



بررسی اثر ابعاد خرده‌های لاستیک تایر فرسوده در پارامترهای مقاومت برشی خاک ماسه‌ای

سارا غفوری امیربنده، حمیدرضا صبا*، مهرداد نوکنده

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۲۷
بازنگری: ۱۳۹۵/۰۹/۲۳
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۲/۱۰

کلمات کلیدی:

خاک مسلح
بازیافت لاستیک
محیط زیست
خرده‌لاستیک
برش مستقیم بزرگ مقیاس

خلاصه: گسترش صنعت خودرو سبب شده تا لاستیک‌های فرسوده به دلیل عدم تجزیه در طبیعت به عنوان یکی از آلاینده‌های زیست‌محیطی در دهه‌های اخیر مطرح شوند. استفاده از خرده‌لاستیک به صورت مخلوط با خاک، یکی از راه‌حل‌هایی است که برای جلوگیری از مخاطرات زیست‌محیطی ناشی از دفن لاستیک‌ها ارائه شده است. با توجه به خواص لاستیک‌ها از جمله رفتار الاستیک، جذب آب ناچیز و هزینه‌ی مناسب جهت استفاده از آنها به شکل خردشده، می‌توان از آنها در تسلیح و بهبود خصوصیات مصالح خاکی استفاده نمود. در این مقاله درصد بهینه خرده‌لاستیک در ماسه بادی جهت افزایش پارامترهای مقاومت برشی آن و همچنین تاثیر افزودن خرده‌لاستیک روی منحنی نیرو-تغییر مکان با استفاده از آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس (۳۰×۳۰ cm) مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور، ماسه با مقادیر ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪ و ۲۵٪ خرده‌لاستیک به ابعاد ۲×۲ cm و ۲×۴ cm تحت تنش‌های نرمال ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ kPa مورد آزمایش برش مستقیم قرار گرفته و میزان درصد و ابعاد خرده‌لاستیک بهینه که به ازای آن مقاومت برشی حداکثر می‌باشد، تعیین شده است. از آن جایی که مقاومت برشی خاک‌ها حاصل از زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی می‌باشد، تاثیر خرده‌لاستیک روی هریک از این پارامترها نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد حالت بهینه، نمونه حاوی ۱۵٪ خرده‌لاستیک ۲×۴ cm است که زاویه اصطکاک داخلی را تا ۲۷٪ افزایش می‌دهد. همچنین اضافه کردن خرده‌لاستیک باعث افزایش ظرفیت شکل‌پذیری ماسه بادی می‌شود.

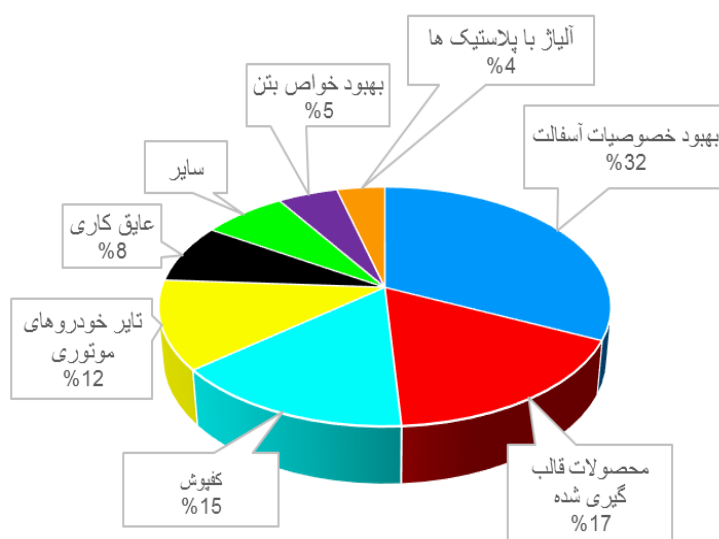
۱- مقدمه

دارد. کاربردهای مهم این مصالح در صنعت در شکل ۱ نشان داده شده است. این شکل کاربرد لاستیک‌های فرسوده خردشده را در صنعت نمایش می‌دهد که مربوط به کشور ایران است. براساس آمار سال ۲۰۰۷، در ایالات متحده آمریکا حدود ۴۵۹۵/۷ هزار تن لاستیک فرسوده و ضایعاتی تولید می‌شود که از این مقدار حدود ۵۶۰ هزار تن در پروژه‌های مهندسی عمران مورد استفاده قرار می‌گیرد. این میزان مصرف حدود ۱۲٪ از کل لاستیک‌های فرسوده و ضایعاتی تولید شده را تشکیل می‌دهد. همچنین حدود ۵۲/۸٪ به عنوان جایگزین سوخت در کوره‌ها، ۱۶/۸٪ در تولید پودرلاستیک و مابقی در مصارف گوناگون مصرف شده‌اند. و فقط ۱۲/۶٪ در سطح زمین دپو و انباشته می‌شوند. در ایران طبق آمار سال ۱۳۸۵ وزارت صنایع و معادن، سرانه لاستیک فرسوده ۶/۳ کیلوگرم به ازای هر نفر در سال می‌باشد که در شرایط ایده‌آل ۳۵/۶٪ لاستیک به روش‌های روکش مجدد، پودرلاستیک و تولید کاتوچوی اصلاح شده بازیافت شده و ۶۴/۴٪ در طبیعت دپو می‌شوند [۱]. به‌طور کلی عناصر مسلح‌کننده خاک به

