

بررسی رفتار استاتیکی و دوره‌ای زهکشی نشده مخلوط ماسه و خرده‌های لاستیک

مسعود روشی (دانشجوی دکتری)

رضا نوزاد* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه نوشیروانی بابل

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۴۰۳)
دوره‌ی ۳۰، شماره‌ی ۱، صص. ۱۴۹-۱۵۸، (پنداشت نشی)

در سال‌های اخیر، مخلوط ماسه و خرده‌های لاستیک در زمینه‌های مختلفی نظیر پایداری شیروانی‌ها، پشت‌ریز دیوارهای نگهدارنده و مواد زهکش در لندفیل‌ها رواج یافته است. در این پژوهش، آزمایش سه محوری زهکشی نشده استاتیکی و دوره‌ای بر روی مخلوط ماسه بابل‌س و خرده‌های لاستیک (با اندازه ۱ الی ۸ میلی‌متر) انجام گردید. تأثیر پارامترهایی نظیر مقدار خرده لاستیک‌های گوناگون (۰، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی) و تراکم نسبی‌های مختلف بر رفتار استاتیکی و دینامیکی مخلوط ماسه و خرده‌های لاستیک و فشار آب حفره‌ای ایجاد شده بررسی شد. نتایج نشان داد که افزودن خرده‌های لاستیک به ماسه سبب کاهش مقاومت برشی و اتساع ماسه می‌شود. همچنین، افزایش مقدار خرده‌های لاستیک در ماسه موجب کاهش فشار آب حفره‌ای اضافی و در نتیجه کاهش روانگرایی در بارگذاری دوره‌ای می‌گردد. خرده‌های لاستیک به دلیل انعطاف‌پذیری و با ایجاد فشار آب حفره‌ای منفی در حین بارگذاری، مقاومت ماسه در برابر روانگرایی را افزایش می‌دهند.

واژگان کلیدی: اتساع، آزمایش سه محوری، خرده لاستیک، روانگرایی، مقاومت برشی.

masoud.raveshi@st.u.nit.ac.ir
rnoorzad@nit.ac.ir

۱. مقدمه

۳. تسلیح و ۴. سم‌تاسیون به وسیله تریق.^[۲] در سال‌های اخیر و به منظور مقابله با پدیده روانگرایی، بیشتر توجه پژوهشگران به روش تسلیح (ژئوستتیک‌ها و خرده‌های لاستیک) معطوف شده است.^[۳]

با پیشرفت فناوری، افزایش جمعیت و نیاز به تولید روزافزون انواع خودروها، سالانه در تمام کشورهای دنیا تعداد زیادی لاستیک فرسوده از چرخه مصرف خارج می‌شوند و مشکلات زیست محیطی متعددی برا به وجود می‌آورند. دفع مواد لاستیکی یکی از مشکلات عمده در سرتاسر جهان است که با توجه به آمار بالای لاستیک‌های فرسوده، باید راهکارهایی برای آن ارائه شود. هر ساله تقریباً ۶۰ میلیون حلقه لاستیک فرسوده در آمریکا، ۲۹ میلیون در کانادا و ۲۵ میلیون در کره جنوبی رها می‌گردند. از این لاستیک‌ها در زمینه‌های مختلفی مانند استفاده دوباره، بازیافت، استفاده به عنوان پشت‌ریز سازه‌های نگهدارنده، استفاده در لندفیل‌ها و به عنوان سوخت استفاده می‌شود.^[۴] ویژگی‌های مکانیکی نظیر مقاومت کششی بالا و وزن مخصوص کم، دوام و قیمت ناچیز لاستیک‌ها، کاربرد آن‌ها را در سازه‌های ژئوتکنیکی مانند دیوارهای نگهدارنده، پایداری شیب‌ها، بستر راه‌ها و پی‌ها برای بهبود پارامترهای رفتاری خاک مطرح می‌سازد.^[۵] براساس استاندارد ASTM D6۲۷۰^[۶] لاستیک‌های بازیافتی به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند:

یکی از علل اصلی خسارت و خرابی‌های وارد شده بر سازه‌ها در حین وقوع زلزله، پدیده روانگرایی است. هنگامی که یک توده خاک در معرض بارگذاری تک محوری، دوره‌ای و دینامیکی قرار می‌گیرد، مقاومت برشی آن در حجم ثابت کاهش می‌یابد و پدیده روانگرایی رخ می‌دهد. در این هنگام، تغییر شکل برشی یک جهتی بسیار بزرگی به توده خاک وارد می‌شود. کاهش در مقاومت برشی ادامه یافته تا زمانی که خاک مقاومت برشی خود را از دست می‌دهد و خاک جاری می‌شود.^[۱] از عوامل موثر بر پدیده روانگرایی می‌توان به تراز آب زیرزمینی، نوع خاک، تراکم نسبی، شکل ذرات و ... اشاره کرد. با وجود این که علل وقوع پدیده روانگرایی به‌طور کامل در جوامع علمی بررسی شده است، اما همچنان مسائل بسیاری همچون چگونگی نحوه حفاظت در برابر آن وجود دارد. بسیاری از پژوهشگران در سال‌های اخیر از مدل‌سازی فیزیکی مانند میز لرزه و آزمایش سانتریفیوژ استفاده کرده‌اند. به منظور کاهش خطرات ناشی از روانگرایی، استفاده از دستگاه‌های مدرن کمک شایانی را در پیش‌برد سریع پژوهش‌ها به دنبال داشته است. روش‌های مقابله با پدیده روانگرایی را در حالت کلی می‌توان به چهار گروه تقسیم‌بندی کرد که عبارتند از: ۱. متراکم‌سازی، ۲. زهکشی،

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۳/۷، اصلاحیه: ۱۴۰۲/۴/۱۰، پذیرش: ۱۴۰۲/۵/۱۵

استناد به این مقاله:

روش، مسعود و نوزاد، رضا، ۱۴۰۳. بررسی رفتار استاتیکی و دوره‌ای زهکشی نشده مخلوط ماسه و خرده‌های لاستیک. مهندسی عمران شریف، ۴۰(۱)، صص. ۱۴۹-۱۵۸.

DOI:10.24200/J30.2023.62453.3226

۱. تراشه لاستیک (تکه‌های لاستیک در اندازه ۵/۰ تا ۲ اینچ)؛

۲. خرده لاستیک (تکه‌های لاستیک در اندازه ۲ تا ۱۲ اینچ)؛

۳. مشتقات خرده لاستیک (هر درصد ترکیبی از تراشه و خرده لاستیک که در پروژه‌های عمرانی استفاده می‌شود).

