

مطالعه آزمایشگاهی رفتار مکانیکی مخلوط ماسه و لاستیک

سلمان روحانی فر^{۱*}، محمد افرازی^۲

۱- فوق دکتری دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس
۲- کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس

*srouhanifar@gmail.com

تاریخ پذیرش: [۹۷/۵/۱۵]

تاریخ دریافت: [۹۷/۱۰/۲۳]

چکیده

گسترش صنعت خودرو سبب شده است که انباشت حجم لاستیک‌های فرسوده به عنوان زباله‌های شهری به یک مشکل بزرگ اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی تبدیل شود. مخلوط کردن خرده‌های لاستیک با ماسه و استفاده از آن به عنوان مصالح سبک وزن یکی از گزینه‌های ممکن برای جلوگیری از انباشت آنها در محیط زیست است. در این پژوهش برای اولین بار دانه‌های ماسه و خرده‌های لاستیک با منحنی دانه‌بندی یکسان مخلوط شده است. این کار برای کم کردن تفاوت اندازه بین دانه‌های مخلوط انجام پذیرفته است؛ بنابراین، رفتار مکانیکی مخلوط بدست آمده، تنها بر پایه نسبت حجمی آن و ساز و کار داخلی بین دانه‌های لاستیک و ماسه استوار است. به منظور بررسی رفتار مکانیکی مخلوط، آزمایش‌های سه محوری زهکشی شده فشاری و کششی تحت تنش‌های همه‌جانبه ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال انجام شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سهم حجم ذرات لاستیک بر رفتار فشاری و کششی مخلوط قابل توجه است. در واقع، دانه‌های لاستیک به‌عنوان یک ساز و کار داخلی، پارامترهایی چون؛ بیشینه تنش انحرافی، سختی اولیه نمونه‌ها، مدول الاستیسیته، کرنش شعاعی، زاویه اصطکاک و اتساع نمونه‌ها را کاهش می‌دهند و در عین حال باعث افزایش کرنش متناظر با تنش انحرافی حداکثر، شکل پذیری نمونه‌ها، کرنش محوری، چسبندگی، مقادیر Γ_{CSL} و λ_{CSL} و شیب خط حالت بحرانی می‌شوند. رفتار تنش-کرنش مخلوط‌های ماسه و لاستیک نشان می‌دهد که با افزایش نسبت اختلاط لاستیک به بیش از ۲۰ درصد، در تمامی تنش‌های همه‌جانبه، نقطه حداکثری مشخصی در نمودار تنش-کرنش وجود ندارد. در نهایت چنین بدست آمد که، رفتار مکانیکی مخلوط خرده لاستیک‌های دانه‌ای و ماسه با منحنی دانه‌بندی یکسان برای نسبت اختلاط لاستیک کمتر از ۲۰ درصد، توسط ماسه و برای نسبت اختلاط بیشتر از ۳۰ درصد، توسط لاستیک کنترل می‌شود.

واژگان کلیدی: بازیافت لاستیک، مخلوط ماسه و خرده لاستیک، آزمایش سه‌محوری، مقاومت برشی، اتساع.

۱- مقدمه

حال افزایش است. بر مبنای آمارهای موجود، هر سال بالغ بر ۱۳/۵ میلیون تن تایلر فرسوده در جهان تولید می‌شود که سهم ایران از این مقدار ۳۵۰ هزار تن است. این در حالی است که در سال‌های اخیر

به دلیل افزایش مداوم تعداد وسایل نقلیه، تعداد لاستیک‌های فرسوده در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه به سرعت در

برشی نمونه‌های ماسه و لاستیک تا نسبت اختلاط لاستیک ۳۸۳ درصد افزایش و سپس کاهش می‌یابد، که دلیل این موضوع ناشی از تقویت مصالح با نیروی کششی بوجود آمده در نوارهای لاستیکی است.

پرامپوتینگتون [20] با انجام آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی نشده روی مخلوط‌های لاستیک و ماسه با 11.7 و 3.3 ، 5.7 و 1.7 نشان داد که با افزایش اندازه دانه‌های لاستیک مقاومت برشی مخلوط‌های ماسه و لاستیک افزایش می‌یابد.

نورزاد و روشی [21] با انجام آزمایش‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌های با نسبت متوسط ابعاد دانه‌های لاستیک به ماسه ۳ و ۲۵، نشان دادند که با افزایش ابعاد دانه‌های لاستیک تنش انحرافی برای برش نمونه‌ها نسبت به دانه‌های لاستیک کوچک‌تر افزایش می‌یابد. لی و همکاران [14] با انجام آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی شده روی مخلوط‌های لاستیک و ماسه با 0.25 و $\frac{D_{Rubber}}{D_{Sand}}$ نسبت‌های اختلاط حجمی لاستیک با درصدهای ۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ به بررسی رفتار تنش کرنش مخلوط پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش میزان لاستیک، مقاومت حداکثری نمونه کاهش و جابه‌جایی متناظر با نقطه بیشینه افزایش می‌یابد.

یوای و برگادو [22] با انجام آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی شده با 10 و $\frac{D_{Rubber}}{D_{Sand}}$ و نسبت‌های اختلاط لاستیک ۰، ۳۷، ۵۰، ۶۱، ۷۰ و ۱۰۰ درصد به بررسی پارامترهای مقاومتی مخلوط لاستیک و ماسه پرداختند، آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد حجمی لاستیک مقدار تنش برشی بیشینه کاهش و جابه‌جایی متناظر با آن افزایش می‌یابد.

پژوهش‌های بسیاری هستند که نشان می‌دهند با افزایش میزان لاستیک مقاومت برشی کاهش و کرنش متناظر با آن افزایش می‌یابد [16]. همچنین برخی از مطالعات نشان می‌دهند که در شرایطی که نسبت 2 و $\frac{D_{Rubber}}{D_{Sand}}$ است با افزایش میزان لاستیک به بیشتر از ۵۰ درصد، مقدار مقاومت بیشینه مشخصی وجود نخواهد داشت [15، 23].

قضاوی و عامل سخی [11] و غفوری امیربنده و همکاران [24] نیز با انجام آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ‌مقیاس به ترتیب به

با افزایش تولید خودرو، تولید و واردات محصولات لاستیکی نیز افزایش یافته است [1]؛ بنابراین انباشت لاستیک‌های فرسوده به تدریج تبدیل به یک مشکل بزرگ اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی خواهد شد.

به‌طور معمول مخلوط کردن خاک و خرده‌های لاستیک در مهندسی عمران به‌عنوان؛ مصالح پُرکننده پشت دیوارهای حائل، زیراساس جاده‌ها، پُرکننده خاکریزها، شیروانی‌ها، ساخت آسفالت، عایق صوت، ساخت زیرسازی راه‌آهن و تقویت پی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [2].

لاستیک‌های فرسوده در مهندسی ژئوتکنیک اغلب به‌صورت قطعات خردشده برای بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک و کاهش اثرات دفن آنها در محیط زیست استفاده می‌شوند. خرده‌های لاستیک نسبت به مصالح متداول، نشست بیشتری دارند و فشار کمتری را به سازه نگهبان وارد می‌کنند [3]. به همین دلیل امکان استفاده از خرده‌های لاستیک و مشتقات آن در دیگر مسائل ژئوتکنیکی نیز، مانند فرسایش خاک [4]، پایداری شیروانی‌ها و خاکریزی بزرگراه‌ها [5]، ساخت و سازهای جاده‌ای [6]، سامانه‌های زهکشی زیرسطحی [7] و همچنین عایق لرزه‌ای زیر پی‌ها [8] امکان‌پذیر است. استفاده از لاستیک‌های فرسوده در مهندسی ژئوتکنیک نیاز به درک بهتری از ساز و کار رفتار مخلوط لاستیک و ماسه دارد.

پارامترهای زیادی مانند نوع، اندازه، درصد و نسبت اندازه متوسط دانه‌های لاستیک به ماسه $\left(\frac{D_{Rubber}}{D_{Sand}}\right)$ می‌توانند بر ساز و کار رفتاری مخلوط ماسه و لاستیک تأثیرگذار باشند. مطالعات حاضر در مورد مخلوط‌های لاستیک و ماسه بیشتر بر مقاومت و تراکم‌پذیری مخلوط‌ها تمرکز داشته‌اند به‌عنوان نمونه از آزمایش‌های برش مستقیم [9-13] به‌منظور شناسایی پارامترهای مقاومتی مخلوط‌های ماسه و لاستیک استفاده شده است. تأثیر مقدار لاستیک بر رفتار تراکم‌پذیری مخلوط‌های ماسه و لاستیک نیز توسط پژوهشگران بسیاری با استفاده از آزمایش تحکیم بررسی شده است [12، 14، 16]. گرچه بیشتر مطالعات روی رفتار تقویتی مصالح دانه‌ای تمرکز کرده‌اند، با این حال مطالعاتی نیز بر روی تقویت رس‌ها انجام شده است [17، 18].