توسعه شهرها و افزایش تعداد وسایل نقلیه جدید، همچنین از رده خارج کردن خودروهای فرسوده سبب شده است که لاستیک‌های فرسوده و ضایعاتی به عنوان یکی از آلاینده‌های زیست‌محیطی و بهداشتی مورد توجه محققین قرار بگیرد. استفاده از لاستیک به عنوان یکی از عناصر مهم زندگی بشر روز به روز در حال افزایش است. لاستیک‌ها از مواد پلیمری تشکیل شده‌اند که به راحتی در طبیعت تجزیه نشده و خطرات جدی را برای محیط زیست و سلامت انسان‌ها به همراه دارند. مخاطرات زیست‌محیطی و بهداشتی که در اثر انباشت لاستیک‌های فرسوده و ضایعاتی به وجود می‌آید شامل آتش‌سوزی فاجعه‌آمیز، پرورش و تکثیر حشرات و نهایتاً بروز بیماری‌های ویروسی و میکروبی می‌باشد. علاوه بر مخاطرات ذکر شده، انباشته‌های لاستیکی بر زیبایی و چشم‌انداز محیط زندگی و شهری نیز لطمه می‌زند. لاستیک‌های بازیافتی کاربردهای مختلفی در بخش‌های گوناگون

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hr.saba@tafreshu.ac.ir





شکل ۱. کاربرد لاستیک‌های فرسوده خردشده در صنعت

Fig. 1. Application of shredded worn tires in industry

ادیل و بوسچر در سال ۱۹۹۴ به ارائه خواص تراشه های لاستیک فرسوده و بهبود خواص مهندسی خاک مسلح پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد تراشه لاستیک دارای رفتار اصطکاکی است. لذا مقاومت اصطکاکی ماسه را در مخلوط افزایش می‌دهد. در سال ۲۰۰۴ ادینکلیر و همکاران یک سری آزمایش سه‌محوری تحکیم یافته زهکشی‌شده (CD) روی ماسه‌ی خالص، لاستیک خالص و ترکیب لاستیک و ماسه انجام دادند و به این نتیجه دست یافتند که با افزایش درصد وزنی خرده‌های لاستیک تا ۳۵٪، مقاومت برشی نمونه‌ها افزایش می‌یابد و سپس با افزایش درصد وزنی تکه‌های لاستیک به بیش از ۳۵٪ مقاومت برشی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. هاتف و رحیمی در سال ۲۰۰۶ مدل‌های آزمایشگاهی برای تحقیق در مورد استفاده از خرده‌های لاستیک فرسوده جهت افزایش ظرفیت باربری ارائه نمودند. نتایج آزمایش‌ها حاکی از آن بود که افزودن خرده‌های لاستیک به ماسه، باعث افزایش نسبت ظرفیت باربری کالیفرنیا از ۱۷/۱ تا ۳/۹، بسته به درصد خرده‌های لاستیک و نسبت اضلاع آنها می‌گردد. اکیبولیت و پامیوکوچو در سال ۲۰۰۶ به منظور بهبود پارامترهای دینامیکی خاک در کرنش‌های کم، بر روی مخلوط ماسه‌ی اتاوا و خرده‌های لاستیک، یک سری آزمایش‌های کنترل شده انجام دادند. نتایج تحقیقات آنها حاکی از افزایش هم‌زمان مدول برشی و ضریب میرایی نمونه‌های ماسه، به ازای یک

دو طریق در خاک قرار می‌گیرند: استفاده از تسلیح‌کننده‌های ی که به طور پیوسته در خاک قرار می‌گیرند، مثل تسلیح‌کننده‌های صفحه‌ای یا نواری که برای قرار گرفتن در خاک از قانون و قاعده خاصی پیروی می‌کنند و دیگری استفاده از تسلیح‌کننده‌های ی که به‌طور گسترده در خاک قرار می‌گیرند مثل الیاف و خرده‌های لاستیک که به‌طور تصادفی و بدون قاعده و قانون خاصی با خاک ترکیب می‌شوند. از مهم‌ترین مزایای این تسلیح‌کننده‌ها، می‌توان به حفظ همسانی مقاومت و حذف صفحات گسیختگی ضعیف اشاره نمود. از زمان ابداع و رواج خاک مسلح تاکنون استفاده از مسلح‌کننده‌های فلزی مطرح بوده است ولی این نوع مسلح‌کننده‌ها دارای یک عیب اساسی هستند و آن دوام کم آنها مخصوصاً در محیط‌های مرطوب است. بنابراین تلاش‌ها برای دستیابی به مواد و مصالحی انجام پذیرفت که علاوه بر افزایش قابل ملاحظه توان باربری، دارای دوام قابل قبولی نیز باشند. تحقیقات انجام شده منجر به بکارگیری این مواد پلیمری که مقاومت و دوام قابل قبولی دارند در خاک شد. علاوه بر این‌ها، خرده‌لاستیک در صنایعی مانند قطعه‌سازی خودرو، نفت، تولید لاستیک و تیوپ و کشتیرانی نیز مصرف می‌شود. اخیراً در مهندسی ژئوتکنیک از مخلوط مصالح حاکی و خرده‌لاستیک در خاکریزی پشت دیوارهای حائل، راهسازی در جاده‌ها، مدفن‌های بهداشتی و... استفاده می‌شود [۲].