در سه دهه اخیر، پژوهشگران بسیاری با انجام آزمایش‌های سه‌محوری، تک‌محوری، برش مستقیم و آزمایش نفوذپذیری به بررسی ویژگی‌های رفتاری نمونه‌های خاک مسلح با خرده‌های لاستیک پرداخته‌اند. نتایج این آزمایش‌ها حاکی از آن بود که افزودن خرده‌های لاستیک به خاک، ویژگی‌های مقاومتی خاک را بهبود بخشیده و رفتار خاک را از حالت ترد به یک حالت انعطاف‌پذیرتر تغییر می‌دهد.^[۷] به عنوان اولین پژوهش‌ها در زمینه استفاده از خرده لاستیک در کارهای ژئوتکنیکی می‌توان به پژوهش‌های ماهر و گرای^[۸]، ادیل^[۹]، احمد و لاول^[۱۰]، بوسچر و همکاران^[۱۱]، فووز و همکاران^[۱۲] اشاره کرد که در زمینه ساخت خاکریز مهندسی از مخلوط ماسه و خرده لاستیک می‌باشند. همچنین، پژوهشگران بسیاری به منظور بررسی پارامترهای مقاومتی مخلوط ماسه و خرده لاستیک، آزمایش‌های برش مستقیم و سه‌محوری بر روی نمونه‌های متشکل از درصد‌های وزنی گوناگون مخلوط ماسه و خرده لاستیک انجام دادند که می‌توان به پژوهش‌های یانگ و همکاران^[۱۳]، یوای و برگادو^[۱۴]، زورنبرگ و همکاران^[۱۵]، گوتلند و همکاران^[۱۶]، ونکاتا پا و داتا^[۱۷]، اتم^[۱۸] و نورزاد و روشی^[۱۹] احمد و همکاران^[۲۰] اشاره کرد. در سال‌های اخیر، پژوهشگران به بررسی روانگرایی مخلوط ماسه و خرده لاستیک پرداختند (اکاموتو و همکاران^[۲۱]، پروپونانکون و همکاران^[۲۲]، زو و وانگ^[۲۳]، شریعتمداری و همکاران^[۲۴]، آمانتا و همکاران^[۲۵]، نیکیتاس و همکاران^[۲۶]، کاراتا و همکاران تعدادی آزمایش سه‌محوری دوره‌ای زهکشی نشده روی مخلوط ماسه با خرده‌های لاستیک (۰ الی ۱۰۰ درصد) انجام دادند. فشار همه‌جانبه برای تمام نمونه‌ها ۱۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شد. آن‌ها گزارش کردند که برای مخلوط ماسه و خرده لاستیک با مقدار کمتر از ۵۰ درصد حجمی خرده لاستیک، روانگرایی رخ می‌دهد، در صورتی که برای مخلوط ماسه و خرده لاستیک با مقدار بالای ۵۰ درصد حجمی خرده لاستیک، روانگرایی به وضوح مشاهده نمی‌شود.^[۲۷] مشیری با انجام آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی و دوره‌ای بر روی مخلوط ماسه و خرده لاستیک، به بررسی روانگرایی آن پرداخت. نتایج پژوهش او نشان داد که افزودن خرده‌های لاستیک به ماسه تا میزان ۳۰ درصد وزنی موجب افزایش مقاومت ماسه در برابر روانگرایی می‌شود. همچنین، وجود خرده‌های لاستیک در ماسه باعث به‌وجود آمدن مخلوطی با تخلخل کمتر می‌شود و همین امر موجب کاهش ایجاد فشار آب حفره‌ای اضافه در مخلوط ماسه و خرده لاستیک می‌شود.^[۲۸] سنتن آموتن و همکاران به بررسی روانگرایی استاتیکی و دوره‌ای مخلوط ماسه و خرده لاستیک (۰ الی ۱۰۰ درصد) با انجام آزمایش سه‌محوری پرداختند. اندازه خرده‌های لاستیک استفاده شده در این پژوهش کمتر از ۲ میلی‌متر بود. مخلوط‌های ماسه با خرده‌های لاستیک به میزان ۳۰ الی ۵۰ درصد وزنی خرده لاستیک، مقاومت بیشتری در برابر روانگرایی نسبت به ماسه خالص از خود نشان داده است. همچنین، افزودن خرده‌های لاستیک به ماسه موجب کاهش سختی خاک گردید.^[۲۹] لی و همکاران به کمک آزمایش ستون تشدید و سه‌محوری دوره‌ای به تحلیل مقاومت برشی، میرایی و پتانسیل روانگرایی مخلوط ماسه و خرده لاستیک با دو اندازه متفاوت خرده‌های لاستیک پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش خرده‌های لاستیک، ضریب برشی را در فشارهای جانبی پایین و بالا به ترتیب کاهش و افزایش می‌دهد. همچنین افزایش نسبت اندازه خرده لاستیک به ذرات ماسه، مقاومت در برابر روانگرایی را افزایش می‌دهد.^[۳۰] برخی از تحقیقات مانند تحقیق

شریعمداری و همکاران و هونگ نشان داده‌اند که افزایش خرده‌های لاستیک در ماسه، مقاومت برشی و مقاومت در برابر روانگرایی مخلوط ماسه و خرده لاستیک را کاهش می‌دهد.^[۳۱-۳۲] این اختلاف در نتایج پژوهش‌های گوناگون را می‌توان به اختلاف در نمونه‌سازی، شرایط مختلف آزمایش‌ها، اندازه خرده‌های لاستیک متفاوت و شرایط بارگذاری گوناگون نسبت داد.^[۳۱-۳۲] نتایج پژوهش‌های پیشین نشان داده است که تغییر در مقاومت روانگرایی مخلوط ماسه و خرده لاستیک به دلیل اختلاف در نتایج پژوهش‌های قبلی نیاز به مطالعه بیشتری دارد. بنابراین در این پژوهش با انجام آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی و دینامیکی، به بررسی روانگرایی مخلوط ماسه و خرده لاستیک و تغییر فشار آب حفره‌ای ایجاد شده پرداخته شده است. همچنین، با مقایسه این نتایج با نتایج سایر پژوهشگران، علت تغییر در مقاومت برشی و پتانسیل روانگرایی مخلوط ماسه و خرده لاستیک بیان شده است.

۲. مصالح و روش انجام آزمایش

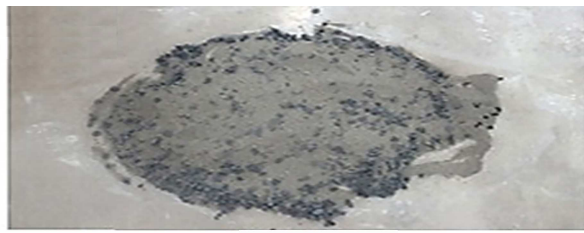
۲.۱. مشخصات مصالح مورد استفاده در این پژوهش

در این پژوهش، از ماسه بابل‌سرا استفاده شده است که ویژگی‌های آن و منحنی دانه‌بندی آن طبق استاندارد ASTM D ۴۲۲^[۳۲]، به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۱ نشان داده شده است. بر اساس سیستم رده‌بندی متحد، ماسه بابل‌سرا از نوع ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده (SP) می‌باشد. به منظور تسلیح خاک، از خرده‌های لاستیک باز یافتی (۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ درصد وزنی) استفاده می‌شود. خرده‌های لاستیک، ذرات حاصل از خرد و آسیاب کردن تابه‌های فرسوده اتومبیل‌ها پس از خارج کردن سیم‌های فلزی آن‌ها است. باید توجه داشت که به منظور اجتناب از تأثیر اندازه ذرات بر نتایج آزمایش، باید از خرده‌های لاستیک با ابعاد کوچکتر از ۱/۶ قطر نمونه‌ها استفاده کرد. به همین منظور، از خرده‌های لاستیک با ابعاد کوچک‌تر از ۸ میلی‌متر استفاده گردید. برای تعیین ویژگی‌های تراکمی ماسه و مخلوط ماسه و خرده لاستیک از آزمایش نسبت بوکی کمینه و بیشینه استفاده شد.

به این منظور، آزمایش تعیین وزن مخصوص بیشینه مطابق استاندارد ASTM D ۴۲۵۳^[۳۳] و آزمایش تعیین وزن مخصوص کمینه مطابق استاندارد ASTM D ۴۲۵۴^[۳۳] بر روی مخلوط ماسه و خرده‌های لاستیک انجام گردید. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، به دلیل قرارگیری ذرات ماسه در بین خرده‌های لاستیک، وزن مخصوص بیشینه و کمینه ماسه با افزودن خرده‌های لاستیک کاهش می‌یابد.

جدول ۱. ویژگی‌های ماسه و خرده‌های لاستیک.

