

**بررسی اثر اندازه خرده لاستیک بر رفتار مکانیکی مخلوط ماسه و خرده لاستیک با دستگاه برش مستقیم\***علیرضا رضاپور<sup>(۱)</sup>سید احسان سیدی حسینی نیا<sup>(۲)</sup>

**چکیده** در این مقاله، رفتار مکانیکی مخلوط ماسه و خرده لاستیک به صورت آزمایشگاهی مطالعه شده است. در این مطالعه، از آزمون برش مستقیم استفاده شده و مصالح مورد نظر به صورت زه کشی شده بارگذاری شده اند. هدف از این پژوهش، تأثیر اندازه دانه های خرده لاستیک بر رفتار ترکیب ماسه و خرده لاستیک بوده است. بدین منظور، از یک نوع ماسه و سه اندازه مختلف خرده لاستیک با دانه بندی تقریباً یکنواخت استفاده شده است. شیوه پژوهش بدین صورت بوده است که ابتدا رفتار مکانیکی ماسه و خرده لاستیک ها به تنهایی بررسی شده و سپس این مطالعه، بر روی درصد های اختلاط مختلف ماسه و خرده لاستیک انجام شده است. این پژوهش در دو بخش شامل مطالعه رفتار نشست پذیری توده ها در حالت فقط سربار قائم و سپس مطالعه رفتار مکانیکی تحت بارگذاری برشی انجام شده است. بررسی نتایج حاصل از بخش اول نشان می دهد که توده خرده لاستیک ها نشست پذیری خیلی بیشتری نسبت به ماسه دارند. هرچه اندازه دانه های خرده لاستیک بزرگ تر باشد، توده نشست پذیری کمتری دارد. بررسی آزمون های برشی حاصل از بخش دوم پژوهش، نشان می دهد که به طور کلی، افزایش درصد اختلاط خرده لاستیک همواره موجب کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک و در نتیجه افت مقاومت برشی توده می شود. زاویه اصطکاک داخلی توده با افزایش اندازه دانه خرده لاستیک افزایش می یابد. تراکم پذیری توده حین بارگذاری برشی با افزایش سهم خرده لاستیک تا ۲۰٪ روند کاهش دارد و پس از آن اثر ناچیزی دارد. در پایان، مدول تغییر شکل محدود شده نمونه ها به دست آمد. نتایج نشان می دهد که اندازه خرده لاستیک بر مدول تغییر شکل نقش مستقیم داشته است. هم چنین، مدول تغییر شکل توده مخلوط با افزایش سهم خرده لاستیک، کاهش می یابد.

**واژه های کلیدی** مخلوط ماسه و خرده لاستیک، اندازه خرده لاستیک، آزمون برش مستقیم، رفتار مکانیکی.

## A Study on the Effect of Shredded Tire Size on the Mechanical Behavior of Sand and Shredded Tire Mixtures Using Direct Shear Test

A. Rezapour

E. Seyedi Hosseininia

**Abstract** In this study, the mechanical behavior of the sand and shredded tire mixtures is studied by using direct shear box test. The aim of this research is to understand the effect of size effect of shredded tire particles on the mechanical behavior of the mixtures. Three different sizes of shredded tires are used in this study. First, the compressibility of the mixtures under consolidation pressure is studied and then, the mechanical behavior is investigated during the shear load. Under the compression stage, it is seen that the compressibility of shredded tires are much bigger than the sand alone. Also, it is seen that the compressibility is reduced as the size increases. During the shear loading stage, it is found out that the internal friction angle of the mixtures reduces as the percentage of the shredded tire increases. In addition, the friction angle is obtained larger as the size increases. As obvious, the compressibility of the mixtures increases with the increase in the percentage of shredded tire content. This is more effective until 20% content of shredded tire. The size of the shredded tire is not so effective on the compressibility, since the volumetric variation of medium to coarse shredded tire was almost equal. It is noted that in this paper, the variation of the friction angle and volumetric behavior of mixtures were investigated for different levels of specimen deformations.

**Key Words** Sand and Shredded Tire Mixture, Size Effect, Direct Shear Test, Mechanical Behavior.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۹/۴ و تاریخ پذیرش آن ۹۴/۸/۱۰ می باشد.

(۱) دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

Email: Eseyedi@um.ac.ir

(۲) نویسنده مسئول: دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

### مقدمه

بر طبق سرشماری انجمن تولید لاستیک آمریکا (RMA: Rubber Manufacturer Association) تقریباً ۲۹۹ میلیون حلقه لاستیک زاید در سال ۲۰۰۵ در آمریکا تولید شده است. هم‌چنین، تقریباً ۲۶۰۰۰۰۰ تن لاستیک زاید در سال ۲۰۰۳ در اتحادیه اروپا [1] ۱۰۶ میلیون حلقه لاستیک زاید در سال ۲۰۰۶ در ژاپن [2] و تقریباً حدود ۱۱۲ میلیون حلقه لاستیک هم در هندوستان [3] تولید شده است. در ایران تولید لاستیک از ۳۴ هزار تن در اول انقلاب به ۲۴۰ هزار تن در سال ۱۳۸۶ رسید که پیش‌بینی می‌شود در برنامه هفتم توسعه به ۹۳۰ هزار تن در سال ۱۴۰۴ برسد [۴]. انباشته کردن این لاستیک‌ها می‌تواند یک سری مسائل و مشکلات اجتماعی را مانند به خطر انداختن سلامتی جامعه به‌دنبال داشته باشد. بر همین اساس تلاش‌های مستمر و پیوسته‌ای انجام گرفته تا یک راه حل مفید و مناسب برای استفاده از این لاستیک‌های زاید ارائه شود. هم‌اکنون، حدود ۴۵ درصد از لاستیک‌های زاید تولید شده، به‌عنوان سوخت در کوره‌های تولید سیمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. از کاربردهای دیگر ضایعات لاستیک می‌توان به ساخت کف‌پوش‌ها، لرزه‌گیر و عایق‌های صوتی و حرارتی اشاره کرد. در مهندسی عمران و به‌خصوص در مهندسی ژئوتکنیک، سعی شده است تا از این مصالح به شکل ریزشده و یا خردشده استفاده شود. این مواد به‌عنوان مصالح پرکننده خاکریز برای پشت دیوارهای حائل [5] و لایه زه‌کش استفاده می‌شوند که معمولاً به‌همراه ماسه برای کاهش تراکم‌پذیری آن لایه استفاده می‌شود.

### مروری بر تحقیقات گذشته

در مهندسی ژئوتکنیک، پژوهش‌های متعددی بر روی تأثیر وجود قطعات خردشده و بریده‌شده لاستیکی بر رفتار مکانیکی مخلوط آن با خاک انجام شده است. به‌طور کلی، قطعات لاستیکی استفاده‌شده در تحقیقات، به‌صورت تکه‌های چند سانتی‌متری به‌نام لاستیک

بریده‌شده (tire chips) و یا به‌صورت پودر (در حد میلی‌متر و در بازه دانه‌های ماسه) به‌نام خرده‌لاستیک (shredded tire) مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

از میان تحقیقاتی که با دستگاه سه محوری انجام شده، می‌توان به تحقیقی که Gotteland et al. [6] انجام داد، اشاره کرد. آنها اثر چیدمان قرارگیری نوارهای لاستیکی بریده‌شده بر خواص مکانیکی مخلوط ماسه با لاستیک‌های بریده‌شده را مطالعه کردند. در کار دیگری توسط Bałachowski and Gotteland [7]، دستگاه سه‌محوری برای مطالعه رفتار مخلوط ماسه و لاستیک خردشده/ بریده‌شده مورد استفاده قرار گرفت. آنها مشاهده کردند که مقدار زاویه اصطکاک داخلی مخلوط با افزایش درصد لاستیک، کاهش پیدا می‌کند. در تحقیقات دیگری توسط Zorenberg et al. [8] و [9] Lee et al.، از لاستیک‌های بریده‌شده به‌صورت نواری در ترکیب با خاک ماسه‌ای استفاده شده و پارامترهای مقاومت برشی مخلوط‌ها به‌دست آمده است.

علاوه بر دستگاه سه محوری، دستگاه برش مستقیم نیز برای مطالعه مخلوط خاک و قطعات لاستیکی استفاده شده که به‌خاطر سهولت در نحوه انجام آزمایش، از محبوبیت بیشتری برخوردار است. شایان ذکر است اکثر تحقیقات انجام شده بر روی مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک، با دستگاه برش مستقیم بوده است. Attom [10] آزمایش‌های برش مستقیمی بر روی سه نوع ماسه با دانه‌بندی متفاوت و چهار درصد مختلف خرده‌لاستیک انجام داد. بر طبق نتایج او، زاویه اصطکاک داخلی با افزایش درصد لاستیک افزایش پیدا می‌کند. در پژوهش دیگری، Cabalar [11] چندین آزمایش برش مستقیم بر روی دو ماسه ریز Ceyhan و ماسه ریزتر Leighton Buzzard انجام داد. ماسه Ceyhan تیز گوشه و ماسه Leighton Buzzard گرد گوشه است. او مشاهده کرد که در ماسه Ceyhan با افزایش درصد خرده‌لاستیک، زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافت ولی در ماسه Leighton Buzzard با

خرده‌لاستیک استفاده شود و تأثیر اندازه دانه‌ها بر مقاومت برشی و تراکم‌پذیری مخلوط با خاک ماسه‌ای در درصدهای اختلاط مختلف مطالعه گردد.