گرانول لاستیک از ۲/۵ تا ۱۰٪، زاویه اصطکاک داخلی در محدوده ۶ الی ۱۴٪ افزایش می‌یابد، به طوری که بیشترین مقدار افزایش زاویه اصطکاک داخلی، در نمونه‌های حاوی ۵٪ گرانول لاستیک رخ می‌دهد.

در این مقاله سعی شد است تا درصد مناسب مصرف خرده‌لاستیک جهت افزایش پارمترهای مقاومت برشی خاک ماسه‌ای تعیین شود. بدین منظور آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ مقیاس (۳۰×۳۰ cm) با درصد‌های مختلف خرده‌لاستیک و همچنین خاک بدون خرده‌لاستیک انجام شده است. نتایج تاثیر درصد‌های مختلف خرده‌لاستیک در خاک ماسه‌ای روی مقاومت برشی خاک و رفتار نیرو-تغییر مکان خاک با درصد‌های مختلف خرده‌لاستیک بررسی شده است.

۲- مصالح مصرفی

۱-۲- خاک

خاک مورد استفاده در کلیه آزمایش‌ها، ماسه‌ی ساحل شهر کلاچای واقع در کرانه‌ی جنوبی دریای خزر، بوده است. با توجه به آزمایش تراکم روی نمونه ماسه‌ی مورد نظر، مقدار حداکثر وزن مخصوص خشک خاک برابر $16/4 \text{ kN} / \text{m}^3$ و حداقل وزن مخصوص خشک $14/8 \text{ kN} / \text{m}^3$ اندازه‌گیری شده است. همچنین توده‌ی ویژه‌ی خاک نیز برابر $G_s = 2/65$ محاسبه گردیده است. توزیع اندازه‌ی ذرات ماسه توسط آزمایش دانه‌بندی مطابق شکل ۲ می‌باشد. این منحنی نشان می‌دهد که ماسه‌ی مورد نظر تقریباً یکنواخت بوده و با اندازه‌ی ذرات بین ۰/۰۶ تا ۰/۴۲ mm می‌باشد. مطابق سیستم طبقه‌بندی یکنواخت (ASTM D 2487-11)، خاک مورد آزمایش به صورت ماسه با دانه‌بندی بد (SP) طبقه بندی می‌گردد.

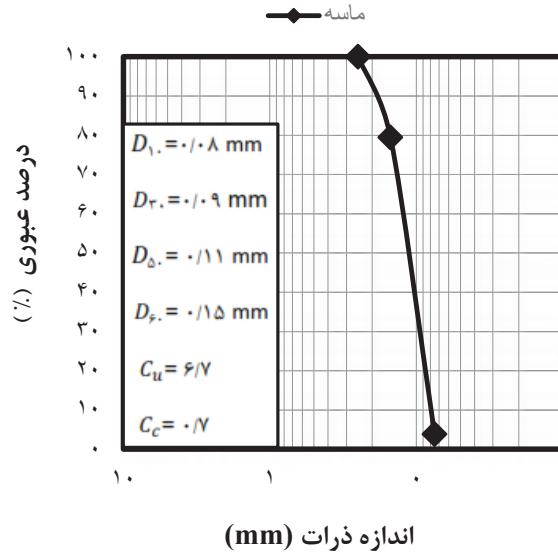
۲-۲- مسلح کننده (خرده‌لاستیک)

در اروپا لغات و اصطلاحات فنی متفاوتی برای تعریف حلقه لاستیک فرسوده، پودرلاستیک، گرانول و غیره بکار می‌رود (شکل ۳). در جدول ۱ اصطلاحات استاندارد اروپا ETRA برای محصولات حاصل از خرد کردن حلقه لاستیک ارائه گردیده است [۱۹].

لاستیک مورد استفاده در این تحقیق، از دسته سوم، یعنی خرده‌لاستیک و دارای محدوده ابعاد ۵۰-۱۰ mm بوده است. قطعات خرده‌لاستیک در دو اندازه (۲×۲ cm) و (۲×۴ cm) انتخاب شده اند که توسط قیچی برش زده شده است و دارای چگالی دانه‌های جامد ۱/۲۵ می‌باشند. بر طبق استانداردهای بین‌المللی اندازه‌المان‌ها نباید از یک سوم کوچکترین بعد