نمونه	نسبت بوکی		وزن مخصوص (Gs)
	کمینه (<i>e_{min}</i>)	بیشینه (<i>e_{max}</i>)	
ماسه خالص	۰/۵۳۴	۰/۸۰۴	۲/۶۷
خرده لاستیک ٪۵	۰/۵۱۸	۰/۷۶۲	۲/۵۱
خرده لاستیک ٪۱۰	۰/۴۶۶	۰/۷۱	۲/۳۶
خرده لاستیک ٪۲۰	۰/۳۳۸	۰/۵۸۴	۲/۰۶
خرده لاستیک ٪۳۰	۰/۱۹۸	۰/۴۳۱	۱/۷۶



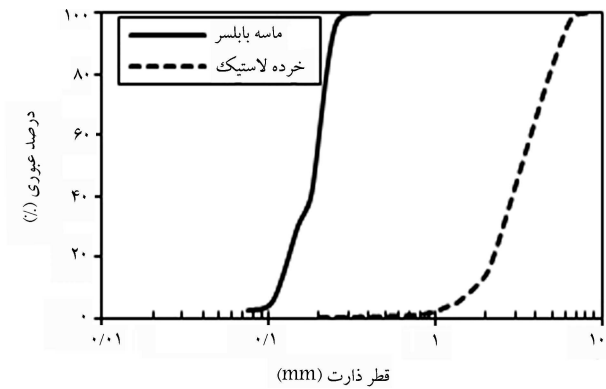
الف) بدون رطوبت؛



ب) با رطوبت.

شکل ۳. مخلوط ماسه و خرده لاستیک.

است. در همین راستا، در پژوهش حاضر به منظور رسیدن به نمونه‌های همگن از روش کوبش مرطوب^۳ استفاده شد. به این منظور، ۴ درصد وزنی مخلوط ماسه و خرده لاستیک، آب به نمونه‌ها اضافه گردید. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، افزودن آب موجب ایجاد نمونه‌های همگن از مخلوط ماسه و خرده لاستیک شده است. خرده‌های لاستیک به ماسه به صورت ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی خشک اضافه شده است. دلیل افزودن خرده‌های لاستیک به ماسه تا ۳۰ درصد وزنی آن است که در میزان خرده‌های لاستیک بیشتر از این مقدار، پدیده جداسازی میان ذرات خرده لاستیک و ذرات ماسه رخ می‌دهد. برای تهیه و ساخت هر نمونه، ابتدا میزان ماسه و خرده‌های لاستیک با توجه به تراکم نسبی نمونه بدست می‌آیند و سپس با یکدیگر مخلوط می‌شوند. مخلوط ماسه و خرده‌های لاستیک در پنج لایه آماده شدند. به منظور متراکم کردن لایه‌های ریخته شده در قالب، از کوبه‌ای با قطر کمی بیش از نصف قطر نمونه استفاده شد. ارتفاع لایه‌های متراکم شده با استفاده از کولیس رقیمی با دقت میلی‌متر کنترل گردید. به منظور حفظ پیوستگی دو لایه، با استفاده از خطکش فلزی شیارهایی به عمق حدود ۱/۱۰ ضخامت لایه، به صورت شبکه‌ای ایجاد می‌شود. بعد از ساخت نمونه، به منظور عدم کج‌شدگی و خروج از مرکزیت نمونه، مقدار کمی مکش در حدود ۱۰ تا ۱۵ کیلوپاسکال به نمونه اعمال می‌شود. پس از پر نمودن آب داخل سلول، برای حذف خلاء اعمالی، فشار داخلی سلول تا ۱۵ کیلوپاسکال (برای تمام نمونه‌ها) افزایش می‌یابد. برای اشباع‌سازی نمونه‌ها، گاز دی‌اکسید کربن به مدت یک ساعت و سپس آب مقطر عاری از هوا از هوا از نمونه‌ها عبور داد می‌شود. در مرحله بعد، برای اشباع‌سازی کامل نمونه و دستیابی به درصد اشباع بالای ۹۵ درصد، فشار همه‌جانبه و فشار داخل نمونه افزایش می‌یابد. این روند در گام‌های گوناگون تکرار شده تا نمونه به درصد اشباع ۹۵ درصد برسد. فشار همه‌جانبه برای تمامی نمونه‌ها ۱۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شد. در آزمایش‌های سه محوری استاتیکی، نمونه‌ها با تراکم نسبی ۴۵، ۶۰ و ۸۰ درصد ساخته شدند. میزان سرعت بارگذاری ۳/۰ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شده است و بارگذاری بر روی نمونه‌ها تا کرنش ۱۵ درصد ادامه می‌یابد. در آزمایش‌های سه محوری دوره‌ای، تمامی نمونه‌ها با تراکم نسبی ۴۵ درصد ساخته شدند و در انجام آزمایش‌های اخیر از فشار دورگیر ۱۰۰ کیلوپاسکال استفاده شد و بارگذاری روی تمامی نمونه‌ها از نوع کنترل تنش با $CSR = 25/0$ و بسامد ۱ هرتز است. پس از انجام آزمایش‌های



شکل ۱. دانه‌بندی ماسه و خرده‌های لاستیک.



الف) دستگاه سه محوری استاتیکی؛



ب) دستگاه سه محوری دینامیکی.

شکل ۲. شمای کلی دستگاه‌های مورد استفاده.

۲.۲. دستگاه‌های آزمایش

در این پژوهش، به منظور بررسی رفتار ماسه و خرده لاستیک از دستگاه سه محوری استاتیکی و دینامیکی استفاده شد. برای آزمایش‌های استاتیکی از دستگاه سه محوری استاتیکی^۱ متعلق به آزمایشگاه ژئوتکنیک لرزه‌ای دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل مطابق با استاندارد ASTM D۷۱۸۱^[۳۵] و برای آزمایش‌های دینامیکی از دستگاه سه محوری دینامیکی متعلق به شرکت مواد ساخت آزما ویستا (GMTM)^۲ مطابق با استاندارد ASTM D۵۳۱۱^[۳۶] استفاده گردید. شمای کلی دستگاه سه محوری استاتیکی و دینامیکی استفاده شده در این پژوهش به ترتیب در شکل ۲ نشان داده شده است.

۳.۲. نمونه‌سازی و نحوه انجام آزمایش

از آنجا که در آزمون‌های آزمایشگاهی قرانت‌ها در مرزهای نمونه انجام می‌گیرد، ساخت نمونه همگن در راستای به دست آوردن معادله رفتاری از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی بسیار اهمیت دارد. برای هر دو آزمایش سه محوری استاتیکی و دینامیکی، نمونه‌هایی با قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر مدنظر قرار گرفت. ساخت نمونه همگن در آزمایش‌های سه محوری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار

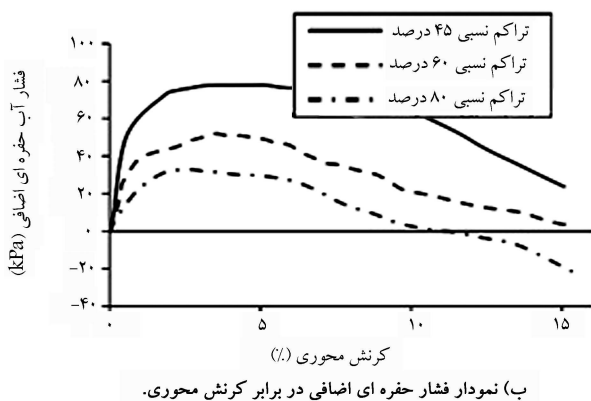
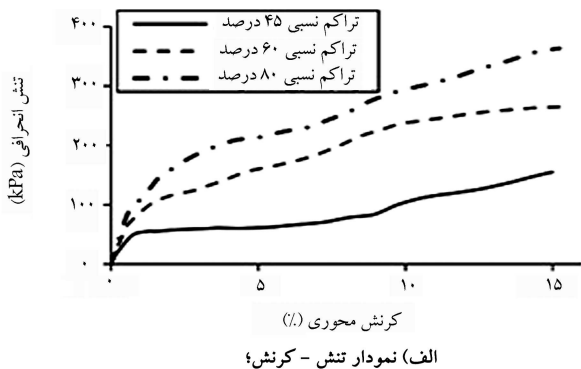
استاتیکی و دوره‌ای بر روی نمونه‌ها، اصلاحات مربوط نفوذ غشا، نیرو و سطح بارگذاری در محاسبات اعمال می‌شود.