زورنبرگ و همکاران [19] با انجام آزمایش‌های سه‌محوری روی نوارهای لاستیکی با نسبت ابعاد ۸، نشان دادند که مقاومت

برای اولین بار با منحنی دانه‌بندی یکسان بکار گرفته شده است تا تفاوت اندازه بین دانه‌های لاستیک و ماسه به کمترین برسد. بنابراین، رفتار مکانیکی مخلوط به دست آمده تنها بر پایه نسبت حجمی و ساز و کار داخلی بین دانه‌های لاستیک و ماسه استوار است، سپس به بررسی آزمایشگاهی رفتار مکانیکی مخلوط لاستیک و ماسه پرداخته شده است. بدین منظور آزمایش‌های سه محوری زهکشی شده فشاری و کششی روی مخلوط ماسه لیتون بازارد و لاستیک با دانه‌بندی یکسان انجام شده و تأثیر لاستیک بر پارامترهای مقاومتی و تغییر شکل مخلوط بررسی شده قرار گرفته است.

۲- مصالح و روش ساخت نمونه

۱-۲ ماسه

ماسه استفاده شده در این پژوهش، ماسه لیتون بازارد با محدوده تغییرات دانه‌بندی ۱/۱۸ تا ۲/۳۶ میلی‌متر است که شامل ۹۵/۳ درصد سیلیکون دی‌اکسید (SiO_2)، ۳/۵۴ درصد اکسید آهن (Fe_2O_3)، ۰/۳۲ درصد آلومینیوم اکسید (Al_2O_3) و ۰/۸۴ درصد پتاسیوم اکسید می‌است [25]. شکل دانه‌های این ماسه گرد^۴ تا نیمه گرد^۵ است و کروییت^۶ و گرد بودن دانه‌های آن به ترتیب ۰/۷۴ و ۰/۳۳ است [27]. نمودار دانه‌بندی ماسه مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است. در جدول (۱) نیز مشخصات ماسه مورد استفاده و در شکل (۲) تصویر میکروسکوپی دانه‌های ماسه قابل مشاهده است.

شکل ۱. منحنی دانه‌بندی ماسه لیتون بازارد

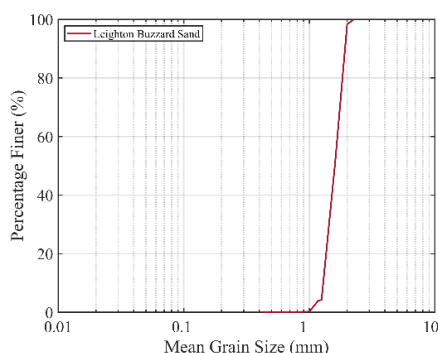


Fig. 1. Particles Size Distribution of Leighton Buzzard Sand (LB sand)

بررسی نوارهای لاستیکی^۱ و تکه‌های لاستیک^۲ پرداختند و تأثیر آن بر پارامترهای مقاومت برشی مصالح را بررسی کردند.

رفتار تغییر شکل مخلوط ماسه و لاستیک نیز به شدت تأثیرپذیر از مقدار لاستیک موجود در مخلوط است [25]. در این ارتباط، کیم و سانتامارینا [15] با انجام آزمایش‌های تحکیم با نسبت‌های اختلاط حجمی لاستیک ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد به بررسی اثر نسبت اختلاط لاستیک بر شکل‌پذیری مصالح پرداختند. آنها نشان دادند که با افزایش میزان لاستیک، مقدار تراکم نمونه‌ها افزایش می‌یابد و در نسبت‌های اختلاط لاستیک بین ۴۰-۵۰ درصد حدی است که مصالح از حالت رفتار ماسه گونه به رفتار لاستیکی تغییر رفتار می‌دهند. آنها همچنین نشان دادند که با افزایش نسبت اختلاط لاستیک، مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد که این موضوع با نتایج لی و همکاران [14] همخوانی دارد.

ننازشیخ و همکاران [16] با انجام آزمایش‌های تحکیم به بررسی تأثیر مقدار لاستیک موجود در مخلوط لاستیک و ماسه پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش میزان لاستیک تراکم‌پذیری مخلوط افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر این آنها دریافتند که میزان لاستیک مخلوط، تأثیر به سزا و مستقیمی بر شاخص‌های اتساع و تراکم‌پذیری دارد.

یووی و همکاران [22] به بررسی تأثیر نوارهای لاستیکی بر پارامترهای مقاومت برشی و تراکم‌پذیری مخلوط ماسه و لاستیک پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با کاهش میزان ماسه، مقاومت برشی نمونه‌ها کاهش و تراکم‌پذیری آنها افزایش می‌یابد.

مشیری و همکاران [26] نیز با انجام آزمایش‌های سه‌محوری به بررسی تأثیر مقدار چسب لاستیکی^۳ بر پارامترهای مقاومت برشی، اتساع و مدول الاستیسیته پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش میزان لاستیک مقاومت برشی بیشینه، زاویه اتساع و مدول الاستیسیته کاهش می‌یابند.

همان‌گونه که پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهند، پارامترهای زیادی مانند: نوع، اندازه، درصد و نسبت اندازه دانه‌های لاستیک به ماسه ($\frac{D_{Rubber}}{D_{Sand}}$) می‌تواند بر ساز و کار رفتاری مخلوط ماسه و لاستیک تأثیرگذار باشند، در این پژوهش، مخلوط لاستیک و ماسه

4 Round
5 Subround
6 Sphericity

1 Shred tire
2 Tire crumb
3 Tire chips

منظور لاستیک و ماسه با رطوبت ۱۰ درصد به گونه‌ای که تمامی دانه‌های لاستیک و ماسه به طور کامل خیس شوند با یکدیگر مخلوط شده و سپس مخلوط در سه لایه درون قالب نمونه ریخته و با چکش تا رسیدن به چگالی مورد نظر کوبیده می‌شود. در این پژوهش لاستیک با نسبت‌های اختلاط حجمی ۰، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد در نمونه‌های با قطر و ارتفاع ۷۰ میلی‌متر با ماسه مخلوط شد. تمام نمونه‌های مورد آزمایش با چگالی نسبی یکسان ($R_D = 65\%$) مانند شکل (۴) به شکلی که مجموع حجم مصالح جامد ثابت است ساخته شده‌اند.

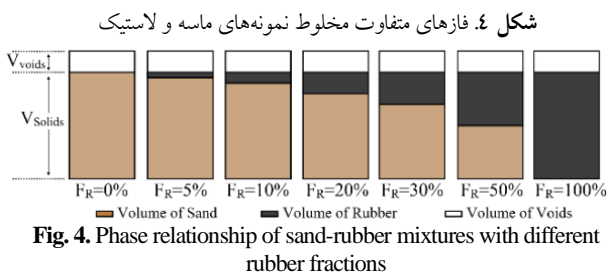


Fig. 4. Phase relationship of sand-rubber mixtures with different rubber fractions

آزمایش‌های تحکیم یافته زهکشی شده روی نمونه‌های اشباع بر اساس استاندارد ASTM D7181 انجام شده است. مشابه آزمون‌های متداول سه‌محوری، پس از ساخت نمونه، سلول دستگاه سه‌محوری به وسیله آب پر می‌شود و نمونه تحت فشار همه‌جانبه موثر ۳۰ کیلو پاسکال قرار می‌گیرد. اولین مرحله اشباع سازی نمونه عبور دادن گاز دی اکسید کربن از نمونه است، پس از عبور گاز دی اکسید کربن به مدت دو ساعت اقدام به اشباع سازی نمونه توسط آب بدون هوا می‌نماییم و با عبور آب بدون هوا نمونه اشباع می‌شود و پس از آن تحکیم صورت می‌پذیرد. در نهایت فشار همه‌جانبه به مقدار مورد نظر می‌رسد و در انتها نمونه‌ها با سرعت ۰/۰۲ میلی‌متر بر دقیقه تحت بارگذاری فشاری قرار گرفتند. در این تحقیق ۳۰ آزمایش سه‌محوری زهکشی شده فشاری و کششی روی نمونه‌های مخلوط ماسه و لاستیک با تنش‌های همه‌جانبه ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال انجام شد.

همان‌گونه که در شکل (۵) نیز نشان داده شده است با افزایش میزان لاستیک، چگالی نمونه‌ها کاهش پیدا می‌کند.