حجم بهینه از خرده‌های لاستیک بود. هایدو و همکارانش در سال ۲۰۰۷، بر اساس تست‌های سه‌محوری سیکلی زهکشی نشده، و یوچیمورا و هازریکا بر اساس آزمایش‌های میز لرزه، افزایش کندتر فشار آب منفذی و یک افزایش چشمگیر مقاومت در برابر روانگرایی مخلوط خاک-لاستیک را با افزایش مقدار لاستیک، گزارش کردند. ادینکلیر و همکاران در سال ۲۰۱۰ یک سری آزمایش سه‌محوری تحکیم یافته‌ی زهکشی شده روی ترکیب درصد‌های مختلف تکه‌های لاستیک با ماسه انجام دادند و به این نتیجه دست یافتند که افزایش خرده‌های لاستیک به ماسه باعث بهبود رفتار زهکشی شده نمونه‌ها می‌شود. آهان و همکاران در سال ۲۰۱۱ تعدادی آزمایش سه‌محوری تحکیم یافته زهکشی‌شده، تراکم و نفوذپذیری روی مخلوط ماسه و خرده‌های لاستیک انجام دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مخلوط‌های خاک و لاستیک، پتانسیل بالایی برای استفاده به‌عنوان مصالح دانه‌ای سبک‌وزن در کارهای عمرانی دارند. آناستاسیدس و همکاران و آناستیسو در سال ۲۰۱۲ تحقیقاتی روی مخلوط ماسه رودخانه‌ای-لاستیک بازیافتی، توسط دستگاه ستون تشدید پیچشی با دامنه بالا، به دو صورت خشک و اشباع انجام دادند. نتایج نشان می‌داد با افزایش مقدار لاستیک، اضافه فشار آب منفذی در همان دامنه کرنش حجمی و مدول برشی کاهش می‌یابد و ضریب میرایی و کرنش حجمی افزایش می‌یابد.

مهران نیا و همکارانش در سال ۱۳۸۵ آزمایش‌های برش مستقیم را روی ماسه مخلوط با خرده لاستیک و پودرلاستیک انجام دادند که نشان می‌داد با افزودن خرده‌لاستیک، مقاومت برشی ماسه افزایش می‌یابد ولی با افزودن پودرلاستیک مقاومت برشی کاهش پیدا می‌کند. منافی در سال ۱۳۹۰ تعدادی آزمایش توسط دستگاه میز لرزان بر روی نمونه‌های مخلوط ماسه و تکه‌های لاستیک انجام داد که نشان می‌داد تکه‌های لاستیک سبب بهبود خواص دینامیکی ماسه و کاهش پتانسیل روانگرایی آن می‌شود. محمدی و بهادری در سال ۱۳۹۱ جهت بررسی تاثیر افزودن پودرلاستیک بر رفتار ماسه اشباع، آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی نشده مونوتونیک روی مخلوط با مقادیر مختلف لاستیک انجام دادند و نتیجه گرفتند افزودن پودرلاستیک به ماسه باعث افزایش تولید فشار منفذی در شرایط زهکشی نشده و انتقال رفتار ماسه از حالت سخت شونده به حالت نرم شونده می‌گردد. صبا و همکاران ۱۳۹۵ با استفاده از آزمایش برش مستقیم، تفاوت مقاومت برشی ماسه خالص و ماسه مسلح شده با گرانول لاستیک فرسوده با درصد‌های وزنی ۰٪، ۲/۵٪، ۵٪، ۷/۵٪ و ۱۰٪ گرانول تحت سه تنش نرمال ۳۰، ۶۰ و kPa را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد وزنی



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی خاک مورد آزمایش

Fig. 2. Granulation curve of the tested soil

جدول ۱. ابعاد مختلف لاستیک بر طبق استاندارد اروپا (ETRA)

Table 1. Different dimensions of tires according to the European standard (ETRA)

ردیف	نام	حداقل ابعاد (mm)	حداکثر ابعاد (mm)
۱	پودر	۰	۱
۲	گرانول	۱	۱۰
۳	خرده	۱۰	۵۰
۴	تراشه (کوچک)	۴۰	۷۵
۵	تراشه (بزرگ)	۷۵	۳۰۰



شکل ۳. لاستیک در ابعاد مختلف براساس استاندارد اروپا (ETRA)

Fig. 3. Tires in different dimensions according to the European standard (ETRA)



شکل ۴. تصویری از ماسه و خرده لاستیک ۲×۲ و ۲×۴ cm

Fig. 4. Image of sand and crumbed tires (2 × 2) and (2 × 4) cm

۴- نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها

شرایط و خواص مصالح بدست آمده از خرده لاستیک به گونه‌ای است که نمی‌توان آنها را با دستگاه برش مستقیم معمولی آزمایش کرد. دستگاه برش مستقیم ۳۰×۳۰ cm این مزیت را دارد که می‌توان مواد با دانه‌بندی بزرگ‌تر را آزمایش کرد.

