

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

مسعود روشی^۱، رضا نورزاد^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشگاه نوشیروانی بابل

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه نوشیروانی بابل

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- masoud.raveshi@stu.nit.ac.ir

۲- moorzad@nit.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر، مخلوط ماسه و خرده‌های لاستیک در زمینه‌های گوناگون نظیر پایداری شیروانی‌ها، پشت‌ریز دیوارهای نگهبان و مواد زهکش در لندفیل‌ها استفاده می‌شوند. در این پژوهش، آزمایش سه محوری زهکشی نشده استاتیکی و دوره‌ای بر روی مخلوط ماسه بابل‌سر و خرده‌های لاستیک (اندازه بین ۱ تا ۸ میلی‌متر) انجام گردید. تاثیر 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 گردید. 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، موجب افزایش مقاومت در برابر روانگرایی می‌شوند.

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

* رضا نورزاد، دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه نوشیروانی بابل
ایمیل: moorzad@nit.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

Investigating the static and cyclic undrained behavior of the tire-sand mixture

Abstract

In recent years, the mixture of sand and rubber particles has been used in various fields of civil engineering, such as the stability of roofs, retaining walls, and drainage materials in landfills, due to its durability, cost-effectiveness and solving environmental problems. The purpose of this study is to investigate the effect of tire crumb on the shear strength and dilation in a static state and the liquefaction resistance in a dynamic state. In this regard, in this research, a static and dynamic undrained triaxial test was performed on a mixture of Babolsar sand and tire crumb (size between 1 and 8 mm) under constant confining pressure. The effect of parameters such as the amount of different tire crumbs (0, 10, 20 and 30% by weight) and different relative densities on the static and dynamic behavior of the mixture of sand and rubber crumb and the created pore water pressure was investigated. In the static (consolidated-undrained) triaxial test, the relative densities of the sand-tire mixtures were 40, 60 and 80 percent. The tests were carried out on the specimens at 100 kPa cell pressure. Also, the specimen was loaded under a strain rate of 0.3% per minute, for all the tests until the axial strain reached 20%. In cyclic triaxial tests, the relative density of the sand-tire mixtures was 40 percent and the confining pressure of 100 kPa was used in the experiments. The sinusoidal waveform was applied to the specimen with a frequency of 0.5 Hz. To accuracy evaluation, the behavior of the sand-tire mixture, corrections such as membrane penetration corrections, membrane force and cross-sectional area were applied. The results showed that adding tire crumb to sand reduces the shear strength and dilation of sand. Also, the ratio of the mean diameter of tire particles to the mean diameter of sand particles affects the behavior of shear resistance and dilation of the sand-tire mixture. As the ratio of the mean diameter of tire particles to the mean diameter of sand particles increases, the shear strength and dilation of the sand-tire mixture increases. Also, increasing the amount of tire crumb in sand reduces the excess pore water pressure and as a result reduces liquefaction potential in cyclic loading. This behavior can be attributed to the compressible nature due to the low elastic modulus of the tire crumb.

Keywords: Tire crumb, Triaxial test, Shear strength, Dilation, Liquefaction

۱. مقدمه

یکی از علل اصلی خسارت و خرابی‌ها وارد بر سازه‌ها در حین وقوع زلزله، پدیده روانگرایی می‌باشد. روانگرایی پدیده‌ای است که طی آن، هنگامی که یک توده خاک در معرض بارگذاری تک محوری، دوره‌ای و دینامیکی قرار می‌گیرد، مقاومت برشی آن در حجم ثابت کاهش می‌یابد. در این هنگام توده خاک، تغییر شکل برشی یک جهتی بسیار بزرگی تحمل می‌نماید، این 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 غیره اشاره کرد. با وجود این که علل وقوع پدیده روانگرایی به طور کامل در جوامع علمی بررسی شد، اما هنوز مسائل بسیاری همچون چگونگی نحوه حفاظت در برابر این پدیده وجود دارد. بسیاری از پژوهشگران در سال‌های اخیر از مدل سازی فیزیکی در آزمایشگاه، مانند میز لرزه و آزمایش سانتریفیوژ استفاده کردند. استفاده از این دستگاه‌های مدرن، کمک شایانی را در پیش‌برد سریع پژوهش‌ها به منظور کاهش خطرات ناشی از روانگرایی به دنبال داشته است. روش‌های مقابله با پدیده روانگرایی را در حالت کلی می‌توان به چهار گروه تقسیم‌بندی کرد: (۱) متراکم-سازی (۲) زهکشی (۳) تسلیح (۴) سمنتاسیون بوسیله تزریق.^[۲] در سال‌های اخیر، بیشتر توجه پژوهشگران برای مقابله با پدیده روانگرایی به کمک روش تسلیح (ژئوسنتتیک‌ها و خرده‌های لاستیک) معطوف شده است.^[۳]

با پیشرفت تکنولوژی و افزایش جمعیت و نیاز به تولید روزافزون انواع خودروها، سالانه در تمام کشورهای دنیا تعداد زیادی لاستیک فرسوده، با خارج شدن از چرخه مصرف، سبب بروز مشکلات زیست محیطی می‌شوند. از این رو دفع مواد لاستیکی یکی از مشکلات عمده در سرتاسر جهان می‌باشد که باید با توجه به آمار بالای لاستیک‌های فرسوده، راهکارهایی برای آن پیشنهاد شود. هر ساله تقریباً ۶۰ میلیون حلقه لاستیک فرسوده در آمریکا، ۲۹ میلیون در کانادا و ۲۵ میلیون در کره جنوبی رها می‌گردند که این لاستیک‌های رها شده در زمینه‌های گوناگون از قبیل: استفاده دوباره، بازسازی، استفاده به عنوان پشت‌ریز سازه‌های نگهبان، استفاده در لندفیل‌ها، و به عنوان سوخت استفاده می‌شوند.^[۴] ویژگی‌های مکانیکی نظیر مقاومت کششی بالا و وزن مخصوص کم، دوام و قیمت ناچیز لاستیک-ها، کاربرد آن‌ها را در سازه‌های ژئوتکنیکی مانند دیوارهای نگهبان،