جدول ۱. خلاصه مشخصات ماسه‌ی مورد استفاده (لیتون بازارد)

Used Materials Properties	Leighton Buzzard Sand
Specific Gravity, G_s	2.65
Minimum Void Ratio, e_{min}	0.55
Maximum Void Ratio, e_{max}	0.83
Mean Grain Size, D_{50} (mm)	1.6
*Coefficient of Uniformity, C_u	1.3
**Coefficient of Gradation, C_g	1.02
Sphericity [27]	0.88
Roundness [27]	0.33
* $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ ** $C_g = \frac{D_{30}^2}{D_{60}D_{10}}$	

Table 1. Index properties of Tested sand particles

شکل ۲. تصویر میکروسکوپی دانه‌های ماسه

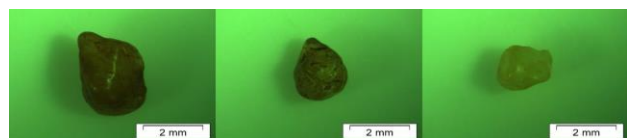


Fig. 2. Microscopic image of Leighton Buzzard Sand particles

۲-۲ - خرده‌های لاستیک

خرده‌های لاستیک به شکلی تهیه شده‌اند که منحنی دانه‌بندی یکسانی با ماسه لیتون بازارد داشته باشند. به همین منظور ابتدا خرده‌های لاستیک الک شده و در اندازه‌های مختلف جداسازی می‌شوند. سپس به گونه‌ای با همدیگر مخلوط می‌شوند که منحنی دانه‌بندی یکسانی با ماسه مورد استفاده در این پژوهش را داشته باشند. معمولاً دانه‌های لاستیک شامل ۵۶ درصد پلیمر، ۲۰-۵ درصد استون، ۲۵-۳۰ درصد کربن سیاه، ۱۵ درصد خاکستر و ۳-۱ درصد گوگرد است [25]. شکل (۳) تصویر میکروسکوپی لاستیک‌های مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

شکل ۳. تصویر میکروسکوپی دانه‌های لاستیک



Fig. 3. Microscopic image of Rubber particles

۳-۲ - چگونگی تهیه مخلوط لاستیک و ماسه و برنامه آزمایش‌ها

روش کوبش مرطوب^۱ متداول‌ترین روش برای آماده‌سازی نمونه‌های مخلوط لاستیک و ماسه در آزمایشگاه است. بدین

خرده لاستیک‌های دانه‌ای^۱ باعث کاهش تنش‌انحرافی بیشترین و افزایش کرنش متناظر با تنش‌انحرافی بیشینه در نمونه‌ها می‌شود. در شکل (۷) نمودار تنش‌انحرافی در مقابل کرنش محوری تحت تنش‌های همه‌جانبه ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال برای نمونه‌های با نسبت اختلاط لاستیک متفاوت نشان داده شده است.

شکل ۷. نمودار تنش‌انحرافی در مقابل کرنش محوری مخلوط لاستیک و ماسه تحت تنش همه‌جانبه (الف) ۱۰۰ کیلو پاسکال (ب) ۲۰۰ کیلو پاسکال

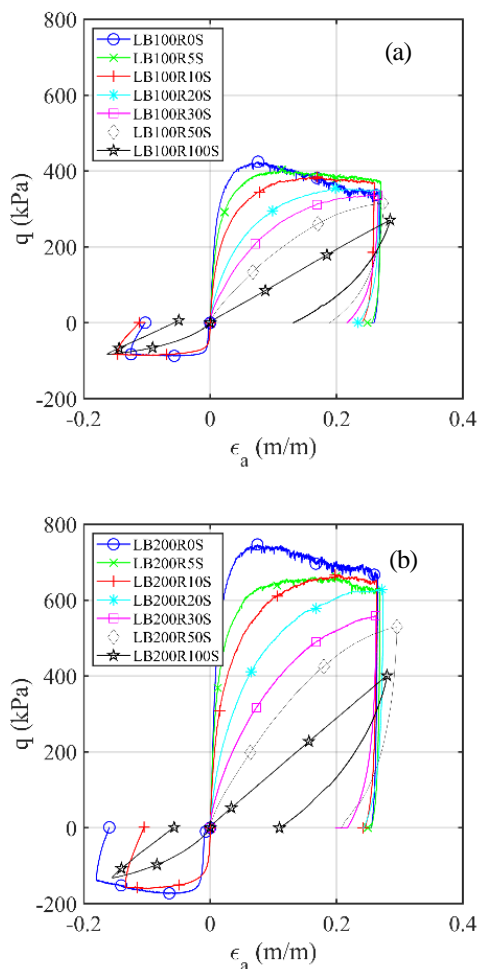


Fig. 7. Deviatoric Stress-Axial Strain for LB Sand-Rubber mixtures under (a) 100kPa (b) 200kPa confining pressure

همان‌گونه که در این نمودارها قابل مشاهده است با افزایش میزان خرده لاستیک‌های دانه‌ای از سختی اولیه نمونه‌ها کاسته می‌شود، درواقع شکنندگی نمونه‌های دارای ماسه تنها با افزایش لاستیک کاسته و شکل‌پذیری آنها افزایش می‌یابد که دلیل این موضوع را می‌توان به کمتر بودن سختی دانه‌های لاستیک نسبت به

شکل ۵. تغییرات چگالی مخلوط ماسه و لاستیک

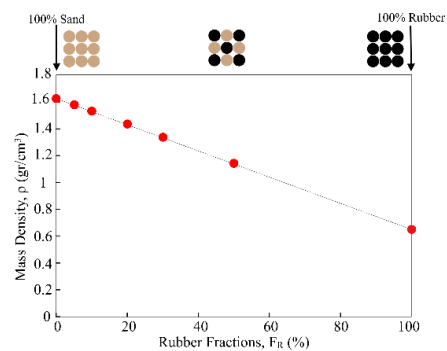


Fig. 5. Measured mass density as a function of volumetric rubber fraction for rigid-soft mixture ($\frac{\rho_{Rubber}}{\rho_{Sand}} = 1$)

۳- بحث و نتیجه‌گیری

۱-۳ رفتار تنش-کرنش مخلوط ماسه و لاستیک

در این قسمت رفتار تنش-کرنش مخلوط ماسه و لاستیک به صورت نمودارهای تنش‌انحرافی در مقابل کرنش محوری بیان شده است. شکل (۶) رفتار ترکیب ماسه و لاستیک تحت تنش همه‌جانبه ۵۰ کیلو پاسکال را نشان می‌دهد.

شکل ۶. نمودار تنش‌انحرافی در مقابل کرنش محوری مخلوط لاستیک و ماسه تحت تنش همه‌جانبه ۵۰ کیلو پاسکال

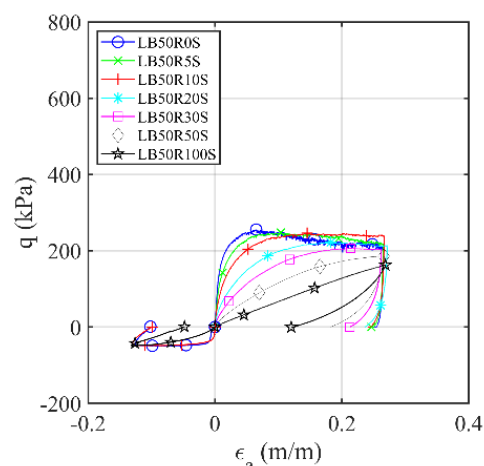


Fig. 6. Deviatoric Stress-Axial Strain for LB Sand-Rubber mixtures under 50kPa confining pressure

همان‌گونه که در شکل (۶) نشان داده شده است، نمونه‌های با ماسه تنها دارای نقطه تنش‌انحرافی بیشینه آشکار هستند و بعد از نقطه حداکثر به حالت نرم شوندگی تا حالت بحرانی ادامه می‌دهد، این حالت برای تمامی تنش‌های همه‌جانبه ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال قابل مشاهده است. همچنین مشاهده می‌شود که افزایش

برشی مقاومت کند بنابراین در مصالح با درصد بالای لاستیک این زنجیر نیرو ضعیف تر بوده و با نیروی کمتری گسیخته می شوند.

تأثیر نسبت اختلاط لاستیک بر رفتار کرنش مخلوط خرده لاستیک و ماسه، در تنش های همه جانبه بالا مهم تر و آشکارتر است (در این پژوهش ۲۰۰ کیلو پاسکال). میزان بیشینه و باقی مانده تنش انحرافی نمونه های غیر مسلح ($F_R = 0$) بیشتر از نمونه های مسلح ($F_R \neq 0$) تحت تنش همه جانبه ۲۰۰ کیلو پاسکال است که این موضوع می تواند به دلیل شکل پذیری بالای مخلوط های ماسه و لاستیک تحت تنش های همه جانبه ۲۰۰ کیلو پاسکال در مقایسه با تنش های همه جانبه کمتر باشد [25].