طبق نکته ۴ در ASTM D 3080، تذکر داده شده است که اگر دانه‌های بزرگ‌تر از حد استاندارد با توجه به ابعاد جعبه برش در نمونه وجود داشت باید طبق روش ASTM D 422، روی نمونه دانه‌بندی انجام شود. تا آنچه بصری دیده شده است تایید گردد و نتایج این تحلیل همراه نتیجه آزمایش برش ارائه گردد. این نکته برای این است که طراح بتواند مقاومت برشی بدست آمده را به همراه دانه‌بندی ملاحظه کرده و نتیجه‌گیری کند که آیا این مقاومت بدست آمده، مقاومت برشی خود مخلوط است یا مقاومت برشی دانه‌ها و اینکه چه مقدار باید در مقادیر مقاومت برشی، اصلاح اعمال گردد. در ادامه مقاله نیز این نکته رعایت شده است.

ساخت نمونه برای یک پژوهش آزمایشگاهی، موضوع بسیار مهمی است. فوس در سال ۱۹۹۳ پیشنهاد کرد که برای سهولت در ساخت نمونه‌ها در آزمایشگاه از مقیاس وزنی طبق روش گفته شده در استاندارد ASTM D854، استفاده گردد. در ارتباط با تشریح فرآیند اختلاط مصالح برای تهیه نمونه باید عنوان کرد هرچند با استناد به مقاله ی هاتف و رحیمی -۲۰۰۶ که در منابع نیز به آن اشاره شده است، توزیع مصالح را تصادفی منظور نموده‌اند

دستگاه بزرگ‌تر شود، به عبارت دیگر در این مدل می‌بایست حداکثر بعد قطعات کوچک‌تر از ثلث بعد دستگاه آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس (حدود ۵ cm) در نظر گرفته شود ASTM D 3080، توزیع اندازه ذرات خاک توسط آزمایش دانه‌بندی مطابق شکل ۲ و تصویر خاک و خرده‌های لاستیک مورد استفاده در آزمایش مطابق شکل ۴ می‌باشد.

۳- آزمایش تراکم

مطابق با استاندارد ASTM D4253 برای انجام آزمایش تراکم خاک‌های غیرچسبیده لزوماً می‌بایست از دستگاه میز لرزان استفاده کرد، و آزمایش کوبش برای این نوع خاک‌ها مناسب نیست. به همین دلیل در این پژوهش آزمایش تراکم بوسیله دستگاه میز لرزان انجام شد.

با افزودن خرده لاستیک ۲×۲ و ۲×۴ cm به ماسه، وزن مخصوص خشک حداقل و حداکثر، کاهش می‌یابد. بیشترین میزان کاهش در ۲۵٪ وزنی خرده لاستیک ۲×۲ و ۲×۴ cm و به ترتیب برابر با ۱۳٪ و ۱۰٪ برای وزن مخصوص خشک حداقل و ۱۲٪ و ۱۱٪ برای وزن مخصوص خشک حداکثر می‌باشد. علت رخداد این پدیده کمتر بودن وزن مخصوص خرده لاستیک در مقایسه با ماسه می‌باشد. همچنین به علت بیشتر بودن سطح مخصوص خرده لاستیک ۲×۲ نسبت به خرده لاستیک ۲×۴ cm، وزن مخصوص نمونه‌های شامل خرده لاستیک ۲×۲ cm به میزان بیشتری کاهش می‌یابد.

جدول ۲. وزن مخصوص خشک حداکثر و حداقل مخلوط‌های ماسه-خرده‌لاستیک (۲×۲)

Table 2. Maximum and minimum dry weight of sand-crumbed rubber mixtures (2×2)

خرده‌لاستیک ۲×۲ (%)	وزن مخصوص خشک حداقل (kN/m^3)	وزن مخصوص خشک حداکثر (kN/m^3)
۰	۱۳/۸	۱۶/۴
۵	۱۳/۲	۱۵/۸
۱۰	۱۲/۹	۱۵/۴
۱۵	۱۲/۷	۱۵/۲
۲۰	۱۲/۵	۱۵
۲۵	۱۲/۲	۱۴/۷

و خرده‌لاستیک مصرفی در هر نمونه بسته به درصد خرده‌لاستیک با استفاده از سعی و خطا محاسبه گردید. اطلاعات مربوط به وزن مخصوص خشک حداکثر و وزن مخصوص خشک حداقل مخلوط‌های با خرده‌لاستیک ۲×۲ و خرده‌لاستیک ۲×۴ cm به ترتیب در جدول ۲ و ۳ آمده است.

$$D_r = \frac{\frac{1}{\gamma_{d_{min}}} - \frac{1}{\gamma_d}}{\frac{1}{\gamma_{d_{min}}} - \frac{1}{\gamma_{d_{max}}}} \quad (1)$$

$$\gamma_{dry} = \frac{W_t}{V_t} = \frac{W_s + W_c}{V_t} \quad (2)$$

در این روابط :

D_r : تراکم نسبی

$\gamma_{d_{min}}$: وزن مخصوص خشک حداقل (کیلو نیوتن بر متر مکعب)

$\gamma_{d_{max}}$: وزن مخصوص خشک حداکثر (کیلو نیوتن بر متر مکعب) : وزن

مخصوص خشک (کیلو نیوتن بر متر مکعب)

V_t : حجم کل نمونه (متر مکعب)