### فعالیت‌های آزمایشگاهی

تمامی آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است. در این پژوهش، از یک نوع ماسه و سه دسته خرده‌لاستیک با اندازه‌های متفاوت استفاده شده است. برای بررسی تأثیر محتوای خرده‌لاستیک، نمونه‌هایی با درصدهای وزنی صفر، ۲۰، ۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد برای هر یک از سه اندازه خرده‌لاستیک ساخته شده‌اند. رفتار مکانیکی مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک با دستگاه برش مستقیم انجام شده است.

### مصالح مورد استفاده در پژوهش

مصالح مورد استفاده در این پژوهش شامل یک نوع ماسه و سه اندازه متفاوت لاستیک خرد شده بوده است. از ماسه موجود در آزمایشگاه مکانیک خاک استفاده شده است. شکل ذرات ماسه تیز گوشه است. خرده‌لاستیک‌ها از کارگاهی در منطقه خین عرب مشهد که در آن، لاستیک‌ها توسط یک رنده مکانیکی به اندازه‌های مختلف تبدیل می‌شوند، تهیه شده‌اند. در انتخاب اندازه خرده‌لاستیک‌ها طوری عمل شده است که محدودیت و شرایط استاندارد انجام آزمون برش مستقیم برای حداکثر اندازه دانه‌ها ارضا شود. در این پژوهش، خرده‌لاستیک‌ها با نام‌های خرده‌لاستیک ریز، خرده‌لاستیک متوسط و خرده‌لاستیک درشت نام‌گذاری شده‌اند. شکل (۱) شکل و اندازه دانه‌های ماسه و خرده‌لاستیک‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد. همچنین، در این پژوهش از آزمایش‌های دانه‌بندی و تعیین دانسیته کمیته و بیشینه توسط میز لرزان طبق استاندارد استفاده شده است که در ادامه به شرح آنها

افزودن ۱۰ تا ۲۰ درصد لاستیک خرد شده، زاویه اصطکاک داخلی حداکثر به حدود ۳۷ درجه رسید. Humphrey et al. [12] مجموعه‌ای از آزمون‌های برش مستقیم را بر روی سه اندازه مختلف از لاستیک‌های بریده شده و با استفاده از جعبه برش مستقیم انجام دادند. آنها مشاهده کردند با افزایش اندازه قطعات لاستیک، مقادیر پارامترهای مقاومت برشی افزایش یافته است. همچنین، آنان مشاهده کردند که با افزایش اندازه قطعات لاستیک نمونه‌های بدون چسبندگی، دارای چسبندگی ظاهری شده‌اند. Yang et al. [13] با انجام آزمایش‌های برش مستقیم بر روی لاستیک‌های خرد شده، دریافتند که تنش برشی تمامی نمونه‌ها روند صعودی داشته و به مقدار حداکثری نرسیده است. در تحقیقی که توسط Ghazavi [14] انجام شد، آزمایش‌های برش مستقیم بر روی مواد لاستیکی خرد شده با ماسه در دو تراکم متفاوت انجام گرفت که نشان از تأثیرپذیرتر بودن وجود خرده‌لاستیک در نمونه‌های سست‌تر بوده است. Moo-Young et al. [15] آزمایش‌های برش مستقیم بر روی لاستیک‌های دور انداخته شده در اندازه‌های مختلف انجام دادند. آنان بیان کردند که افزایش اندازه دانه‌ها و تراکم باعث افزایش مقاومت برشی لاستیک‌های دور ریخته شده می‌شود. همچنین اگر اندازه دانه‌های لاستیک‌ها در محدوده ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر باشد، بیشترین مقدار مقاومت برشی به دست می‌آید.

باتوجه به مرور ادبیات فنی گذشته، با این که تأثیر اندازه لاستیک بریده شده در مخلوط بررسی شده، ولی تاکنون اثر اندازه لاستیک خرد شده (نزدیک به اندازه دانه‌های ماسه) بر رفتار مکانیکی بررسی نشده است. از طرف دیگر، در ادبیات فنی به‌سختی یک کار پژوهشی یافت می‌شود که در آن، هر دو مقوله مقاومت برشی و تغییر شکل مطالعه شده باشند. از این رو، در این پژوهش سعی شده است تا با در نظر گرفتن مشخصات ثابتی برای یک خاک ماسه‌ای، از سه اندازه مختلف

پرداخته می شود.

### تعیین چگالی و تراکم نسبی

برای به دست آوردن چگالی دانه های جامد ( $G_s$ ) طبق استاندارد ASTM D854-02 عمل شده است. آزمایش فوق با دو پیکنومتر ۲۵۰ و ۱۰۰۰ میلی لیتری تکرار شده و مقادیر حاصل از این آزمایش در جدول (۱) آورده شده است. مشاهده می شود که چگالی دانه های جامد ماسه، تقریباً ۲/۵ برابر خردلاستیک است.



(الف)

جدول ۱ مقادیر چگالی دانه های جامد (گرم بر سانتی متر مکعب) برای دو حجم مختلف پیکنومتر

ماده \ پیکنومتر	۲۵۰ میلی لیتر	۱۰۰۰ میلی لیتر
خردلاستیک	۱/۱۳ - ۱/۱۴	۱/۱۴ - ۱/۱۵
ماسه	۲/۶۵ - ۲/۶۷	۲/۶۵ - ۲/۶۷



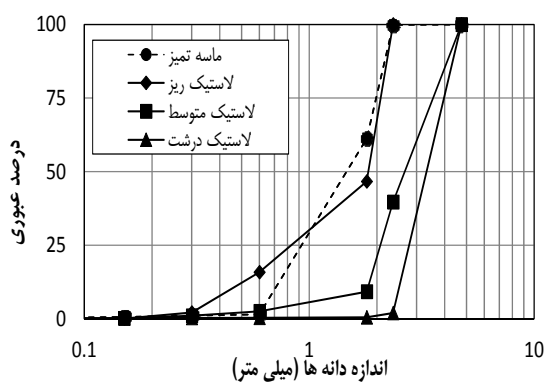
(ب)

شکل ۱ نمایش (الف) ماسه تیز گوشه و (ب) خردلاستیک های مورد آزمایش (از راست به چپ ریزتر می شود)

در این پژوهش، تمامی نمونه های مخلوط ماسه و خردلاستیک در یک تراکم نسبی برابر با  $D_r = 75\% \pm 5\%$  تهیه شده اند. به منظور تعیین تراکم نسبی نمونه ها، برای هر یک از نسبت های اختلاط، آزمون تعیین دانسیته بیشینه براساس ASTM D4253-93 و آزمون تعیین دانسیته کمینه براساس ASTM D4254-93 انجام گردید که نتایج آن مطابق با جدول (۲) است. شکل (۳) مقادیر وزن مخصوص به دست آمده را برای درصد اختلاط های مختلف و خردلاستیک های ریز، متوسط و درشت با تراکم نسبی ۷۵٪ را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، با افزایش درصد لاستیک در مخلوط، وزن مخصوص کاهش یافته است. ضمناً با درشت تر شدن اندازه خردلاستیک ها وزن مخصوص بیشتر شده است، به طوری که این مقادیر بین ۰/۵ تا ۱/۵۳ گرم بر سانتی متر مکعب به دست آمده اند.

### دانه بندی مصالح

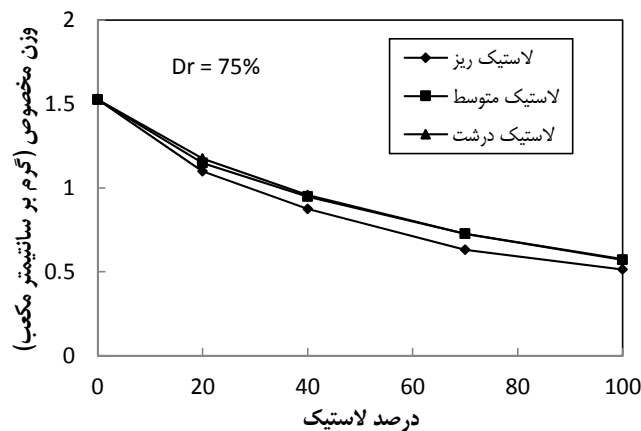
شکل (۲) منحنی دانه بندی ماسه تمیز و انواع خردلاستیک ها را نشان می دهد. مشاهده می شود که منحنی دانه بندی مربوط به خردلاستیک درشت در طرف راست نمودار قرار گرفته است.



شکل ۲ منحنی دانه بندی مصالح استفاده شده

جدول ۲ مقادیر وزن مخصوص بیشینه و کمیته مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)

لاستیک درشت		لاستیک متوسط		لاستیک ریز		درصد محتوای
مقدار بیشینه	مقدار کمیته	مقدار بیشینه	مقدار کمیته	مقدار بیشینه	مقدار کمیته	وزنی لاستیک
۱.۵۷	۱.۴۱	۱.۵۷	۱.۴۱	۱.۵۷	۱.۴۱	صفر
۱.۲۱	۱.۰۸	۱.۱۸	۱.۰۶	۱.۱۴	۰.۹۹	۲۰
۰.۹۹	۰.۸۷	۰.۹۸	۰.۸۶	۰.۹۳	۰.۷۴	۴۰
۰.۷۶	۰.۶۴	۰.۷۶	۰.۶۴	۰.۶۸	۰.۵۲	۷۰
۰.۶۱	۰.۴۹	۰.۶۱	۰.۴۸	۰.۵۶	۰.۴۱	۱۰۰



شکل ۳ وزن مخصوص با درصد محتوای لاستیک برای درجه تراکم ۷۵٪

ضروری است که در ادبیات فنی، پژوهش‌هایی یافت می‌شود که در آن به تأثیر اندازه دانه‌ها توجه کرده و اعلام کرده‌اند که حداقل بعد جعبه باید بین ۵۰ تا ۳۰۰ برابر قطر دانه باشد [16].