رفتار تنش-کرنش نمونه های لاستیک خالص ($F_R=100\%$) تحت تمامی تنش های همه جانبه به صورت خطی است؛ بنابراین در تمامی تنش های همه جانبه هیچ نقطه بیشینه تنش انحرافی حتی تا کرنش های بالا وجود ندارد که این مشاهده با پژوهش های گذشته از جمله وو و همکاران [29] و لی و همکاران [3] هماهنگی بسیار خوبی دارد.

آزمایش های سه محوری کششی روی نمونه های با نسبت اختلاط لاستیک ۰، ۱۰ و ۱۰۰ درصد با تنش های همه جانبه ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال نشان می دهد که در تمامی تنش های همه جانبه، نمونه های با نسبت اختلاط لاستیک ۱۰ درصد، نقطه حداکثر واضحی در نمودارهای تنش-کرنش ندارند و در تمامی تنش های همه جانبه نمونه های با نسبت اختلاط لاستیک ۱۰ درصد، نقطه بیشینه تنش انحرافی کمتری نسبت به نمونه های با ماسه تنها دارند و رفتار تنش-کرنش نمونه های لاستیک تنها مانند حالت فشاری خطی نیست.

همان گونه که در شکل های (۶ و ۷) ارائه شده است، مقدار تنش انحرافی با افزایش سطح تنش همه جانبه افزایش می یابد، در واقع واضح است که صرف نظر از مقدار لاستیک موجود در نمونه ها، در طول آزمایش های سه محوری زهکشی شده فشاری و کششی، مقاومت برشی نمونه به صورت محسوسی تحت تأثیر تنش همه جانبه قرار دارد.

لی و همکاران [14] با انجام آزمایش های سه محوری فشاری روی مخلوط های لاستیک و ماسه مترکم با $\frac{D_{Rubber}}{D_{Sand}} = 0.25$ تحت

ماسه و اندرکنش بیشتر لاستیک با لاستیک در نمونه های با میزان لاستیک بالا نسبت داد [15]، به نوعی رفتار نمونه های با مقدار لاستیک بالا مانند رفتار نمونه های ماسه سست است.

همان گونه که در شکل های (۶ و ۷) دیده می شود افزایش نسبت اختلاط لاستیک تا ۵ و ۱۰ درصد در تنش های همه جانبه ۵۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال تأثیر کمتری روی مقاومت بیشینه انحرافی نسبت به تنش همه جانبه ۲۰۰ کیلو پاسکال دارد و همچنین همان گونه که از نمودارهای رفتار تنش-کرنش مخلوط های ماسه و لاستیک پیداست با افزایش نسبت اختلاط لاستیک بیش از ۲۰ درصد، در تمامی تنش های همه جانبه نقطه حداکثری مشخصی در نمودار تنش-کرنش وجود ندارد. نتایج به دست آمده از این قسمت هماهنگی بسیار خوبی با نتایج لی و همکاران [12] دارد که از روش نمونه سازی و نسبت تخلخل متفاوت استفاده کرده اند؛ اما با نتایج نازشیخ و همکاران [16] که با انجام آزمایش های سه محوری به بررسی نسبت های اختلاط مختلف خرده های لاستیک بر مقاومت برشی و تراکم پذیری نمونه های ماسه با لاستیک پرداخته اند، مغایرت دارد. شاید دلیل این موضوع اثر اندازه دانه های لاستیک مورد استفاده و یا روش نمونه سازی بکار رفته در پژوهش آنها است.

مکانیک رفتاری مخلوط لاستیک و ماسه شامل دو ساز و کار؛ برش داخلی بین دانه های ماسه و لاستیک و ساز و کار تقویت که از طریق نیروی کششی خرده های لاستیک ایجاد می شود، می باشد. به دلیل یکسان بودن نسبت دانه های ماسه به لاستیک در این پژوهش هیچ نیروی کششی ناشی از اتصالات لاستیکی (تقویت به کمک لاستیک) وجود ندارد.

سوگا و میشل [28] معتقدند که ساز و کار مقاومت برشی مصالح دانه ای ناشی از چرخش و لغزیدن دانه های مصالح روی یکدیگر در نقطه تماس آنها، جابه جایی ذرات و مقاومت آنها در مقابل تغییر حجم است؛ بنابراین ممکن است بعضی دانه ها زمانی که تحت تأثیر نیروهای خارجی قرار می گیرند در نقطه ای تماسشان با یکدیگر زنجیر نیروی^۱ قوی و بعضی دیگر زنجیر ضعیف تشکیل دهند، به هر حال در مخلوط های با نسبت اختلاط لاستیک بالا، زنجیر نیرو به اندازه کافی قوی نیست که در مقابل نیروی

سختی اندک دانه‌های لاستیک نسبت به دانه‌های ماسه باشد. چگونگی رفتار دانه‌های ماسه و خرده لاستیک‌های دانه‌ای در مخلوط لاستیک و ماسه در شکل (۹) نشان داده شده است؛ در واقع زمانی که دانه‌های ماسه (در نمونه ماسه تنها) در معرض یک نیروی خارجی قرار می‌گیرند، دانه‌ها تغییراتی را متحمل می‌شوند و این جابه‌جایی باعث مقداری کرنش محوری می‌شود که این مقدار در شکل با H_s نشان داده شده است. حال اگر، دانه‌های لاستیک و ماسه (در نمونه‌های مسلح) هردو در یک مخلوط مورد بارگذاری محوری قرار گیرند آنگاه به دلیل سختی اندک دانه‌های لاستیک نسبت به ماسه تغییر شکل شامل تغییرات جابه‌جایی دانه‌های ماسه و لاستیک هم‌زمان است ($H_s + H_R$) که این تغییر شکل بیشتر از حالت ماسه تنها است. البته وجود دانه‌های لاستیک در بین دانه‌های ماسه می‌تواند روی انتقال نیرو بین دانه‌ها نیز مؤثر باشد.

شکل ۹. طرحواره کرنش محوری ناشی از اعمال نیروی خارجی

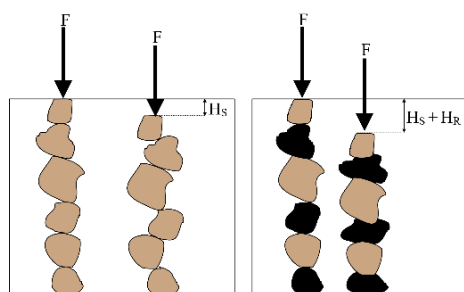


Fig. 9. Schematic view of axial strain response due to the axial loading

شکل (۱۰) تغییرات کرنش محوری را در تنش‌های انحرافی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال برای تنش‌های همه‌جانبه ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است کرنش محوری با افزایش نیرو و مقدار خرده لاستیک‌های دانه‌ای افزایش می‌یابد.

در شکل (۱۱) به عنوان نمونه تغییرات کرنش شعاعی در مقابل کرنش محوری برای مخلوط‌های ماسه و خرده لاستیک‌های دانه‌ای تحت تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۱) پیداست که کرنش شعاعی با افزایش میزان خرده لاستیک‌های دانه‌ای کاهش می‌یابد.

تنش همه‌جانبه ۸۰ کیلو پاسکال به این نتیجه دست یافتند که با افزودن لاستیک به نمونه‌ها مقدار تنش انحرافی کاهش می‌یابد و برای نمونه‌های با نسبت اختلاط لاستیک بیشتر از ۴۰ درصد مقدار تنش انحرافی بیشینه مشخصی وجود ندارد این در حالی است که نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در شرایط ($\frac{D_{Rubber}}{D_{Sand}} = 1$)، در نمونه‌های با نسبت اختلاط لاستیک بیش از ۲۰ درصد تنش انحرافی مشخصی وجود ندارد. یکی از دلایل این اختلاف می‌تواند تفاوت در نسبت اندازه دانه‌های لاستیک به دانه‌های ماسه و یا روش به کار گرفته شده برای نمونه‌سازی باشد.

مدول الاستیسیته برای مخلوط‌های ماسه و لاستیک در درصد‌های کرنش کمتر از ۱/۵ درصد در شکل (۸) برای نسبت‌های اختلاط مختلف لاستیک و تحت تنش‌های همه‌جانبه ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که در این نمودار قابل مشاهده است رابطه خطی بین مدول الاستیسیته مخلوط‌ها و تنش همه‌جانبه وجود دارد به‌گونه‌ای که با افزایش تنش همه‌جانبه مدول الاستیسیته نیز افزایش می‌یابد.