لیکن جهت ایجاد شرایط یکنواختی و همگنی تلاش گردید طرح اختلاط به گونه‌ای هدایت شود که توزیع یکنواخت افزودنی‌های به خاک رعایت گردد به منظور حصول اطمینان بعضی از نمونه‌ها میزان توزیع یکنواخت در اجسام قبل از انجام آزمایش کنترل گردید. این آزمایش‌ها به صورت خشک در تراکم نسبی ۷۰٪ انجام شد. استفاده از تراکم نسبی در درصد‌های بالاتر از این مقدار، به دلیل عدم امکان تراکم ماسه تنها و در درصد‌های تراکم پایین‌تر از این مقدار، به دلیل مشکل بودن آماده‌سازی نمونه‌های حاوی خرده‌لاستیک امکان‌پذیر نبود. در این آزمایش ابتدا خرده‌های لاستیک را به نسبت مشخص وزن کرده و سپس با توجه به نوع آزمایش، آنها را با درصد‌های وزنی مشخص، در سه قسمت مساوی با خاک مخلوط می‌کنیم. سپس هر قسمت را به‌طور جداگانه داخل قالب دستگاه برش مستقیم می‌ریزیم و آن را در وزن مخصوص مشخص متراکم می‌کنیم تا حجم قالب را پر کنند. برای تراکم نمونه‌ها از چکش فلزی مربع شکل با سطح مقطع کوبش 100 cm^2 استفاده شد. در ابتدا برای بدست آوردن نمونه‌های ماسه-خرده‌لاستیک با تراکم نسبی ۷۰٪، به دلیل اینکه هر مخلوط، وزن مخصوص خشک حداکثر و حداقل مربوط به خود را دارد، لذا وزن مخصوص خشک حداکثر و حداقل مربوط به هر نمونه جداگانه اندازه‌گیری و سپس با استفاده از رابطه (۱) وزن مخصوص خشک مخلوط (γ_d) محاسبه گردید و در انتها با استفاده از رابطه (۲) و با توجه به حجم قالب و صفر فرض کردن رطوبت نمونه‌ها، وزن خاک

جدول ۳. وزن مخصوص خشک حداکثر و حداقل مخلوط‌های ماسه-خرده‌لاستیک ۲×۴

Table 3. Maximum and minimum dry weight of sand-crumbed rubber mixtures (2 × 4)

خرده‌لاستیک ۲×۴ (%)	وزن مخصوص خشک حداقل (kN/m^3)	وزن مخصوص خشک حداکثر (kN/m^3)
۰	۱۳/۸	۱۶/۴
۵	۱۳/۵	۱۶
۱۰	۱۳/۳	۱۵/۶
۱۵	۱۳/۱	۱۵/۳
۲۰	۱۲/۹	۱۵/۱
۲۵	۱۲/۶	۱۴/۸

ساخته شده است که ۱۲ نمونه مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است. شکل ۵ نتایج آزمایش‌های برش مستقیم تکراری را به صورت تغییرات تنش‌برشی در مقابل جابجایی افقی برای مخلوط دارای ۱۵٪ وزنی خرده‌لاستیک یک در دو اندازه ۲×۲ cm و ۲×۴ cm تحت سربار ۶۰ kPa ارائه می‌نماید. این شکل‌ها نشان می‌دهند که اختلاف نتایج حاصل از دو آزمایش در شرایط کاملاً یکسان حداکثر ۲/۶٪ است، که این اختلاف در محدوده‌ی مطالعات ژئوتکنیکی مورد قبول می‌باشد. این امر بیانگر دقت مناسب در آماده‌سازی نمونه‌ها، اندازه مناسب خرده‌های لاستیک، انجام صحیح روند آزمایش‌ها و دقت در اندازه‌گیری‌هاست.

آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه ماسه و ماسه مسلح شده با خرده لاستیک ۲×۲ cm و ۲×۴ cm در درصدهای وزنی مختلف انجام گرفته است. نمودار تنش‌برشی برحسب تنش قائم در شکل ۶ ارائه شده است.

این شکل نمودار پوش حاصل از منحنی حداکثر تنش‌برشی براساس تنش قائم است، که از آزمایش برش مستقیم بدست آمده است. نمونه‌ها تحت سربارهای ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ kPa قرار گرفته‌اند و میزان حداکثر تنش‌برشی برای هر سربار قرائت شده است.

همانطور که از جدول ۴ مشاهده می‌شود در تنش‌های قائم مختلف، با افزایش درصد وزنی خرده‌های لاستیک به مخلوط، مقدار تنش‌برشی افزایش خواهد یافت. طبق مشاهدات انجام شده با اضافه کردن خرده‌لاستیک ۲×۲

W_t : وزن کل نمونه (کیلو نیوتن)

W_s : وزن ماسه (کیلو نیوتن)

و W_c : وزن خرده لاستیک (کیلو نیوتن) می‌باشد.