پایداری شیب‌ها، بستر راه‌ها و پی‌ها برای بهبود پارامترهای رفتاری خاک مطرح می‌سازد.^[۵] براساس استاندارد ASTM D۶۲۷۰^[۶] لاستیک‌های بازیافتی انواع گوناگونی دارند که به شرح زیر می‌باشد: (۱) تراشه لاستیک (تکه‌های لاستیک در اندازه ۰/۵ تا ۲ اینچ)، (۲) خرده لاستیک (تکه‌های لاستیک در اندازه ۲ تا ۱۲ اینچ) و (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، تک محوری، برش مستقیم و آزمایش نفوذپذیری بر روی نمونه‌های خاک مسلح با خرده‌های لاستیک، به بررسی ویژگی‌های رفتاری آن پرداخته‌اند. نتایج این آزمایش‌ها حاکی از آن بود که افزودن خرده‌های لاستیک به خاک، موجب بهبود ویژگی‌های مقاومتی خاک می‌شود و رفتار خاک را از حالت ترد به یک حالت انعطاف‌پذیرتر تغییر می‌دهد.^[۷] به عنوان اولین پژوهش‌ها در استفاده از خرده لاستیک در کارهای ژئوتکنیکی می‌توان به پژوهش‌های ماهر و گرای^[۸]، ادیل^[۹]، احمد و لاول^[۱۰]، بوسچر^[۱۱] و همکاران^[۱۱]، فووز^[۵] 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 سه محوری بر روی نمونه‌های متشکل از درصد‌های وزنی گوناگون مخلوط ماسه و خرده لاستیک انجام دادند که می‌توان به پژوهش‌های یانگ^[۶] و همکاران^[۱۳]، یوای و برگادو^[۱۴]، زورنبرگ^[۸] و همکاران^[۱۵]، گوتلند^[۹] و همکاران^[۱۶]، ونکاتاپا 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^[۱۲] و همکاران^[۲۱]، پروپوتانکون^[۱۳] و همکاران^[۲۲]، زو و وانگ^[۲۳]، شریعتمداری و همکاران^[۲۴]، آمانتا^[۱۵] و همکاران^[۲۵]، نیکیتاس^[۱۶] و همکاران^[۲۶]، کاواتا^[۱۷] و همکاران یک سری آزمایش‌های سه محوری دوره‌ای زهکشی نشده روی مخلوط ماسه با خرده‌های لاستیک (۰-۱۰۰٪) انجام دادند. فشار همه جانبه برای تمام نمونه‌ها ۱۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شد. آنان گزارش دادند که برای مخلوط ماسه و خرده لاستیک با مقدار کمتر از ۵۰ درصد حجمی خرده لاستیک، روانگرایی رخ می‌دهد، در صورتیکه برای مخلوط ماسه و خرده لاستیک با مقدار بالای ۵۰ درصد حجمی خرده لاستیک، روانگرایی به وضوح مشاهده

پژوهشگران، علت تغییر در مقاومت برشی و پتانسیل روانگرایی مخلوط ماسه و خرده لاستیک بیان گردید.

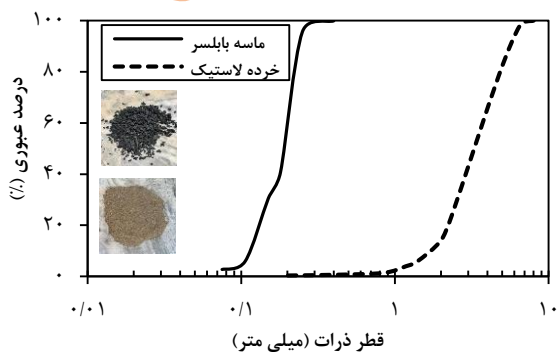
۲. مصالح و روش انجام آزمایش

۲.۱. مشخصات مصالح مورد استفاده در این پژوهش

در این پژوهش از ماسه بابلسر استفاده شد که ویژگی‌های آن در جدول ۱ و منحنی دانه‌بندی آن طبق استاندارد ASTM D۴۲۲ [۳۲]، در شکل ۱ نشان داده شده است. بر اساس سیستم رده‌بندی متحد، ماسه بابلسر از نوع ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده (SP) می‌باشد. جهت تسلیح خاک در این پژوهش، از خرده‌های لاستیک بازیافتی (۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ درصد وزنی) استفاده می‌شود. خرده‌های لاستیک، ذرات حاصل از خرد و آسیاب کردن تایرهای فرسوده اتومبیل‌ها پس از خارج کردن سیم‌های فلزی آن‌ها است. باید توجه داشت به منظور اجتناب از تاثیر اندازه ذرات روی 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 پوکی کمینه و بیشینه استفاده شد.

جدول ۱. ویژگی‌های ماسه و خرده‌های لاستیک.

نمونه	نسبت پوکی بیشینه (e _{max})	نسبت پوکی کمینه (e _{min})	وزن مخصوص (Gs)
ماسه خالص	۰/۸۰۴	۰/۵۳۴	۲/۴۷
خرده لاستیک ۵٪	۰/۷۶۲	۰/۵۱۸	۲/۵۱
خرده لاستیک ۱۰٪	۰/۷۱	۰/۴۶۶	۲/۳۶
خرده لاستیک ۲۰٪	۰/۵۸۴	۰/۳۳۸	۲/۰۶
خرده لاستیک ۳۰٪	۰/۴۳۱	۰/۱۹۸	۱/۷۶



شکل ۱. دانه‌بندی ماسه و خرده‌های لاستیک.

نمی‌شود. [۲۷] مشیری^{۱۸} با انجام آزمایش‌های سه محوری استاتیکی و دوره‌ای بر روی مخلوط ماسه و خرده لاستیک، به بررسی روانگرایی آن پرداخت. نتایج نشان داد که افزودن خرده‌های لاستیک به ماسه تا میزان ۳۰٪ وزنی، موجب افزایش مقاومت ماسه در برابر روانگرایی می‌شود. همچنین وجود خرده‌های لاستیک در ماسه باعث به وجود 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 آمونتن^{۱۹} و همکاران به بررسی روانگرایی استاتیکی و دوره‌ای مخلوط ماسه و خرده لاستیک (۰-۱۰۰٪) با انجام آزمایش سه محوری پرداختند. اندازه خرده‌های لاستیک استفاده شده در این پژوهش کمتر از ۲ میلی‌متر بود. مخلوط‌های ماسه با خرده‌های لاستیک به میزان ۳۰ تا 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 باعث کاهش سختی خاک گردید. [۲۹] لی^{۲۰} و همکاران به کمک آزمایش ستون تشدید و سه محوری 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 در فشار همه جانبه پایین، ضریب برشی با افزایش میزان خرده‌های لاستیک کاهش و در فشار همه جانبه بالا، افزایش می‌یابد. از سوی دیگر افزایش نسبت اندازه خرده لاستیک به ذرات ماسه، موجب افزایش مقاومت در برابر روانگرایی می‌شود. آنان دلیل تغییر در مقاومت در برابر روانگرایی مخلوط ماسه و خرده لاستیک را به تغییر تماس ذرات از حالت ذرات ماسه به هم، به ذرات ماسه با ذرات خرده لاستیک دانستند. [۳۰] از طرفی دیگر پژوهش‌های شریعتمداری و همکاران و هونگ نشان داد که با افزایش خرده‌های لاستیک در ماسه، مقاومت برشی و مقاومت در برابر روانگرایی مخلوط ماسه و خرده لاستیک کاهش می‌یابد. [۳۱] این اختلاف در نتایج پژوهش‌های گوناگون را می‌توان از اختلاف در نمونه‌سازی، شرایط مختلف آزمایش‌ها، اندازه خرده‌های لاستیک متفاوت و شرایط بارگذاری گوناگون دانست. [۲۷-۳۱] بررسی 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 ضرورت بررسی در این زمینه مورد توجه قرار گرفته است. در نتیجه در این پژوهش با انجام آزمایش‌های سه محوری استاتیکی و دینامیکی، به بررسی روانگرایی مخلوط ماسه و خرده لاستیک، تغییر فشار آب حفره‌ای ایجاد شده پرداخته شده است. همچنین با مقایسه این نتایج با نتایج سایر

به این منظور آزمایش تعیین وزن مخصوص بیشینه مطابق استاندارد ASTM D4253^[۳۳] و آزمایش تعیین وزن مخصوص کمینه مطابق استاندارد ASTM D4254^[۳۴] بر روی مخلوط ماسه و خرده‌های لاستیک انجام گردید. همان طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود با افزودن خرده‌های لاستیک به ماسه، به دلیل قرارگیری ذرات ماسه در بین خرده‌های لاستیک، وزن مخصوص بیشینه و کمینه ماسه کاهش می‌یابد.

