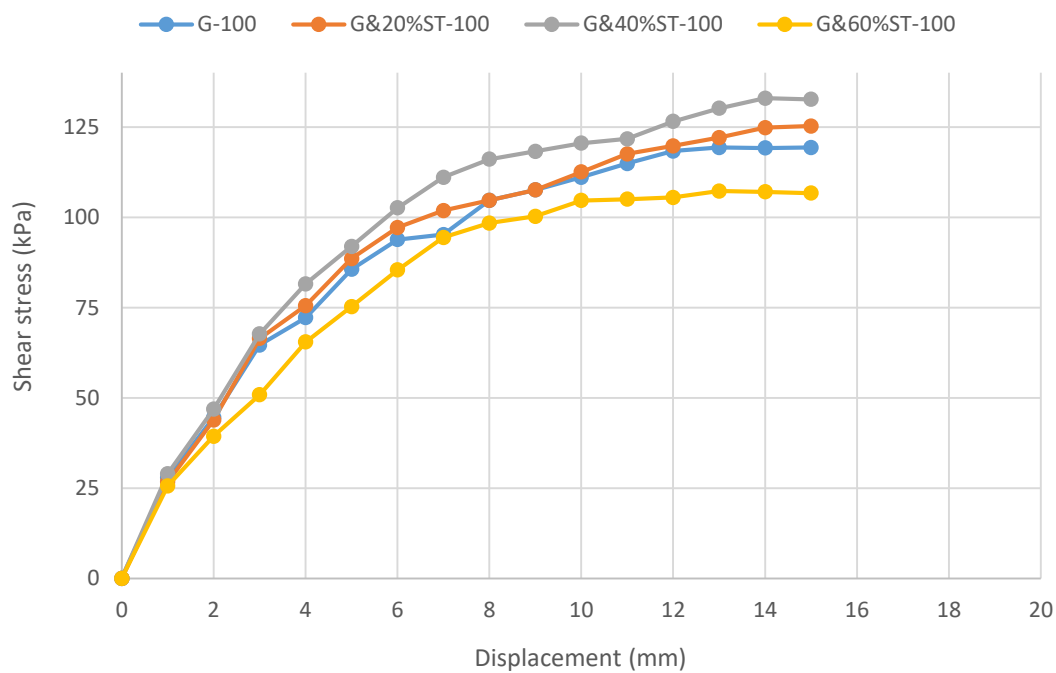
شکل (۴-۱۶) افزایش اصطکاک داخلی مخلوط شن-خرده لاستیک نسبت به شن خالص

در اشکال (۴-۱۷)، (۴-۱۸) و (۴-۱۹) نمودار تنش برشی - جابه‌جایی برای ابعاد و درصدهای مختلف خرده لاستیک تحت سربار قائم ۱۰۰ کیلو پاسکال ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار سختی با افزایش خرده لاستیک در نمونه کاهش می‌یابد و همچنین افزودن خرده لاستیک به مخلوط باعث سبک‌تر شدن نمونه می‌شود که این امر موجب کاهش تنش‌های اعمالی به مخلوط می‌گردد.



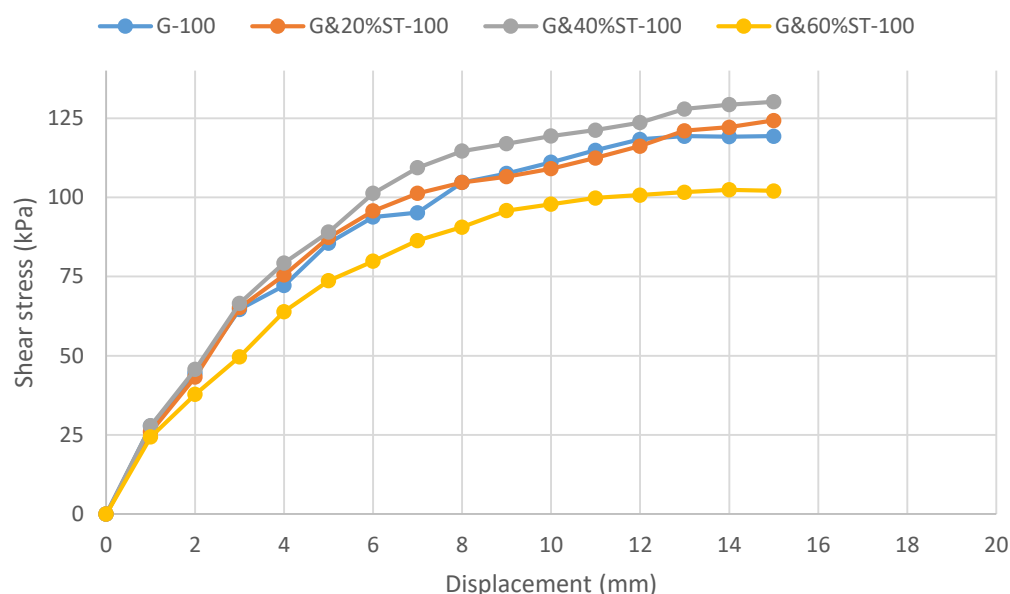
شکل (۴-۱۷) نمودار تنش برشی - جابه‌جایی برای درصد‌های مختلف خرده لاستیک سایز ریز تحت سربار قائم ۱۰۰

کیلو پاسکال



شکل (۴-۱۸) نمودار تنش برشی - جابه‌جایی برای درصد‌های مختلف خرده لاستیک سایز متوسط تحت سربار قائم

۱۰۰ کیلو پاسکال



شکل (۴-۱۹) نمودار تنش برشی - جابه‌جایی برای درصد‌های مختلف خرده لاستیک سایز درشت تحت سربار قائم ۱۰۰

کیلو پاسکال

زونبرگ و همکاران [۴۶] در آزمایش‌های خود مشاهده نمودن با افزایش خرده لاستیک تا ۳۵ درصد مقاومت برشی نمونه افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین ژونگ‌نیان یانگ و همکاران [۵۴] در یک مقاله مروری سعی بر یافتن تأثیر خرده لاستیک بر بهسازی خاک نمودند که جمع‌بندی آن‌ها نشان داد، مقاومت برشی خاک تقویت‌شده با خرده لاستیک با توجه به عوامل همچون نوع خاک و مشخصات مصالح استفاده‌شده متفاوت است ولی در کل استفاده از خرده لاستیک باعث بهبود مقاومت برشی خاک می‌شود.

در نتیجه می‌توان از آزمایش‌های برش مستقیم جعبه بزرگ صورت گرفته نتیجه گرفت که درصد بهینه خرده لاستیک با توجه به مصالح استفاده‌شده حدود ۴۰ درصد خرده لاستیک سایز متوسط می‌باشد که خرده لاستیک می‌تواند به‌طور مؤثری ویژگی‌های تغییر شکل خاک را بهبود بخشد و همچنین به دلیل خاصیت ارتجاعی خوب می‌تواند در رفتگی بین ذرات شن و ماسه را مهار کند، انسجام خاصی به خاک بدهد و در نتیجه باعث افزایش مقاومت برشی خاک تقویت‌شده با خرده لاستیک شود.

۴-۳-۲- تکرارپذیری نتایج و خطاهای دستگاه برش مستقیم جعبه بزرگ

در این پایان نامه جهت جلوگیری از خطا حدود ۲۰ درصد از آزمایشات ۳ بار تکرار شده تا همخوانی نتایج با یکدیگر کنترل شود و صحت نتایج اثبات گردد و همچنین در مواردی که به صحت نتایج آزمایشات مشکوک بوده ایم نیز، آن آزمایش ها را تکرار نموده تا از درستی آن اطمینان حاصل و یا به اصلاح نتایج نادرست آزمایش پردازیم و به طور کلی درصد خطا در آزمایشات برش مستقیم ۱ الی ۲ درصد به دست آمد.

به طور کلی خطاهای آزمایش برش مستقیم جعبه بزرگ شامل موارد زیر می باشد:

- ۱- خطای فردی: شامل نحوه نمونه سازی.
 - ۲- محاسباتی: شامل روابط محاسباتی و فرضیات.
 - ۳- دستگاه آزمایش: شامل کالیبراسیون و نرم افزار دستگاه.
- عیب های ذاتی آزمایش برش مستقیم شامل موارد زیر می باشد:
- ۱- عدم گسیختگی خاک در ضعیف ترین صفحه: به دلیل اینکه راستای برش و صفحه آن در آزمایش برش مستقیم از پیش تعیین شده می باشد و در عمل ممکن است خاک در راستای دیگری گسیخته شود.
 - ۲- توزیع غیریکنواخت تنش برشی در روی سطح گسیختگی: به دلیل اینکه تنش های برشی روی سطح گسیختگی به طور یکنواخت توزیع نشده اند، در صورتی که ما فرض کرده ایم که توزیع تنش به صورت یکنواخت می باشد.

۴-۴- بررسی نتایج آزمایش های مد سازی فیزیکی بزرگ مقیاس

در این بخش نتایج حاصل از آزمایش های مدل سازی فیزیکی بزرگ مقیاس شامل نمودارهای جابجایی- نیرو ارائه خواهد شد. همچنین به مقایسه نتایج این تحقیق با تحقیقات دیگر محققان نیز پرداخته خواهد

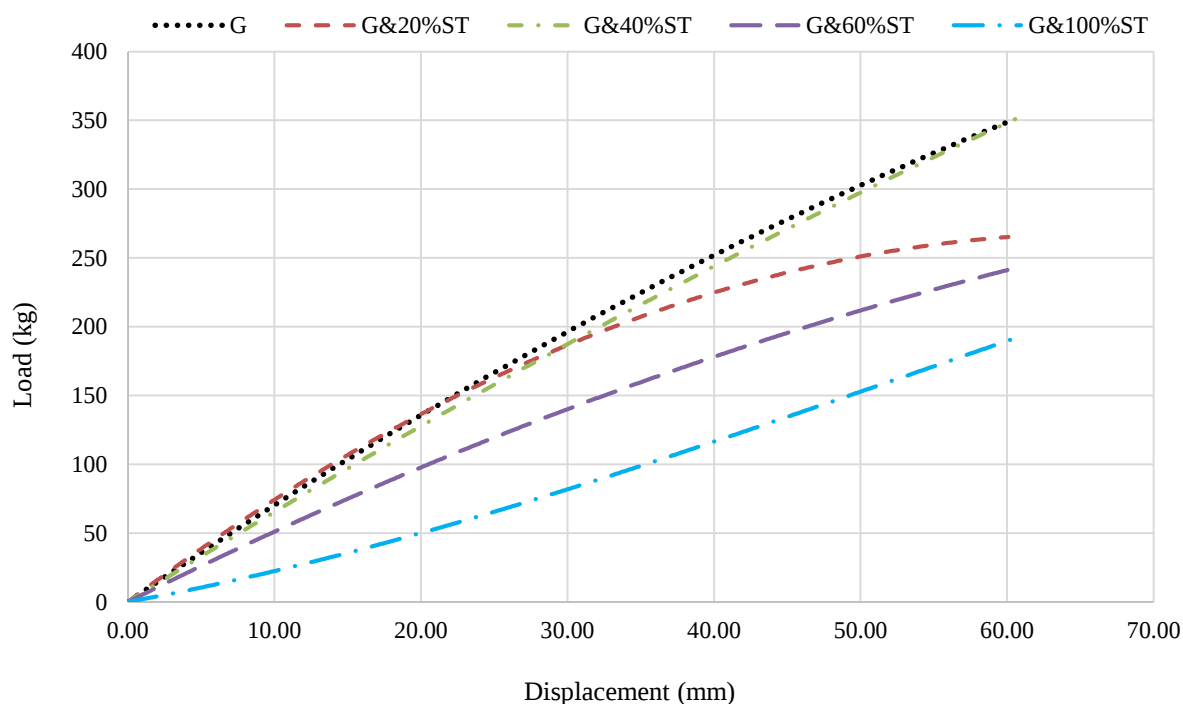
شد. همان‌طور که در فصل سوم اشاره شد، سه سایز ریز، متوسط و درشت خرده لاستیک برای آزمایشات در نظر گرفته شده است.

۴-۴-۱- ارزیابی درصدهای اختلاط خرده لاستیک بر ظرفیت باربری

ستون شنی در ۶۰ میلی‌متر نشست

در شکل (۴-۲۰) و جدول (۴-۳) نتایج حاصل از آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی بزرگ‌مقیاس، با خرده لاستیک سایز ریز نشان داد که ظرفیت باربری ستون شنی با افزودن ۴۰ درصد حجمی خرده لاستیک سایز ریز حدود ۴ درصد افزایش پیدا کرده و در مابقی اختلاط‌های این سایز به دلیل ریز بودن ابعاد خرده لاستیک و نفوذ آنها به انتهای ستون شنی شاهد کاهش ظرفیت باربری بودیم.

همچنین اشکال (۴-۲۱) (۴-۲۲) و جداول (۴-۴) (۴-۵) نیز نتایج آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی بزرگ‌مقیاس بر روی نمونه‌هایی با خرده لاستیک سایز متوسط و درشت را نشان داده شده است که ظرفیت باربری ستون شنی با افزودن ۴۰ درصد حجمی خرده لاستیک سایز متوسط و درشت به ترتیب حدود ۱۷ درصد و ۱۱ درصد افزایش پیدا کرده است.