مراحل مختلف این آزمون عبارتست از قرار دادن نمونه ساخته شده در ابزار برش مستقیم، اعمال تنش عمودی از پیش تعیین شده، تحکیم نمونه تحت تنش عمودی، بازکردن قاب‌های نگهدارنده نمونه آزمایش، جابه‌جایی افقی یک فک نسبت به فک دیگری با نرخ ثابت تغییر مکان برشی و اندازه‌گیری نیروی برشی و تغییر مکان‌های افقی نمونه تحت برش.

### شرح مختصر روش انجام آزمایش

ابتدا ماسه و خرده‌لاستیک با درصدهای وزنی از پیش

### مشخصات دستگاه برش

برای بررسی رفتار مکانیکی مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک از دستگاه برش مستقیم مربعی ۱۰×۱۰ سانتی‌متر استفاده شده است. این دستگاه محصول سال ۱۹۹۱ میلادی شرکت ELE است و قابلیت اعمال نرخ جابه‌جایی ۰/۰۰۰۵ تا ۲ میلی‌متر بر دقیقه را دارد. گنج‌های نصب‌شده روی دستگاه، حساسیتی معادل ۰/۰۰۲ میلی‌متر را دارند. این آزمون طبق استاندارد ASTM D3080 انجام شده است. طبق این استاندارد، ابعاد جعبه و ضخامت آن حداقل باید ۱۰ و شش برابر بزرگترین قطر دانه‌ها باشد که باتوجه به منحنی دانه‌بندی درشت‌ترین خرده‌لاستیک (شکل ۲)، این نسبت به حدود ۳۰ می‌رسد و در نتیجه، نگرانی بابت اندازه جعبه آزمایش وجود ندارد. البته ذکر این نکته

نیروی برشی به نمونه وارد می‌شود. این عمل به کمک موتور الکتریکی با سرعت کرنش یک میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفته است. شایان ذکر است برای بررسی تأثیر سرعت بارگذاری، نمونه ماسه و نمونه‌های خرده‌لاستیک به تنهایی تحت سرعت‌های جابه‌جایی ۰/۲، یک و دو میلی‌متر بر دقیقه بارگذاری شدند. با مقایسه نمودارهای تنش-کرنش آن‌ها و یکسان بودن مسیر تنش‌ها، مشاهده شد که سرعت بارگذاری نقشی بر رفتار مکانیکی ندارد. به منظور رسم پوش گسیختگی و تعیین پارامترهای مقاومت برشی، نمونه‌ها در سه سربار عمودی (قائم) ۲۵ و ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال تحت برش قرار گرفته‌اند. با توجه به سه نوع خرده‌لاستیک و سه سربار و پنج مقدار اختلاط قید شده، در مجموع ۴۵ آزمایش برش مستقیم انجام گرفته است. جزئیات بیشتر در مرجع [۱۷] ارائه شده است.

### نتایج

در مرحله قبل از بارگذاری برشی، نمونه‌ها فقط تحت بارگذاری قائم قرار گرفتند و در نتیجه، نشست‌پذیری نمونه‌ها بررسی شده‌اند، در حالی که، در مرحله دوم که بارگذاری به صورت برشی بوده است، علاوه بر بحث تراکم‌پذیری، مقاومت برشی نمونه‌ها هم مطالعه شده‌اند. نتایج در ادامه تشریح شده‌اند.

#### تراکم‌پذیری نمونه‌ها قبل از اعمال برش

شکل (۵) نمودار نشست برحسب زمان نمونه‌های حاوی ماسه تمیز و خرده‌لاستیک را نشان می‌دهد. نمونه ماسه‌ای تحت بیشترین سربار حدود ۰/۵ میلی‌متر نشست داشته است، در صورتی که نمونه خرده‌لاستیک‌ها در حد ۱۰ میلی‌متر نشست داشته‌اند. به عبارت دیگر، اگر در خاک ریزی، به جای ماسه، از خرده‌لاستیک به عنوان مصالح پرکننده استفاده شود، مقدار نشست آن، حدود ۲۰ برابر بیشتر می‌شود. از میان خرده‌لاستیک‌ها، همان‌طور که مشاهده می‌شود، هرچه خرده‌لاستیک‌ها

تعیین شده با هم مخلوط می‌شوند. سپس، با در نظر گرفتن تراکم ۷۵ درصد برای نمونه‌ها و محاسبه وزن مخصوص نمونه (شکل ۳)، وزن لازم برای پرکردن قالب برش به دست می‌آید. باید نمونه را طوری متراکم نمود تا با گذاشتن صفحه برش بالایی، این صفحه با سطح بالایی قالب هم‌سطح شود. برای بررسی نشست نمونه با زمان قبل از برش، نمونه را در دستگاه قرار داده و با قرار دادن سربارها در زمان‌های مختلف مقدار گسیج قائم ثبت می‌شود. نحوه بارگذاری به صورت تدریجی بوده است، بدین صورت که تا رسیدن به تنش سربار مورد نظر، سربار در چند مرحله وارد شده است. برای ثبت اولیه مقدار نشست (تحت سربار کوچک)، به جای قرار دادن اهرم بار، از یک لوله سبک و دو گسیج در طرفین آن استفاده شده است. دلیل استفاده از دو گسیج، سرشکن کردن نشست‌های غیر متقارن بوده است. قرائت نشست تا زمانی طول می‌کشد که تغییرات نشست ناچیز شود. پس از ثابت شدن مقدار نشست، سربار بعدی قرار داده می‌شود. این کار تا قراردادن سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال ادامه یافته است. شکل ۴ نمونه را تحت بارگذاری مرحله آخر (۱۰۰ کیلوپاسکال) نشان می‌دهد.



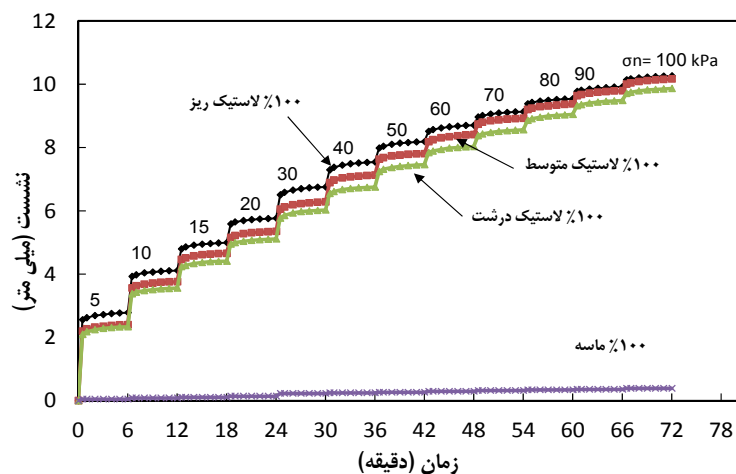
شکل ۴ نمونه تحت بارگذاری ۱۰۰ کیلوپاسکال

پس از نشست کامل نمونه در سربار مورد نظر،

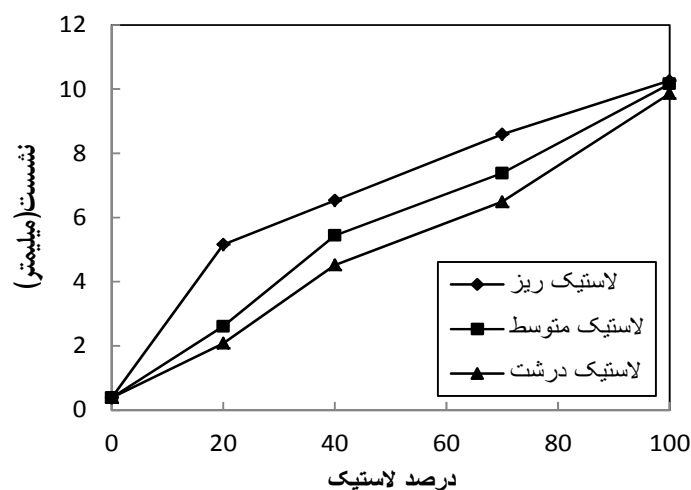
خرده‌لاستیک باعث کاهش نشست پذیری توده مخلوط شده است. تغییرات نشست با درصد خرده‌لاستیک از نوع متوسط و درشت تقریباً خطی است، در صورتی که نشست مخلوط با خرده‌لاستیک با دانه بزرگ‌تر، بیشتر شده است. در این نمودار، هم‌چنان مشاهده می‌شود که اندازه دانه‌های خرده‌لاستیک نقش مهمی در مقدار نشست پذیری دارد. هرچه دانه‌های خرده‌لاستیک درشت‌تر باشد، نشست کمتر می‌شود. البته این قاعده برای درصد اختلاط‌های ۲۰-۸۰ بیشتر بروز می‌کند.

ریزتر باشند، نشست بیشتر شده است. هم‌چنین، مقدار اختلاف نشست‌ها در میان خرده‌لاستیک‌ها، در سربارهای کم، کوچک بوده است، ولی با افزایش سربار، این مقدار اختلاف کاهش می‌یابد.