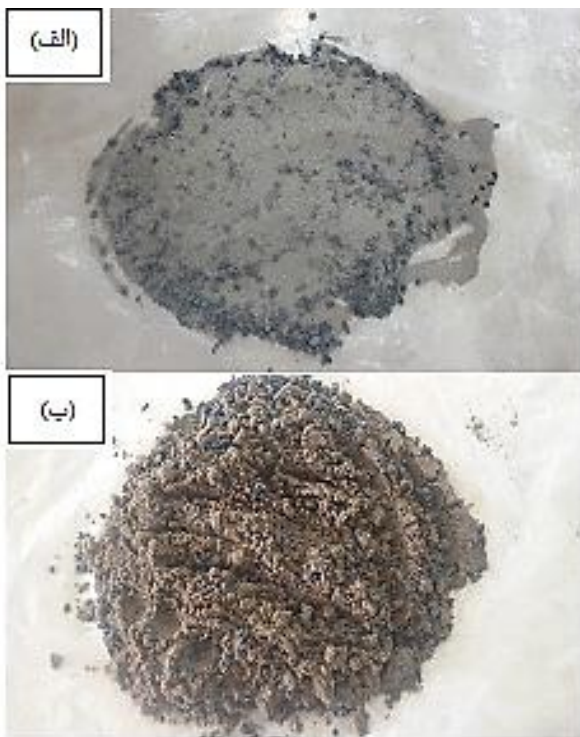
۲.۲. دستگاه‌های آزمایش

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 طبق استاندارد ASTM D۷۱۸۱^[۳۵] و برای آزمایش‌های دینامیکی از دستگاه سه محوری دینامیکی متعلق به شرکت مواد ساخت آزما ویستا (GMTM)^۲ طبق استاندارد ASTM D۵۳۱۱^[۳۶] استفاده گردید. در شکل ۲ به ترتیب شمای کلی دستگاه سه محوری استاتیکی و دینامیکی استفاده شده در این پژوهش، مشاهده می‌شود.

۲.۳. نمونه‌سازی و نحوه انجام آزمایش

در آزمون‌های آزمایشگاهی چون قرائت‌ها در مرزهای نمونه انجام می‌گیرد مسئله ساخت نمونه همگن جهت 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 مد نظر قرار گرفت.

ساخت نمونه همگن در آزمایش‌های سه محوری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به همین دلیل، در پژوهش حاضر به منظور رسیدن به نمونه‌های همگن، برای ساخت نمونه از روش کوبش مرطوب^{۲۱} استفاده شد و به مقدار ۴ درصد وزنی مخلوط ماسه و خرده لاستیک، آب به نمونه‌ها اضافه گردید. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود افزودن آب موجب ایجاد نمونه‌های همگن از مخلوط ماسه و خرده لاستیک شد.



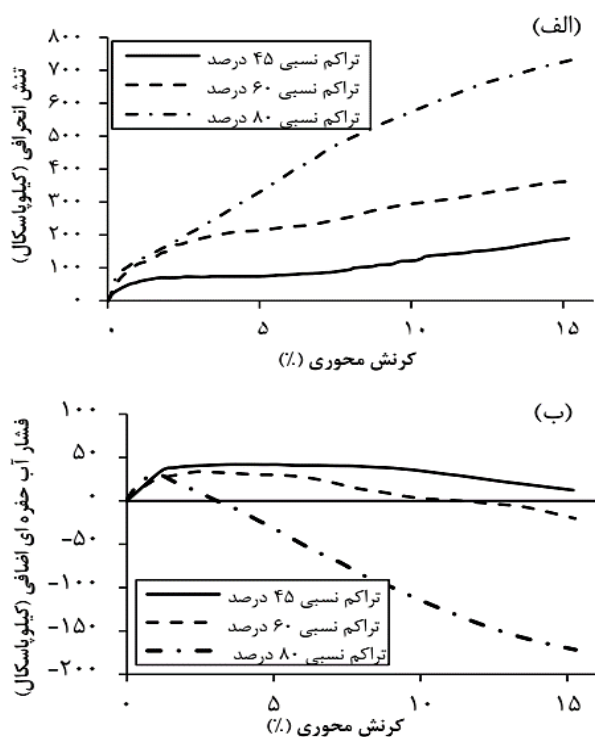
شکل ۳. مخلوط ماسه و خرده لاستیک (الف) بدون رطوبت (ب) با رطوبت خرده‌های لاستیک به ماسه به صورت ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی خشک اضافه شده است. علت افزودن خرده‌های لاستیک به ماسه تا درصد وزنی ۳۰ درصد آن است که در میزان خرده‌های



شکل ۲. شمای کلی (الف) دستگاه سه محوری استاتیکی (ب) دستگاه سه محوری دینامیکی.

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 تاثیرگذار است. برای ماسه بابلسر و مخلوط ماسه با خرده‌های لاستیک، با افزایش تراکم نسبی، تنش انحرافی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش تراکم 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.

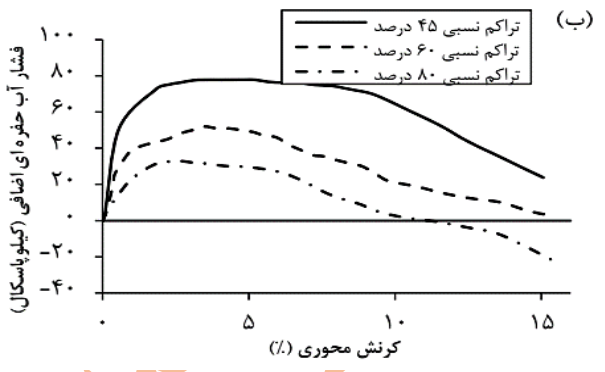
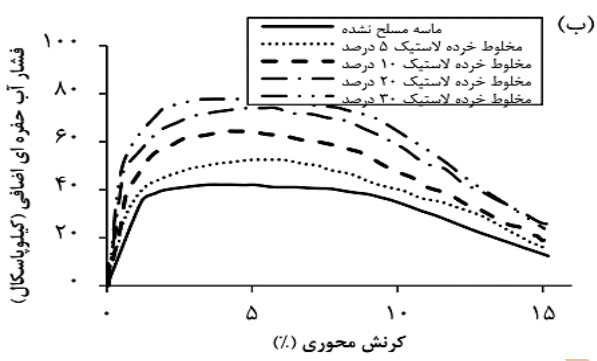
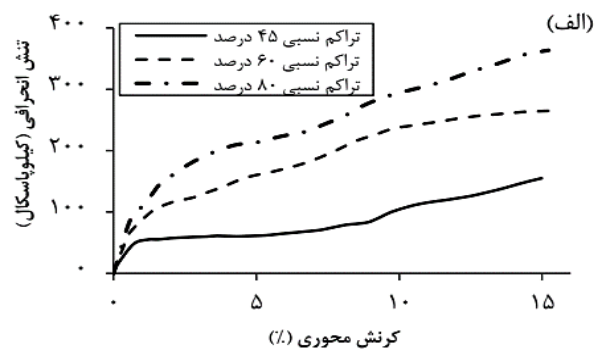
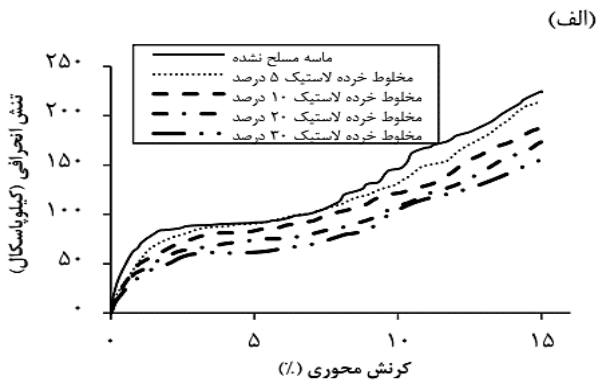