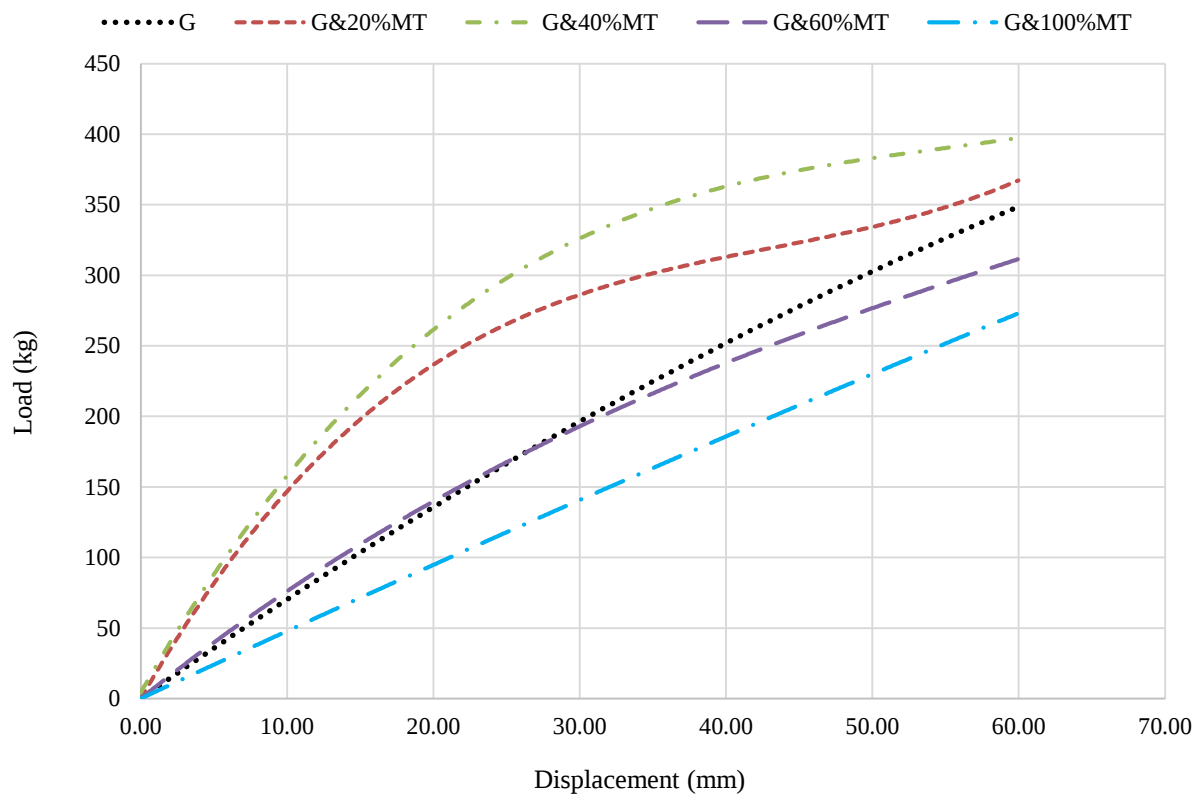


شکل (۴-۲۰) مقایسه نمودار نشست- بار برای ستون شنی با خرده لاستیک سایز ریز

جدول (۴-۳) نتایج آزمایش مدل سازی بزرگ مقیاس روی ستون شنی حاوی درصدهای مختلف خرده لاستیک سایز ریز در ۶۰

میلی متر نشست

ردیف	نام اختصاری آزمایش	درصد اختلاط خرده لاستیک	حداکثر نیرو وارد بر ستون شنی (kg)	نسبت ظرفیت باربری ستون شنی حاوی خرده لاستیک سایز ریز به ظرفیت باربری ستون شنی خالص
1	G	0	350	1
2	G&20%ST	20	287	0.82
3	G&40%ST	40	365	1.04
4	G&60%ST	60	243	0.69
5	G&100%ST	100	189	0.54

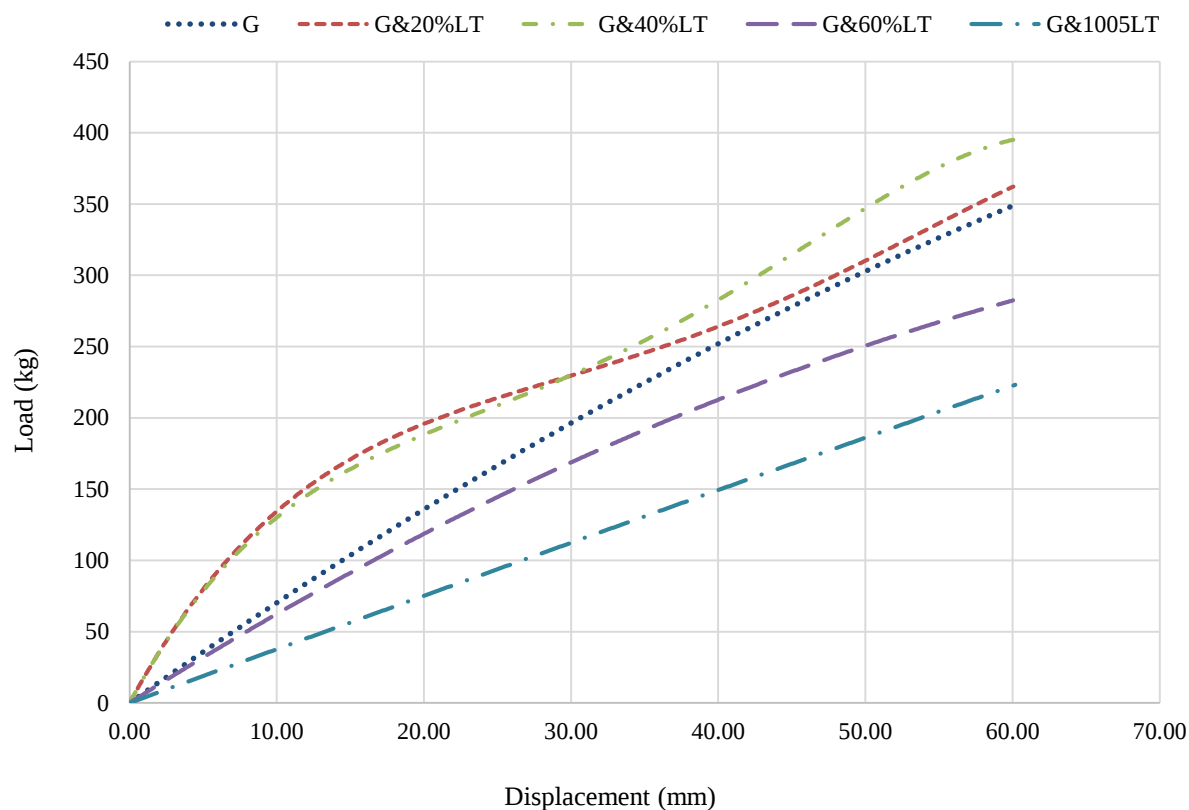


شکل (۴-۲۱) مقایسه نمودار نشست- بار برای ستون شنی با خرده لاستیک سایز متوسط

جدول (۴-۴) نتایج آزمایش مدل سازی فیزیکی بزرگ مقیاس روی ستون شنی حاوی درصد های مختلف خرده لاستیک سایز

متوسط در ۶۰ میلی متر نشست

ردیف	نام اختصاری آزمایش	درصد اختلاط خرده لاستیک	حداکثر نیرو وارد بر ستون شنی (kg)	نسبت ظرفیت باربری ستون شنی حاوی خرده لاستیک سایز ریز به ظرفیت باربری ستون شنی خالص
1	G	0	350	1
2	G&20%MT	20	368	1.06
3	G&40%MT	40	409	1.17
4	G&60%MT	60	300	0.85
5	G&100%MT	100	276	0.79



شکل (۴-۲۲) مقایسه نمودار نشست- بار برای ستون شنی با خرده لاستیک سایز درشت

جدول (۴-۵) نتایج آزمایش مدل سازی فیزیکی بزرگ مقیاس روی ستون شنی با درصد های مختلف خرده لاستیک سایز درشت در

۶۰ میلی متر نشست

ردیف	نام اختصاری آزمایش	درصد اختلاط خرده لاستیک	حداکثر نیرو وارد بر ستون شنی (kg)	نسبت ظرفیت باربری ستون شنی حاوی خرده لاستیک سایز ریز به ظرفیت باربری ستون شنی خالص
1	G	0	350	1
2	G&20%LT	20	360	1.03
3	G&40%LT	40	390	1.11
4	G&60%LT	60	290	0.83
5	G&100%LT	100	225	0.64

۴-۲- ارزیابی اندازه خرده لاستیک بر ظرفیت باربری و نشست

ستون شنی

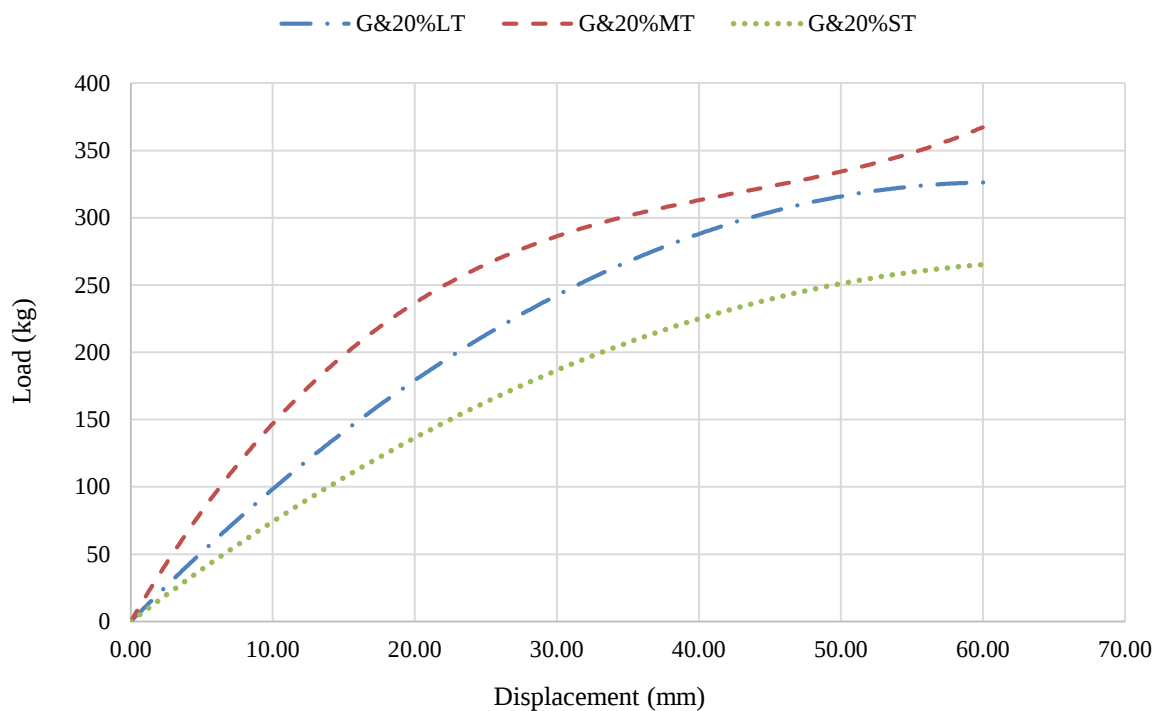
در جدول (۴-۶) نتایج حاصل از آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی بزرگ‌مقیاس روی ستون شنی بر اساس سایز خرده لاستیک نشان داده شده است که همان‌طور که مشاهده می‌شود خرده لاستیک سایز متوسط بهینه‌ترین سایز خرده لاستیک در این تحقیق می‌باشد که بیشترین تحمل بار را از خود در ۶ سانتی‌متر نشست از خود نشان داده است.