باتوجه به تراکم‌پذیری بالای مصالح خرده‌لاستیک، می‌توان این خاصیت را با افزودن ماسه به آن اصلاح نمود. شکل (۶) مقدار نشست نمونه‌های مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک تحت سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال را برحسب محتوای خرده‌لاستیک نشان می‌دهد. به‌طور کلی، مشاهده می‌شود که افزودن ماسه در کنار



شکل ۵ تغییرات نشست نمونه حاوی فقط ماسه و خرده‌لاستیک برحسب زمان تحت سربارهای مختلف

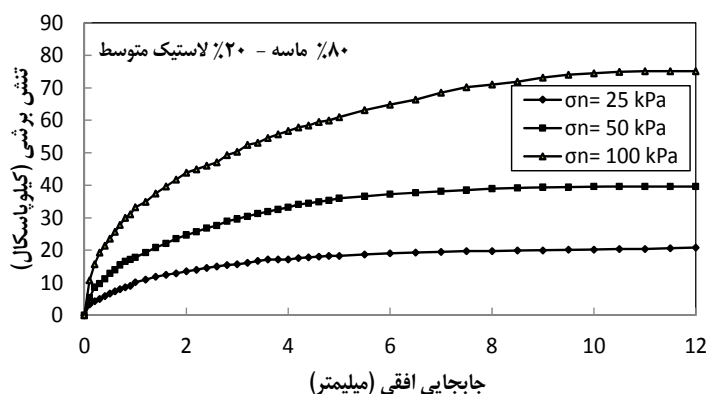
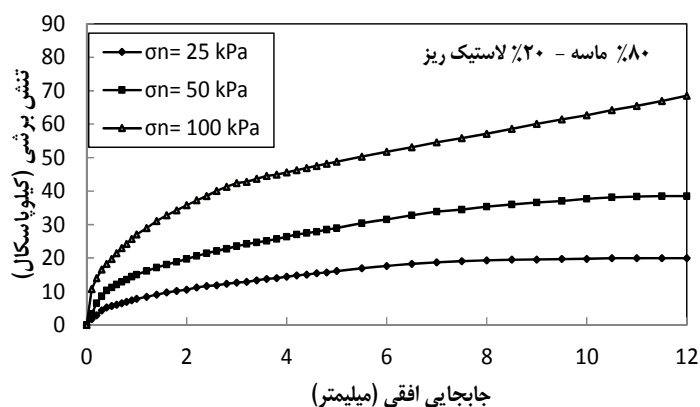
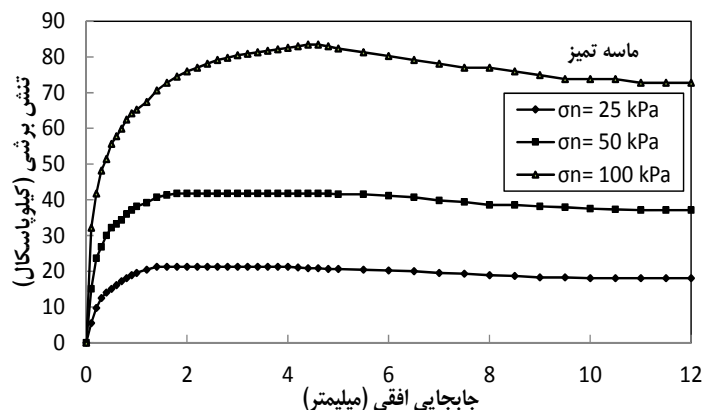


شکل ۶ نمودار حداکثر نشست برحسب محتوای خرده‌لاستیک زیر اعمال سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال

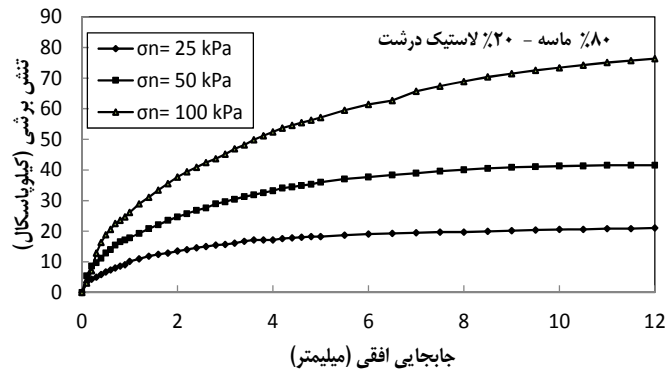
### روند تغییرات مقاومت برشی

در صورتی که با افزودن ۲۰٪ خرده لاستیک، نقطه قله در نمودار مقاومت برشی از بین می‌رود و تنش برشی مرتباً در حال افزایش است. به عبارت دیگر، رفتار نمونه از حالت ترد (افت مقاومت پس از کرنش حدود ۴٪)، به حالت شکل‌پذیر درآمده است. در بقیه نسبت‌های اختلاط نیز چنین روندی مشاهده می‌شود.

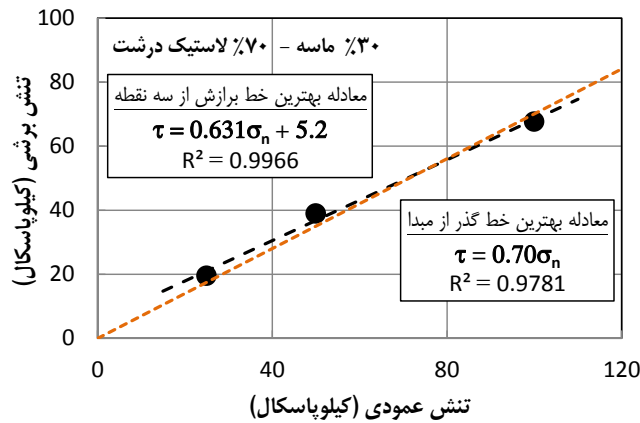
شکل (۷) نمودارهای تغییرات تنش برشی را برحسب جابه‌جایی افقی برای نمونه ماسه تمیز و نمونه‌های حاوی ۲۰٪ خرده لاستیک (به‌عنوان نمونه) از اندازه‌های مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نمونه حاوی ماسه تمیز، رفتاری سخت‌شونده-نرم‌شونده دارد،







شکل ۷ تغییرات تنش برشی با جابه‌جایی افقی تحت تنش‌های عمودی مختلف برای ماسه تمیز و مخلوط‌های ۸۰٪ ماسه - ۲۰٪ خرده‌لاستیک



شکل ۸ نمایش پوش‌های گسیختگی برای مخلوط ۳۰٪ ماسه - ۷۰٪ خرده‌لاستیک درشت

### پارامترهای مقاومت برشی مخلوط

مطالعه و تعیین مقاومت برشی مصالح دانه‌ای با کمک معیار کولمب انجام می‌شود که با رابطه  $\tau_f = \sigma_n \tan \phi + c$  تعریف می‌گردد. در این معیار، رابطه میان مقاومت برشی ( $\tau_f$ ) با تنش عمودی وارد بر سطح ( $\sigma_n$ ) توسط دو معیار زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) و چسبندگی ( $c$ ) تعریف می‌شود. این دو پارامتر با کمک برازش دادن بهترین خط گذرنده از میان سه نقطه در فضای مختصات تنش برشی - تنش عمودی وارد بر سطح برش به دست می‌آید.

برای مصالح دانه‌ای که میان ذرات آن چسبندگی کمی و یا ناچیزی وجود دارد، به جای دو پارامتر مذکور،

از یک پارامتر دیگر به نام زاویه اصطکاک داخلی معادل استفاده می‌شود. در واقع، این پارامتر از روی شیب بهترین خط برازش شده و گذرنده از مبدأ مختصات به دست می‌آید. مزیت استفاده از این پارامتر، سادگی در مطالعه مقاومت برشی (استفاده از یک پارامتر به جای دو پارامتر) است که در ادامه و براساس نتایج به دست آمده شرح داده می‌شوند.

در این پژوهش، معیار (پوش) گسیختگی برای تمام مخلوط‌ها با کمک برازش رسم بهترین خط مستقیم از میان سه نقطه مربوط به تنش‌های عمودی  $\sigma_n = 25, 50, 100$  kPa حاصل شده است. به عنوان نمونه، پوش‌های گسیختگی مربوط به مقادیر بیشینه تنش برشی

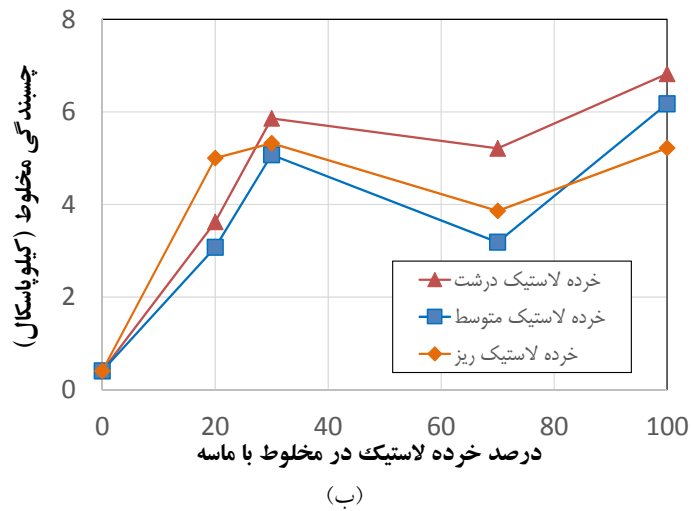
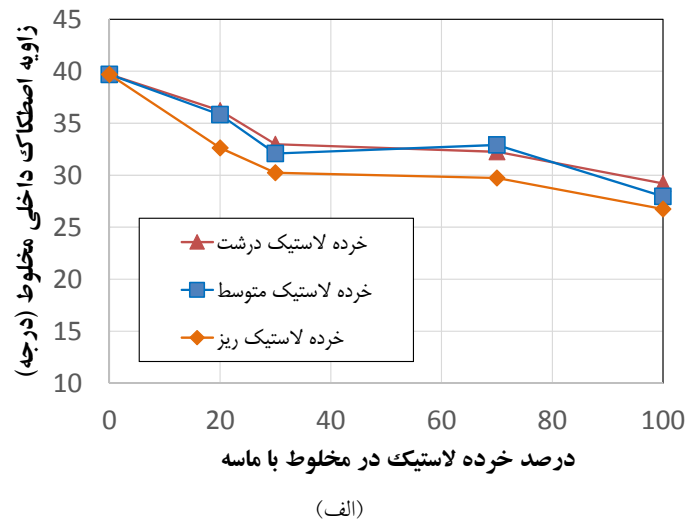
ادامه این پژوهش، مقدار زاویه اصطکاک داخلی معادل مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک به‌عنوان فقط یک پارامتر دخیل در تعریف مقاومت برشی در سطوح مختلف تغییرشکلی محاسبه و مقایسه می‌شود.