۳. نتایج

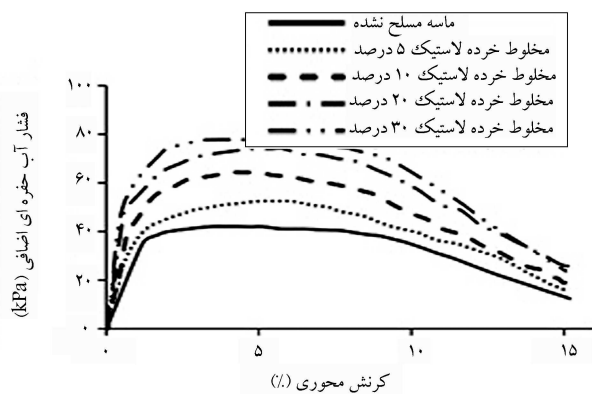
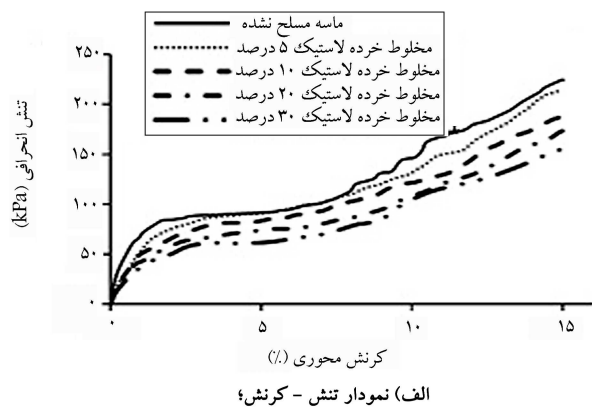
۱.۳. آزمایش سه محوری استاتیکی

به منظور بررسی میزان اثربخشی خرده‌های لاستیک بر رفتار ماسه و در شرایط زهکشی نشده، آزمایش‌های سه محوری استاتیکی بر روی مخلوط ماسه و خرده‌های لاستیک در میزان خرده‌های لاستیک ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد و تراکم نسبی ۴۵، ۶۰ و ۸۰ درصد انجام گردیدند. در شکل‌های ۴ و ۵ نتایج آزمایش سه محوری استاتیکی زهکشی نشده به ترتیب بر روی ماسه بابلسر و مخلوط با ۳۰ درصد خرده لاستیک در تراکم نسبی‌های گوناگون مشاهده می‌شود. آزمایش‌ها برای مخلوط ماسه و خرده لاستیک در تراکم نسبی ۴۵، ۶۰ و ۸۰ درصد انجام شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تراکم نسبی بر رفتار ماسه و مخلوط ماسه و خرده‌های لاستیک تأثیرگذار است. برای ماسه بابلسر و مخلوط ماسه با خرده‌های لاستیک، با افزایش تراکم نسبی، تنش انحرافی افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش نسبی، اتساع افزایش می‌یابد و انتقال فاز در کرنش محوری پایین‌تری اتفاق می‌افتد. به عنوان مثال، برای ماسه بابلسر، انتقال فاز برای تراکم نسبی ۸۰ درصد در کرنش نسبی ۱ درصد و برای تراکم نسبی ۴۵ درصد در کرنش نسبی ۴ درصد اتفاق می‌افتد.

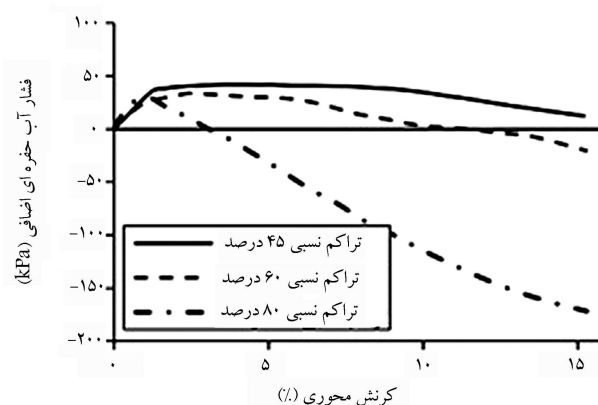
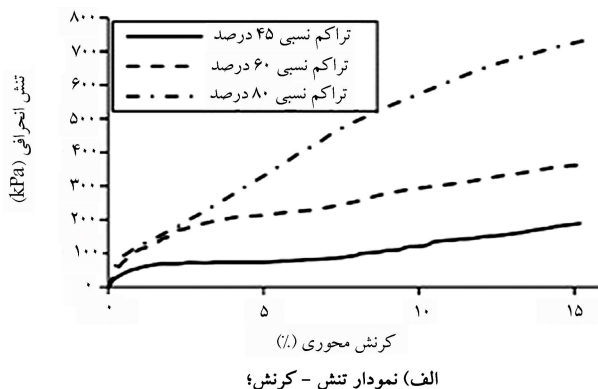
در شکل ۶ (قسمت الف) تأثیر افزودن خرده‌های لاستیک به مقاومت برشی



شکل ۵. آزمایش سه محوری استاتیکی زهکشی نشده بر روی مخلوط با ۳۰ درصد خرده لاستیک.



شکل ۶. آزمایش سه محوری استاتیکی زهکشی نشده بر روی مخلوط ماسه و خرده لاستیک.



شکل ۷. آزمایش سه محوری استاتیکی زهکشی نشده بر روی ماسه بابلسر.

جدول ۲. خلاصه پژوهش‌های قبلی بر روی ویژگی‌های مخلوط ماسه و خرده لاستیک.

پژوهشگران	مقاومت برشی بیشینه	(ماسه) D_{50} / (خرده لاستیک) D_{50}	اتساع
یووی و برگادو [۱۴]	کاهش	۱۱/۶	-
شیخ [۳۷]	کاهش	۴,۶/۵	-
کاواتا [۲۷]	کاهش	۱/۶۵	-
مشیری [۲۸]	تا ۳۰ درصد خرده لاستیک افزایش، بیشتر از ۳۰ درصد کاهش	۲۲	تا ۳۰ درصد خرده لاستیک افزایش، بیشتر از ۳۰ درصد کاهش
روزنبرگ [۱۵]	تا ۳۰ درصد خرده لاستیک افزایش، بیشتر از ۳۰ درصد کاهش	۳۱/۷۵, ۶۳/۵	تا ۳۰ درصد خرده لاستیک افزایش، بیشتر از ۳۰ درصد کاهش
مدهوسوندهان [۳۸]	کاهش	۴	کاهش
روحانی فر [۳۹]	تا ۲۰ درصد خرده لاستیک افزایش، بیشتر از ۲۰ درصد کاهش	۱۸	تا ۲۰ درصد خرده لاستیک افزایش، بیشتر از ۲۰ درصد کاهش
ردی [۴۰]	تا ۳۰ درصد خرده لاستیک افزایش، بیشتر از ۳۰ درصد کاهش	۴۴	-
سنتن آمونتن [۲۹]	کاهش	۳	کاهش
لی [۴۱]	کاهش	۱۰	-
پژوهش حاضر	کاهش	۱۴	کاهش

می‌توان مشاهده کرد که با افزایش اندازه متوسط خرده‌های لاستیک به اندازه متوسط ذرات ماسه تا حدود ۱۸، ذرات خرده لاستیک موجب افزایش مقاومت برشی ماسه نمی‌شوند و برای اندازه خرده لاستیک‌های بزرگ‌تر از این نسبت، تا حدود نسبت وزنی ۲۵ الی ۳۰ درصد خرده‌های لاستیک به ماسه، خرده‌های لاستیک موجب افزایش مقاومت برشی و اتساع می‌شوند و با افزایش این نسبت وزنی، مقاومت برشی مخلوط ماسه و خرده لاستیک کاهش می‌یابد. علت این امر را می‌توان به تماس ذرات ماسه با ماسه، ماسه با خرده‌های لاستیک و خرده‌های لاستیک با یکدیگر نسبت داد. با افزایش نسبت وزنی خرده‌های لاستیک در ماسه، به تدریج تماس ذرات ماسه با خرده‌های لاستیک افزایش می‌یابد، به طوری که در نسبت وزنی حدود ۲۵ الی ۳۰ درصد، تماس ذرات ماسه با خرده‌های لاستیک به مقدار حداکثر خود می‌رسد و در این نسبت وزنی بیشترین مقاومت برشی را از خود نشان می‌دهد.