همان‌گونه که در شکل (۸) نشان داده شده است با افزایش میزان خرده لاستیک‌های دانه‌ای، مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد؛ بنابراین بیشترین مدول الاستیسیته را نمونه ماسه تنها و کمترین را نمونه لاستیک تنها دارد.

شکل ۸. تأثیر مقدار لاستیک بر مدول الاستیسیته مخلوط ماسه و لاستیک

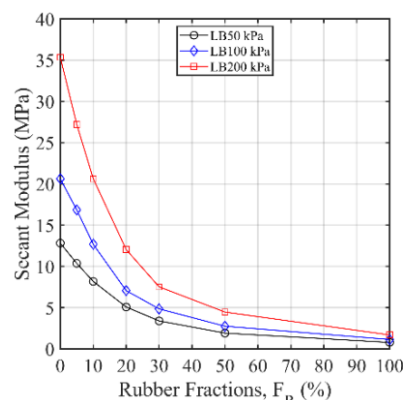


Fig. 8. Effect of Rubber fraction on Secant Tangent Modulus for LB Sand-rubber mixtures

۲-۳ کرنش محوری و شعاعی مخلوط‌های لاستیک و ماسه مقدار کرنش متناظر با یک تنش انحرافی خاص با افزایش مقدار لاستیک افزایش می‌یابد؛ که دلیل این موضوع می‌تواند

بنابراین در صورت افزایش میزان لاستیک نمونه‌ها، تغییر شکل ذرات لاستیک از تغییرات کرنش شعاعی نمونه جلوگیری می‌کنند.

تأثیر مقدار لاستیک بر حداکثر تنش انحرافی مخلوط ماسه و لاستیک به صورت خلاصه در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همان‌گونه پیداست، با افزایش خرده لاستیک‌های دانه‌ای بیشینه تنش انحرافی نمونه در مقایسه با نمونه‌های ماسه تنها کاهش می‌یابد. حداکثر تنش انحرافی نمونه‌های با نسبت اختلاط لاستیک ۵ و ۱۰ درصد در تنش همه‌جانبه ۵۰ کیلو پاسکال معادل ۹۷ و ۹۰ درصد حداکثر تنش انحرافی نمونه ماسه تنها و در تنش‌های همه‌جانبه ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال معادل ۹۰ درصد تنش انحرافی نمونه‌ی ماسه است.

شکل ۱۲. تأثیر مقدار لاستیک بر حداکثر تنش انحرافی مخلوط ماسه و لاستیک

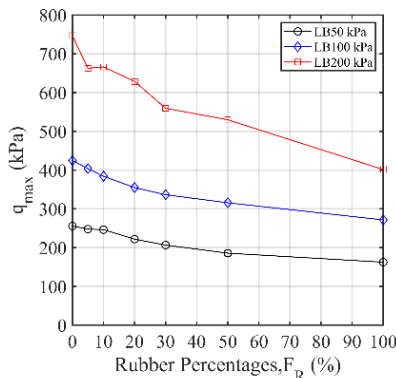


Fig. 12. Effect of Rubber fraction on compressive deviatoric stress for LB Sand-rubber mixtures at maximum point

شکل (۱۳)، میزان تنش انحرافی را در نقطه معادل ۲۰ درصد کرنش محوری برای نمونه‌های با نسبت اختلاط مختلف لاستیک ارائه می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار تنش‌های انحرافی نمونه‌ها در تنش‌های همه‌جانبه ۵۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال در نسبت‌های اختلاط لاستیک ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد افزایش و سپس با افزایش مقدار لاستیک کاهش می‌یابد، اما در تنش همه‌جانبه ۲۰۰ کیلو پاسکال همواره با افزایش میزان لاستیک، تنش انحرافی کاهش می‌یابد.

شکل ۱۰. تغییرات کرنش محوری را در تنش‌های انحرافی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال برای تنش‌های همه‌جانبه (الف) ۵۰ کیلو پاسکال (ب) ۱۰۰ کیلو پاسکال (ج) ۲۰۰ کیلو پاسکال

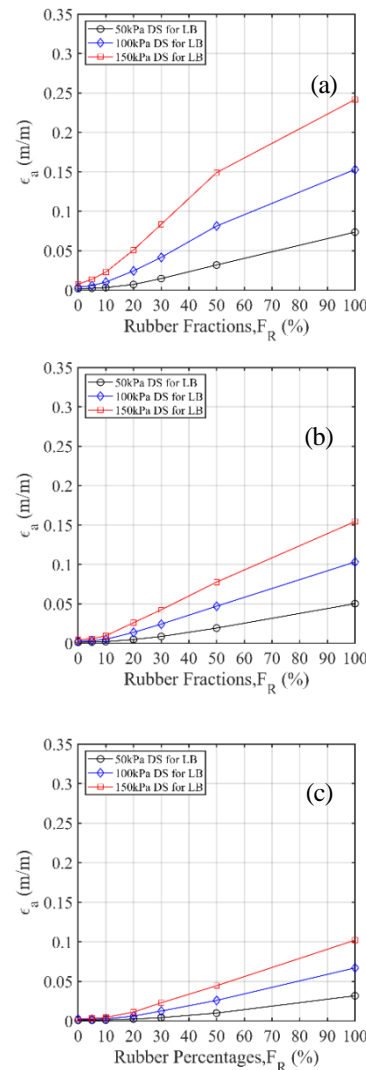


Fig. 10. Axial strain of LB sand-rubber mixtures at deviatoric stresses (DS) of 50kPa, 100kPa and 150kPa under (a) 50kPa; (b) 100kPa and (c) 200kPa confining pressures

شکل ۱۱. تغییرات کرنش شعاعی در مقابل کرنش محوری برای مخلوط‌های

ماسه و لاستیک تحت تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال

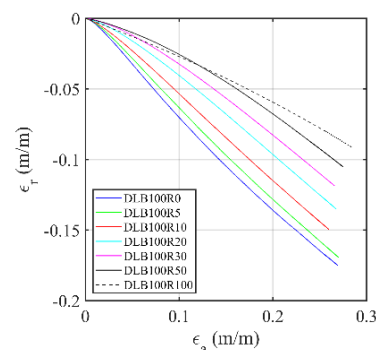


Fig. 11. Radial Strain-Axial Strain for LB and Sand-Rubber mixtures under 100kPa confining pressures

همه‌جانبه ۵۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال بیشتر است که دلیل این موضوع می‌تواند به علت تنش همه‌جانبه زیاد و شکل‌پذیری دانه‌های لاستیک باشد، برای حالت ۱۰- درصد کرنش محوری نیز شرایط مشابه برقرار است.

شکل (۱۵) زاویه اصطکاک متناظر با حداکثر تنش انحرافی و ۲۰ درصد کرنش محوری را در مقابل افزایش میزان لاستیک ارائه می‌دهد. بر اساس این شکل می‌توان دریافت که صرف‌نظر از مقدار تنش همه‌جانبه، حداکثر زاویه اصطکاک با افزایش میزان لاستیک، کاهش می‌یابد. همان‌گونه که از شکل (۱۵ ب) پیداست زاویه اصطکاک برای نمونه‌های تحت تنش همه‌جانبه ۵۰ کیلو پاسکال در نسبت اختلاط لاستیک ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین زاویه اصطکاک بیشتری برای نمونه‌های با نسبت اختلاط لاستیک ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد نسبت به نمونه ماسه تنها برای تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال نیز گزارش شده است اما زاویه اصطکاک متناظر با ۲۰ درصد کرنش محوری در تنش همه‌جانبه ۲۰۰ کیلو پاسکال با افزایش میزان خرده لاستیک‌های دانه‌ای همواره کاهش می‌یابد. رفتار مشابه موارد ذکرشده در لی و همکاران [12] با $1 \approx \frac{D_{Rubber}}{D_{Sand}}$ مشاهده شده است.