شکل ۴. آزمایش سه محوری استاتیکی زهکشی نشده بر روی ماسه بابلسر (الف) نمودار تنش-کرنش، (ب) نمودار فشار حفره‌ای اضافی در برابر کرنش محوری

لاستیک بیشتر از این مقدار پدیده جداشدگی بین 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 ۵ 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 رقمی که دقتی برابر میلی‌متر دارد، کنترل گردید. در بین لایه‌ها، به منظور حفظ پیوستگی دو لایه، با استفاده از خط‌کش فلزی شیارهایی به ژرفای حدود ۱/۱۰ ضخامت لایه، به صورت شبکه‌ای ایجاد شد. بعد از ساخت نمونه به منظور عدم کج‌شدگی و خروج از مرکزیت نمونه، مقدار کمی مکش در حدود ۱۰ تا ۱۵ کیلو پاسکال به نمونه اعمال می‌شود. بعد از پر نمودن آب داخل سلول به منظور حذف خلاء عملی بر نمونه، فشار داخلی سلول تا مقداری که جایگزین مکش عملی برای نگه داشتن نمونه باشد؛ افزایش می‌یابد که این مقدار برای تمام نمونه‌ها ۱۵ کیلو پاسکال در نظر گرفته شد. برای اشباع‌سازی نمونه‌ها گاز دی اکسید کربن به منظور خروج حباب‌های هوا، به مدت ۱ ساعت و در ادامه آب مقطر عاری از هوا از نمونه‌ها عبور داد شد. در مرحله بعد برای اشباع سازی کامل نمونه و دستیابی به درصد اشباع بالای ۹۵ درصد، اقدام به افزایش فشار همه‌جانبه و فشار داخل نمونه شده است. این روند در گام‌های گوناگون تکرار شده تا نمونه به درصد اشباع ۹۵ درصد برسد. فشار همه‌جانبه برای تمامی نمونه‌ها ۱۰۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شد. در آزمایش‌های سه محوری استاتیکی، نمونه‌ها با تراکم نسبی ۴۵، ۶۰ و ۸۰ درصد ساخته شدند. میزان سرعت بارگذاری ۰/۳ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شده است و بارگذاری بر روی نمونه‌ها تا کرنش ۱۵ درصد ادامه یافت. در آزمایش‌های سه محوری دوره‌ای، تمامی نمونه‌ها با تراکم نسبی ۴۵ درصد ساخته شدند و در انجام آزمایش‌های اخیر از فشار دورگیر ۱۰۰ کیلو پاسکال استفاده شد و بارگذاری روی تمامی نمونه‌ها از نوع کنترل تنش با $CSR = 0.25$ و بسامد ۱ هرتز است. پس از انجام آزمایش‌های استاتیکی و دوره‌ای بر روی نمونه‌ها، در انجام محاسبات اصلاحات مربوط نفوذ غشا، نیرو و سطح بارگذاری انجام شد.

۴. ارائه و تفسیر نتایج

۴.۱. آزمایش سه محوری استاتیکی



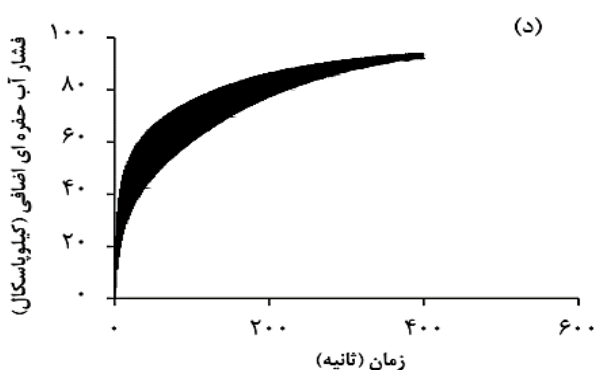
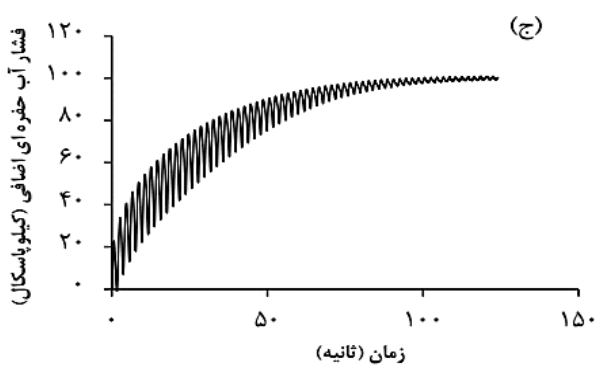
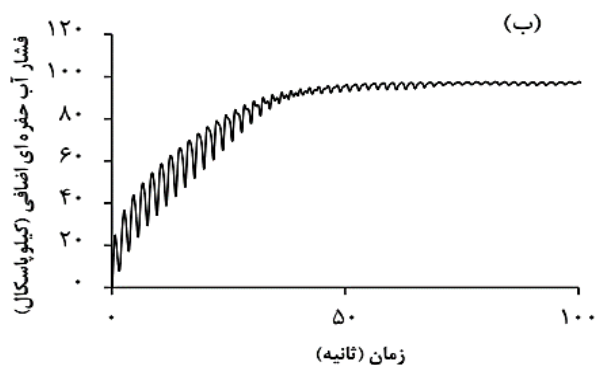
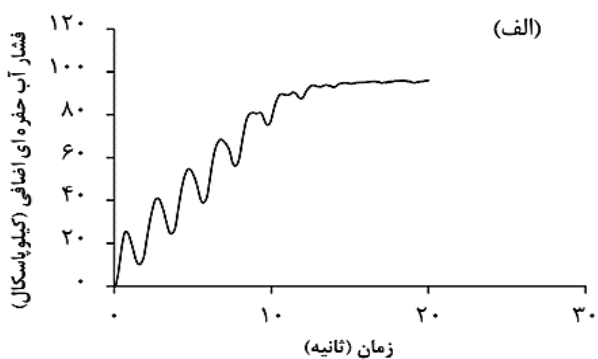
شکل ۵. آزمایش سه محوری استاتیکی زهکشی نشده بر روی مخلوط با ۳۰ درصد خرده لاستیک الف) نمودار تنش-کرنش، ب) نمودار فشار حفره‌ای اضافی در برابر کرنش محوری

شکل ۶. آزمایش سه محوری استاتیکی زهکشی نشده بر روی مخلوط ماسه و خرده لاستیک الف) نمودار تنش-کرنش، ب) نمودار فشار حفره‌ای اضافی در برابر کرنش محوری