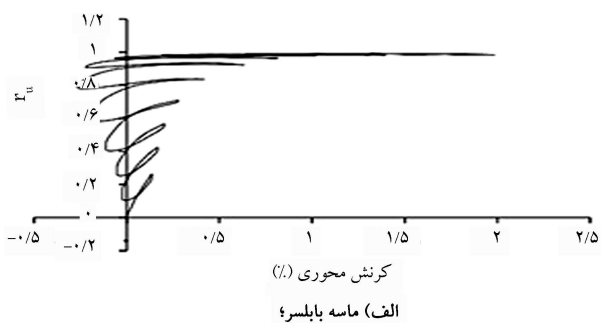
۲.۳. آزمایش سه محوری دوره‌ای

به منظور بررسی میزان اثربخشی خرده‌های لاستیک بر رفتار ماسه تحت بارگذاری دوره‌ای، آزمایش‌های سه محوری دوره‌ای بر روی مخلوط ماسه و خرده‌های لاستیک در میزان خرده‌های لاستیک ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد و تراکم نسبی ۴۵ درصد انجام گردیدند. در شکل‌های ۷ تا ۱۰ به ترتیب نتایج آزمایش سه محوری دوره‌ای روی ماسه با بلسر و مخلوط ماسه با خرده‌های لاستیک ارائه شده است.

شکل ۷ به ترتیب فشار آب حفره‌ای اضافی بر حسب زمان را برای ماسه، مخلوط خرده لاستیک ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل

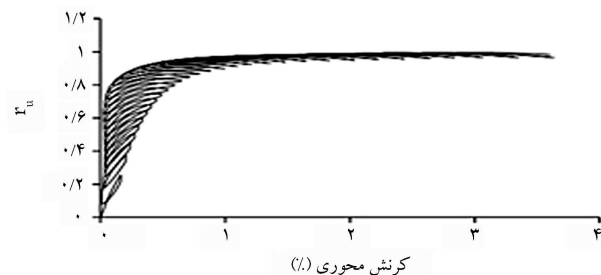
ماسه در تراکم نسبی ۸۰ درصد مشاهده می‌شود. همان‌طور که نشان داده شده است، مقاومت زهکشی نشده ماسه با افزودن خرده‌های لاستیک به آن کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، در نمونه با خرده‌های لاستیک به میزان ۲۰ درصد، مقدار تنش بیشینه به میزان حدود ۲۵ درصد نسبت به ماسه خالص کاهش یافته است. همچنین، با افزودن خرده‌های لاستیک به ماسه اتساع کاهش می‌یابد (شکل ۶ قسمت ب). این نتایج با پژوهش صورت گرفته توسط شریعتمداری [۲۴] انطباق خوبی دارد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که افزودن خرده‌های لاستیک به ماسه موجب نرم‌شدگی و کاهش مقاومت برشی ماسه می‌شود. کاهش در میزان اتساع مخلوط ماسه و خرده لاستیک به دلیل وجود خرده‌های لاستیک در میان ذرات ماسه می‌باشد. خرده‌های لاستیک به دلیل رفتار ارتجاعی در هنگام بارگذاری، تغییر شکل زیادی از خود نشان می‌دهند و همین موضوع موجب کاهش اتساع مخلوط ماسه و خرده‌های لاستیک می‌شود. همچنین، با افزودن میزان خرده‌های لاستیک در ماسه از مقدار ۵ الی ۳۰ درصد، کاهش در مقاومت و اتساع به وضوح مشهود می‌گردد.

در جدول ۲ می‌توان نتایج پژوهش‌های قبلی با نسبت‌های گوناگون اندازه متوسط خرده‌های لاستیک به اندازه متوسط ذرات ماسه را مشاهده کرد. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، نسبت اندازه متوسط خرده‌های لاستیک به اندازه متوسط ذرات ماسه بر رفتار مخلوط ماسه و خرده‌های لاستیک تأثیر می‌گذارد. با افزایش نسبت اندازه متوسط خرده‌های لاستیک به اندازه متوسط ذرات ماسه، درگیری و قفل و بست ذرات خرده لاستیک با ماسه بیشتر می‌شود و خرده‌های لاستیک عملکرد بهتری به عنوان تسلیح‌کننده از خود نشان می‌دهند. با افزایش نسبت اندازه متوسط خرده‌های لاستیک به اندازه متوسط ذرات ماسه، مقاومت برشی و اتساع مخلوط ماسه و خرده‌های لاستیک افزایش می‌یابد. همچنین، در جدول ۲



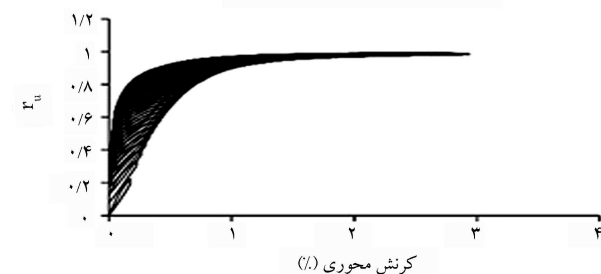
کرنش محوری (%)

الف) ماسه بابلسر؛



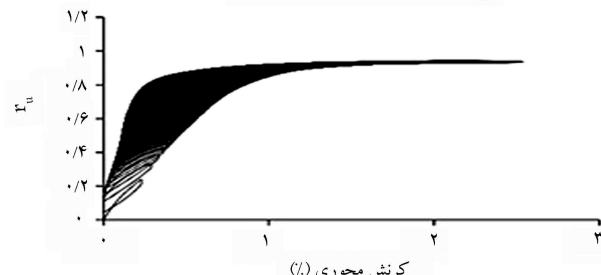
کرنش محوری (%)

ب) مخلوط خرده لاستیک ۱۰ درصد؛



کرنش محوری (%)

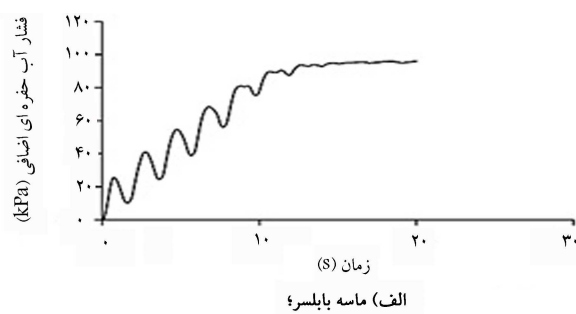
ج) مخلوط خرده لاستیک ۲۰ درصد؛



کرنش محوری (%)

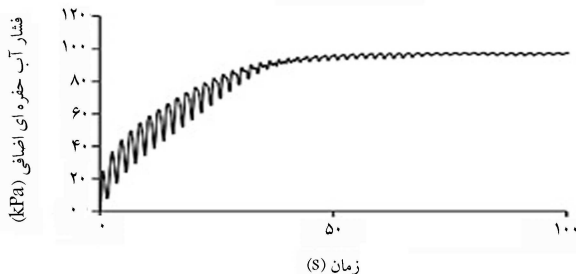
د) مخلوط خرده لاستیک ۳۰ درصد.

شکل ۸. نسبت ϵ_u - کرنش محوری.