جدول (۴-۶) نتایج آزمایش مدل‌سازی فیزیکی بزرگ‌مقیاس روی ستون شنی بر اساس سایز خرده لاستیک

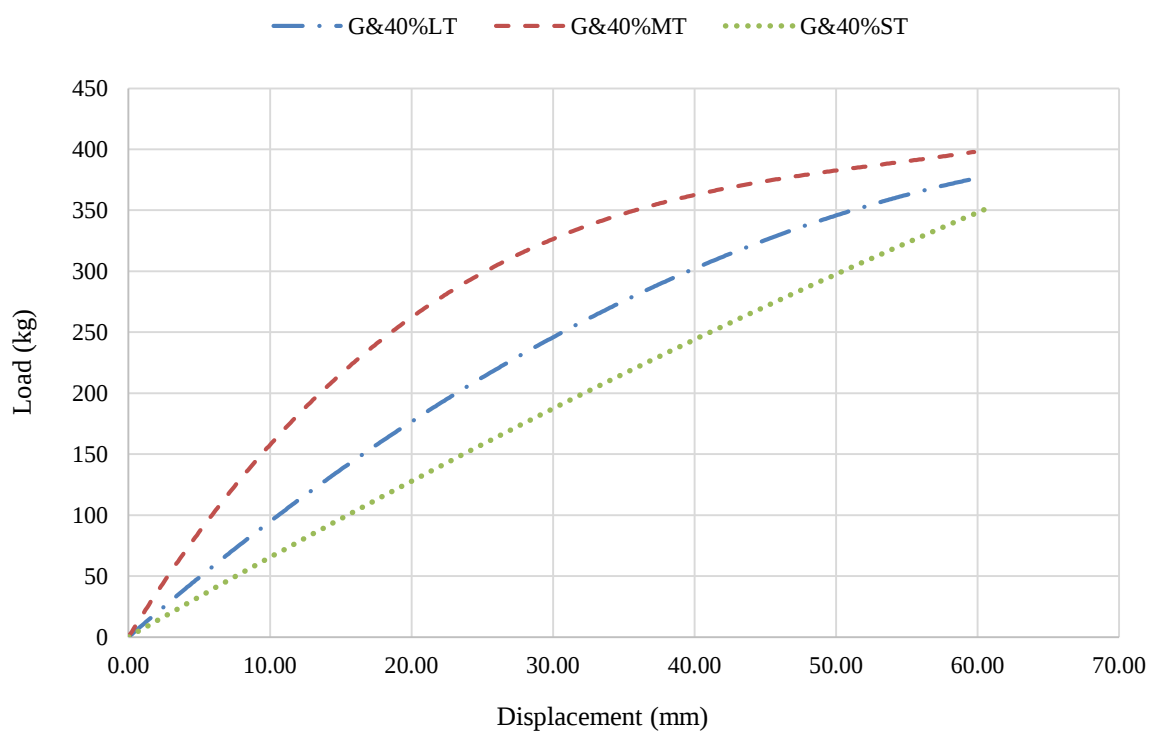
درصد خرده لاستیک	20	40	60	100
بیشترین بار تحملی خرده لاستیک سایز درشت (kg)	360	390	290	225
بیشترین بار تحملی خرده لاستیک سایز متوسط (kg)	368	409	300	276
بیشترین بار تحملی خرده لاستیک سایز ریز (kg)	287	365	243	189

شکل (۴-۲۳) الی (۴-۲۶) نمودارهای مقایسه‌ای نشست-بار ستون شنی با درصدهای اختلاط ۲۰، ۴۰،

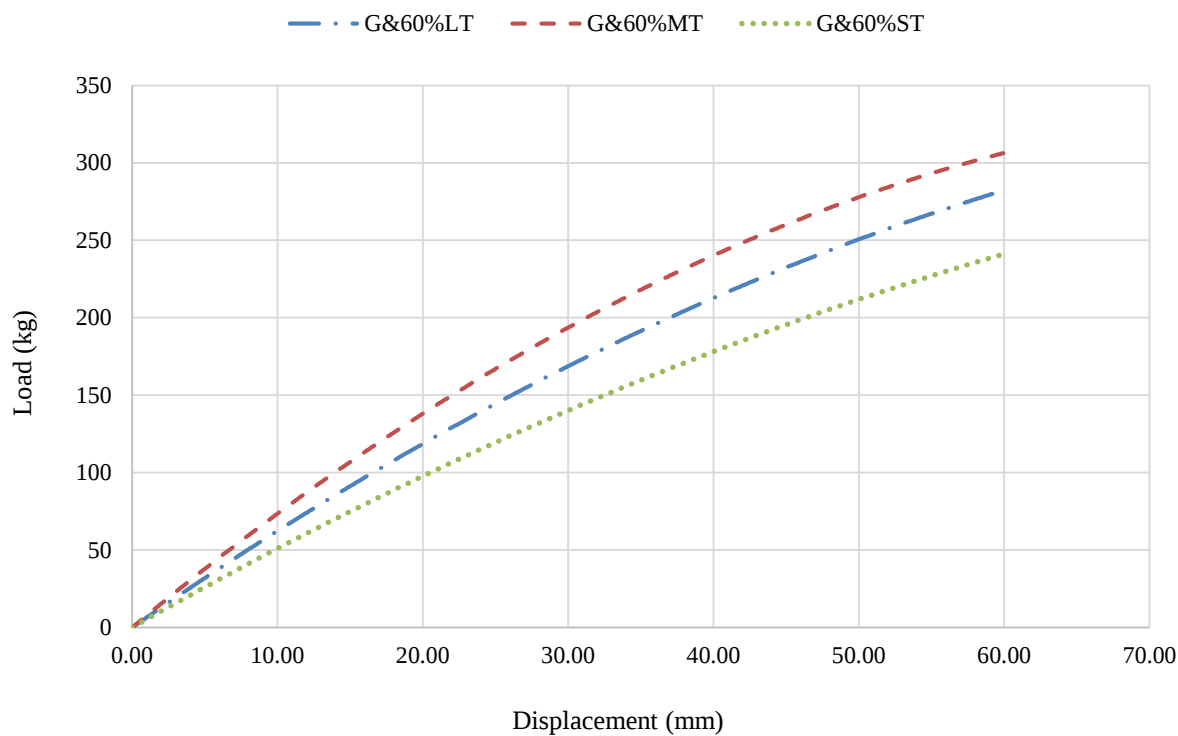
۶۰ و ۱۰۰ خرده لاستیک و با سه سایز ریز، متوسط و درشت ارائه شده است.



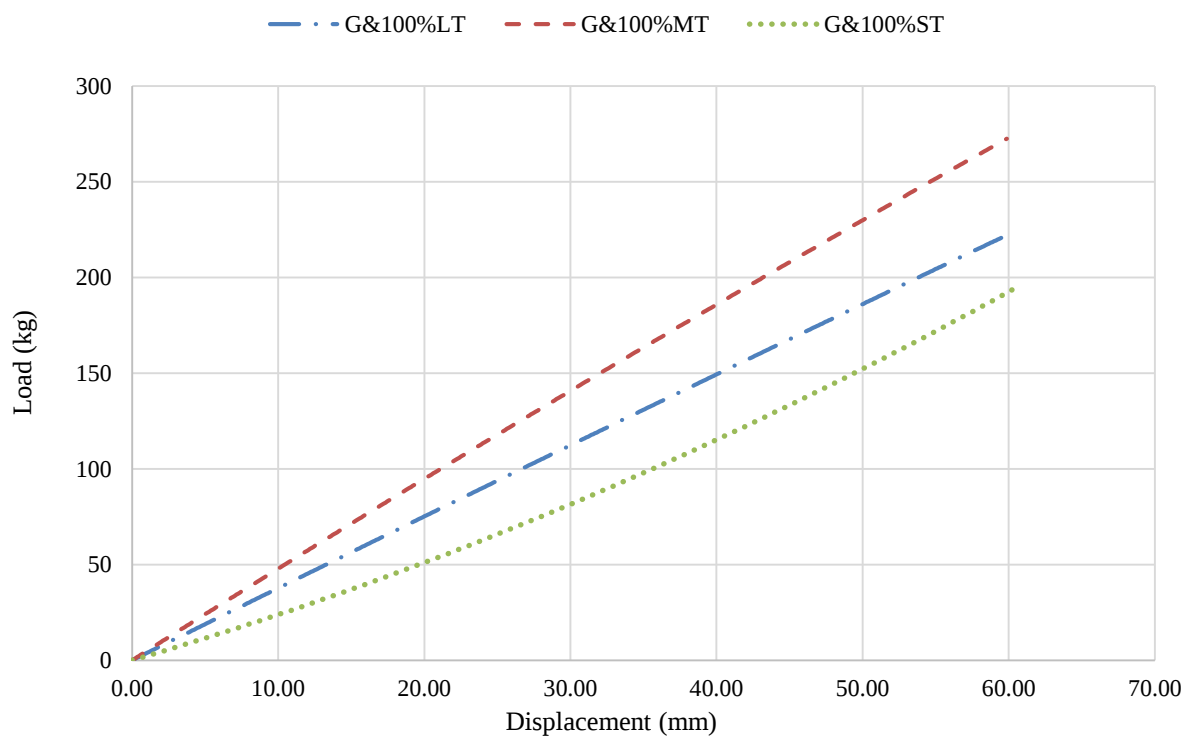
شکل (۴-۲۳) نمودار مقایسه نشست- بار ستون شنی با ۲۰٪ خرده لاستیک



شکل (۴-۲۴) نمودار مقایسه نشست- بار ستون شنی با ۴۰٪ خرده لاستیک



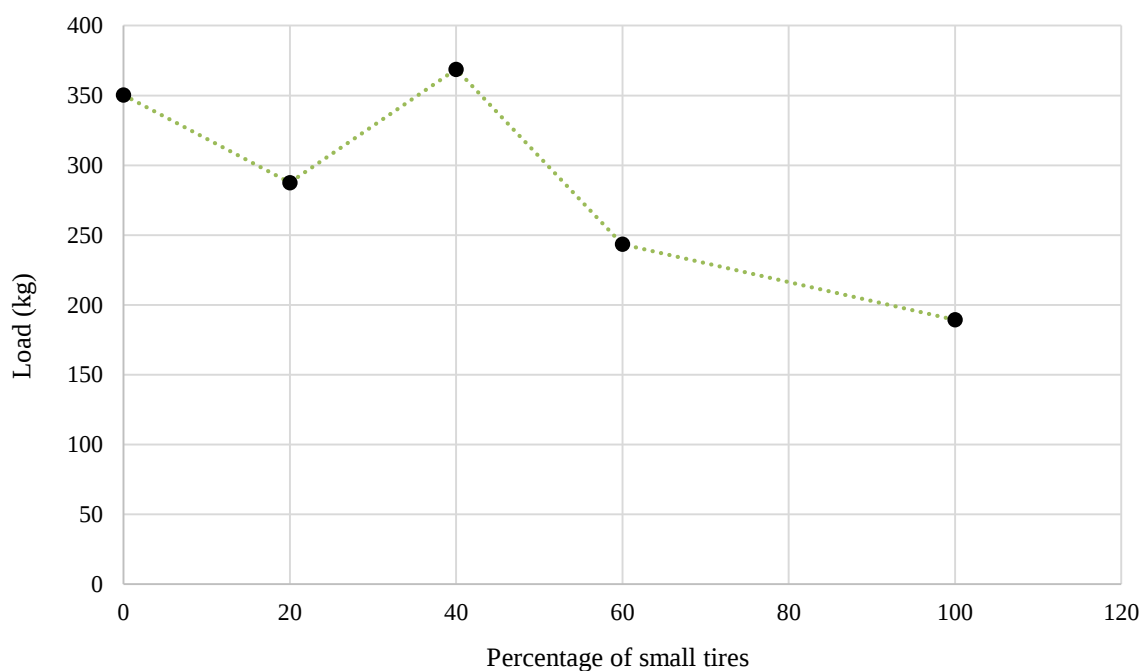
شکل (۴-۲۵) نمودار مقایسه نشست- بار ستون شنی با ۶۰٪ خرده لاستیک



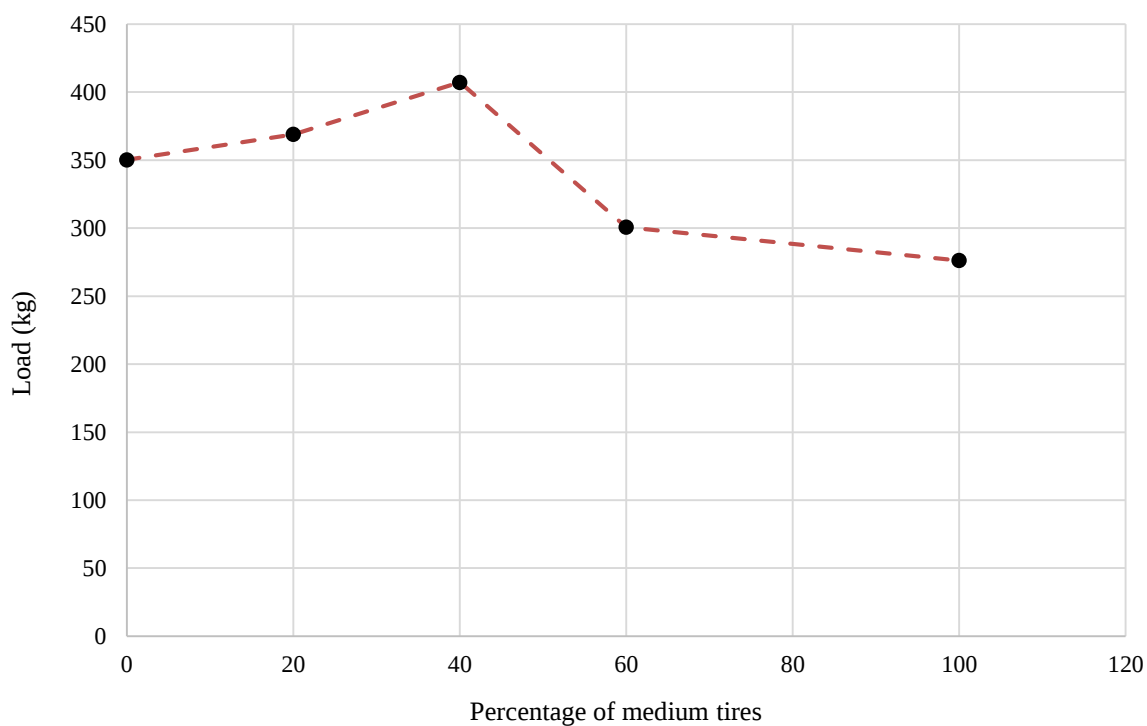
شکل (۴-۲۶) نمودار مقایسه نشست- بار ستون شنی با ۱۰۰٪ خرده لاستیک

همانطور که در جداول و اشکال بالا نشان داده شده است، حداکثر نیروی تحملی توسط ستون شنی با افزودن ۲۰ درصد خرده لاستیک، سایز متوسط و درشت افزایش پیدا کرد ولی در خرده لاستیک سایز ریز کاهش یافت و در ادامه با افزودن بیشتر خرده لاستیک به ستون شنی و رساندن آن به مقدار ۴۰ درصد حجمی، نیروی تحملی در هر سه سایز خرده لاستیک با الگوی حدوداً یکسان افزایش پیدا نمود به طوری که درصد بهینه خرده لاستیک در این پژوهش ۴۰ درصد می باشد. سپس با افزایش خرده لاستیک و رساندن درصد حجمی آن به ۶۰ درصد درمی یابیم که نیروی تحملی ستون شنی به طور محسوسی کاهش می یابد و این روال ادامه دارد. همان طور که پیداست درصد بهینه خرده لاستیک در این آزمایش ها ۴۰٪ می باشد و با افزودن خرده لاستیک بیش از این مقدار به مخلوط، به علت کاهش رفتار اصطکاکی دانه های شن با یکدیگر رفتار مصالح به سمت مصالح لاستیکی رفته و این مسئله باعث کاهش ظرفیت باربری می شود.