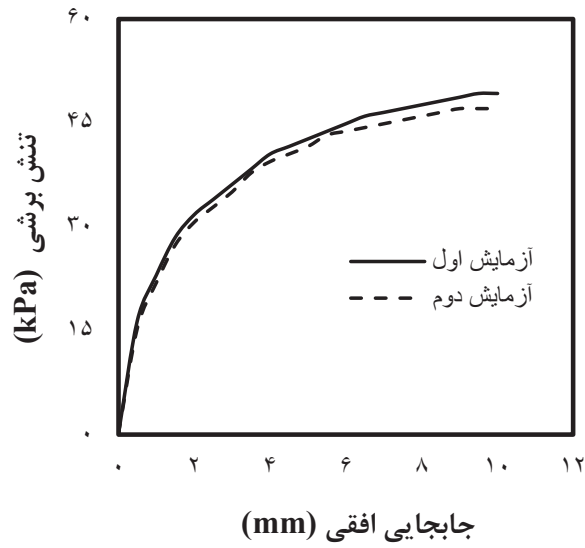
۵- آزمایش برش مستقیم

برای بررسی اثر خرده‌های لاستیک فرسوده بر روی خاک ماسه‌ای غیرچسبنده، آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس در جعبه‌ای به ابعاد ۳۰×۳۰×۱۵ cm و ارتفاع ۱۵ cm تحت تنش‌های ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ kPa بر روی ماسه غیرمسلح و همچنین مسلح شده با خرده‌لاستیک فرسوده در مقادیر وزنی ۰٪، ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪ و ۲۵٪ با نرخ اعمال بار 2 mm/min مطابق استاندارد ASTM D3080، انجام پذیرفت.

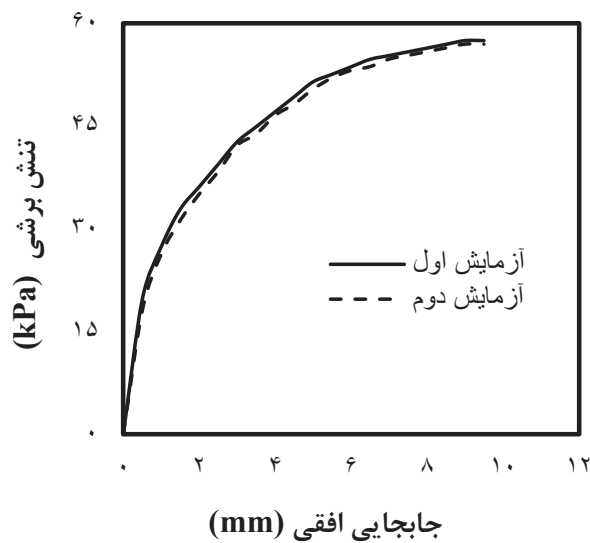
۶- نتایج

۶-۱- تکرارپذیری نتایج

از جمله مسائل مهم در مطالعات آزمایشگاهی، کنترل تکرارپذیری نتایج به‌منظور حصول اطمینان از عملکرد سیستم آزمایش، اندازه‌گیری مقادیر پارامترهای ورودی و خروجی و دقت در آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش می‌باشد. از این‌رو تعدادی آزمایش جهت کنترل صحت آزمایش‌ها و تکرارپذیری آنها صورت گرفته است. در این آزمایش‌ها، تعداد ۳۳ نمونه



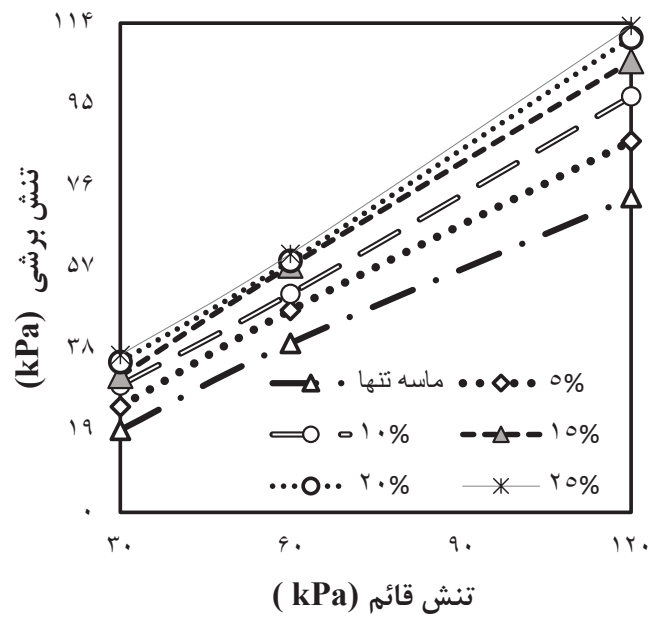
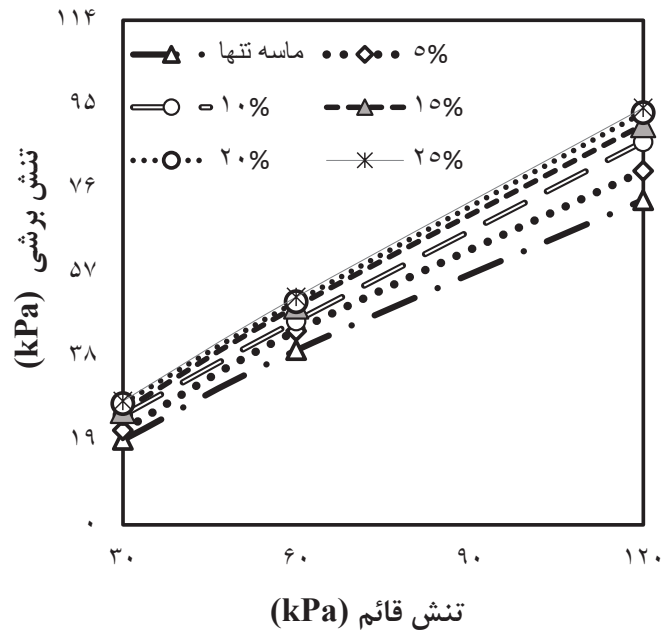
الف: خرده لاستیک ۲×۲