در شکل (۱۰) تغییرات زاویه اصطکاک داخلی معادل برای مخلوط‌های با خرده‌لاستیک‌های ریز، متوسط و درشت در سطوح تغییرشکل‌های مختلف و با درصد‌های اختلاط مختلف نمایش داده شده است. با دقت در این مقادیر ملاحظه می‌شود که در تمامی نمونه‌ها با افزایش درصد محتوای لاستیک، مقدار زاویه اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد، با این تفاوت که نمونه‌های ساخته‌شده از خرده‌لاستیک درشت، کاهش کمتری را نشان می‌دهند. اگر به نمودارهای رسم شده برای جابه‌جایی سه میلی‌متر دقت شود، ملاحظه می‌شود که مقادیر زاویه اصطکاک داخلی از ۳۹ درجه، برای نمونه ماسه تمیز تا ۱۸ درجه برای نمونه لاستیک ریز ۱۰۰ درصد کاهش پیدا می‌کند، این در حالی است که در جابه‌جایی ۹ میلی‌متر این مقدار از ۳۷ درجه به ۲۹ درجه کاهش پیدا می‌کند. نکته دیگر آن‌که در نمودارهای جابه‌جایی ۹ میلی‌متر برای لاستیک درشت فقط دو درجه به‌ازای افزودن ۴۰ درصد لاستیک کاهش زاویه اصطکاک مشاهده می‌شود؛ یعنی حدس زده می‌شود که اگر از خرده‌لاستیک‌هایی با اندازه‌های درشت‌تر استفاده شود، می‌توان امیدوار بود که زاویه اصطکاک داخلی ثابت باقی بماند و حتی این‌که بیشتر خرده‌لاستیک گفته نمی‌شود، بلکه در طبقه‌بندی لاستیک بریده شده قرار می‌گیرد. افزایش زاویه اصطکاک توده در مخلوط ماسه و لاستیک بریده شده توسط محققان دیگری که در بخش دو مقاله اشاره شده، گزارش شده است. در صورتی که مقدار زاویه اصطکاک برای حداکثر برش محاسبه شود، روندی مشابه با معیار جابه‌جایی ۹ میلی‌متر دیده می‌شود.

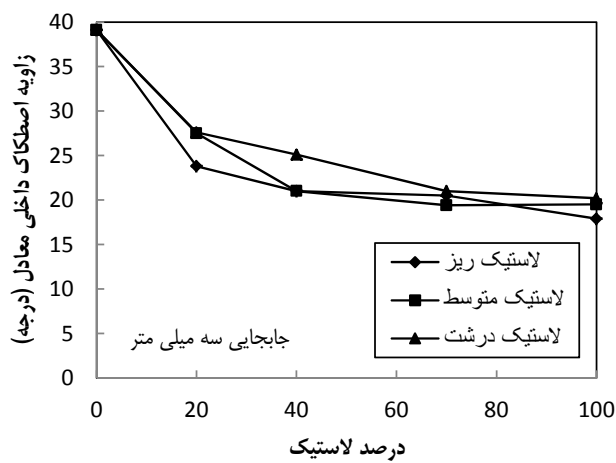
برای مخلوط ۳۰٪ ماسه - ۷۰٪ خرده‌لاستیک درشت در شکل (۸) نشان داده شده است. منظور از  $R^2$  در این شکل، ضریب رگرسیون خطی است. معادله‌های بهترین خط‌های گذرنده از میان سه نقطه و نیز سه نقطه به‌همراه مبدأ مختصات نشان داده شده‌اند. عرض از مبدأ نشان‌دهنده چسبندگی است و شیب خط برابر با تانژانت زاویه اصطکاک داخلی خاک است.

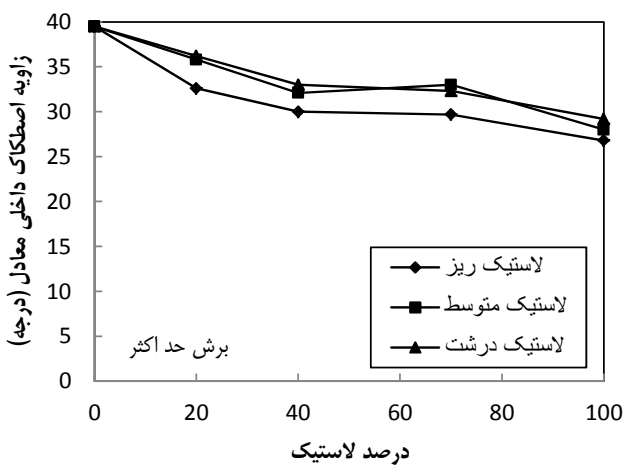
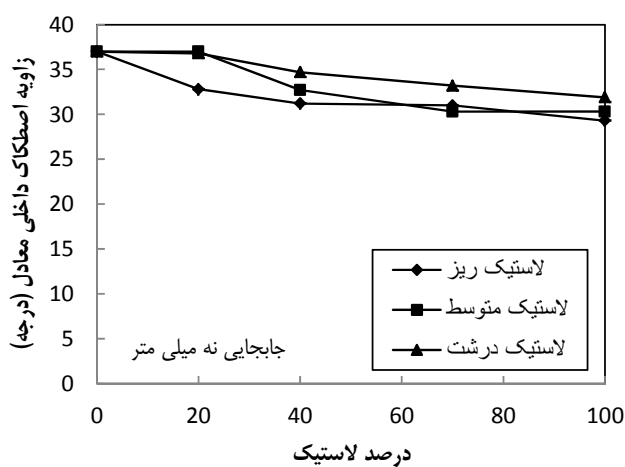
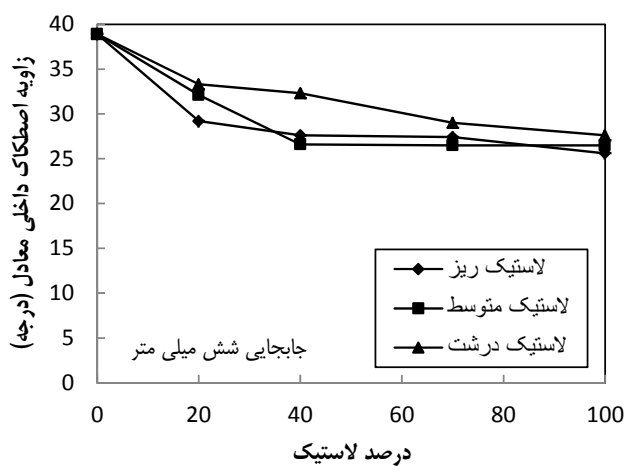
شکل (۹) روند تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک (متناظر با تنش برشی بیشینه) و چسبندگی مخلوط‌ها با درصد‌های مختلف ماسه و خرده‌لاستیک را نشان می‌دهد. در شکل (۹-الف) مشاهده می‌شود که با افزایش سهم خرده‌لاستیک، زاویه اصطکاک داخلی مخلوط همواره کاهش می‌یابد. زاویه اصطکاک داخلی برای مخلوط‌های درشت و متوسط تقریباً مثل هم است و از مقادیر متناظر با خرده‌لاستیک ریز بزرگ‌تر می‌باشد. شایان ذکر است که نتایج این پژوهش با نتایج قبلی [8,11] تطابق دارد. در شکل (۹-ب) مشاهده می‌شود که در تمام آزمایش‌ها، با افزایش درصد خرده‌لاستیک از صفر تا ۳۰ درصد، چسبندگی توده افزایش می‌یابد. ولی پس از آن در نسبت ۷۰٪ افت دارد و در نهایت، توده حاوی فقط خرده‌لاستیک، بیشترین چسبندگی است. درضمن، اثر مستقیم اندازه خرده‌لاستیک‌ها به‌وضوح قابل مشاهده است. نتایج کارهای دیگران [7, 8] نیز مؤید این موضوع است که صرف‌نظر از اندازه دانه‌ها و در سهم‌های کوچک خرده‌لاستیک، مخلوط حاوی ۳۰٪ خرده‌لاستیک، بیشترین چسبندگی را داشته است.