شکل ۱۵. تأثیر لاستیک بر زاویه اصطکاک در (الف) مقاومت حداکثر (ب) ۲۰ درصد کرنش محوری

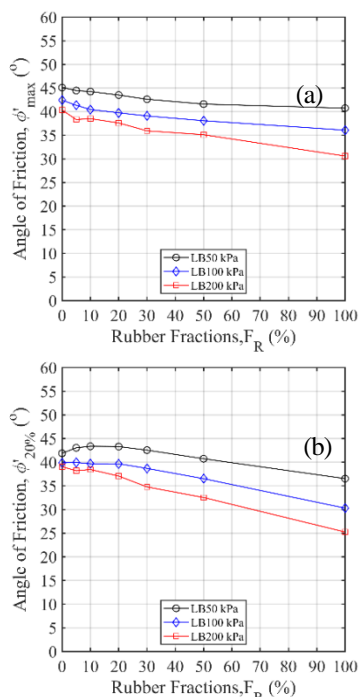


Fig. 15. Effect of Rubber fraction on angle of friction for LB Sand-rubber mixtures at (a) peak strength; (b) 20% axial strain

شکل ۱۳. تأثیر مقدار لاستیک بر تنش انحرافی در نقطه معادل ۲۰ درصد کرنش

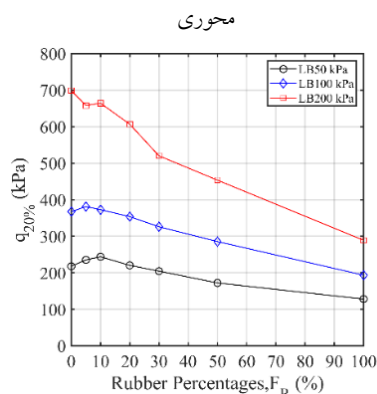


Fig. 13. Effect of Rubber fraction on compressive deviatoric stress for LB Sand-rubber mixtures at 20% axial strain

شکل ۱۴. تأثیر مقدار لاستیک بر تنش کششی انحرافی در (الف) در نقطه حداکثر

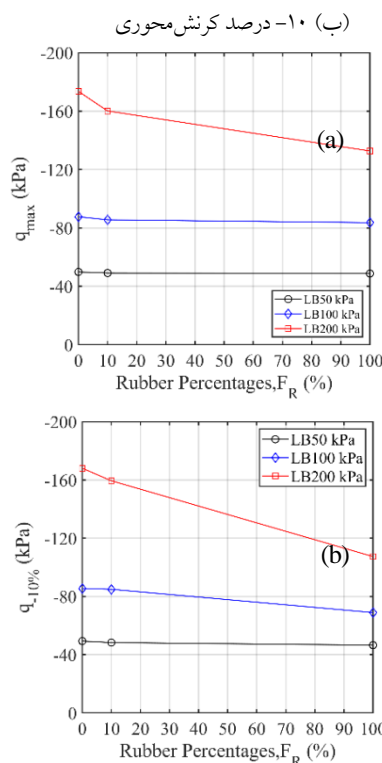


Fig. 14. Effect of Rubber fraction on extensive deviatoric stress for LB Sand-rubber mixtures at (a) maximum point; (b) -10% axial strain

شکل (۱۴) تغییرات پیشینه تنش انحرافی و مقدار تنش انحرافی در ۱۰- درصد کرنش محوری را در مقابل افزایش میزان لاستیک در آزمایش‌های سه‌محوری کششی در تنش‌های همه‌جانبه ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال به صورت خلاصه نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش میزان خرده لاستیک‌های دانه‌ای مقدار تنش انحرافی پیشینه کاهش می‌یابد و این مقدار کاهش در تنش همه‌جانبه ۲۰۰ کیلو پاسکال از تنش‌های

اصطکاک بشدت تحت تأثیر حجم لاستیک موجود در مخلوط‌های ماسه و لاستیک برای نسبت‌های اختلاط لاستیک بیشتر از ۲۰ درصد است.

جدول ۲. زاویه اصطکاک و چسبندگی در کرنش‌های ۲۰ و ۱۰- درصد

Failure envelope at 20% axial strain for compression							
F_R (%)	0	5	10	20	30	50	100
ϕ' (°)	39.3	35.9	36.2	34.2	31.0	28.8	20.1
c' (kPa)	0	20	19	24.3	30	20.2	30
Failure envelope at -10% axial strain for extension							
ϕ' (°)	45.9	-	36.2	-	-	-	14
c' (kPa)	0	-	5.9	-	-	-	14

Table 2. Angle of friction and cohesion intercept at 20% and -10% axial strain for LB sand-rubber mixtures

جدول ۳. زاویه اصطکاک و چسبندگی در نقطه حداکثر

Failure envelope at peak points for compression							
F_R (%)	0	5	10	20	30	50	100
ϕ' (°)	41.1	35.3	35.9	35.0	32.8	32.3	25.9
c' (kPa)	0	25.8	23.2	22.2	25.8	22.3	33.0
Failure envelope at peak points for extension							
ϕ' (°)	49.5	-	36.2	-	-	-	21.7
c' (kPa)	0	-	6.4	-	-	-	13.9

Table 3. Angle of friction and cohesion intercept at peak points for LB sand-rubber mixtures

۳-۵ حالت بحرانی مخلوط ماسه-لاستیک

به‌طور کلی، دشواری این قسمت پیدا کردن نقطه‌ای است که مقدار حجم و تنش در آن نقطه ثابت باشد. در این مطالعه انتهای آزمایش به‌عنوان محل حالت بحرانی در نظر گرفته شده است که حجم و تنش ثابت دارد. خط حالت بحرانی با استفاده از فرمولاسیون اتکینسون [30] در صفحه $v - \ln p'$ در نظر گرفته شده است که در آن $v = (1 + e)$ بیان‌کننده حجم مخصوص، e نسبت تخلخل، p' تنش مؤثر و پارامتر λ_{CSL} شیب خط حالت بحرانی و Γ_{CSL} حجم مخصوص در تنش مؤثر ۱ کیلو پاسکال را نشان می‌دهد:

$$v = \Gamma_{CSL} - \lambda_{CSL} \ln(p') \quad (1)$$

شکل (۱۸) موقعیت خط حالت بحرانی مخلوط‌های ماسه و لاستیک را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش میزان خرده لاستیک‌های دانه‌ای شیب خط حالت بحرانی افزایش پیدا می‌کند.

۳-۴ سطح گسیختگی مخلوط ماسه-لاستیک

سطح گسیختگی برای حالت فشاری معادل کرنش ۲۰ درصد و برای حالت کششی، معادل کرنش ۱۰- درصد در نظر گرفته شد که در شکل (۱۶) نشان داده شده است.

شکل ۱۶. سطح گسیختگی برای حالت فشاری و کششی به ترتیب در کرنش‌های ۲۰ و ۱۰- درصد

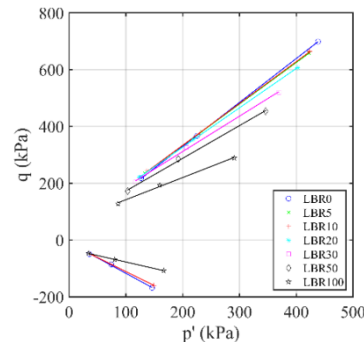


Fig. 16. Strength envelope for sand-rubber mixtures at 20% and -10% axial strain for compression and extension

پوش گسیختگی برای تنش انحرافی حداکثری نیز در شکل (۱۷) نشان داده شده است.

شکل ۱۷. سطح گسیختگی برای حالت تنش فشاری و کششی در نقطه حداکثر

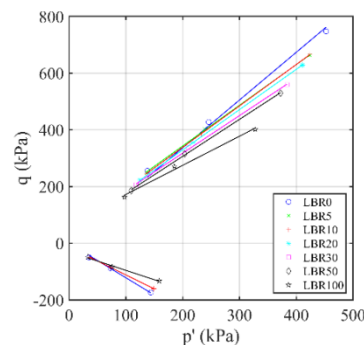


Fig. 17. Strength envelope for LB sand-rubber mixtures at peak points for compression and extension

با توجه به شکل‌های (۱۶ و ۱۷) پوش گسیختگی برای تمام مقادیر خرده لاستیک‌های دانه‌ای، خطی است.

زاویه اصطکاک و چسبندگی برای تمام مقادیر لاستیک در جدول‌های (۲ و ۳) به صورت خلاصه ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، افزایش مقدار خرده لاستیک‌های دانه‌ای در مخلوط‌های مسلح بر زاویه اصطکاک و چسبندگی آزمایش‌های فشاری و کششی تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد، باین حال کاهش زاویه

نتایج این قسمت هماهنگی بر نتایج بدست آمده از پژوهش‌های قبلی از جمله چو و همکاران [31] است.