در شکل ۶ الف) تاثیر افزودن خرده‌های لاستیک به مقاومت برشی ماسه در تراکم نسبی ۸۰ درصد مشاهده می‌شود. همان‌طور که می‌توان دید با افزودن خرده‌های لاستیک به ماسه، مقاومت زهکشی نشده ماسه کاهش می‌یابد. به طوری که برای 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 ب)). این نتایج با پژوهش‌های شریعتمداری^[۲۴] انطباق خوبی دارد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که افزودن خرده‌های لاستیک به ماسه باعث نرم‌شدگی و کاهش مقاومت برشی ماسه می‌شود. کاهش در میزان اتساع مخلوط ماسه و خرده لاستیک به دلیل وجود خرده‌های لاستیک در بین ذرات ماسه می‌باشد. خرده‌های لاستیک به دلیل رفتار ارتجاعی در هنگام بارگذاری، تغییرشکل زیادی از خود نشان می‌دهند و همین موضوع باعث کاهش اتساع مخلوط ماسه و خرده‌های لاستیک می‌شود. همچنین با افزودن میزان خرده‌های لاستیک در ماسه از مقدار ۵ درصد تا 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 تاثیر 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 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 تا 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

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 سه‌محوری دوره‌ای روی ماسه بابلسر و مخلوط ماسه با خرده‌های لاستیک ارائه شده است.



شکل ۷. نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی-زمان (الف) ماسه بابلسر ب) مخلوط خرده لاستیک ۱۰ درصد ج) مخلوط خرده لاستیک ۲۰ درصد د) مخلوط خرده لاستیک ۳۰ درصد

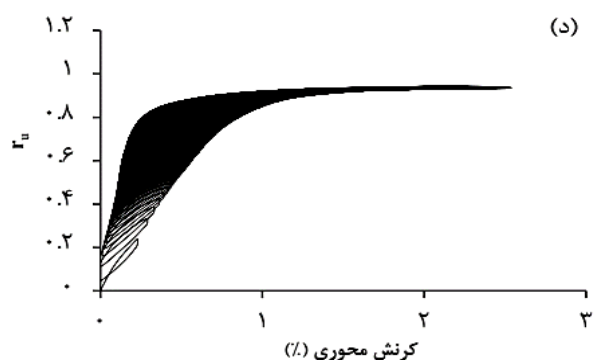
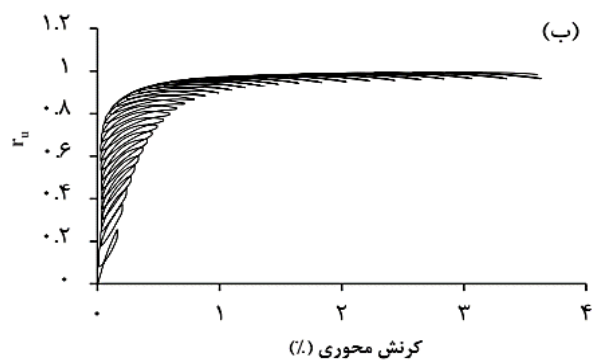
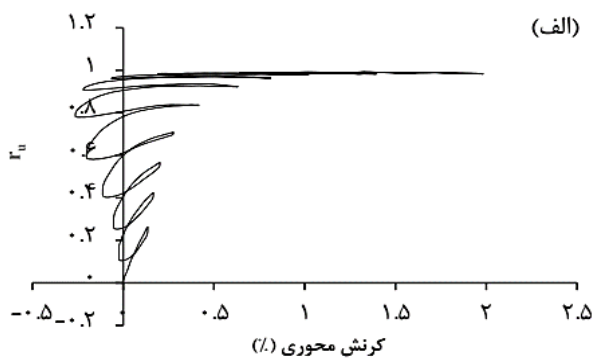
لاستیک کاهش می‌یابد. علت این امر را می‌توان در تماس ذرات ماسه با ماسه، ماسه با خرده‌های لاستیک و خرده‌های لاستیک با یکدیگر دانست. با افزایش نسبت وزنی خرده‌های لاستیک در ماسه، بتدریج تماس ذرات ماسه با خرده‌های لاستیک افزایش می‌یابد؛ به طوری که در نسبت وزنی حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد، تماس ذرات ماسه با خرده‌های لاستیک به مقدار حداکثر خود می‌رسد و در این نسبت وزنی بیشترین مقاومت برشی را از خود نشان می‌دهد.

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

پژوهشگران	مقاومت برشی بیشینه	خرده لاستیک (D _{۵۰} / D _{۱۰۰})	اتساع
یووی و برگادو [۱۳]	کاهش	۱۱/۶	-
شیخ [۲۵]	کاهش	۴,۶/۵	-
کاواتا [۲۶]	کاهش	۱/۶۵	-
مشیری [۲۷]	تا ۳۰ درصد خرده لاستیک افزایش، بیشتر از ۳۰ درصد کاهش	۲۲	تا ۳۰ درصد خرده لاستیک افزایش، بیشتر از ۳۰ درصد کاهش
زورنبرگ [۱۴]	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 [۲۳]	کاهش	۴	کاهش
روحانیفر [۳۷]	تا ۲۰ درصد خرده لاستیک افزایش، بیشتر از ۲۰ درصد کاهش	۱۸	تا ۲۰ درصد خرده لاستیک افزایش، بیشتر از ۲۰ درصد کاهش
ردی [۲۸]	تا ۳۰ درصد خرده لاستیک افزایش، بیشتر از ۳۰ درصد کاهش	۴۴	-
سنتن آمونت [۲۸]	کاهش	۳	کاهش
لی [۲۵]	کاهش	۱۰	-
پژوهش حاضر	کاهش	۱۴	کاهش

۴.۲. آزمایش سه محوری دوره‌ای

به منظور بررسی میزان اثربخشی خرده‌های لاستیک بر رفتار ماسه تحت بارگذاری دوره‌ای، آزمایش‌های سه محوری دوره‌ای



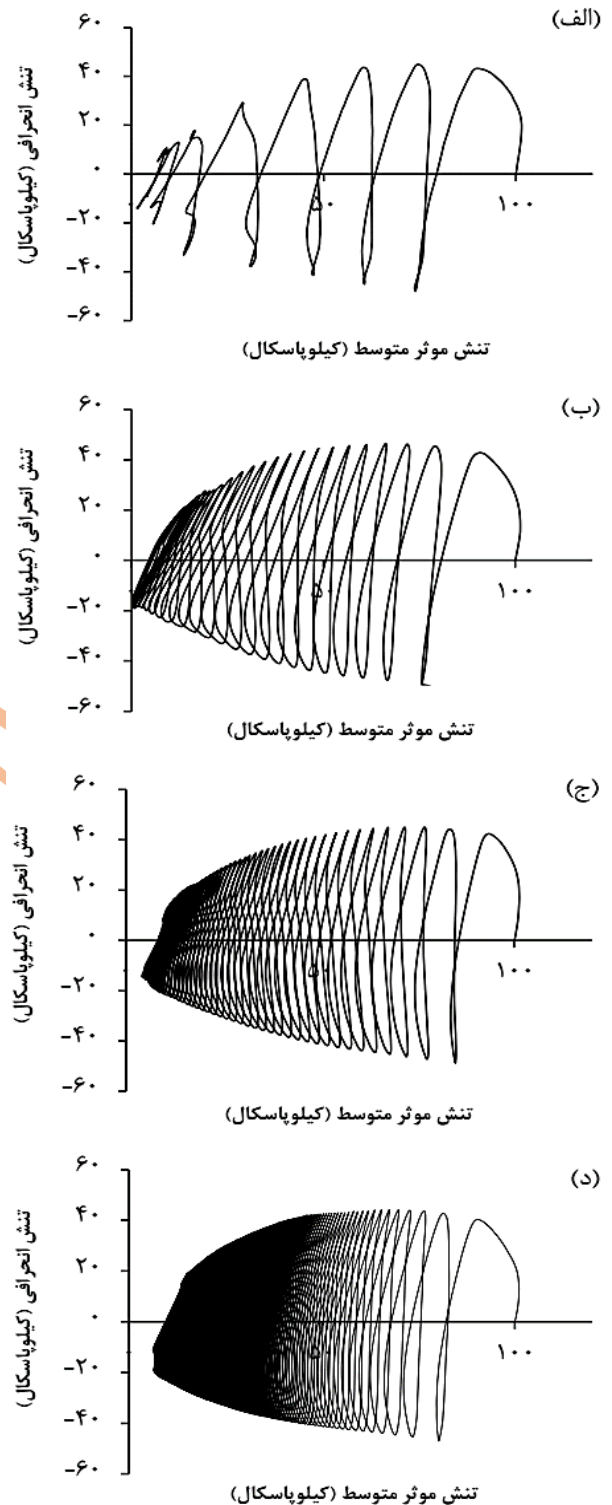
شکل ۸. نسبت I_{II} - کرنش محوری الف) ماسه بابلسر ب) مخلوط خرده لاستیک ۱۰ درصد ج) مخلوط خرده لاستیک ۲۰ درصد د) مخلوط خرده لاستیک ۳۰ درصد