در مکانیک خاک کلاسیک، مرسوم است که زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی متناظر با حداکثر تنش برشی تحمل‌شده در نظر گرفته شود. این امر نشان‌دهنده حد نهایی مقاومت است. در صورتی که در دیدگاه سطوح عملکرد که هم‌اکنون در طراحی‌های ژئوتکنیکی مورد توجه قرار می‌گیرد، به تغییرشکل‌های قابل تحمل خاک و سازه روی آن نیز توجه می‌شود. از این‌رو، در



شکل ۹ روند تغییرات (الف) زاویه اصطکاک داخلی، (ب) چسبندگی مخلوط ماسه با خرده‌لاستیک متناظر با تنش برشی بیشینه





شکل ۱۰ تغییرات زاویه اصطکاک داخلی معادل برای لاستیک‌های ریز، متوسط و درشت

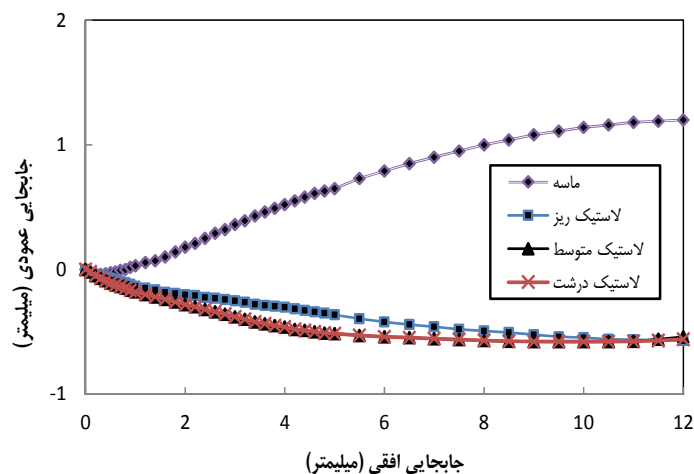
خرده‌لاستیک، تغییرات حجمی نمونه حین برش هم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. زیرا تغییرشکل‌های

بررسی تغییرات حجمی نمونه‌ها حین برش علاوه بر تغییرات مقاومت برشی مخلوط ماسه و

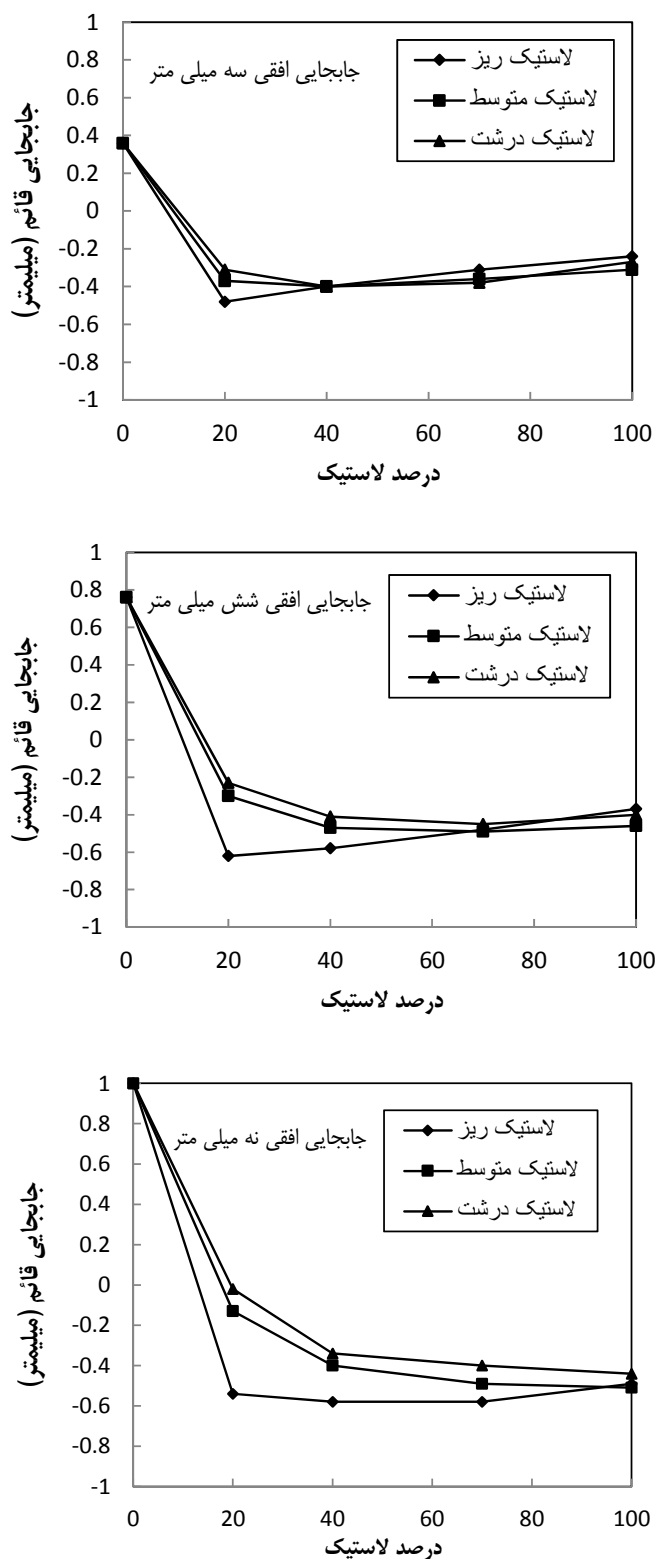
است. با این حال، باید گفت که مقدار تغییر حجم هر سه نمونه خرده‌لاستیک، در پایان آزمایش یکسان به‌دست آمده است.

به‌منظور بررسی تأثیر درصد اختلاط ماسه و خرده‌لاستیک، تغییرشکل‌های تمام نمونه‌ها برداشت شده است و مشابه تعریف زاویه اصطکاک داخلی در تغییرشکل‌های افقی مختلف، مقدار تغییرشکل‌های قائم در مراحل مختلف در شکل (۱۲) ارائه شده است. نمودارها همگی برای آزمایش‌های با سربار ۲۵ کیلوپاسکال نشان داده شده‌اند. مقدار مثبت محور قائم نشانگر تورم نمونه (افزایش حجم) و مقدار منفی نشانگر انقباض نمونه است. یادآوری می‌شود که رفتار ماسه به‌شدت اتساعی است، ولی همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود، با افزودن ۲۰٪ خرده‌لاستیک به ماسه، رفتار آن به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد و مقدار تورم در آن کاهش می‌یابد. مقدار کاهش تورم در مخلوط با خرده‌لاستیک بیشتر بوده است. هم‌چنین، مشاهده می‌شود که افزودن بیش از ۲۰٪ خرده‌لاستیک، تأثیر بسزایی در تغییر روند تغییرشکل‌ها نداشته است.

توده خاک عمدتاً تحت اعمال بارگذاری برشی رخ می‌دهند. برای بررسی تغییرات حجمی نمونه حین برش در آزمون برش مستقیم، از جابه‌جایی قائم نمونه استفاده می‌شود. به‌منظور مقایسه رفتار حجمی ماسه و خرده‌لاستیک‌ها، تغییرات جابه‌جایی افقی و قائم در آزمون برش مستقیم تحت تنش عمودی ۲۵ کیلوپاسکال در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نمونه ماسه‌ای ابتدا رفتار تراکمی دارد (در جابه‌جایی کمتر از ۰/۵ میلی‌متر معادل نیم درصد) و سپس رفتار اتساعی آن شروع می‌شود و تا انتهای آزمایش، افزایش حجم دارد؛ درصورتی‌که در نمونه‌های با ۱۰۰٪ خرده‌لاستیک، رفتار تغییرشکلی فرق دارد و همگی رفتار تراکمی از خود نشان می‌دهند. دلیل تفاوت رفتار، در شکل‌پذیری دانه‌هاست. اندازه دانه‌های لاستیک نیز در روند تغییرشکل‌پذیری نقش دارد، بدین صورت که خرده‌لاستیک ریز رفتار تراکمی کمتری از خود نشان داده است. از طرفی، رفتار خرده‌لاستیک‌های متوسط و درشت تقریباً مشابه هم بوده‌اند. به‌عبارت دیگر، برخلاف نشست‌پذیری نمونه‌ها تحت فقط سربار قائم که متأثر از اندازه دانه‌ها بود (شکل ۵)، با افزایش اندازه دانه‌ها، رفتار تغییرشکل حین برش فرقی نکرده



شکل ۱۱ تغییرات جابه‌جایی قائم نسبت به تغییرشکل افقی نمونه‌های حاوی ماسه تمیز و خرده‌لاستیک تحت تنش عمودی ۲۵ کیلوپاسکال



شکل ۱۲ تغییرات جابه‌جایی قائم در نسبت اختلاط‌های مختلف خرده‌لاستیک تحت تنش عمودی ۲۵ کیلوپاسکال

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_2 + \sigma_3) \\ \varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_3 + \sigma_1) \\ \varepsilon_3 = \frac{\sigma_3}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) \end{cases} \quad (1)$$

که در آن، منظور از  $\varepsilon_i$  و  $\sigma_i$  مؤلفه‌های کرنش و تنش در راستاهای مختلف ( $i = 1, 2, 3$ ) است. شرایط مرزی این المان در دستگاه برش مستقیم بدین صورت است که کرنش‌های جانبی صفر هستند. به عبارت دیگر:  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$ . با داشتن این شرط و تعیین تنش‌های جانبی و درنهایت، ساده کردن رابطه برحسب تنش و کرنش در راستای ۱ داریم:

$$\sigma_1 = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \varepsilon_1 = M\varepsilon_1 \quad (2)$$

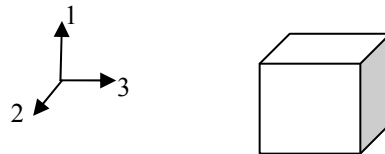
در این رابطه،  $M = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} E$  است و در مکانیک خاک کلاسیک به «مدول تغییرشکل محدودشده» شناخته می‌شود. این مدول همان پارامتری است که در آزمون تحکیم نیز به دست می‌آید و برابر با عکس ضریب تراکم‌پذیری ( $m_v$ ) است. یادآوری می‌شود که در آزمون تحکیم هم، بارگذاری به صورت یک‌بعدی انجام می‌شود.