۳-۶ رفتار تغییر شکل مخلوط ماسه و لاستیک

رفتار تغییر حجم مخلوط ماسه و لاستیک با نسبت‌های اختلاط مختلف، به عنوان نمونه تحت تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال در شکل (۲۰) ارائه داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود رفتار ماسه در ابتدا متراکم شده و سپس اتساع پیدا می‌کند. بررسی رفتارهای حجمی نشان می‌دهند که با افزایش میزان خرده لاستیک‌های دانه‌ای، اتساع نمونه‌ها کاهش می‌یابد که دلیل این موضوع می‌تواند رفتار شکل‌پذیر دانه‌های لاستیک باشد که با افزایش میزان لاستیک این مقدار افزایش می‌یابد. با افزایش میزان لاستیک بیشتر از ۲۰ درصد تراکم نمونه‌های مسلح به شدت افزایش می‌یابد در واقع رفتار کلی مخلوط ماسه و لاستیک با افزایش میزان لاستیک به بیش از ۲۰ درصد در مقایسه با نسبت‌های اختلاط کمتر، از خود رفتار لاستیک نشان می‌دهد و همان‌گونه که مشاهده می‌شود رفتار نمونه‌ی لاستیک تنها، به صورت خطی است.

تنها در نمونه‌های سه‌محوری کششی رفتار اتساعی از ماسه مشاهده شد. افزایش میزان لاستیک در ۱۰ درصد، باعث تغییر رفتار حجمی نمونه می‌شود که از میزان اتساع نمونه کاهش و تراکم آن افزایش پیدا می‌کند. نمونه‌های لاستیک تنها تحت برش برای تمامی مقادیر فشار همه‌جانبه، اتساع پیوسته دارند.

شکل ۲۰. کرنش حجمی در مقابل کرنش محوری تحت تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال

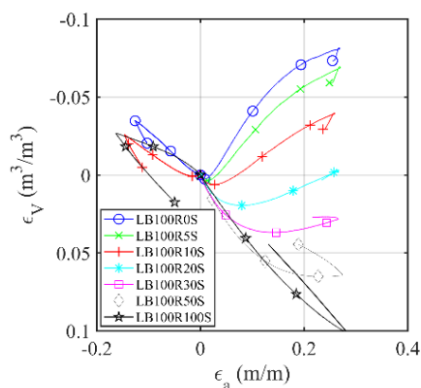


Fig. 20. Volumetric Strain-Axial Strain for LB Sand-Rubber mixtures under 100kPa confining pressure.

شکل ۱۸. خط حالت بحرانی مخلوط‌های ماسه و لاستیک

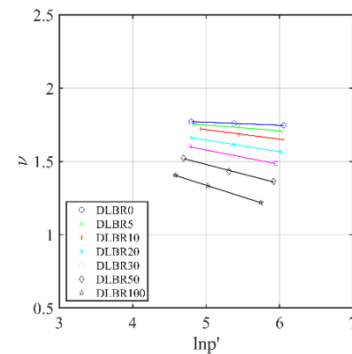


Fig. 18. Critical State Lines on the v - $\ln p'$ for Leighton buzzard sand-rubber drained triaxial tests

مقادیر λ_{CSL} و Γ_{CSL} با افزایش میزان لاستیک افزایش می‌یابند، در واقع مقادیر λ_{CSL} و Γ_{CSL} برای ماسه لیتون بازارد مورد مطالعه به ترتیب برابر ۰/۰۱۹۸ و ۱/۸۶۶۲ است که این مقادیر به ۰/۱۶۰۵ و ۲/۱۳۹۸ برای نمونه‌های لاستیک تنها افزایش پیدا می‌کنند. شکل (۱۹) تأثیر لاستیک را بر λ_{CSL} برای مخلوط‌های ماسه و لاستیک نشان می‌دهد.

شکل ۱۹. تأثیر لاستیک را بر λ_{CSL} برای مخلوط‌های ماسه و لاستیک (*: احتمالاً مخلوط در این نقاط به حالت بحرانی نرسیده)

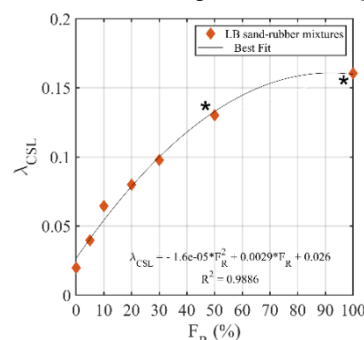


Fig. 19. Effect of Rubber fraction on λ for LB Sand-rubber mixtures (*: critical state may not have been reached)

تأثیر مقدار خرده لاستیک‌های دانه‌ای بر موقعیت حالت بحرانی مخلوط‌های ماسه و لاستیک به دلیل افزایش λ_{CSL} با افزودن خرده‌های لاستیک بیشتر به مخلوط قابل توجه است. جدول (۴) تأثیر میزان لاستیک بر مقادیر Γ_{CSL} و λ_{CSL} را به تفکیک نشان می‌دهد.

جدول ۴. خلاصه مقادیر حالت بحرانی برای مخلوط لاستیک و ماسه

Critical State Line values for drained triaxial tests							
F_R (%)	0	5	10	20	30	50	100
λ_{CSL}	0.0198	0.039	0.064	0.08	0.097	0.13	0.16
Γ_{CSL}	1.8662	1.947	2.039	2.046	2.066	2.13	2.139

Table 4. Summary of Critical State Lines values for LB drained triaxial tests

۴- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

استفاده از لاستیک‌های فرسوده به صورت کلی یا خرده، در مهندسی عمران و ژئوتکنیک در سراسر جهان در حال افزایش است. استفاده از این مصالح در ابعاد واقعی نیاز به شناخت بهتر رفتار مکانیکی آنها دارد. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که رفتار مکانیکی مخلوط‌های ماسه و لاستیک، به شدت تحت تأثیر پارامترهای مختلفی مانند؛ مقدار لاستیک، چگالی، تنش همه‌جانبه و نسبت ابعاد دانه‌های ماسه و لاستیک است؛ در این پژوهش، مخلوط لاستیک و ماسه برای اولین بار با منحنی دانه‌بندی یکسان بکار گرفته شده است تا تفاوت اندازه بین دانه‌های لاستیک و ماسه به کمترین برسد. بنابراین، رفتار مکانیکی مخلوط به‌دست‌آمده تنها بر پایه نسبت حجمی و ساز و کار داخلی بین دانه‌های لاستیک و ماسه استوار است. به همین منظور آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی شده بر روی مخلوط‌های لاستیک و ماسه انجام شد تا رفتار مکانیکی این مخلوط مطالعه شود.

نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که:

- (۱) با افزایش نسبت اختلاط خرده لاستیک‌های دانه‌ای، بیشینه مقاومت نمونه‌ها کاهش و کرنش متناظر با آن افزایش می‌یابد.
- (۲) برای مخلوط‌های با نسبت اختلاط خرده لاستیک‌های دانه‌ای بیشتر از ۲۰ درصد نقطه حداکثری مشخصی در نمودارهای تنش انحرافی مشخص نیست.
- (۳) با افزایش خرده لاستیک‌های دانه‌ای از سختی اولیه نمونه‌ها کاسته می‌شود و شکل پذیری آنها افزایش می‌یابد.
- (۴) با افزایش نسبت اختلاط لاستیک مقدار زاویه اصطکاک و مدول الاستیسیته کاهش و مقدار چسبندگی افزایش می‌یابد.
- (۵) کرنش شعاعی نمونه‌ها با افزایش لاستیک کاهش می‌یابد، بنابراین در صورت افزایش میزان لاستیک نمونه‌ها، تغییر شکل ذرات لاستیک از تغییرات کرنش شعاعی نمونه‌ها جلوگیری می‌کند.
- (۶) پوش گسیختگی برای تمام مقادیر خرده لاستیک‌های دانه‌ای خطی است.
- (۷) پارامترهای حالت بحرانی با افزایش مقدار خرده لاستیک‌های دانه‌ای افزایش می‌یابند.

(۸) تغییرات حجم نمونه‌ها نشان می‌دهد که با افزایش نسبت اختلاط لاستیک تمایل نمونه‌ها به تراکم افزایش و اتساع آنها کاهش می‌یابد.

به طور کلی، رفتار مکانیکی مخلوط‌های لاستیک و ماسه برای نسبت اختلاط لاستیک کمتر از ۲۰ درصد توسط ماسه و برای نسبت اختلاط لاستیک بیشتر از ۳۰ درصد، توسط لاستیک کنترل می‌شود. لازم به ذکر است در این نوع از بررسی، کنترلی روی شکل ذرات نداریم و ممکن است شکل مصالح نیز روی نتایج آزمایش مؤثر باشد که این موضوع نیاز به مطالعات بیشتر دارد.

۵- قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از زحمات و راهنمایی‌های آقای دکتر اردین ابراهیم دانشیار دانشگاه بریتول انگلستان در راستای نگارش مقاله حاضر تشکر و قدردانی نمایند.