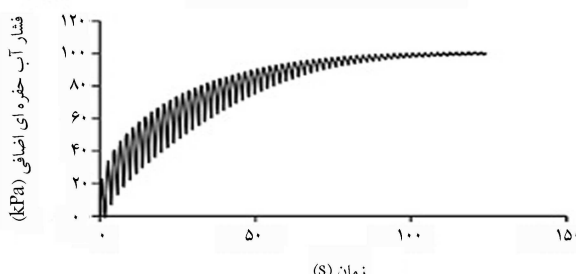
زمان (s)

الف) ماسه بابلسر؛



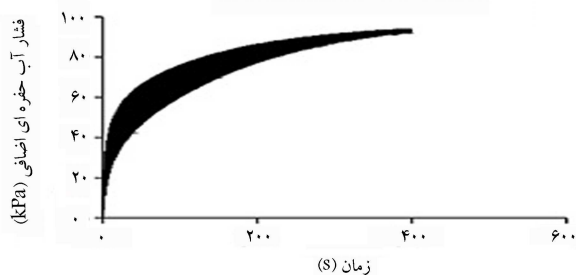
زمان (s)

ب) مخلوط خرده لاستیک ۱۰ درصد؛



زمان (s)

ج) مخلوط خرده لاستیک ۲۰ درصد؛



زمان (s)

د) مخلوط خرده لاستیک ۳۰ درصد.

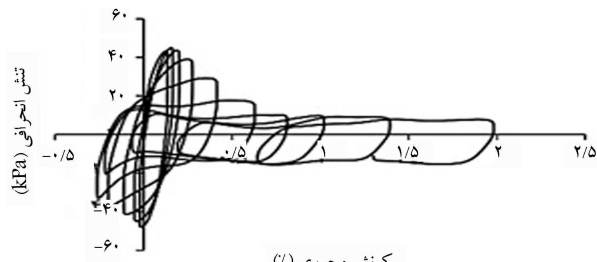
شکل ۷. نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی - زمان.

را برای ماسه، مخلوط خرده لاستیک ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که نسبت فشار آب حفره‌ای در ماسه بابلسر در کرنش محوری حدود ۰/۶ درصد روی می‌دهد، درحالی‌که برای مخلوط ماسه و خرده لاستیک ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد در حدود ۰/۹، ۱/۱ و ۱/۳ درصد اتفاق می‌افتد. بنابراین، وجود خرده‌های لاستیک به دلیل طبیعت انعطاف‌پذیری موجب افزایش کرنش محوری در زمان شروع روانگرایی می‌شود. همچنین، با افزایش مقدار خرده‌های لاستیک، کرنش محوری برای شروع روانگرایی نیز افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، با افزودن خرده‌های لاستیک به ماسه، تعداد سیکل‌های لازم برای وقوع روانگرایی افزایش می‌یابد.

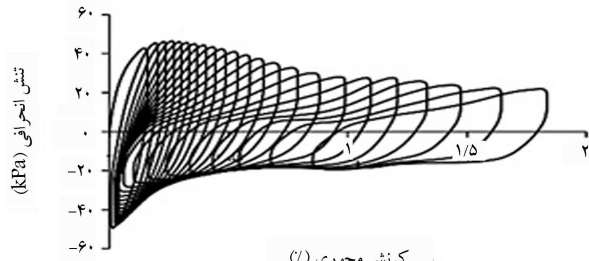
در شکل ۹ به ترتیب می‌توان مسیر تنش را برای ماسه مسلح نشده و مخلوط

نشان داده شده است، به‌طورکلی فشار آب حفره‌ای با افزایش تعداد سیکل‌ها افزایش می‌یابد. با مقایسه این شکل‌ها می‌توان مشاهده کرد که در یک زمان ثابت، مقدار فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در ماسه بیشتر از نمونه‌های دیگر می‌باشد. همچنین، فشار آب حفره‌ای اضافی در ماسه در زمان ۱۲ ثانیه به مقدار حداکثر خود رسیده است، درحالی‌که برای نمونه‌های مخلوط ماسه و خرده لاستیک ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد به ترتیب در زمان‌های ۴۲، ۷۵ و ۳۰۰ ثانیه به این مقدار می‌رسد. در نتیجه، افزودن خرده‌های لاستیک به ماسه موجب افزایش تعداد سیکل‌های لازم برای روانگرایی می‌شود. همچنین، با افزایش مقدار خرده‌های لاستیک، زمان لازم برای وقوع روانگرایی نیز افزایش می‌یابد.

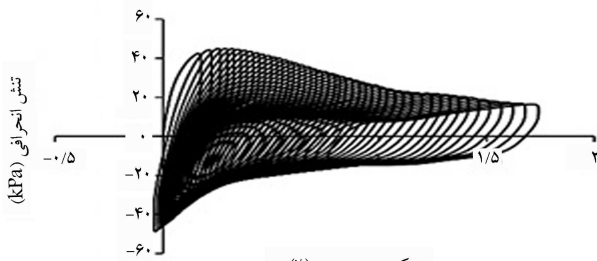
شکل ۸ به ترتیب مقدار ϵ_u (نسبت فشار آب حفره‌ای) بر حسب کرنش محوری



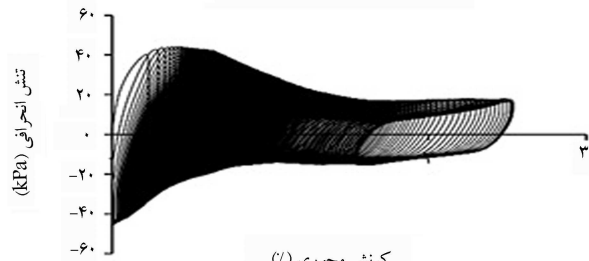
کرنش محوری (%)
الف) ماسه پابلسر؛



کرنش محوری (%)
ب) مخلوط خرده لاستیک ۱۰ درصد؛

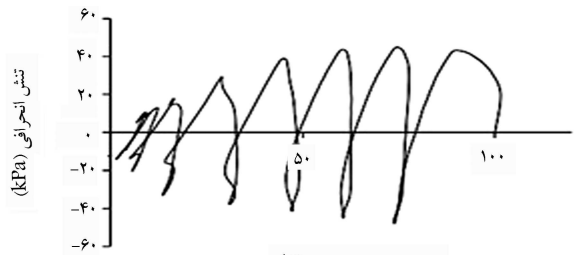


کرنش محوری (%)
ج) مخلوط خرده لاستیک ۲۰ درصد؛

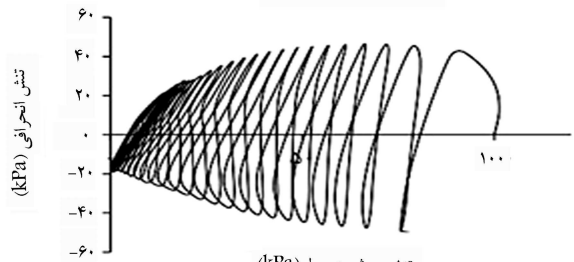


کرنش محوری (%)
د) مخلوط خرده لاستیک ۳۰ درصد.

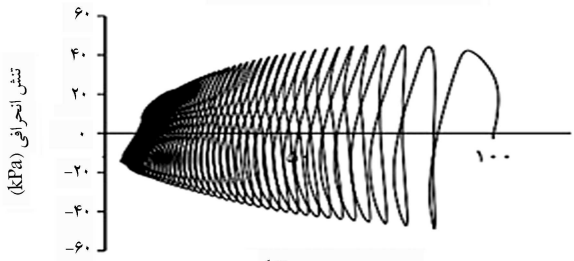
شکل ۱۰. تنش انحرافی - کرنش محوری.