در شکل‌های ۹ (الف) تا ۹ (د) به ترتیب می‌توان مسیر تنش را برای ماسه مسلح نشده و مخلوط 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.

شکل‌های ۷ (الف) تا ۷ (د) به ترتیب فشار آب حفره‌ای اضافی بر حسب زمان را برای ماسه، مخلوط خرده لاستیک ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد نشان می‌دهند. در حالت کلی، همان‌طور که از شکل‌ها نمایان است 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 در حالی که 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 باعث افزایش تعداد سیکل‌های لازم برای روانگرایی می‌شود. همچنین با افزایش مقدار خرده‌های لاستیک زمان لازم برای وقوع روانگرایی نیز افزایش می‌یابد.

شکل‌های ۸ (الف) تا ۸ (د) به ترتیب مقدار I_{II} (نسبت فشار آب حفره‌ای) بر حسب کرنش محوری 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، در حالی که 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 باعث افزایش کرنش محوری در زمان شروع روانگرایی می‌شود. همچنین با افزایش مقدار خرده‌های لاستیک کرنش محوری برای شروع روانگرایی نیز افزایش می‌یابد. از سوی دیگری، با افزودن خرده‌های لاستیک به ماسه تعداد سیکل‌های لازم برای وقوع روانگرایی افزایش می‌یابد.

همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود با افزودن خرده‌های لاستیک به ماسه، فشار آب حفره‌ای کاهش یافته و تنش موثر متوسط در تعداد سیکل‌های بالاتری کاهش می‌یابد.

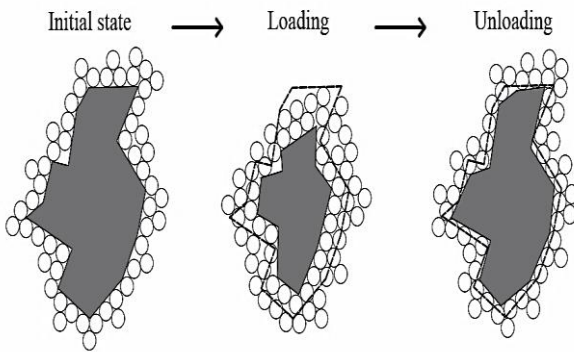


شکل ۹. نسبت تنش انحرافی-تنش موثر متوسط (الف) ماسه بابلسر (ب) مخلوط خرده لاستیک ۱۰ درصد (ج) مخلوط خرده لاستیک ۲۰ درصد (د) مخلوط خرده لاستیک ۳۰ درصد

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.

شکل‌های ۱۰ (الف) و ۱۰ (د) به ترتیب مقدار تنش انحرافی بر حسب کرنش محوری را برای ماسه مسلح نشده و مخلوط خرده لاستیک ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد ارائه می‌دهد. با مشاهده این اشکال می‌توان نتیجه گرفت که افزودن خرده‌های لاستیک به ماسه به دلیل تغییر شکل‌پذیر بودن خرده‌های لاستیک، موجب کاهش سختی و افزایش شکل‌پذیری 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^[۳۷] و دینگ^[۳۸] انطباق خوبی دارد. این پژوهشگران دریافته‌اند، 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 انعطاف‌پذیر و غیر قابل تراکم هستند، در هنگام بارگذاری دوره‌ای برای نمونه‌های ماسه خالص، آب موجود در بین حفرات ذرات ماسه، محلی برای جاری و زهکشی ندارند و به همین دلیل فشار آب حفره‌ای بالا می‌رود. درحالی‌که خرده‌های لاستیک طبیعت شکل‌پذیر و انعطاف‌پذیری دارند. زمانی که ذرات خرده‌های لاستیک موجود در بین ذرات ماسه، تحت بارگذاری قرار می‌گیرند در اثر اعمال نیرو تغییر شکل می‌دهند و این ذرات حجم کمتری را اشغال می‌کنند. این کاهش حجم باعث ایجاد محلی برای جاری و زهکشی شدن آب موجود در بین حفرات می‌شود و در نتیجه موجب ایجاد فشار آب حفره‌ای منفی در ماسه می‌شود که در مجموع باعث کاهش تولید فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در مخلوط ماسه و خرده‌های لاستیک می‌شود. در نتیجه با افزایش مقدار خرده‌های لاستیک در ماسه فشار آب حفره‌ای منفی بیشتری ایجاد می‌شود و مقاومت در برابر روانگرایی در ماسه افزایش می‌یابد (شکل ۱۱).