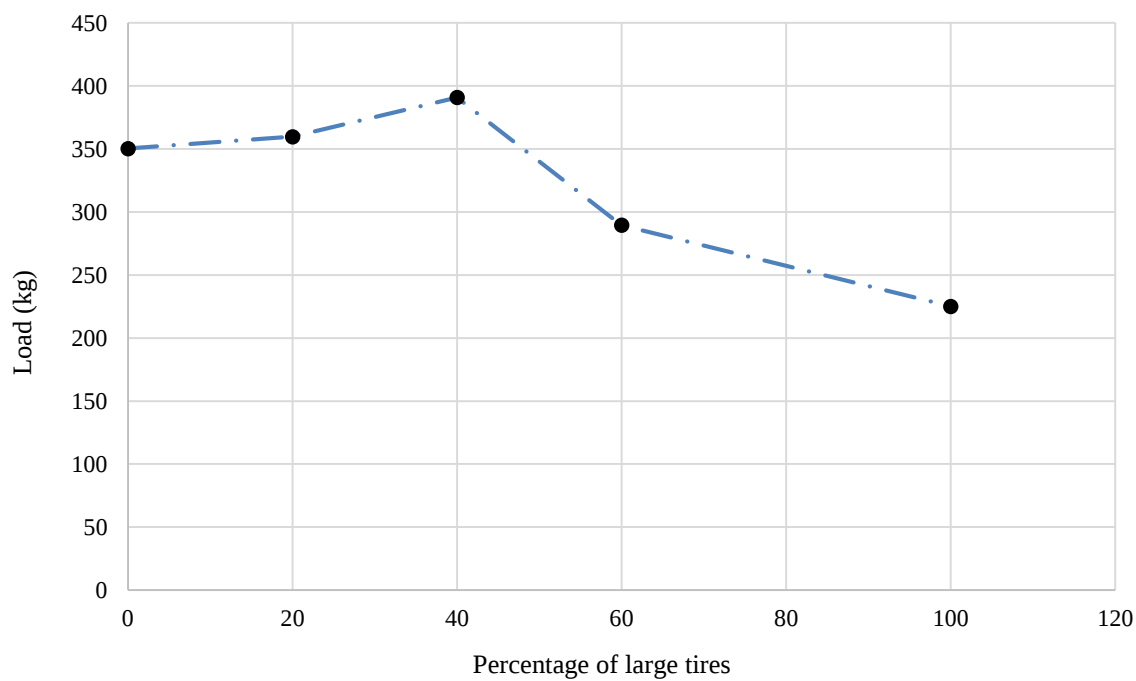
در اشکال (۲۷-۴) الی (۲۹-۴) نمودار تغییرات ظرفیت باربری ستون شنی دارای خرده لاستیک را در سه سایز نمایش داده شده است.



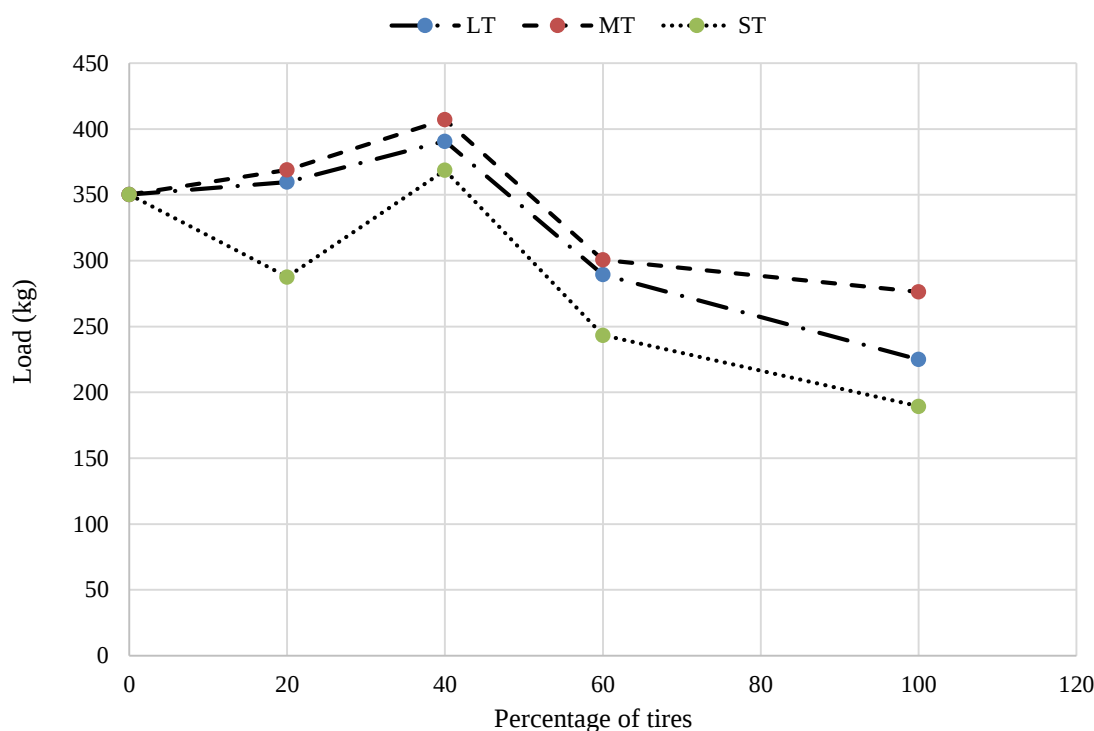
شکل (۲۷-۴) نمودار تغییرات ظرفیت باربری ستون شنی دارای خرده لاستیک سایز ریز



شکل (۴-۲۸) نمودار تغییرات ظرفیت باربری ستون شنی دارای خرده لاستیک سایز متوسط



شکل (۴-۲۹) نمودار تغییرات ظرفیت باربری ستون شنی دارای خرده لاستیک سایز درشت



شکل (۴-۳) نمودار مقایسه تغییرات ظرفیت باربری ستون شنی دارای خرده لاستیک در سه سایز

در شکل (۴-۳) نمودار مقایسه تغییرات ظرفیت باربری ستون شنی دارای خرده لاستیک در سه سایز نمایش داده شده و نتایج زیر از منحنی‌های نشان داده شده حاصل می‌شوند:

۱- همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزودن خرده لاستیک تا ۴۰ درصد به مخلوط شاهد افزایش ظرفیت باربری می‌باشیم که مقدار بیشینه ظرفیت باربری در ۴۰ درصد خرده لاستیک مشاهده می‌شود. درصد بهینه خرده لاستیک در تحقیق‌های گوناگون به ویژگی مصالح و نوع آزمایشات بستگی داشته ولی ازجمله محققینی که به درصد بهینه حدوداً مشابه رسیده‌اند گاتلندی [۴۷] با درصد بهینه ۳۴ درصد و ردی با درصد بهینه‌ی بین ۳۰ الی ۴۰ درصد را گزارش کرده‌اند و این می‌توان به تحقیقات زوربرگ و همچنین وینات و سینق نیز اشاره نمود.

۲- در دو سایز خرده لاستیک متوسط و درشت درصد بهینه خرده لاستیک ۴۰ درصد می‌باشد که به ترتیب حدود ۱۷ درصد و ۱۱ درصد میزان ظرفیت باربری را نسبت به حالت بدون خرده لاستیک افزایش یافته ولی در خرده لاستیک سایز ریز این افزایش مقدار ناچیز ۴ درصد می‌باشد و چون در اختلاط ۲۰ درصد این سایز شاهد کاهش میزان ظرفیت باربری را نسبت به حالت

بدون خرده لاستیک هستیم می‌توان نتیجه گرفت که خرده لاستیک سائز ریز تأثیر چشمگیری در افزایش ظرفیت باربری را دارا نمی‌باشد.

۳- همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود، ستون شنی ۴۰ درصد خرده لاستیک سائز متوسط بهترین تأثیر در افزایش ظرفیت باربری نسبت به حالت بدون خرده لاستیک را دارا می‌باشد و خرده لاستیک سائز متوسط بهینه‌ترین سائز خرده لاستیک در این تحقیق می‌باشد.

۴- به کارگیری و استفاده از ۴۰ درصد حجمی خرده لاستیک به جای مصالح ستون شنی در پروژه‌ها باعث کاهش لاستیک‌های فرسوده در محیط‌زیست و همچنین کاهش هزینه‌های پروژه خواهد شد درحالی‌که این کار باعث افزایش ظرفیت باربری نیز می‌شود.

۵- همان‌طور که در شکل‌های (۴-۱۷)، (۴-۱۸)، (۴-۱۹) مشاهده می‌گردد، با افزایش درصد خرده لاستیک در مخلوط نمودارها رفته‌رفته خطی شده و حتی در نمودارهای ۱۰۰ درصد خرده لاستیک سائز ریز شاهد انحنای کوچکی رو به بالا هستیم که این امر نشان‌دهنده‌ی کرنش سخت‌شوندگی می‌باشد که افزایش پیدا می‌کند.

۴-۳-۴- ارزیابی اثر درصدهای اختلاط خرده لاستیک بر ظرفیت باربری

در ۲۰ و ۴۰ میلی‌متر نشست ستون شنی

به‌طور خلاصه نتایج حاصل از آزمایشات مدل‌سازی فیزیکی در ۲۰ و ۴۰ میلی‌متر نشست در جداول (۴-۷) و (۴-۸) نمایش داده شده است.

جدول (۷-۴) نتایج آزمایش مدل سازی فیزیکی بزرگ مقیاس در ۲۰ میلی متر نشست

ردیف	نام اختصاری آزمایش	سایز خرده لاستیک	درصد اختلاط خرده لاستیک	حداکثر نیرو وارد بر ستون شنی (kg)	نسبت ظرفیت باربری ستون شنی حاوی خرده لاستیک به ظرفیت باربری ستون شنی خالص
1	G	سایز ریز	0	147	1
2	G&20%ST		20	145	0.98
3	G&40%ST		40	146	0.99
4	G&60%ST		60	100	0.68
5	G&100%ST		100	50	0.34
6	G	سایز متوسط	0	147	1
7	G&20%MT		20	220	1.49
8	G&40%MT		40	260	1.76
9	G&60%MT		60	141	0.95
10	G&100%MT		100	94	0.63
11	G	سایز درشت	0	147	1
12	G&20%MT		20	180	1.22
13	G&40%MT		40	188	1.27
14	G&60%MT		60	116	0.78
15	G&100%MT		100	73	0.49

جدول (۴-۸) نتایج آزمایش مدل سازی فیزیکی بزرگ مقیاس در ۴۰ میلی متر نشست

ردیف	نام اختصاری آزمایش	سایز خرده لاستیک	درصد اختلاط خرده لاستیک	حداکثر نیرو وارد بر ستون شنی (kg)	نسبت ظرفیت باربری ستون شنی حاوی خرده لاستیک به ظرفیت باربری ستون شنی خالص
1	G	سایز ریز	0	247	1
2	G&20%ST		20	222	0.89
3	G&40%ST		40	224	0.91
4	G&60%ST		60	174	0.7
5	G&100%ST		100	116	0.46
6	G	سایز متوسط	0	247	1
7	G&20%MT		20	319	1.29
8	G&40%MT		40	375	1.51
9	G&60%MT		60	237	0.95
10	G&100%MT		100	183	0.74
11	G	سایز درشت	0	247	1
12	G&20%MT		20	263	1.06
13	G&40%MT		40	282	1.14
14	G&60%MT		60	221	0.89
15	G&100%MT		100	150	0.6

همان‌طور که در جداول (۷-۴) و (۸-۴) مشاهده می‌گردد درصد بهینه خرده لاستیک در نشست ۲۰ و ۴۰ میلی‌متر همانند نشست ۶۰ میلی‌متر در اختلاط ۴۰ درصد رخ داده است و خرده لاستیک سائز متوسط بهینه‌ترین سائز خرده لاستیک می‌باشد.

در این تحقیق بهینه‌ترین نسبت ظرفیت باربری ستون شنی حاوی خرده لاستیک به ظرفیت باربری ستون شنی خالص، اختلاط ۴۰ درصد خرده لاستیک سائز متوسط در نشست ۲۰ میلی‌متر می‌باشد که این نسبت برابر ۱/۷۶ است. و این نسبت در ۴۰ میلی‌متر نشست برابر ۱/۵۱ و در ۶۰ میلی‌متر نشست برابر ۱/۱۷ می‌باشد. این روند نشان می‌دهد که تأثیر خرده لاستیک بر ظرفیت باربری در نشست‌های کم بسیار بالا می‌باشد و هر چه میزان نشست افزایش پیدا کند نسبت ظرفیت باربری ستون شنی حاوی خرده لاستیک به ظرفیت باربری ستون شنی خالص نیز روند کاهشی پیدا می‌کند.