با رجوع به شکل (۵) و یادآوری این که بارگذاری قبل از اعمال برش در آزمون برش مستقیم، در ۱۲ گام مختلف انجام شده است، می‌توان روند میان تنش و کرنش ایجاد شده در نمونه‌های مختلف را بررسی کرد. در شکل (۱۴) رابطه میان تنش - کرنش محوری در راستای ۱ (راستای بارگذاری) به تفکیک برای نمونه‌های مخلوط با خرده‌لاستیک‌ها با اندازه‌های مختلف نشان داده شده است. در این نمودارها، نمودار ماسه تمیز نیز برای مقایسه نشان داده شده است.

### تعیین مدول تغییرشکل

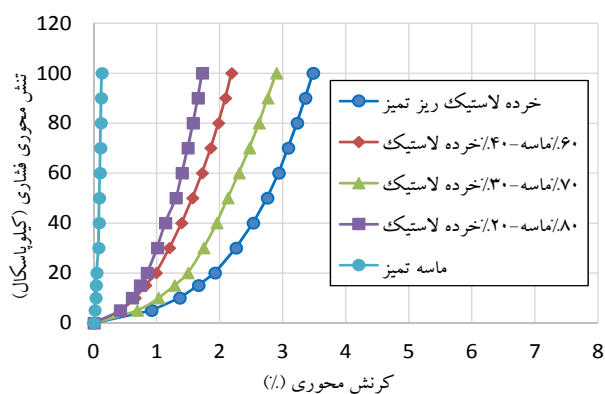
در طراحی سازه‌های ژئوتکنیکی، علاوه بر مقوله مقاومت برشی و تعیین پارامترهای آن، باید به مقوله تغییرشکل‌ها نیز پرداخت. زیرا در خیلی مواقع نظیر طراحی شالوده‌های سطحی، مقاومت برشی خاک حاکم نیست، بلکه تغییرشکل‌ها نباید از حد مجاز و سطح بهره‌برداری تجاوز کند. از این رو، در این بخش سعی شده است تا با کمک روابط الاستیسیته، بتوان مدول تغییرشکل مخلوط‌ها را به دست آورد و با هم مقایسه کرد.

با فرض این که خاک ماسه‌ای و مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک در حین بارگذاری قائم (حین متراکم کردن)، رفتار کشسان (الاستیک) داشته باشند، می‌توان پارامترهایی نظیر تغییرشکل‌پذیری را به دست آورد.

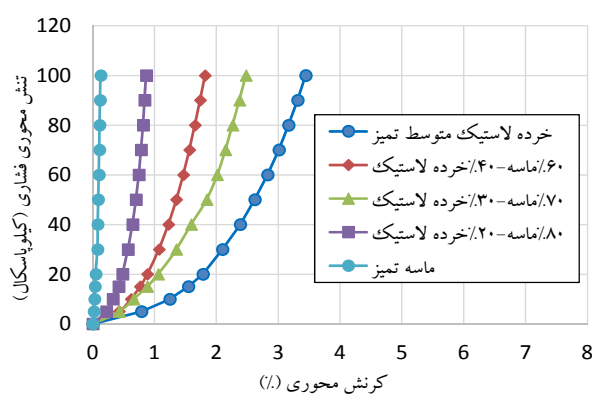


شکل ۱۳ نمایش یک المان در دستگاه مختصات دکارتی

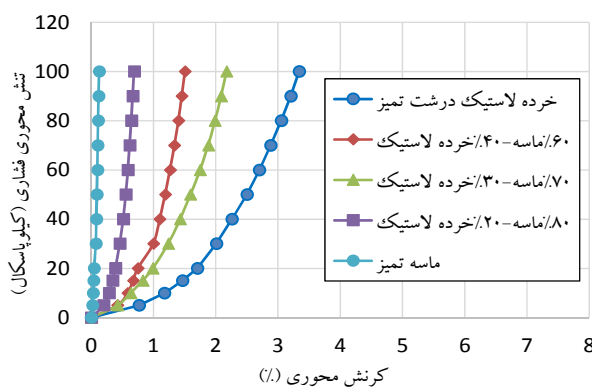
بر اساس نظریه کشسانی، پارامترهای تغییرشکل یک جسم برحسب دو پارامتر مدول تغییرشکل ( $E$ ) و نسبت پواسون ( $\nu$ ) تعریف می‌شود. یک المان از جسمی الاستیک مطابق شکل (۱۳) در دستگاه دکارتی ۱-۲-۳ در نظر گرفته می‌شود که در راستاهای ۲ و ۳ تغییرشکل ندارد و فقط در راستای ۱ در اثر بارگذاری می‌تواند تغییرشکل دهد. این شرایط مشابه با آنچه حین بارگذاری فشاری در آزمایش برش مستقیم و قبل از مرحله اعمال برش است، اتفاق می‌افتد. رابطه کلی میان تنش و کرنش برای چنین المانی به صورت زیر است:



الف) مخلوط با خرده لاستیک ریز



ب) مخلوط با خرده لاستیک متوسط



ب) مخلوط با خرده لاستیک درشت

شکل ۱۴ نمایش نمودار تنش- کرنش یک‌بعدی برای انواع مخلوط‌های ماسه و خرده‌لاستیک

می‌دهد. مطابق شکل (۱۴)، نمودار نمونه ماسه تمیز دارای شیب تندی است و نمونه‌های با درصد‌های مختلف خرده‌لاستیک، شیب کمتری دارند. خاطر نشان می‌شود که براساس آنچه که در رابطه (۲) به دست آمد

همان‌طور که انتظار می‌رود، ماسه تمیز رفتار سختی از خود نشان می‌دهد و با افزودن خرده‌لاستیک به ماسه، رفتار این مخلوط نرم‌تر می‌شود و تحت یک سربار ثابت، کرنش‌های بزرگ‌تری از خود نشان



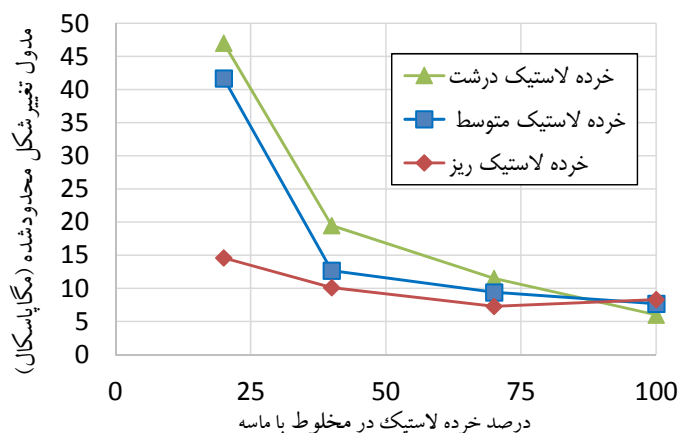
برای بررسی بهتر تأثیر نسبت اختلاط خرده‌لاستیک بر پارامتر تغییرشکل پذیری، تغییرات M با درصد خرده‌لاستیک برای سه اندازه ریز، متوسط و درشت در شکل (۱۵) نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که به‌طور کلی، افزودن خرده‌لاستیک منجر به نرم‌تر شدن مخلوط می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که وجود اندازه درشت‌تر خرده‌لاستیک، موجب سخت‌تر شدن نمونه می‌شود. با این حال، تغییرات سختی برای مخلوط خرده‌لاستیک نرم، نسبت به دو نوع دیگر کمتر است.

در شکل (۱۶) روند تغییرات مدول M با اندازه خرده‌لاستیک در درصد‌های اختلاط ثابت نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که در درصد‌های مختلف اختلاط خرده‌لاستیک با ماسه، اندازه خرده‌لاستیک در افزایش سختی مؤثر است. بدین معنی که هرچه اندازه خرده‌لاستیک بزرگ‌تر باشد، نمونه نیز رفتار سخت‌تری از خود نشان می‌دهد. البته ذکر این نکته ضروری است که با افزایش سهم خرده‌لاستیک، افزایش سختی نیز کاهش می‌یابد به‌طوری‌که، در حالت وجود ۱۰۰٪ خرده‌لاستیک، اندازه خرده‌لاستیک نقشی در افزایش سختی نمونه ندارد.

شیب این نمودارها برابر با همان مدول تغییرشکل محدود شده است. از طرفی، مشاهده می‌شود که این نمودارها در کل، شیب ثابتی ندارند و شیب در همگی آنها ابتدا کم بوده است و با ادامه بارگذاری، افزایش یافته است. با این حال، مشاهده می‌شود که این شیب، در سطح تنش بیشتر از حدود ۴۰ کیلوپاسکال، ثابت شده است. به‌نظر می‌رسد دلیل این تغییرشیب در تنش‌های کمتر از ۴۰ کیلوپاسکال، مربوط به تراکم نمونه‌ها می‌باشد. در جدول (۳) مقدار مدول تغییرشکل محدود شده مخلوط‌ها در انتهای بارگذاری (تنش عمودی ۱۰۰ کیلوپاسکال) برای درصد‌های اختلاط مختلف ارائه شده است. مشاهده می‌شود که مدول ماسه در برابر مخلوط‌های مختلف با خرده‌لاستیک به‌مراتب (حتی تا ۱۷ برابر) بزرگ‌تر است.