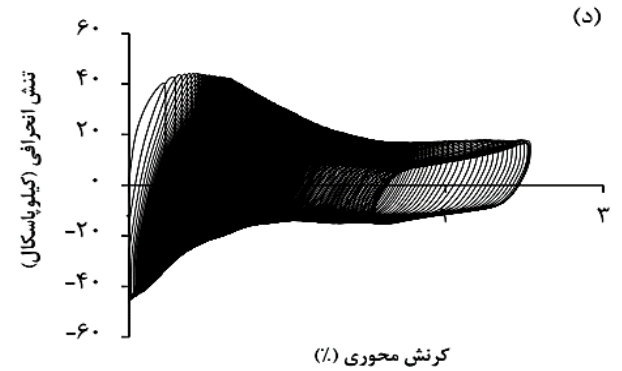
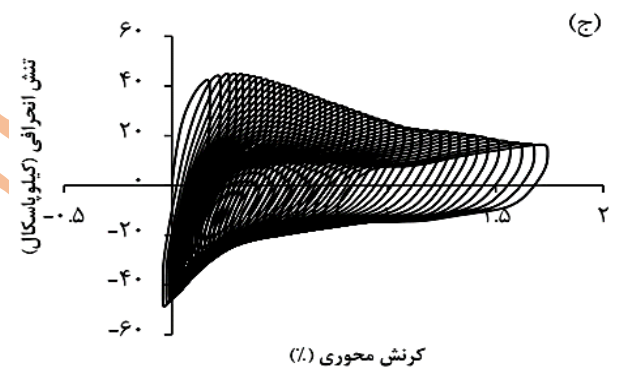
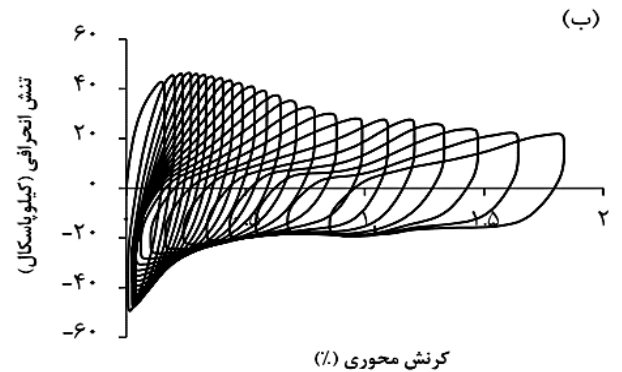
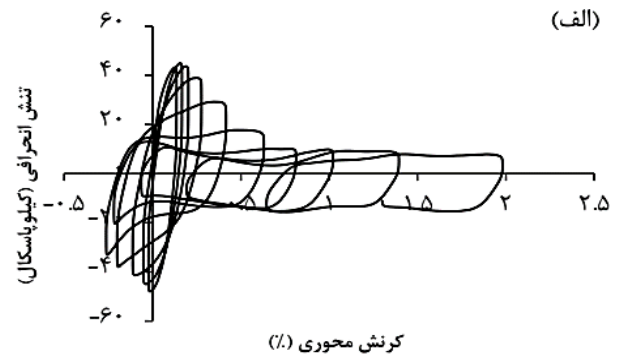


شکل ۱۱. ذرات خرده لاستیک تحت بارگذاری و باربرداری

۵. نتیجه گیری

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

- نتایج آزمایش‌های استاتیکی و مقایسه با پژوهش‌های دیگر نشان داد که نسبت اندازه متوسط خرده‌های لاستیک به اندازه متوسط ذرات ماسه بر رفتار مخلوط ماسه و خرده‌های لاستیک تاثیر می‌گذارد. افزودن خرده‌های لاستیک به ماسه با نسبت اندازه متوسط خرده‌های لاستیک به نسبت اندازه متوسط ذرات ماسه در حدود ۱۸، باعث کاهش مقاومت برشی ماسه می‌شود و اتساع را کاهش می‌دهد. همچنین با افزایش میزان خرده‌های لاستیک در ماسه، کاهش مقاومت برشی به میزان قابل توجهی مشهود بود.
- افزودن خرده‌های لاستیک به ماسه موجب افزایش کرنش محوری در زمان وقوع روانگرایی می‌شود. با افزایش میزان خرده‌های لاستیک در ماسه، مقدار کرنش محوری در زمان روانگرایی بیشتر می‌شود.
- با افزایش میزان خرده‌های لاستیک در ماسه به دلیل طبیعت انعطاف‌پذیری خرده‌های لاستیک، میزان سختی مخلوط ماسه با خرده‌های لاستیک نسبت به ماسه خالص، کاهش و تغییرشکل-پذیری افزایش می‌یابد.
- وجود خرده‌های لاستیک به دلیل تغییرشکل‌پذیری ذرات آن‌ها و جمع‌شدگی این ذرات در هنگام اعمال بارگذاری، باعث ایجاد فشار آب حفره‌ای منفی می‌شوند و در نتیجه در ماسه موجب



شکل ۱۰. تنش انحرافی-کرنش محوری (الف) ماسه بابلسر (ب) مخلوط خرده لاستیک ۱۰ درصد (ج) مخلوط خرده لاستیک ۲۰ درصد (د) مخلوط خرده لاستیک ۳۰ درصد

اعلام تعارض منافع

نویسنده اعلام می‌کند که هیچ نوع تعارض منافی وجود ندارد.

کاهش در تولید فشار آب منغذی اضافی می‌گردند و مقاومت در

برابر روانگرایی را افزایش می‌دهند.

پانوشتها

۱۳. Promputthangkoon
۱۴. Zhou & Wang
۱۵. Amanta
۱۶. Nikitas
۱۷. Kawata
۱۸. Mashiri
۱۹. Senthen Amuthan
۲۰. Li
۲۱. Moist tamping
۲۲. Sheikh
۲۳. Madhusudhan
۲۲. Reddy
۲۵. Lee
۲۶. Ding

۱. Maher & Gray
۲. Edil
۳. Ahmed & Lovell
۴. Bosscher
۵. Foose
۶. Yang
۷. Youwai & Bergado
۸. Zornberg
۹. Gotteland
۱۰. Venkatappa & Dutta
۱۱. Attom
۱۲. Okamoto

فهرست‌های
نمونه

منابع (References)

۱. Kramer, S.L. "Geotechnical earthquake engineering", Upper Saddle River, USA: Prentice-Hall Inc. (۱۹۹۶).
۲. Baziari, Mohammad Hassan., Ghannad, Zeynab. "Soil dynamics", Tehran, Iran University of Science and Technology. ۳rd Edition, (In Persian) (۲۰۱۲).
۳. Madhusudhan, B.R., Boominathan, A., Banerjee, S. "Cyclic simple shear response of sand-rubber tire chips mixture", *Int. J. Geomech*, ۲۰(۹): ۰۴۰۲۰۱۳۶, (۲۰۲۰).
۴. Mehrannia, N., Kosha, B., Vafaeian, M. "Investigating the resistance and permeability behavior of sand mixture with rubber particles", *In: ۷th International Congress of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Isfahan University of Technology*, In Persian (۲۰۰۶).
۵. Humphrey, D.N., et al. "Shear Strength and Compressibility of the Tyre Chips for Use as Retaining Wall Backfill", *Transportation Research Record* No. ۱۴۲۲, Lightweight Artificial and Waste Materials for Embankments over Soft Soils, Washington, DC, pp. ۲۹-۳۰ (۱۹۹۳).
۶. ASTM, D۶۲۷۰, "Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications", Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, P.A., USA (۲۰۰۴)
۷. Raveshi, M. "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) (۲۰۱۴).
۸. Maher, M.H., and Gray, D.H. "Static Response of Sand Reinforced with Randomly Distributed Fibers", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, ۱۱۷(۱), pp. ۱۶۶۱-۱۶۷۷ (۱۹۹۰).
۹. Bosscher, P.J., Edil, T.B., and Eldin, N.N. "Construction and Performance of a Shredded Waste Tire Test Embankment", *Transportation Research Record*, Washington DC ۱۳۴۵, pp. ۴۴-۵۲ (۱۹۹۲)
۱۰. Ahmed, I., and Lovell, C.W. "Rubber Soils as Lightweight Geomaterials, Lightweight Artificial and Waste Materials for Embankments over Soft Soils", *Transportation Research Record* (۱۹۹۲).
۱۱. Bosscher, P.J., Edil, T.B., and Kuraoka, S. "Design of Highway Embankment Using Tire Chips", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*. ۱۲۲(۴), pp. ۲۹۵-۳۰۴ (۱۹۹۶).
۱۲. Foote, G.J., Benson, C.H., and Bosscher, P.J. "Sand Reinforced with Shredded Waste Tires", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, ۱۲۲(۹), pp. ۷۶۰-۷۶۷ (۱۹۹۶).
۱۳. Yang, S., Lohnes, R.A., and Kjartanson B.H. "Mechanical Properties of Shredded Tires", *Geotechnical Testing Journal*, ۲۰(۱), pp. ۴۴-۵۲ (۲۰۰۲).
۱۴. Youwai, S., and Bergado, D.T. "Strength and Deformation Characteristics of Shredded Rubber Tire-Sand Mixtures", *Journal of Canadian Geotechnical*, ۴۰(۲), pp. ۲۵۴-۲۶۴ (۲۰۰۳)
۱۵. Zornberg, J.G., Cabral, A.R. "Behaviour of Tire Shred-Sand Mixtures", *Journal of Canadian Geotechnical*, ۴۱(۲), pp. ۲۲۷-۲۴۱ (۲۰۰۴).
۱۶. Gotteland, P., Lambert, S., and Balachowski, L. "Strength Characteristics of Tyre Chips-Sand Mixture", *Studia Geotechnica et Mechanica*, ۲۷(۱), (۲۰۰۵).
۱۷. Venkatappa, Rao, G., and Dutta, R.K. "Compressibility and Strength Behaviour of Sand-Tire Chip Mixtures", *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, ۲۴(۳), pp. ۲۱۱-۲۲۴ (۲۰۰۶).
۱۸. Attom, M.F. "The Use of Shredded Waste Tires to Improve the Geotechnical Engineering Properties of Sand", *Journal of Environmental Geology*, ۴۹(۴), pp. ۴۹۷-۵۰۳ (۲۰۰۶)
۱۹. Noorzad, R., Raveshi, M. "Mechanical Behavior of Waste Tire Crumbs-Sand Mixtures Determined by Triaxial Tests", *Journal of Geotech Geol Eng* ۳۵, pp. ۱۷۹۳-۱۸۰۲ (۲۰۱۷).
۲۰. Ahmed, S., Vinod, J. S., Neaz Sheikh, M. Behavior of Sand-Tire Chip Mixtures in Constant Shear Drained Stress Path", *Journal materials in civil engineering*, ۳۴(۱۱) (۲۰۲۲).
۲۱. Okamoto, S., Hyodo, M., Orense, P., and Hazarika, H. "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. ۱۸۷-۱۹۶ (۲۰۰۷).
۲۲. Promputthangkoon, P., and Hyde, A.F.L. "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. ۱۶۱-۱۷۰ (۲۰۰۷).