۴-۴-۴- بررسی خطاهای مؤثر در نتایج آزمایش مدل‌سازی فیزیکی

بزرگ‌مقیاس

در تحقیقات و مطالعات آزمایشگاهی چه در ساخت نمونه چه در بارگذاری‌ها و برداشت اطلاعات، خطاهایی مؤثر می‌باشد که گاهی ناچیز و گاهی قابل توجه می‌باشند. در آزمایش مدل‌سازی فیزیکی بزرگ‌مقیاس خطاهای زیر دخیل می‌باشد که با بالا بردن دقت فردی و گاهی تکرار آزمایشات سعی بر کم کردن این خطاها شده است:

- ۱- با توجه به اینکه خرده لاستیک وزن کمتری نسبت به شن دارد، در هنگام اختلاط و ساخت نمونه حاوی خرده لاستیک باید دقت کافی برای اختلاط این مصالح در این تحقیق را داشت تا اختلاط به‌صورت یکنواخت صورت گیرد و در صورت عدم ناهم‌پاشی نمونه‌ها در اختلاط باعث به وجود آمدن خطا در نتایج می‌شود.

۲- در هنگام ساخت نمونه و عمل تراکم توسط میله تراکم، باید تراکم ستون شنی و ماسه در

همه‌ی نمونه‌ها به‌طور مساوی و برابر صورت گیرد.

۳- با توجه به اینکه عمل تراکم ستون شنی و ماسه به‌صورت لایه‌ای و ضربه صورت انجام شده است،

باید در نظر داشت که اثر انرژی تراکمی لایه‌های بالایی می‌تواند منجر به تراکم غیریکنواخت

لایه‌ها شود.

۴- به علت استفاده از لوله پلیکا به‌منظور ساخت ستون شنی، باید به این نکته توجه داشت که

اصطکاک ناچیزی بین مصالح و لوله وجود خواهد داشت که هنگام بیرون کشیدن لوله از خاک

پیرامون روی نتایج تأثیر خواهد داشت.

۵- لوله پلیکا ای که برای ساخت ستون شنی در ماسه فیروزکوه دفن می‌شود باید به‌صورت تراز

باشد و هر لایه‌ای که ماسه اطراف لوله ریخته و ماسه متراکم می‌شود باید از تراز بودن لوله

اطمینان حاصل نمود.

۶- صفحه‌ی فلزی دایره‌ای که برای بارگذاری روی سطح ستون قرار می‌گیرد باید در مرکز ستون

قرارگیرد تا هنگام بارگذاری، بار دقیقاً بر روی ستون شنی اعمال شود.

۴-۴-۵- تکرارپذیری نتایج آزمایش مدل‌سازی فیزیکی بزرگ‌مقیاس

در این مطالعه با توجه به حجم بالای مدل‌سازی فیزیکی، جهت مشاهده شکم‌دادگی ستون شنی

روش‌های گوناگونی همچون استفاده از انواع چسب‌ها، رزین‌ها، درصدهای اختلاط گوناگون آب و سیمان

امتحان گردید و همچنین جهت تزریق دوغاب سیمان یک مخزن دوغاب سیمان ساخته شد که با کمک

گرفتن از پمپ باد، بتوان دوغاب با فشار هوا بین دانه‌های ستون شنی انتقال یابد که متأسفانه بعد

چندین ماه تلاش نتیجه مطلوب کسب نگردید.

برای اطمینان از صحت و مطابقت نتایج با یکدیگر تعدادی از آزمایش‌ها تکرار شده‌اند. همچنین آزمایش

مربوط به شن خالص به دلیل اینکه مبنای مقایسه می‌باشد و اهمیت بالایی نسبت به سایر آزمایش‌ها برخوردار می‌باشد، سه بار آزمایش تکرار شد تا نتایج با یکدیگر مطابقت قابل قبولی داشته باشند. نکته قابل توجه اینکه در هر مرحله نتایج با یکدیگر مقایسه صورت می‌گرفت هرکجا که روند طی شده در آزمایش‌ها با یکدیگر تطابق نداشتند، آزمایش‌ها تکرار شد تا به نتیجه واقعی دست پیدا کنیم.

۴-۵- مقایسه نتایج مطالعه حاضر با نتایج سایر محققین

در سال ۲۰۰۵ گاتلند و همکارانش [۴۷] طی انجام ۹ سری آزمایش CD بر روی خرده لاستیک و بررسی اثرات خرده لاستیک بر روی رفتار تنش - کرنش مخلوط‌های گوناگون مطالعه کردند که به این نتیجه رسیدند که درصد اختلاط خرده لاستیک تأثیر قابل توجهی بر روی مقاومت برشی دارد. همچنین آن‌ها برای رسیدن به مقاومت برشی حداکثر، درصد اختلاط ۳۴ درصد را پیشنهاد کردند که در این تحقیق با انجام آزمایشات برش مستقیم جعبه بزرگ روی درصدهای گوناگون خرده لاستیک، میزان درصد اختلاط بهینه با مشخصات مصالح ارائه در فصول قبل ۴۰ درصد به دست آمده است.

در سال ۲۰۲۰ ژونگنیان یانگ و همکاران [۵۴] در یک مطالعه مروری به بررسی پیشرفت جدید فناوری خاک تقویت شده با لاستیک در سال‌های اخیر پرداختند و روش‌ها و اثرات تقویت کنندگی خرده لاستیک و لاستیک‌های فرسوده را در خاک‌های گوناگون و از جنبه‌های مختلف بررسی نمودند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که ظرفیت باربری و مقاومت برشی خاک بهسازی شده با لاستیک، بخصوص در شن و ماسه در درجات مختلف بهبود یافته است. برای شن و ماسه، افزودن لاستیک به دلیل کشش و انعطاف خوب می‌تواند جابجایی بین ذرات ماسه را مهار کند و انسجام خاصی ایجاد نماید به طوری که خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماسه و شن را بهبود بخشد. همچنین در خاک لاستیکی منبسط شده، لاستیک می‌تواند ذرات خاک را احاطه کرده و ویژگی‌های انبساط و انقباض خاک گسترده را کاهش دهد. وقتی ذرات خرده لاستیک با اندازه ذرات مشابه به خاک اضافه می‌شوند، یک ساختار شبکه به هم پیوسته برای

افزایش انسجام ایجاد می‌شود. از این رو درصد اختلاط خرده لاستیک عامل مهمی در خاک تقویت‌شده با خرده لاستیک است که در این پایان‌نامه مشاهده نمودیم با افزودن خرده لاستیک به مصالح ستون شنی، شاهد افزایش ظرفیت باربری ستون شنی بودیم بطوریکه در ۴۰ درصد اختلاط خرده لاستیک ساینده متوسط با شن شاهد بهینه‌ترین حالت اختلاط جهت افزایش ظرفیت باربری و بهبود رفتار ستون شنی توسط دستگاه مدل‌سازی فیزیکی بزرگ‌مقیاس با خصوصیات مصالح ذکرشده در فصول قبل بودیم.

فصل ۵:

جمع‌بندی و پیشنهادات

۵-۱- مقدمه

در این مطالعه با مدل‌سازی فیزیکی ستون‌های شنی مخلوط شده با درصد‌ها و سایزهای مختلف خرده لاستیک در آزمایشگاه، تأثیر این اختلاط بر رفتار و ظرفیت باربری ستون‌های شنی و یافتن درصد اختلاط بهینه خرده لاستیک موردبررسی قرار گرفت. در مرحله نخست آزمایشات اولیه به‌منظور شناخت خصوصیات مصالح مورداستفاده صورت گرفت که این آزمایشات اولیه شامل آزمایش تعیین وزن مخصوص حداقل و حداکثر، چگالی دانه‌های جامد و آزمایش دانه‌بندی به‌منظور پی بردن به توزیع اندازه دانه‌ها در نمونه خاک و غیره می‌باشد و در مرحله دوم جهت یافتن میزان چسبندگی و اصطکاک داخلی آزمایش‌هایی توسط دستگاه برش مستقیم جعبه بزرگ صورت گرفت و در پایان به‌منظور شبیه‌سازی شرایط بارگذاری و تأمین شرایط مدل‌سازی فیزیکی با مقیاس نیمه واقعی، از یک دستگاه مدل‌سازی فیزیکی بزرگ‌مقیاس که قابلیت بارگذاری‌های استاتیکی، دینامیکی دارد و مورداستفاده قرار گرفت. نتایج آن‌ها در قالب نمودار و جدول ارائه گردید و سپس نتایج مورد تحلیل قرار گرفت.

۵-۲- نتیجه‌گیری

تجمع لاستیک‌های فرسوده یک مشکل زیست‌محیطی بزرگ در جهان می‌باشد که سوزاندن و یا دفن آن‌ها باعث نفوذ مواد شیمیایی و سمی به محیط‌زیست می‌شود که این موضوع یک تهدید جدی برای محیط‌زیست محسوب می‌شود همچنین به دلیل افزایش قیمت زمین‌های مرغوب جهت ساخت‌وساز، مهندسان ناچار به بهسازی زمین‌های دارای خاک‌های نامرغوب شده‌اند. در این میان استفاده از خرده لاستیک در بهسازی خاک به دلیل وزن کم، هزینه پایین و از مهم‌تر جنبه‌های زیست‌محیطی موردتوجه بسیاری از محققین قرار گرفته است تا به کمک این روش بخشی از مشکلات زیست‌محیطی مرتفع شود و همچنین هزینه بهسازی خاک را به علت استفاده از مواد دورریز و فرسوده کاهش می‌یابد. در این

مطالعه با استفاده آزمایش برش مستقیم جعبه بزرگ و مدل‌سازی فیزیکی بزرگ‌مقیاس به بررسی تأثیر استفاده از خرده لاستیک جهت افزایش ظرفیت باربری ستون شنی با سه سایز خرده لاستیک و درصد‌های مختلف خرده لاستیک پرداخته شد و نتایج آزمایش‌ها نشان داد ترکیب خرده لاستیک با شن باعث بهبود پارامترهای مقاومت برشی و ظرفیت باربری و همچنین بهبود رفتار ستون شنی تا درصد بهینه اختلاط می‌شود که نتایج دقیق‌تر به‌دست‌آمده از این پژوهش ارائه شده است:

- در آزمایش برش مستقیم جعبه بزرگ هنگامی که تنش سربار افزایش پیدا کند، مقاومت نهایی نیز افزایش پیدا خواهد کرد که با توجه به اینکه بست بین دانه‌ها در مقاومت نهایی تأثیر می‌گذارد، با افزایش تنش سربار، قفل‌شدگی و در نتیجه مقاومت نهایی افزایش می‌یابد.
- افزایش خرده لاستیک باعث افزایش مداوم چسبندگی در تمام سایزهای خرده لاستیک می‌شود و همچنین تأثیر خرده لاستیک بر اصطکاک داخلی به این صورت می‌باشد که تا مقدار بهینه خرده لاستیک روند افزایشی داشته و سپس مقدار آن کاهش می‌یابد هرچند به دلیل دانه‌ای بودن مصالح مقدار مقادیر حاصل شده ناچیز و قابل صرف نظر کردن می‌باشد.
- مقاومت برشی خاک تقویت‌شده با خرده لاستیک در درجات مختلف بهبود یافته است. افزودن خرده لاستیک به دلیل خاصیت ارتجاعی، می‌تواند ذرات شن و ماسه را مهار کند، انسجام خاصی را بین ذرات به وجود آورد و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی شن را به‌طور مؤثری بهبود بخشد.
- استفاده از خرده لاستیک راهی جدید برای بازیابی و استفاده مجدد از لاستیک‌های فرسوده را فراهم می‌کند زیرا وزن لاستیک و خرده لاستیک کم است و می‌توان از آن به‌عنوان مصالح پرکننده سبک استفاده نمود تا پس از مخلوط شدن با خاک‌های مختلف، میزان نشست را کاهش دهد. همچنین لاستیک دارای قابلیت کشش زیاد و ظرفیت جذب انرژی خوبی می‌باشد.