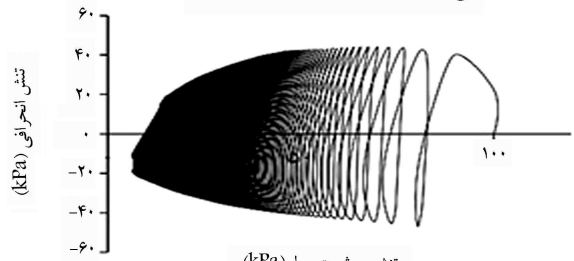
تنش موثر متوسط (kPa)
الف) ماسه پابلسر؛



تنش موثر متوسط (kPa)
ب) مخلوط خرده لاستیک ۱۰ درصد؛



تنش موثر متوسط (kPa)
ج) مخلوط خرده لاستیک ۲۰ درصد؛



تنش موثر متوسط (kPa)
د) مخلوط خرده لاستیک ۳۰ درصد.

شکل ۹. نسبت تنش انحرافی - تنش موثر متوسط.

با مشاهده این شکل می‌توان نتیجه گرفت که افزودن خرده‌های لاستیک به ماسه به دلیل تغییر شکل پذیر بودن خرده‌های لاستیک، موجب کاهش سختی و افزایش شکل پذیری ماسه می‌شود. همچنین، با افزایش میزان خرده‌های لاستیک در ماسه، کاهش سختی بیشتری در مخلوط ماسه و خرده‌های لاستیک مشاهده می‌گردد. این نتایج با پژوهش‌های قضاوی^[۲۲] و دینگ^[۲۳] انطباق خوبی دارد. این پژوهشگران دریافته‌اند که با افزودن خرده‌های لاستیک به ماسه، ضریب برشی کاهش و نسبت میرایی افزایش می‌یابد.

با توجه به مطالعات پیشین و نتایج حاصل از این پژوهش، همانند بارگذاری استاتیکی، نسبت اندازه ذرات خرده لاستیک به ذرات ماسه بر رفتار دوره‌ای مخلوط ماسه و خرده لاستیک اثر می‌گذارد. به دلیل آنکه ذرات ماسه غیر انعطاف پذیر و

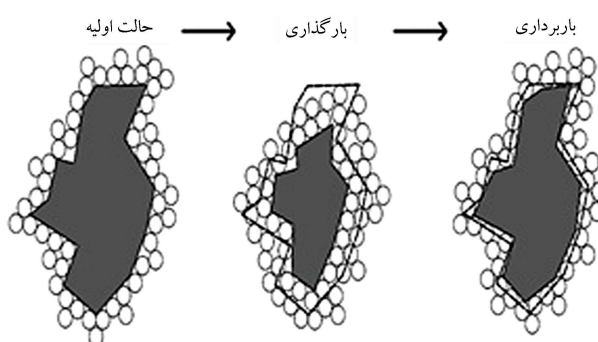
خرده لاستیک ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد مشاهده کرد. با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری، به دلیل افزایش فشار آب حفره‌ای، مقدار تنش موثر متوسط کاهش می‌یابد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزودن خرده‌های لاستیک به ماسه، فشار آب حفره‌ای کاهش یافته و تنش موثر متوسط در تعداد سیکل‌های بالاتری کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش مقدار خرده‌های لاستیک در مخلوط ماسه و خرده لاستیک، فشار آب حفره‌ای کاهش بیشتری یافته و کاهش در تنش موثر متوسط به ترتیب برای مخلوط خرده لاستیک ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد در تعداد سیکل‌های بالاتری اتفاق می‌افتد.

شکل ۱۰ به ترتیب مقدار تنش انحرافی بر حسب کرنش محوری را برای ماسه مسلح‌نشده و مخلوط خرده لاستیک ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد ارائه می‌دهد.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی رفتار استاتیکی و دوره‌ای مخلوط ماسه بابل‌سرو خردده‌های لاستیک (۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی) پرداخته شد. تأثیر افزودن خردده‌های لاستیک در مقاومت برشی و فشار آب حفره‌ای در حالت استاتیکی و دوره‌ای بررسی گردید. نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- نتایج آزمایش‌های استاتیکی و مقایسه آن با نتایج پژوهش‌های دیگر نشان داد که نسبت اندازه متوسط خردده‌های لاستیک به اندازه متوسط ذرات ماسه بر رفتار مخلوط ماسه و خردده‌های لاستیک تأثیر می‌گذارد. افزودن خردده‌های لاستیک به ماسه با نسبت اندازه متوسط خردده‌های لاستیک به نسبت اندازه متوسط ذرات ماسه در حدود ۱۸٪ موجب کاهش مقاومت برشی ماسه شده و اتساع را کاهش می‌دهد. همچنین، با افزایش میزان خردده‌های لاستیک در ماسه، کاهش مقاومت برشی قابل مشاهده است.
- افزودن خردده‌های لاستیک به ماسه موجب افزایش کرنش محوری در زمان وقوع روانگرایی می‌شود. با افزایش میزان خردده‌های لاستیک در ماسه، مقدار کرنش محوری در زمان روانگرایی بیشتر می‌شود.
- با افزایش میزان خردده‌های لاستیک در ماسه به دلیل طبیعت انعطاف‌پذیری خردده‌های لاستیک، میزان سختی مخلوط ماسه با خردده‌های لاستیک نسبت به ماسه خالص کاهش و تغییر شکل‌پذیری افزایش می‌یابد.
- وجود خردده‌های لاستیک به دلیل تغییر شکل‌پذیری ذرات آن‌ها و جمع‌شدگی این ذرات در هنگام اعمال بارگذاری، فشار آب حفره‌ای منفی ایجاد شده و مقاومت در برابر روانگرایی را افزایش می‌دهند.



شکل ۱۱. ذرات خردده لاستیک تحت بارگذاری و باربرداری.

غیر قابل تراکم هستند، در هنگام بارگذاری دوره‌ای برای نمونه‌های ماسه خالص، آب موجود در میان حفرات ذرات ماسه، محلی برای جاری و زهکشی ندارند و به همین دلیل فشار آب حفره‌ای بالا می‌رود. درحالی که خردده‌های لاستیک، طبیعت شکل‌پذیر و انعطاف‌پذیری دارند. زمانی که ذرات خردده‌های لاستیک موجود در میان ذرات ماسه تحت بارگذاری قرار می‌گیرند، در اثر اعمال نیرو تغییر شکل می‌دهند و این ذرات حجم کمتری را اشغال می‌کنند. این کاهش حجم موجب ایجاد محلی برای جاری و زهکشی شدن آب موجود در میان حفرات می‌شود و در نتیجه موجب ایجاد فشار آب حفره‌ای منفی در ماسه شده که در مجموع موجب کاهش تولید فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در مخلوط ماسه و خردده‌های لاستیک می‌شود. در نتیجه، با افزایش مقدار خردده‌های لاستیک در ماسه، فشار آب حفره‌ای منفی بیشتری ایجاد می‌شود و مقاومت در برابر روانگرایی در ماسه افزایش می‌یابد (شکل ۱۱).

پانویس‌ها

1. ELE International
2. Global Material Testing Manufacturers (GMTM)
3. Moist Tamping

منابع (References)

1. Kramer, S.L., 1996. Geotechnical earthquake engineering. Upper Saddle River, USA: Prentice-Hall Inc.
2. Baziari, M.H. and Ghannad, Z., 2012. Soil Dynamics. Tehran, Iran University of Science and Technology. 3rd Edition, (In Persian).
3. Madhusudhan, B.R., Boominathan, A. and Banerjee, S., 2020. Cyclic simple shear response of sand-rubber tire chips mixture. *Int. J. Geomech*, 20(9), 04020136. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001761](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001761).
4. Mehrannia, N., Kosha, B. and Vafaeian, M., 2006. Investigating the resistance and permeability behavior of

sand mixture with rubber particles. *In: 7th International Congress of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, (In Persian)*.