۲۳. Zhou, E., and Wang, Q. “Experimental Investigation on Shear Strength and Liquefaction Potential of Rubber-Sand Mixtures”, *Advances in Civil Engineering*, Article ID ۵۹۳۴۹۶۱ (۲۰۱۹).
۲۴. Shariatmadari, N., Karimpour-Fard, M., and Shargh, A. “Undrained Monotonic and Cyclic Behavior of Sand-Ground Rubber Mixtures”, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* ۱۷(۳): ۵۴۱-۵۵۳ (۲۰۱۸).
۲۵. Amanta, S. A., Dasaka, S. M., “Dynamic Characteristics and Liquefaction Behavior of Sand-Tire Chip Mixes”, *Journal materials in civil engineering*, ۳۴(۱۰) (۲۰۲۲).
۲۶. Nikitas, G., Bhattacharya, S. “Experimental study on sand-tire chip mixture foundations acting as a soil liquefaction countermeasure”, *Bull Earthquake Eng* (۲۰۲۳).
۲۷. Kawata, S., Hyodo, M., Orense, P., Yamada, S., and Hazarika, H. “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 (۲۰۰۷).
۲۸. Mashiri., M.S. “Monotonic and Cyclic Behaviour of Sand Tyre Chips (STCh) Mixtures”, Dissertation, University of Wollongong, Wollongong, Australia (۲۰۱۴).
۲۹. Senthin Amuthan, M., Boominathan, A., Banerjee, S. “Undrained Cyclic Responses of Granulated Rubber-Sand Mixtures”, *Soils and Foundations*, ۶۰, pp. ۸۷۱-۸۸۵ (۲۰۲۰).
۳۰. Li, B., Huang, M., Zeng, X. “Dynamic behavior and liquefaction analysis of recycled-rubber sand mixtures”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ۲۸(۱۱): ۰۴۰۱۶۱۲۲ (۲۰۱۶).
۳۱. Hong, Y., Yang, Z., Orense, R.P., and Lu, Y. “Investigation of Sand-Tire Mixtures as Liquefaction Remedial Measure”, *Proceedings of the 1۰th Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Sydney, Australia (۲۰۱۵).
۳۲. ASTM D۴۲۲, “Standard test method for particle-size analysis of soils”, Annual Book of ASTM Standards, Conshohocken, P.A. (۲۰۰۴).
۳۳. ASTM D۴۲۰۴, “Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table”, Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA (۲۰۰۴).
۳۴. ASTM D۴۲۰۳, “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 (۲۰۰۴).
۳۵. ASTM D۷۱۸۱, “Standard test method for consolidated drained triaxial compression test for soils”, Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA (۲۰۱۱).
۳۶. ASTM D۵۳۱۱, “Standard test method for load controlled cyclic triaxial strength of soil”, Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA (۲۰۰۴).
۳۷. Sheikh, M., Mashiri, M., Vinod, J.S., Tsang, H.H. “Shear and Compressibility Behaviours of Sand-Tyre Crumb Mixtures”, *Journal materials in civil engineering*. ۲۵(۱۰), pp. ۱۳۶۶-۱۳۷۴ (۲۰۱۳).
۳۸. Madhusudhan, B.R., Boominathan, A., Banerjee, S. “Static and Large-Strain Dynamic Properties of Sand-Rubber Tire Shred Mixtures”, *Mater Civ Eng* Vol. ۲۹, No. ۱۰, pp. ۰۴۰۱۷۱۶۵ (۲۰۱۷).
۳۹. Rouhanifar, S., Afrazi, M., Fakhimi, A., Yazdani, M. “Strength and Deformation Behaviour of Sand-Rubber Mixture”, *Int. J. Geotechn. Eng.* (۱۵), pp. ۱۰۷۸-۱۰۹۲ (۲۰۱۲).
۴۰. Reddy, B., Kumar, P., Krishna, M. “Evaluation of the optimum Mixing Ratio of a Sand-Tire Chips Mixture for Geoenvironment Applications”, *Journal materials in civil engineering*. Vol. ۲۸, ۰۶۰۱۵۰۰۷ (۲۰۱۶).
۴۱. Lee, J.S., Dodds, J., Santamarina, J.C. “Behavior of Rigid-Soft Particle Mixtures”, *Journal materials in civil engineering*. ۱۹(۲), pp. ۱۷۹-۱۸۴ (۲۰۰۷).
۴۲. Ghazavi, M., Kavandi, M. “Shear modulus and damping characteristics of uniform and layered sand-rubber grain mixtures”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, ۱۶۲, ۱۰۷۴۱۲ (۲۰۲۲).
۴۳. Ding, Y., Zhang, J., Chen, X., Wang, X., Jia, Y. “Experimental investigation on static and dynamic characteristics of granulated rubber-sand mixtures as a new railway subgrade filler”, *Construction and Building Materials*, ۲۷۳, ۱۲۱۹۵۵ (۲۰۲۱).

فرد استای زندگی