- جهت مقایسه نتایج آزمایشگاهی دستگاه مدل‌سازی فیزیکی بزرگ‌مقیاس از یک نمونه ستون شنی خالص استفاده گردید و نتایج ستون شنی خالص نشان داد که ستون شنی تا رسیدن به جابه‌جایی ۱۷ میلی‌متر تقریباً ۱۴۰ کیلوگرمی نیرو را تجربه می‌کند سپس به علت جابه‌جا شدن سنگ‌دانه‌های ستون شنی، میزان افزایش نرخ بار کاهش یافته و نمودار با شیب ملایم افزایش می‌یابد ولی در کل برآیند نمودار به صورت خطی می‌باشد و ستون شنی حداکثر ۳۵۰ کیلوگرم بار در ۶۰ میلی‌متر نشست بار گرفته است.
- ظرفیت باربری ستون شنی با افزودن ۴۰ درصد حجمی خرده لاستیک سایز ریز حدود ۴ درصد افزایش پیدا کرده و در مابقی اختلاط‌های این سایز به دلیل ریز بودن ابعاد خرده لاستیک و تجمع آن‌ها در انتهای ستون شنی شاهد کاهش ظرفیت باربری بودیم.
- حداکثر نیروی تحملی توسط ستون شنی با افزودن ۲۰ درصد خرده لاستیک، سایز متوسط و درشت افزایش پیدا کرد ولی در خرده لاستیک سایز ریز کاهش یافت و در ادامه با افزودن بیشتر خرده لاستیک به ستون شنی و رساندن آن به مقدار ۴۰ درصد حجمی، نیروی تحملی در هر سه سایز خرده لاستیک با الگوی حدوداً یکسان افزایش پیدا نمود به طوری که درصد حجمی بهینه خرده لاستیک در این مطالعه ۴۰ درصد در سه سایز خرده لاستیک می‌باشد.
- درصد بهینه خرده لاستیک در این آزمایش‌ها ۴۰ درصد بود و با افزودن خرده لاستیک بیش از این مقدار به مخلوط، به علت کاهش رفتار اصطکاکی دانه‌های شن با یکدیگر رفتار مصالح به سمت مصالح لاستیکی رفته و این مسئله باعث کاهش ظرفیت باربری می‌شود.
- در دو سایز خرده لاستیک متوسط و درشت درصد بهینه خرده لاستیک ۴۰ درصد می‌باشد که به ترتیب حدود ۱۷ و ۱۱ درصد میزان ظرفیت باربری را نسبت به حالت بدون خرده لاستیک افزایش یافته ولی در خرده لاستیک سایز ریز این افزایش مقدار ناچیز ۴ درصد می‌باشد و چون در اختلاط ۲۰ درصد این سایز شاهد کاهش میزان ظرفیت باربری نسبت به حالت بدون خرده

لاستیک بودیم می‌توان نتیجه گرفت که خرده لاستیک سائز ریز تأثیر چشمگیری در افزایش ظرفیت باربری را دارا نمی‌باشد.

- ستون شنی ۴۰ حاوی درصد خرده لاستیک سائز متوسط بهترین تأثیر در افزایش ظرفیت باربری نسبت به حالت بدون خرده لاستیک را دارا می‌باشد بطوریکه در ۶۰ میلی‌متر نشست ظرفیت باربری را حدود ۱۷ درصد افزایش یافت.

- به‌کارگیری و استفاده از ۴۰ درصد حجمی خرده لاستیک سائز متوسط به‌جای مصالح ستون شنی در پروژه‌ها علاوه بر اینکه باعث کاهش لاستیک‌های فرسوده در محیط‌زیست می‌شود، همچنین باعث کاهش هزینه‌های پروژه نیز خواهد شد درحالی‌که این کار باعث افزایش ظرفیت باربری نیز می‌شود.

- با افزایش خرده لاستیک در مخلوط نمودارها رفته رفته خطی شده و حتی در نمودار ۱۰۰ درصد خرده لاستیک سائز ریز شاهد انحنای کمی رو به بالا بودیم که این امر نشان‌دهنده‌ی کرنش سخت‌شوندگی می‌باشد که افزایش پیدا می‌کند.

- درصد بهینه خرده لاستیک در نشست ۲۰ و ۴۰ میلی‌متر همانند نشست ۶۰ میلی‌متر در اختلاط ۴۰ درصد خرده لاستیک سائز متوسط رخ داده است که در ۲۰ میلی‌متر نشست ستون شنی حدود ۷۶ درصد، در ۴۰ میلی‌متر نشست حدود ۵۱ درصد و در ۶۰ میلی‌متر نشست حدود ۱۷ درصد افزایش ظرفیت باربری را شاهد بودیم. این نتیجه نشان می‌دهد تأثیر خرده لاستیک بر ظرفیت باربری در نشست‌های کم بسیار بالا می‌باشد و هر چه میزان نشست افزایش پیدا کند نسبت ظرفیت باربری ستون شنی حاوی خرده لاستیک به ظرفیت باربری ستون شنی خالص نیز روند کاهشی پیدا می‌کند.

۵-۳- پیشنهادات برای تحقیقات آتی

در این تحقیق به ارزیابی رفتار و ظرفیت باربری ستون‌های شنی مخلوط شده با درصد‌ها و سایزهای مختلف خرده لاستیک پرداخته شد و می‌توان در تحقیقات آتی موارد ذیل مورد تحقیق و بررسی قرار گیرد:

- ارزیابی رفتار دینامیکی خاک‌های بهسازی شده با ستون‌های شنی مخلوط شده خرده لاستیک
- ارزیابی ظرفیت باربری ستون‌های شنی مخلوط شده با درصد‌ها و اندازه‌های مختلف خرده شیشه
- ارزیابی رفتار دینامیکی خاک‌های بهسازی شده با ستون‌های شنی مخلوط شده خرده شیشه
- ارزیابی ظرفیت باربری ستون‌های شنی مخلوط شده با درصد‌ها و اندازه‌های مختلف خرده پت‌ها
- ارزیابی رفتار دینامیکی خاک‌های بهسازی شده با ستون‌های شنی مخلوط شده خرده پت‌ها
- ارزیابی ظرفیت باربری ستون‌های شنی مخلوط شده با درصد‌ها و اندازه‌های مختلف خرده لاستیک به همراه ژئوگریدها و یا ژئوسنتتیک‌ها
- ارزیابی رفتار دینامیکی خاک‌های بهسازی شده با ستون‌های شنی مخلوط شده با درصد‌ها و اندازه‌های مختلف خرده لاستیک به همراه ژئوگریدها و ژئوسنتتیک‌ها
- ارزیابی رفتار خاک‌های رسی بهسازی شده با ستون‌های شنی مخلوط شده با خرده لاسیک در دستگاه مدلسازی فیزیکی بزرگ مقیاس

پیوست

پیوست شماره الف: دستگاه برش مستقیم جعبه بزرگ

در دستگاه برش مستقیم جعبه بزرگ، جابه‌جایی‌های قائم و برشی توسط دو سنسور عمودی و افقی به ترتیب با کورس ۵۰ میلی‌متر و دیگری با کورس ۱۰۰ میلی‌متر، و هر دو سنسور دارای دقت ۰/۰۱ میلی‌متر می‌باشد. در این دستگاه تنش برشی توسط یک لودسل^۱ ۱۰ تنی با دقت ۰/۱۵ کیلوگرم-فورس^۲ اندازه‌گیری شده و اطلاعات توسط یک دستگاه دیتالاگر ۸ کاناله به کامپیوتر مرکزی انتقال داده می‌شود شکل (الف-۱).

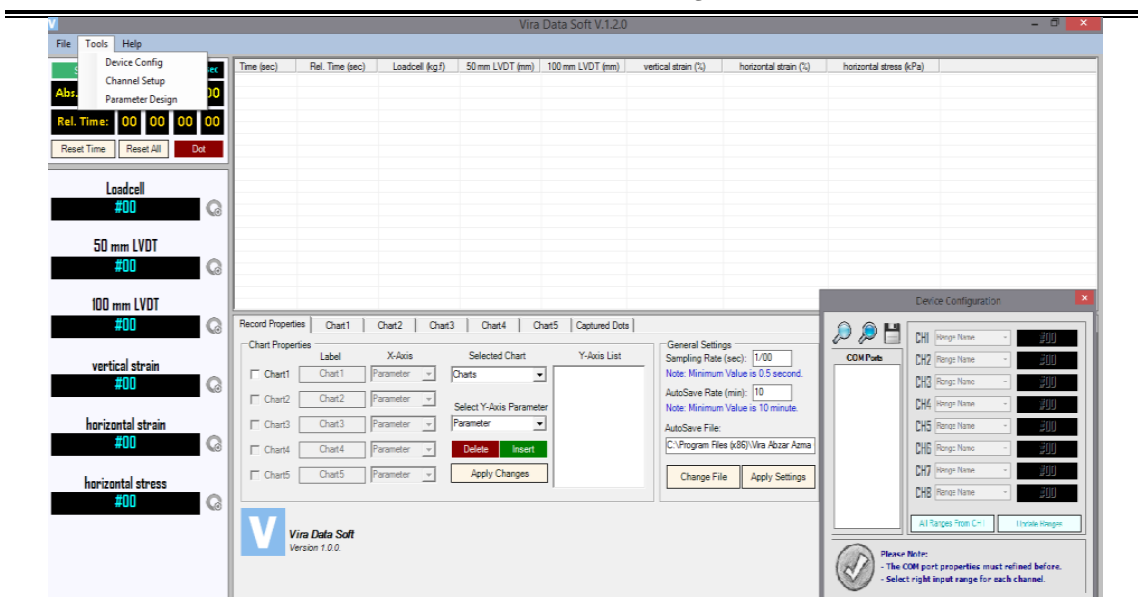


شکل (الف-۱) دیتالاگر و سنسورها

شکل (الف-۲) نرم‌افزار مورد استفاده در کامپیوتر مرکزی vira data soft می‌باشد که توسط شرکت ویرا ابزار آزما برنامه‌نویسی شده است. با استفاده از این نرم‌افزار داده‌های خروجی دستگاه برش مستقیم جعبه بزرگ در کامپیوتر جمع‌آوری و پردازش می‌شوند. نرم‌افزار vira data soft برای هر یک از سنسورها، کانال مجزا تعریف شده که ابتدا در منوی Tools، زیرشاخه‌ی Devise Config شناسایی شده و در زیرشاخه‌ی Channel setup کالیبراسیون سنسور بر روی آن کانال صورت گرفته و پارامترهای مورد اندازه‌گیری نیز در زیرشاخه‌ی Parameter design تعریف شده است. دیتالاگر و نرم‌افزار، امکان ثبت اطلاعات حداکثر با فرکانس ۲ هرتز دارا می‌باشد.

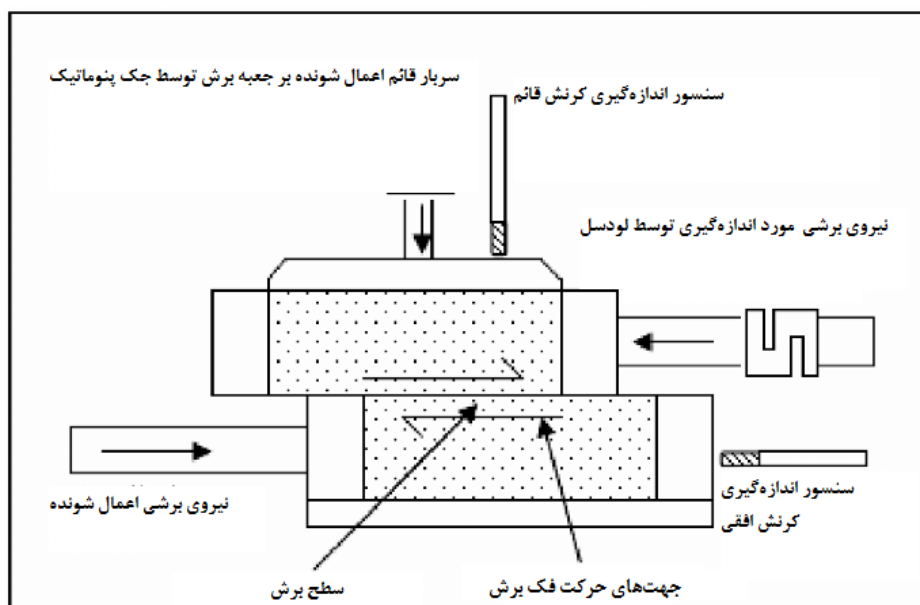
^۱ Load Cell

^۲ Kg.f



شکل (الف-۲) نرم افزار vira data soft

برای درک بهتر از نحوه عملکرد سنسورها، نمای شماتیک جعبه برش و سنسورهای متصل به آن در شکل (الف-۳) نشان داده شده که سنسور افقی با کورس ۱۰۰ میلی متر در راستای حرکت برش، به فک محرک جعبه برش متصل بوده و میزان جابجایی افقی و سنسور دیگری با کورس ۵۰ میلی متر در راستای قائم و در بالای جعبه برش، تغییرات جابجایی قائم نمونه و لودسل ۸۰ تنی S شکل نیز به فک بالایی متصل بوده و نیروی برشی را اندازه گیری می نمایند.