5. Humphrey, D.N., et al., 1993. Shear strength and compressibility of the tyre chips for use as retaining wall backfill. *Transportation Research Record No. 1422, Lightweight Artificial and Waste Materials for Embankments over Soft Soils, Washington, DC, pp. 29-35 (1993)*.
6. ASTM, D6270., 2004. Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications, Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, P.A., USA.
7. Raveshi, M., 2014. Investigating the behavior of coastal walls with an embankment made of sand-tire mixture under static and seismic loads, Master's Thesis, Faculty of Civil Engineering. Noshirvani University of Technology, Babol, (In Persian).
8. Maher, M.H. and Gray, D.H., 1990. Static response of sand reinforced with randomly distributed fibers. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 116(11)*, pp.1661-1677. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1990\)116:11\(1661\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:11(1661)).
9. Bosscher, P.J., Edil, T.B. and Eldin, N.N., 1992. Construction and performance of a shredded waste tire test

- embankment. Transportation Research Record, Washington DC 1345, pp.44-52. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1992/1345/1345-006.pdf>.
10. Ahmed, I. and Lovell, C.W., 1993. Rubber soils as lightweight geomaterials, lightweight artificial and waste materials for embankments over soft soils, Transportation Research Record. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1993/1422/1422-010.pdf>.
 11. Bosscher, P.J., Edil, T.B. and Kuraoka, S., 1996. Design of highway embankment using tire chips. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 123(4), pp.295-304. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1997\)123:4\(295\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:4(295)).
 12. Foose, G.J., Benson, C.H. and Bosscher, P.J., 1996. Sand reinforced with shredded waste tires. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 122(9), pp.760-767. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:9\(760\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:9(760)).
 13. Yang, S., Lohnes, R.A. and Kjartanson B.H., 2002. Mechanical properties of shredded tires. *Geotechnical Testing Journal*, 25(1), pp. 44-52. <https://doi.org/10.1520/GTJ11078J>.
 14. Youwai, S. and Bergado, D.T., 2003. Strength and deformation characteristics of shredded rubber tire-sand mixtures. *Journal of Canadian Geotechnical*, 40(2), pp.254-264. <https://doi.org/10.1139/t02-104>.
 15. Zornberg, J.G. and Cabral, A.R., 2004. Behaviour of tire shred-sand mixtures. *Journal of Canadian Geotechnical*, 41(2), pp.227-241. <https://doi.org/10.1139/t03-086>.
 16. Gotteland, P., Lambert, S. and Balachowski, L., 2005. Strength characteristics of tyre chips-sand mixture. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 27(1). <https://hal.science/hal-01987906>.
 17. Venkatappa, Rao, G., and Dutta, R.k., 2006. Compressibility and strength behaviour of sand-tire chip mixtures. *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, 24(3), pp.711-724. <https://doi.org/10.1007/s10706-004-4006-x>.
 18. Attom, M.F., 2006. The use of shredded waste tires to improve the geotechnical engineering properties of sand. *Journal of Environmental Geology*, 49(4), pp.497-503. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-0003-5>.
 19. Noorzad, R. and Raveshi, M., 2017. Mechanical behavior of waste tire crumbs-sand mixtures determined by triaxial tests. *Journal of Geotech Geol Eng*, 35, pp. 1793-1802. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0209-9>.
 20. Ahmed, S., Vinod, J.S. and Neaz sheikh, M., 2007. Behavior of sand-tire chip mixtures in constant shear drained stress path. *journal materials in civil engineering*, 34(11). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004458](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004458).
 21. Okamoto, S., Hyodo, M., Orense, P. and Hazarika, H., 2007. Undrained cyclic shear properties of tire chips-sand mixtures. *Proceedings of the International Workshop on Scrap Tire Derived Geomaterials-Opportunities and Challenges*, Taylor & Francis Group, London, UK, pp.187-196 (2007).
 22. Promputthangkoon, P. and Hyde, A.F.L., 2007. Compressibility and liquefaction potential of rubber composite soils. *Proceedings of the International Workshop on Scrap Tire Derived Geomaterials-Opportunities and Challenges*. Taylor & Francis Group, London, UK, pp.161-170 (2007).
 23. Zhou, E., and Wang, Q., 2019. Experimental investigation on shear strength and liquefaction potential of rubber-sand mixtures. *Advances in Civil Engineering*, Article ID 5934961 (2019). <https://doi.org/10.1155/2019/5934961>.
 24. Shariatmadari, N., Karimpour-Fard, M. and Shargh, A., 2018. Undrained monotonic and cyclic behavior of sand-ground rubber mixtures. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 17(3), pp.541-553. <https://doi.org/10.1007/s11803-018-0461-x>.
 25. Amanta, S.A. and Dasaka, S.M., 2022. Dynamic characteristics and liquefaction behavior of sand-tire chip mixes. *Journal Materials in Civil Engineering*, 34(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004423](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004423).
 26. Nikitas, G. and Bhattacharya, S., 2023. Experimental study on sand-tire chip mixture foundations acting as a soil liquefaction countermeasure. *Bull Earthquake Eng*. <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01667-1>.
 27. Kawata, S., Hyodo, M., Orense, P., Yamada, S. and Hazarika, H., 2007. Undrained and drained shear behavior of sand and tire chips composite material. *Proceedings of the International Workshop on Scrap Tire Derived Geomaterials-Opportunities and Challenges*, Yokosuka, Japan.
 28. Mashiri, M.S., 2014. Monotonic and cyclic behaviour of sand tyre chips (STCh) mixtures, Dissertation. University of Wollongong, Wollongong, Australia.
 29. Senthin Amuthan, M., Boominathan, A., Banerjee, S., 2020. Undrained cyclic responses of granulated rubber-sand mixtures. *Soils and Foundations*, 60, pp.871-885. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.06.007>.
 30. Li, B., Huang, M. and Zeng, X., 2016. Dynamic behavior and liquefaction analysis of recycled-rubber sand mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(11), 04016122. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001629](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001629).
 31. Hong, Y., Yang, Z., Orense, R.P., and Lu, Y. 2015. Investigation of sand-tire mixtures as liquefaction remedial measure. *Proceedings of the 10th Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Sydney, Australia.
 32. ASTM D422., 2004. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, Annual Book of ASTM Standards, Conshohocken, P.A. (2004).
 33. ASTM D4254., 2004. Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table. Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA.
 34. ASTM D4253., 2004. Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density. Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA.

35. ASTM D7181., 2011. Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA (2011).
36. ASTM D5311., 2004. Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil. Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA.
37. Sheikh, M., Mashiri, M., Vinod, J.S. and Tsang, H.H., 2013. Shear and compressibility behaviours of sand-tyre crumb mixtures. *Journal Materials in Civil Engineering*, 25(10), pp.1366-1374. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.04.004>.
38. Madhusudhan, B.R., Boominathan, A. and Banerjee, S., 2017. Static and large-strain dynamic properties of sand-rubber tire shred mixtures. *Mater Civ Eng*, 29(10), pp.04017165. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002016](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002016).
39. Rouhanifar, S., Afrazi, M., Fakhimi, A., Yazdani, M., 2012. Strength and deformation behaviour of sand-rubber mixture. *Int. J. Ge-otech. Eng*, 15, pp.1078-1092. <https://doi.org/10.1080/19386362.2020.1812193>.
40. Reddy, B., Kumar, P., Krishna, M., 2016. Evaluation of the optimum mixing ratio of a sand-tire chips mixture for engineering applications. *Journal Materials in Civil Engineering*, 28, 06015007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001335](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001335).
41. Lee, J.S., Dodds, J. and Santamarina, J.C., 2007. Behavior of rigid-soft particle mixtures. *Journal Materials in Civil Engineering*. 19(2), pp.179-184. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:2\(179\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:2(179)).
42. Ghazavi, M. and Kavandi, M., 2022. Shear modulus and damping characteristics of uniform and layered sand-rubber grain mixtures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 162, 107412. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107412>.
43. Ding, Y., Zhang, J., Chen, X., Wang, X. and Jia, Y., 2012. Experimental investigation on static and dynamic characteristics of granulated rubber-sand mixtures as a new railway subgrade filler. *Construction and Building Materials*, 273, 121955. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121955>.