جدول ۳ مقدار مدول تغییرشکل محدود شده مخلوط‌ها با تراکم ۷۵٪ (مگاپاسکال)

اندازه خرده‌لاستیک	درصد خرده‌لاستیک				
	صفر	۲۰	۴۰	۷۰	۱۰۰
ریز	۱۰۲	۱۵	۱۰	۷.۳	۸.۳
متوسط		۴۲	۱۳	۹.۴	۷.۷
درشت		۴۷	۲۰	۱۲	۶



شکل ۱۵ تغییرات مدول تغییرشکل محدود شده با درصد اختلاط‌های مختلف



شکل ۱۶ تغییرات مدول تغییر شکل محدود شده با اندازه خرده لاستیک

### خلاصه و جمع بندی

در این مقاله، رفتار مکانیکی مخلوط ماسه و خرده لاستیک شامل مقاومت برشی و تغییر شکل پذیری بررسی شد، بدین صورت که یک نوع ماسه با سه اندازه مختلف خرده لاستیک در دستگاه برش مستقیم و تحت سربار مختلف بارگذاری شدند. در مرحله اول بارگذاری و قبل از اعمال برش، قابلیت تراکم پذیری نمونه‌ها مطالعه شد و سپس در مرحله اعمال برش، تغییرات پارامترهای مقاومت برشی (زاویه اصطکاک معادل) و قابلیت تغییر شکل پذیری نمونه‌ها بر اساس درصد اختلاط و اندازه دانه‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. در مرحله دوم، پارامترها بر اساس سطح‌های مختلف تغییر شکل‌ها بررسی شدند. به طور خلاصه، می‌توان به

نتایج زیر به عنوان دستاورد این پژوهش اشاره کرد:

۱. سرعت بارگذاری در دامنه مورد آزمایش در این مطالعه تأثیری بر روی رفتار مکانیکی (مقاومت برشی و تغییر حجم) نمونه‌های مخلوط نداشته است.
۲. نشست پذیری خرده لاستیک نسبت به ماسه خیلی بیشتر است (حدود ۲۰ برابر). هم چنین، اندازه خرده لاستیک در مقدار نشست پذیری نقش دارد، به طوری که با افزایش اندازه دانه‌ها، نشست نمونه‌ها کمتر شده است.

در پایان، به این نکته اشاره می‌شود که دلیل اصلی در اختلاف رفتار مکانیکی (از نظر مقاومت برشی و تغییر شکلی) مخلوط‌های ماسه و خرده لاستیک را می‌توان در تغییر بافت و ماهیت مخلوط دانست. اگر به منحنی دانه بندی هر یک از مصالح (شکل ۲) توجه شود، مشاهده می‌شود که ماسه و خرده لاستیک ریز تقریباً دانه بندی یکسانی دارند، در صورتی که دانه بندی خرده لاستیک‌های متوسط و درشت بزرگ‌تر از دانه بندی ماسه تمیز است. این بدان معنی است که در مخلوط ماسه-خرده لاستیک ریز می‌توان گفت که دانه بندی تقریباً فرقی نکرده و فقط زبری و تراکم پذیری مصالح متفاوت شده است. به عبارت دیگر، سهم دخالت هر دو ذره ماسه و خرده لاستیک با هم برابرند. در صورتی که در مخلوط‌های ماسه با خرده لاستیک‌های متوسط و درشت چنین نیست. به خاطر ریزتر بودن دانه‌های ماسه، به نظر می‌رسد که مخصوصاً در درصد‌های بیشتر خرده لاستیک، دانه‌های ماسه نقش پرکننده را دارند و خرده لاستیک‌ها رفتار غالب مخلوط‌ها را تشکیل می‌دهند. به همین دلیل، مشاهده می‌شود که تفاوت رفتاری (هم از نظر مقاومت برشی و هم از نظر تغییر شکلی) میان مخلوط‌های با خرده لاستیک متوسط و درشت کم است و در عوض، رفتار این مخلوط‌ها با نتایج رفتار مخلوط با خرده لاستیک ریز فاصله دارد.

- تغییر شکل نخواهد داشت.
۸. با افزایش درصد محتوای لاستیک، نمونه‌ها افزایش حجم کمتری از خود نشان می‌دهند و بیشتر تمایل به متراکم شدن دارند.
۹. در این مقاله، به محاسبه مدول تغییر شکل محدود شده پرداخته شد و مشاهده گردید که در میان نمونه‌های مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک، سخت‌ترین نمونه مربوط به درصد اختلاط ۲۰٪ خرده‌لاستیک است.
۱۰. رفتار تغییر شکلی (سختی) نمونه با درصد اختلاط ۳۰٪ شبیه به نمونه با ۱۰٪ خرده‌لاستیک است. در صورتی که نمونه‌های با درصد اختلاط بیشتر و یا کمتر، سختی بیشتری از خود نشان می‌دهند.
۱۱. اندازه خرده‌لاستیک‌ها در افزایش سختی نمونه‌های مخلوط با ماسه نقش مثبت دارند. اما، با افزایش سهم خرده‌لاستیک‌ها، تأثیر اندازه خرده‌لاستیک‌ها کم می‌شود، به طوری که سختی نمونه‌های با ۱۰٪ خرده‌لاستیک، باهم برابر است.
۳. نشست‌پذیری نمونه‌ها تحت بارگذاری قائم با افزایش درصد محتوای لاستیک، افزایش می‌یابد.
۴. وزن مخصوص نمونه‌ها با افزایش درصد محتوای لاستیک، کاهش می‌یابد. در حالی که با افزایش اندازه دانه‌های لاستیک‌های خرد شده و همچنین افزایش سربار، وزن مخصوص افزایش پیدا می‌کند.
۵. زاویه اصطکاک داخلی معادل، با افزایش درصد محتوای لاستیک، کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، نمونه‌های ساخته شده با خرده‌لاستیک‌های درشت‌تر، زاویه اصطکاک داخلی بیشتری را نشان می‌دهند.
۶. در بررسی زاویه اصطکاک داخلی معادل، در جابه‌جایی نه میلی‌متر از جابه‌جایی سه و شش میلی‌متر، زاویه اصطکاک داخلی بزرگ‌تری مشاهده می‌شود.
۷. با این‌که ماسه تحت برش به سرعت از خود رفتار اتساعی نشان می‌دهد، نمونه‌های حاوی فقط خرده‌لاستیک، فقط حالت تراکم‌پذیری دارند. اگر از حدی، اندازه دانه‌ها بزرگ‌تر شود، دیگر نقشی در

## مراجع

- Shulman, V.L., "Tire recycling", European Tyre Recycling Association (ETRA) 15, (2004).
- JATA, "Tyre recycling handbook", Tokyo: Japan Automobile Tire Manufacturers Association, (2007).
- Rao, G. and R.K. Dutta, "Compressibility and strength behaviour of sand-tyre chip mixtures", *Geotechnical and Geological Engineering*. Vol. 24, pp. 711-724, (2006).
- زارع، م. ز، "تحلیل استراتژیک صنعت تایر ایران"، نشریه صنعت لاستیک ایران، صص ۱۷-۵، ج. ۶۲، (۱۳۹۰).
- Khan, R.A. and A. Shalaby., "Performance of a road base constructed with shredded rubber tires", in *Proceeding of Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering*. Motreal, Quebec, Canada, (2002).
- Gotteland P., L.S., Bałachowski L., "Strength characteristics of tyre chips – sand mixtures", *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. 27(1-2), pp. 55-66, (2005).
- Bałachowski and P. L. Gotteland, "Characteristics of Tyre Chips-Sand Mixtures from Triaxial Tests", *Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*. Vol. 54(1), pp. 25-36, (2007).
- Zornberg, J.G., Y.D. Costa, and B. Vollenweider. "Mechanical performance of a prototype

- embankment backfill built with tire shreds and cohesive soil", in Proceedings of the 83<sup>rd</sup> Annual Meeting, Washigon D.C.: Transportation Research Board, (2004).
9. Lee, J.H., R. Salgado, A. Bernal., and C.W. Lovell., "Shredded tires and rubbersand as lightweight backfill", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125(2), pp. 132-141, (1999).
  10. Attom, M., F., "The Use of Shredded Waste Tires To improve The Geotechnical Engineering Properties of Sands", *Environmebtal Geology*. Vol. 49, pp. 497-503, (2005).
  11. Cabalar, A.F., "Direct Shear Tests on Waste Tires–Sand Mixtures", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 29, pp. 411-418, (2010).
  12. Humphery, D.N., Sandford, T.C., Cribbs, M. M., and Manion, W. P., "Shear Strength and Compressibility Of Tire Chips For Use As Retaining Wall Backfill", *Transportation Research Record*. Vol. 1422, pp. 29-35, (1993).
  13. Yang, S., Lohnes, R.A., and Kjartanson, B.H., "Mechanical properties of shredded tires", *Geotechnical Testing Journal*. Vol. 25(2), pp. 44-52, (2002).
  14. Ghazavi, M., "Shear Strength Characteristics Of Sand-mixed With Granular Rubber", *Geotechnical and Geological Engineering*. Vol. 22, pp. 401-416, (2004).
  15. Moo-Young, H., K. Sellasie, D. Zeroka, and S. G., "Physical and Chemical Properties of Recycled Tire Shreds for Use in Construction", *Journal of Environmental Engineering*. Vol. 129(10), pp. 921-929, (2003).
  16. Jewell, R.A. and C.P. Wroth, "Direct shear tests on reinforced sand", *Géotechnique*. Vol. 37(1), pp. 53-68, (1987).
۱۷. رضاپور، ع. "بررسی اثر اندازه خرده لاستیک بر رفتار مکانیکی مخلوط ماسه و لاستیک به کمک آزمون DST"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۹۲).