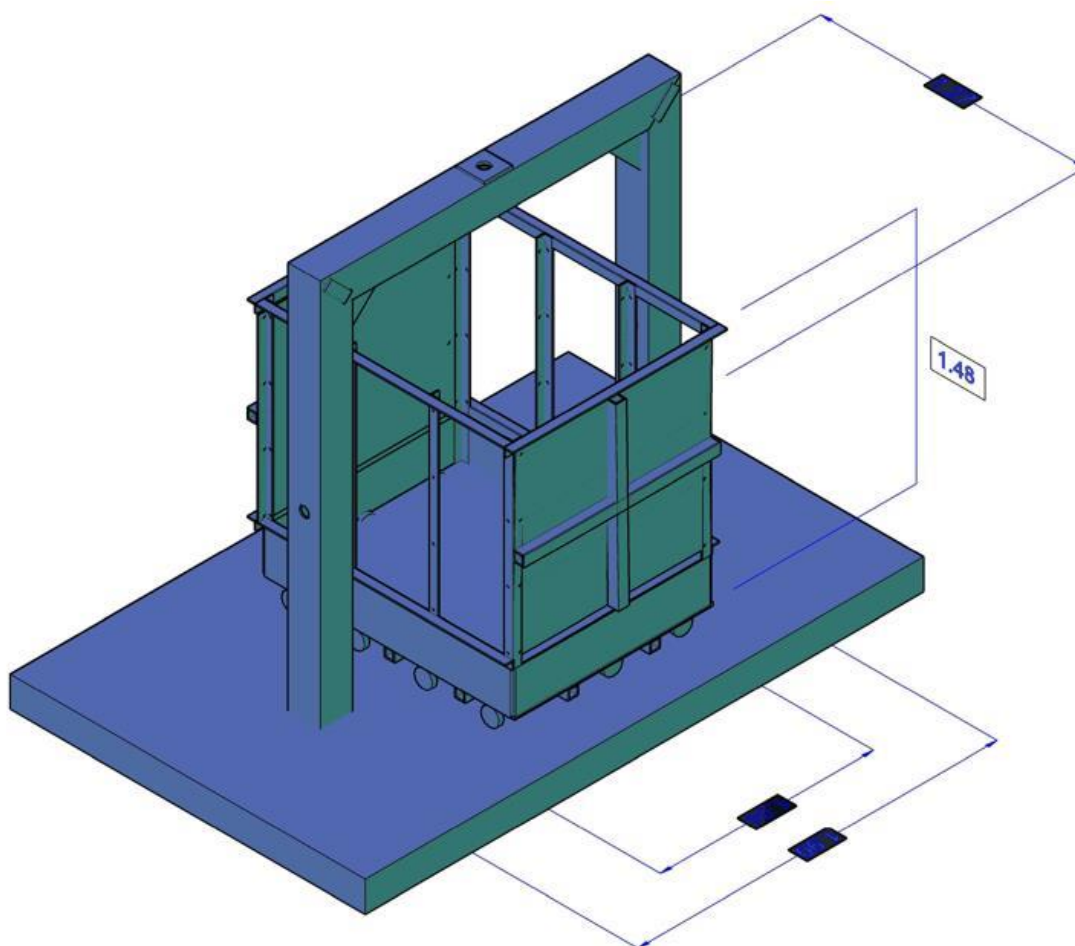


شکل (الف-۳) شماتیک عملکرد دستگاه برش مستقیم جعبه بزرگ

پیوست شماره ب: دستگاه مدلسازی فیزیکی بزرگ مقیاس

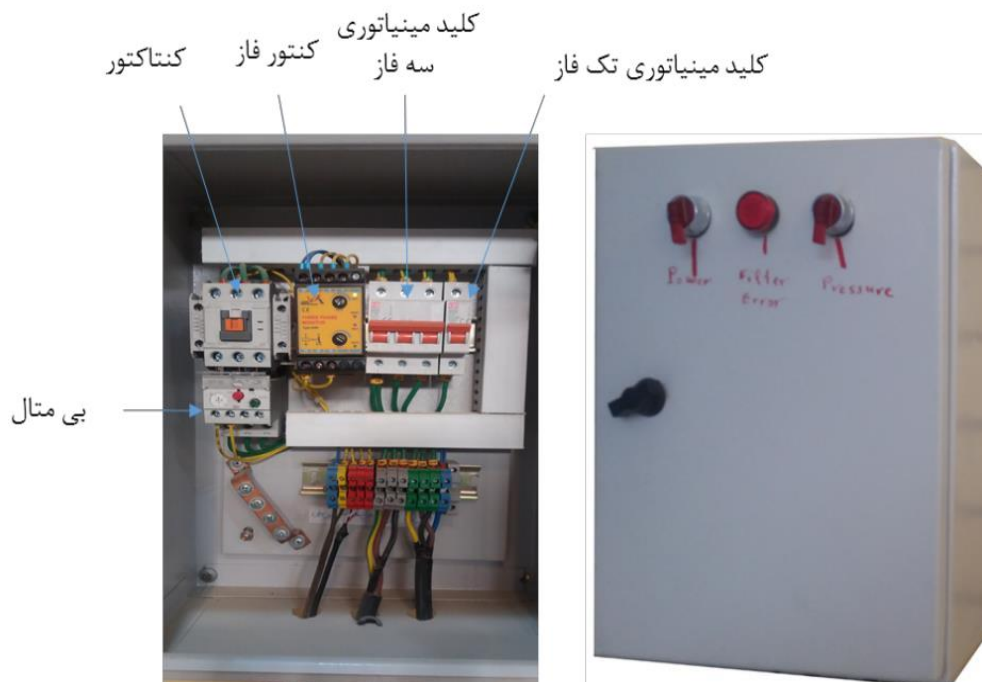
اجزای تشکیل دهنده‌ی دستگاه مدلسازی فیزیکی شامل موارد زیر می‌شود:

۱- محفظه‌ی دستگاه: شکل (ب-۱) محفظه‌ی دستگاه مدلسازی فیزیکی بزرگ مقیاس می‌باشد که دارای قابلیت ساخت نمونه‌های گوناگون جهت بارگذاری می‌باشد. این محفظه به شکل یک مکعب مستطیل با ابعاد $1 \times \frac{1}{2} \times 1$ و ارتفاع ۱/۲۷ متر می‌باشد که از جنس فلز است و در دو سمت آن از پلاکسی گلاس و کف آن به صورت صلب به منظور جلوگیری از هرگونه تغییر شکل ساخته شده است. همچنین محفظه دارای غلتک‌هایی با قابلیت چرخش 360° درجه به منظور جابه‌جایی و سهولت در آماده‌سازی نمونه می‌باشد.



شکل (ب-۱) محفظه‌ی آزمایش و قاب بارگذاری

۲- تابلو برق دستگاه: شکل (ب-۲) تابلو برق دستگاه می‌باشد که وظیفه تأمین و کنترل برق دستگاه را بر عهده دارد. تابلو برق دستگاه دارای یک چراغ هشدار می‌باشد که چراغ وقتی روشن باشد، نشان‌دهنده‌ی این است که میکرو فیلتر دستگاه بسته‌شده، به‌عبارتی دیگر وقتی روغن به درجه کشیفی که در نظر گرفته‌شده برسد، این چراغ روشن می‌شود و دستگاه به‌صورت خودکار سیستم را قطع می‌کند. دو کلید دیگر شامل کلید پاور و کلید فشار وجود دارد که کلید پاور وظیفه روشن و خاموش کردن موتور را بر عهده دارد و کلید فشار، روغن را با فشاری که تنظیم‌شده به مدار بارگذاری انتقال می‌دهد.



شکل (ب-۲) تابلو برق دستگاه و جزئیات

۳- سیستم پاورپک: شکل (ب-۳) سیستم پاورپک دستگاه می‌باشد که وظیفه‌ی تأمین نیرو برای بارگذاری را دارا می‌باشد. این سیستم دارای یک موتور ۱۱ کیلووات سه فاز و یک شیر پروپورشنال می‌باشد که با گنجی که روی آن قرار دارد می‌توان فشار را تنظیم کرد، حداکثر فشار کاری این گیج ۲۰۰ بار می‌باشد. ظرفیت روغن سیستم پاورپک ۱۰۰ لیتر می‌باشد که برای پر کردن آن از محلی که درب باک مانند وجود دارد پر می‌شود. همچنین سیستم پاورپک

دارای فیلترها و میکرو فیلترهایی می‌باشد که میکرو فیلتر دارای دقت ۵ میکرون بوده و یک فیلتر در خط برگشت در نظر گرفته شده که دارای اندیکاتور بوده که اگر این اندیکاتور از ناحیه سبزرنگ به ناحیه قرمز رنگ وارد شود، بیانگر این هست که ذرات ۲۵ میکرون روغن دستگاه از حد مجازش بیشتر شده و باید روغن تعویض شود. همچنین یک دماسنج در قسمت پایین سیستم پاورپیک وجود دارد که وظیفه کنترل دمای روغن را دارا می‌باشد.



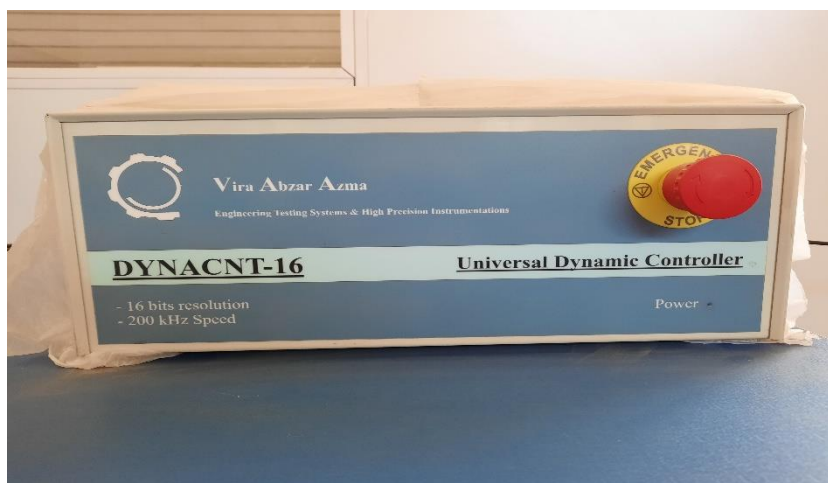
شکل (ب-۳) سیستم پاورپیک

۴- سیستم اکچویاتور: سیستم اکچویاتور در فشار ۲۱۰ بار دارای ظرفیت بارگذاری ۱۰ تن می‌باشد و همچنین در فشار ۱۶۰ بار، ظرفیت بارگذاری ۶ تن دارا می‌باشد. سرووالی که بر روی اکچویاتور نصب شده دارای دبی ۴۰ لیتر بر دقیقه بوده و با استفاده از آن می‌توانیم بارهای هارمونیک سینوسی را به نمونه وارد کنیم. حسگر موجود بر روی اکچویاتور دارای کورس ۱۵ سانتی متر می‌باشد و به صورت مغناطیسی عمل می‌کند. حسگر دارای دقت بسیار بالایی می‌باشد به طوری که خطای آن در یک کورس ۱۵۰ میلی متری دارای خطا ۰/۰۱ میلی متر می‌باشد. لودسل در نظر گرفته در این سیستم به شکل S بوده که ظرفیت کشش و فشار ۱۰ تن را دارا می‌باشد. شکل (ب-۴)



شکل (ب-۴) اجزا سیستم اکچویتور

۵- سیستم جمع‌آوری داده (دیتالاگر): سیستم جمع‌آوری داده شکل (ب-۵)، دارای ۸ کانال ورودی با سرعت داده‌برداری ۲۰۰ کیلوهرتز و با دقت ۱۶ بیت و دارای ۲ کانال خروجی با دقت ۱۶ بیت و سرعت ۲۰۰ کیلوهرتز برای کنترل و فرمان دهی سیستم‌های بارگذاری سیکلی می‌باشد. وظیفه این دستگاه ذخیره داده‌ها می‌باشد که این داده‌ها توسط نرم‌افزار موجود به رایانه انتقال می‌یابد.



شکل (ب-۵) سیستم جمع‌آوری داده (دیتالاگر)

۶- سیستم کامپیوتری و ثبت داده‌ها: سیستم کامپیوتری موجود دارای سرعت بالا پردازش داده‌های دریافتی از نمونه مدل‌سازی شده در محفظه و همچنین دقت بالا می‌باشد که این داده‌ها

به صورت فایل اکسل ذخیره می شود که این امر درصد خطا قرائت را بسیار زیاد نسبت به قرائت دستی کاهش می دهد شکل (ب-۶). این سیستم دارای نرم افزار جامع می باشد که به وسیله ی آن می توان سرعت بارگذاری، نوع بارگذاری (استاتیکی یا دینامیکی)، کالیبره کردن، مقدار نفوذ را در هنگام بارگذاری را به دستگاه مدل سازی فیزیکی بارگذاری بزرگ مقیاس اعمال و تنظیم نمود.



شکل (ب-۶) سیستم کامپیوتری کنترل، قرائت و ثبت داده ها

مراجع

[۱] وحید م، سعیدعسکری ج، نوروزی م، شریعتمداری ن. بررسی تاثیر افزودن خرده لاستیک های فرسوده بر پارامترهای مقاومتی و رفتاری ماسه با استفاده از آزمایش برش مستقیم. کنفرانس بین المللی علوم محیط زیستی، مهندسی و تکنولوژی. ۱۳۹۴؛ ۱-۱۲.

[2] J. Dargay, G. Dermot, and S. Martin, "Vehicle ownership and income growth, worldwide: 1960–2030," *The Energy Journal*, vol. 28, no. 4, pp. 143–170, 2007

[3] T. Edil, H. Pincus and P. Bosscher, "Engineering properties of tire chips and soil mixtures," *Geotechnical Testing Journal*, vol. 17, no. 4, pp. 453–464, 1994

[4] N. Oikonomou and S. Mavridou, "The use of waste tyre rubber in civil engineering works," in *Book: Sustainability of Construction Materials*, pp. 213–238, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 2009.

[5] M. S. Mashiri, J. S. Vinod, M. N. Sheikh, and H.-H. Tsang, "Shear strength and dilatancy behaviour of sand-tyre chip mixtures," *Soils and Foundations*, vol. 55, no. 3, pp. 517–528, 2015.

[6] A. Soltani, A. Deng, A. Taheri, and M. Mirzababaei, "Rubber powder-polymer combined stabilization of south Australian expansive soils," *Geosynthetics International*, vol. 25, no. 3, pp. 304–321, 2018.