References

۶- منابع

- [1] A. Haddad and D. Rezazadeh Eidgahee, 2018 Experimental Evaluation of Mobilized Friction Angle of Sandy Soil-Rubber Mixtures for Different Loading Stress Paths. *Transp. Infrastructure Eng.*, 4(2), 15–28.
- [2] A. Platzler, S. Rouhanifar, P. Richard, B. Cazacliu, and E. Ibraim, 2018 Sand-rubber mixtures undergoing isotropic loading: derivation and experimental probing of a physical model. *Granul. Matter*, 20(4), 81.
- [3] C. Lee, J., Salgado, R., Bernal, A. and Lovell, 1999 Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 125(2), 132–141.
- [4] P. S. H. Poh and B. B. Broms, 1995 Slope stabilization using old rubber tires and geotextiles. *J. Perform. Constr. Facil.*, 9(1), 76–79.
- [5] P. J. Bosscher, T. B. Edil, and N. N. Eldin, 1992 Construction and performance of a shredded waste tire test embankment. *Transp. Res. Rec.*, 1345.
- [6] D. N. Humphrey and R. A. Eaton, 1993 Tire Chips as Insulation Beneath Gravel Surfaced Roads. US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
- [7] I. Ahmed, 1993 Laboratory study on properties of rubber-soils.
- [8] H. Hazarika, 2007 Structural stability and flexibility during earthquakes using tyres (SAFETY)—a novel application for seismic disaster mitigation. in *Proceedings of the international workshop on scrap tire derived geomaterials—opportunities and challenges, Yokosuka, Japan*, 115–125.
- [9] T. Edil and P. Bosscher, 1994 Engineering properties of tire chips and soil mixtures. *Geotech. Test. J.*, 17(4).

- [19] J. G. Zornberg, A. R. Cabral, and C. Viratjandr, 2004 Behaviour of tire shred sand mixtures. *Can. Geotech. J.*, 41(2), 227–241.
- [20] P. Promptthangkoon, 2009 Liquefaction of Sand-tyre Chip Mixtures. The University of Sheffield.
- [21] R. Noorzad and M. Raveshi, 2017 Mechanical behavior of waste tire crumbs--sand mixtures determined by triaxial tests. *Geotech. Geol. Eng.*, 35(4), 1793–1802.
- [22] D. T. Youwai, S. and Bergado, 2003 Strength and deformation characteristics of shredded rubber tire sand mixtures. *Can. Geotech. J.*, 40(2), 254–264.
- [23] C. Lee, Q. H. Truong, W. Lee, and J.-S. Lee, 2009 Characteristics of rubber-sand particle mixtures according to size ratio. *J. Mater. Civ. Eng.*, 22(4), 323–331.
- [24] S. Qafuri amirbande, H. R. Saba, and M. Nokandeh, 2018 To study the effect of crumb sizes of worn tires in shear strength parameters of Sandy soil. *AUT J. Civ. Eng.* .
- [25] S. Rouhanifar and E. Ibraim, 2017 Mechanics of Soft-Rigid Soil Mixtures. University of Bristol.
- [26] M. S. Mashiri, J. S. Vinod, M. N. Sheikh, and H.-H. Tsang, 2015 Shear strength and dilatancy behaviour of sand--tyre chip mixtures. *Soils Found.*, 55(3), 517–528.
- [27] I. Cavarretta, 2009 The influence of particle characteristics on the engineering behaviour of granular materials.
- [28] J. K. Mitchell, K. Soga, and others, 2005 *Fundamentals of soil behavior*, 3, John Wiley & Sons New York.
- [29] W. Y. Wu, C. C. Benda, and R. F. Cauley, 1997 Triaxial determination of shear strength of tire chips. *J. Geotech. geoenvironmental Eng.*, 123(5), 479–482.
- [30] J. Atkinson, 1993 *An introduction to the mechanics of soils and foundations: through critical state soil mechanics*.
- [31] G. C. Cho, J. Dodds, and J. C. Santamarina, 2004 Particle Shape Effects on Packing Density. *Stiffness Strength Nat. Crushed Sands-Internal Report, Georg. Inst. Technol.* 33.
- [10] J. Foose, H. Benson, and J. Bosscher, 1996 Sand reinforced with shredded waste tires. *J. Geotech. Eng.*, 9(122).
- [11] M. Ghazavi and M. Amel Sakhi, 2005 Influence of Optimized Tire Shreds on Shear Strength Parameters of Sand. *Int. J. Geomech.*, 5(1), 59–65.
- [12] C. Lee, H. Shin, and J.-S. Lee, 2014 Behavior of sand--rubber particle mixtures: experimental observations and numerical simulations. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 38(16), 1651–1663.
- [13] D. Rezazadeh Eidgahee, A. Haddad, and H. Naderpour, 2018 Evaluation of shear strength parameters of granulated waste rubber using artificial neural networks and group method of data handling. *Sci. Iran.*.
- [14] J.-S. Lee, J. Dodds, and J. C. Santamarina, 2007 Behavior of rigid-soft particle mixtures. *J. Mater. Civ. Eng.*, 19(2), 179–184.
- [15] J. C. Kim, H. K. and Santamarina, 2008 Sand-rubber mixtures (large rubber chips). *Can. Geotech. J.*, 45(10), 1457–1466.
- [16] M. Neaz Sheikh, M. S. Mashiri, J. S. Vinod, and H.-H. Tsang, 2012 Shear and compressibility behavior of sand--tire crumb mixtures. *J. Mater. Civ. Eng.*, 25(10), 1366–1374.
- [17] A. Al-Tabbaa and T. Aravinthan, 1997 Engineered clay-shredded tyre mixtures as barrier materials.
- [18] Z. H. Özkul and G. Baykal, 2007 Shear behavior of compacted rubber fiber-clay composite in drained and undrained loading. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 133(7), 767–781.

Experimental study on mechanical behavior of sand-rubber mixtures

Salman Rouhanifar^{1*}, Mohammad Afrazi²

1- Research Fellow, Dept. of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University, Tehran

2- M.Sc. of Geotechnical Engineering, Dept. of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University, Tehran

srouhanifar@gmail.com

The number of scrap tires is increasing rapidly in both developed and developing countries due to the steady rise in the number of vehicles. Scrap tires accumulation in the environment causes several social, economical and environmental issues all around the world. Recent studies showed that this material can be considered as an alternative for some conventional materials in construction industries. Scrap tires are used as a whole or in processed pieces in geotechnical engineering to help reducing the disposal effects and improve mechanical characteristics of soils. It is becoming quite common to mix soils and processed rubber particles in different civil and geotechnical constructions like lightweight backfill, road subbase, embankment fills, slopes, asphalt construction, sound barriers, rail construction and foundation reinforcement. However, the employment of these mixtures in real scale projects requires a better understanding of the mechanical performance of the mixtures.

The mechanical response of sand-rubber mixtures, initial fabric skeleton and interaction mechanism between constituents depend on several factors such as volume proportions of the mixtures, confinement stress and size ratio between constituent's grains. The idea of mixing sand and rubber particles with the same particle size distribution was employed in this study to minimize size contrast effect between the grains. Therefore, the mechanical behavior of the mixtures is only based on the volume proportions of the mixtures and internal mechanism between sand and rubber particles. To do so, drained triaxial compression and extension tests were conducted in conventional triaxial apparatus on sand-rubber mixtures. The triaxial samples were made using moist tamping method in three successive layers to avoid high segregation between rubber and sand particles.

The effect of rubber particles was significant on drained mechanical response of sand-rubber mixtures. Peak strength reduction followed by axial strain increase corresponding to the peak strength were observed by increasing the rubber fractions of the mixtures. Consequently the initial elastic modulus of sand-rubber mixtures reduces by increasing the rubber proportions of the mixtures. The contribution of volume proportions of the rubber particles inside the mixtures was found to be significant on the deformation behavior of the mixtures. The volumetric response of sand-rubber mixtures shows that increasing the rubber proportions of the mixtures increases the compressibility tendency of the mixtures which reduces the dilatancy of the mixtures. The angle of friction and intercept cohesion reduces and increases by increasing the rubber fractions of sand-rubber mixtures which are consistent with what have been observed by the previous investigations in the literature. The critical state line parameters of the mixtures were highly dependent on rubber proportions of the mixtures as the slope of critical state line increases by increasing the rubber fraction of the mixtures. The radial strain of the mixtures decreases by increasing the rubber proportions of the mixtures which could be the effect of replacing sand particles by rubber particles in force chains. In general, the mechanical response of sand-rubber mixtures was mostly controlled by sand particles where $FR \leq 20\%$ and by rubber particles where $FR > 30\%$.

Keywords: tire recycling, Sand-rubber mixtures, triaxial test, shear strength properties, deformation behavior of the mixtures