[7] P. J. Bosscher, T. B. Edil, and S. Kuraoka, "Design of highway embankments using tire chips," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 123, no. 4, pp. 295–304, 1997.

[8] Y. Liu, *Study on Mechanical Properties of Waste Tire Strips and Bearing Characteristics and Deformation of Reinforced Embankment Slopes*, Shandong University, Jinan, China, 2019.

[9] M. N. Sheikh, S. Mashiri, J. S. Vinod et al., "Shear and compressibility behavior of sand-tire crumb mixtures," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 25, no. 10, pp. 1366–1374, 2013.

[10] Downs, L.A., Humphrey, D.N., Katz, L.E., Rock, C.A., 1996. *Water Quality Effects of Using Tire Chips Below the Groundwater Table*. Thesis, in Civil Engineering.

University of Maine.

[11] Mohajerani, Abbas, et al. "Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review." *Resources, Conservation and Recycling* 155 (2020): 104679.

[12] Edinçliler, Ayşe, Gökhan Baykal, and Altug Saygılı. "Influence of different processing techniques on the mechanical properties of used tires in embankment construction." *Waste Management* 30.6 (2010): 1073-1080.

[13] Dickson TH, Dwyer DF, Humphrey DN (2001) Prototypes tire-shred embankment construction. *Transportation Research Record* 1755, TRB, National Research Council, Washington, DC, pp 160–167

[14] Lemieux, Paul M., and Jeffrey V. Ryan. "Characterization of air pollutants emitted from a simulated scrap tire fire." *Air & Waste* 43.8 (1993): 1106-1115.

[۱۵] خبر گذاری ایسنا. [/https://www.isna.ir/news/99062015383](https://www.isna.ir/news/99062015383)

[۱۶] خداوردی، گزارش تحلیل وضعیت صنعت لاستیک خودرو در سال ۱۳۸۹، دفتر کالاهای غیر فلزی معاونت

کالاهای سرمایه‌ای و خدمات زیر بنایی سازمان حمایت مصرف کنندگان و تولیدکنندگان

[۱۷] گزارش تحلیل وضعیت صنعت لاستیک خودرو در اسفند ۱۳۹۵. [/https://old.babc.ir](https://old.babc.ir)

[18] M. N. Sheikh, S. Mashiri, J. S. Vinod et al., ““Shear and compressibility behavior of sand-tire crumb mixtures,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 25, no. 10, pp. 1366–1374, 2013.

[19] L. H. Li and C. D. Yu, “Properties of soil reinforced by waste tire,” *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, vol. 36, no. 11, pp. 1–6, 2019.

[20] A. AbdelRazek, R. M. El-Sherbiny, and H. A. Lotfi, “Mechanical properties and time-dependent behaviour of sand-granulated rubber mixtures,” *Geomechanics and Geoengineering*, vol. 13, no. 4, pp. 288–300, 2018.

[۲۱] مسعود عاطفی فرد، مهدی خیری، سعید داوودی، علی آزاد فلاح، سعید بهنیا. مروری اجمالی بر مهمترین روش

های بهسازی و تثبیت خاکهای مختلف. دومین کنفرانس بین المللی تحقیقات در عمران، معماری و شهرسازی و محیط زیست پایدار. ۱۳۹۵؛

[22] Babu, MR Dheerendra, Sitaram Nayak, and R. Shivashankar. "A critical review of construction, analysis and behaviour of stone columns." *Geotechnical and Geological*

Engineering 31.1 (2013): 1-22.

[23] Hughes, J., and Withers, N. (1974). "Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns." *Ground Engineering*, 7(3), 42-49.

[24] Mokhtari, Masoumeh, and Behzad Kalantari. "Soft Soil Stabilization using Stone Column--A Review." *Electronic journal of Geotechnical engineering* 17 (2012): 1459-1466.

[25] Brksdale, R. D., and Bachus, R. C. (1983). "Design and Construction of Stone Columns Volume I." FHWA, Rep. No. FHWA/RD-83/026, Washington, D.C.

[۲۶] کیخسروپور ل. مطالعه تاریخیچه و روشهای ساخت ستونهای شنی. سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه امیر کبیر.

.۱۳۸۸

[27] Priebe, H.J., The design of vibro replacement. *Ground engineering*, 1995. 28(10): p. 31..

[28] Barksdale, Richard D., and Robert Charles Bachus. Design and Construction of Stone Columns Volume I. No. FHWA-RD-83-026 Final Rpt. 1983..

[۲۹] مهیار بابازاده. معرفی انواع روشهای اجرایی ستونهای سنگی به عنوان روشی نوین در بهسازی خاک. همایش

ملی یافته های نوین در مهندسی عمران. ۱۳۸۹.

[30] Barksdale, R.D. and Bachus RC. Design and construction of stone columns. FHWA/RD-83/026, Fed Highw Adm Washington, DC. 1983 Dec;

[31] Han, Jle and SLY. Settlement analysis of buildings on the soft clays stabilized by stone columns. In *Proc., Int. Conf. on Soil Improvement and Pile Found*, vol. 118, pp. 446-451. 1992.

[32] Munfakh, G. A., S. K. Sarkar and RJC. search-results "Performance of a test embankment founded on stone columns. In *Proceedings of the International Conference on Advances in Piling and Ground Treatment for Foundations*, London, pp. 193-199. 1983.

[33] Malarvizhi, S. N., and K. Ilamparuthi. "Load versus settlement of clay bed stabilized with stone and reinforced stone columns." *Proceedings of GeoAsia-2004*, Seoul, Korea (2004): 322-329

[34] McCabe, B. A., McNeill, J. A., & Black, J. A. (2007). Ground improvement using the vibro-stone column technique. Paper Presented at the Joint Meeting of Engineers

Ireland West Region and the Geotechnical Society of Ireland, NUI Galway, 1–12.

[35] Ambily AP, Gandhi SR. Behavior of Stone Columns Based on Experimental and FEM Analysis. *J Geotech Geoenvironmental Eng.* 2007 Apr;133(4):405–15.

[36] Deb K, Samadhiya NK, Namdeo JB. Laboratory model studies on unreinforced and geogrid-reinforced sand bed over stone column-improved soft clay. *Geotext Geomembranes.* 2011 Apr 1;29(2):190–6.

[37] Kumar R, Jain PK. Expansive Soft Soil Improvement by Geogrid Encased Granular Pile. *Int J Emerg Technol.* 2013;4(1):55–6

[38] Fattah MY, Al-Neami MA, Shamel Al-Suhaily A. Estimation of bearing capacity of floating group of stone columns. *Eng Sci Technol an Int J.* 2017;20(3):1166–72.

[39] Ghazavi M, Ehsani Yamchi A, Nazari Afshar J. Bearing capacity of horizontally layered geosynthetic reinforced stone columns. *Geotext Geomembranes.* 2018;46(3):312–8.

[40] Xue J, Liu Z, Chen J. Triaxial compressive behaviour of geotextile encased stone columns. *Comput Geotech.* 2019;108(October 2018):53–60.

[۴۱] سید مرتضی مرندی، سید حجت اله موسوی، آنالیز عددی ستون‌های سنگی مسلح شده با ژئوگرید، ششمین

کنگره ملی مهندسی عمران دانشگاه سمنان. ۱۳۹۰.

[۴۲] فتاحی، ا و شریفی پور، م. اصلاح خاکهای سست به وسیله ستونهای سنگی مسلح شده توسط ژئوگریدها.

ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. ۱۳۹۰.

[43] Guler, E. a. " Mechanical properties of granular rubber-sand mixtures ". *New Development in Soil Mechanic and Geotechnical Engineering.*North Cyprus (2009)..

[44] Masad, Eyad, Ramzi Taha, Carlton Ho, and Thomas Papagiannakis. "Engineering properties of tire/soil mixtures as a lightweight fill material." *Geotechnical Testing Journal* 19 (1996)..

[45] Lee, J. H., R. Salgado, A. Bernal, and C. W. Lovell. "Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 125, no. 2 (1999): 132-141.

[46] Zornberg, Jorge G., Alexandre R. Cabral, and Chardphoom Viratjandr. "Behaviour of tire shred sand mixtures." *Canadian Geotechnical Journal* 41, no. 2 (2004): 227-241..

[47] Gotteland, Ph, S. Lambert, and L. Balachowski. "Strength characteristics of tyre chips-sand mixtures." *Studia geotechnica et mechanica* 27, no. 1-2 (2005): 55-66..

[48] Rao GV, Dutta RK. Compressibility and strength behaviour of sand-tyre chip mixtures. *Geotech Geol Eng.* 2006 Jun;24(3):711–24.

[49] Vinot, V., and Baleshwar Singh. "Experimental Study on Shear Strength Behavior of Shredded Tyre-Reinforced Sand." In *GeoShanghai 2010 International Conference.* (2010)..

[50] Priyadarshee, Akash, et al. "Comparative study on performance of tire crumbles with fly ash and kaolin clay." *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering* 1.4 (2015): 1-7.

[51] Yadav JS, Tiwari SK. Effect of waste rubber fibres on the geotechnical properties of clay stabilized with cement. *Appl Clay Sci.* 2017;149(May):97–110.

[52] Tajdini M, Nabizadeh A, Taherkhani H, Zartaj H. Effect of Added Waste Rubber on the Properties and Failure Mode of Kaolinite Clay. *Int J Civ Eng.* 2017 Sep 1;15(6):949–58.

[53] Daud, K. "Soil improvement using waste tire chips." *International Journal of Civil Engineering and Technology* 9.8 (2018): 1338-1345.

[54] Yang, Zhongnian, et al. "Advances in Properties of Rubber Reinforced Soil." *Advances in Civil Engineering* 2020 (2020).

[۵۵] ملک خانی، م. بررسی پارامترهای مقاومتی مخلوط ماسه و پودر لاستیک توسط دستگاه سه محوری. پایان نامه

کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران. ۱۳۹۲.

[56] Ayothiraman, Ramanathan, and Sasikala 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.

[57] Shariatmadari N, Zeinali SM, Mirzaeifar H, Keramati M. Evaluating the effect of using shredded waste tire in the stone columns as an improvement technique. *Constr Build Mater.* 2018;176:700–9.

[58] Mazumder, T., A. K. Rolaniya, and R. Ayothiraman. "Experimental study on behaviour of encased stone column with tyre chips as aggregates." *Geosynthetics International* 25.3 (2018): 259-270

[59] Bikdeli, Hoorah, Baitollah Badarloo, and Ali Golabchifard. "Experimental

investigation of using reclaimed asphalt pavement aggregate in scrap tire encased stone column." Amirkabir Journal of Civil Engineering (2020).

[60] ASTM, D., Standard test method for particle-size analysis of soils. 2007.

[61] Testing, A.S.f. and Materials, Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density. 2006: ASTM International

[62] Presti, D.L., S. Pedroni, and V. Crippa, Maximum dry density of cohesionless soils by pluviation and by ASTM D 4253-83: A comparative study. Geotechnical Testing Journal, 1992. 15(2): p. 180-189.

[63] C. ASTM, 127. 2004. Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate. Annual book of ASTM standards, 2004.

[64] ASTM D854-14, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014

[65] D. ASTM, 3080-90: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. Annual Book of ASTM Standards, 1994, 4,

Abstract

Every year, a large amount of worn tires is imposed on the environment in the world, which causes a lot of environmental problems. So far, numerous studies have been conducted to investigate the impact of sub-tires in industries such as road construction, construction, automotive, marine industries, sports, animal husbandry and agriculture, and water supply. Although the advantages of using rubber, whether crushed or not, in improving soil properties in general have been proven, research in various fields continues. In this study, by physically modeling stone columns mixed with different percentages and sizes of crumb rubber in the laboratory, the effect of these mixtures on the behavior and bearing capacity of stone columns and the best percentage of crumb rubber mixing was investigated. In the first stage, initial experiments were performed to identify the properties of the materials used. These initial experiments included the minimum and maximum specific gravity determination, solid grain density and grading test to determine the grain size distribution in the soil sample, etc. In the second stage, in order to find the internal adhesion and friction, experiments were performed by large-scale direct cutting machine to evaluate the shear strength of the mixtures. Finally, in order to simulate the loading conditions and to provide the physical modeling conditions with a semi-real scale, a large-scale physical modeling device capable of static and dynamic loading was used. The results of the experiments showed that with the addition of medium-sized tires up to 40%, the bearing capacity of the stone column increased to about 17%, and with the increase of tires more than 40%, we saw a decrease in bearing capacity. Addition of more rubber particles to the mixture, due to the reduction of the frictional behavior of the sand grains with each other, the behavior of the materials tends towards elastic materials, and this reduces the bearing capacity; Therefore, the optimum bearing capacity of stone column containing crumb rubber compared to the sandblasting capacity of sandstone column without crumb rubber is mixing 40% of medium-sized crumb rubber, which in mixing 40% of medium-sized crumb rubber, in 20 mm stone column settling about 76%, in 40 mm We saw a 51% increase in bearing capacity and a 17% increase in carrying capacity at 60 mm.

. Keywords: Environmental Geotechnics, stone Column, Rubber, Large-Scale Physical Modeling, Load Capacity, Large-Scale Direct Cutting



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Geotechnical Engineering

**Evaluation of behavior and bearing capacity of stone columns
mixed with different percentages and sizes of crumb rubber
using large-scale physical modeling machine**

By:

Mohammad Hamedani

Supervisor:

Dr. Mohsen Keramti

April 2021