ب: خرده لاستیک ۲×۴

شکل ۵. تکرارپذیری تغییرات تنش برشی-جابجایی افقی نمونه مسلح به ۱۵٪ خرده لاستیک تحت سربار ۶۰ kPa (الف) خرده لاستیک ۲×۲ (ب) خرده لاستیک ۲×۴

Fig. 5. Reproducibility of changes in shear stress-horizontal displacement of the sample reinforced with 15% crumbed tires under 60 kPa force a) crumbed tires (2 × 2) - b) crumbed tires (2 × 4)



شکل ۶. نمودار تنش برشی حداکثر بر حسب تنش قائم

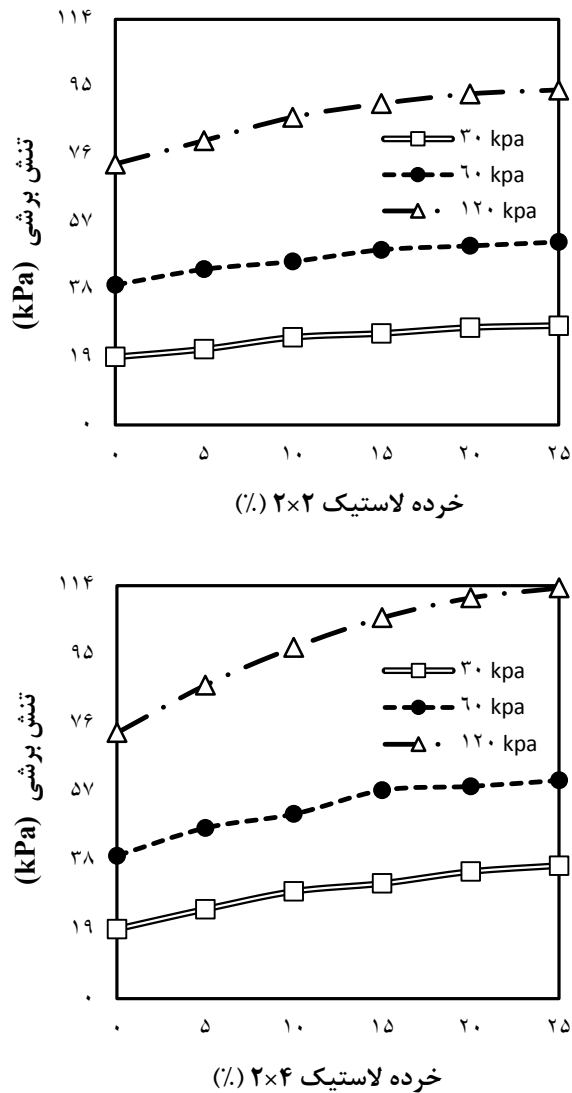
Fig. 6. Diagram of maximum shear stress relative to vertical stress

جدول ۲. وزن مخصوص خشک حداکثر و حداقل مخلوط‌های ماسه-خرده لاستیک (۲×۲)

Table 2. Maximum and minimum dry weight of sand-crumbed rubber mixtures (2×2)

(a) crumbed tires (2× 2)			
نسبت تغییرات تنش برشی در تنش قائم مختلف			
۱۲۰ kPa	۶۰ kPa	۳۰ kPa	خرده لاستیک (%)
۱	۱	۱	۰
۱/۰۹	۱/۱۱	۱/۱۱	۵
۱/۱۸	۱/۱۷	۱/۲۹	۱۰
۱/۲۳	۱/۲۵	۱/۳۴	۱۵
۱/۲۷	۱/۲۸	۱/۴۳	۲۰
۱/۲۸	۱/۳۱	۱/۴۶	۲۵

(b) crumbed tires (2× 4)			
نسبت تغییرات تنش برشی در تنش قائم مختلف			
۱۲۰ kPa	۶۰ kPa	۳۰ kPa	خرده لاستیک (%)
۱	۱	۱	۰
۱/۱۸	۱/۱۹	۱/۲۹	۵
۱/۳۲	۱/۲۹	۱/۵۴	۱۰
۱/۴۳	۱/۴۶	۱/۶۶	۱۵
۱/۵۱	۱/۴۹	۱/۸۳	۲۰
۱/۵۵	۱/۵۳	۱/۹۱	۲۵

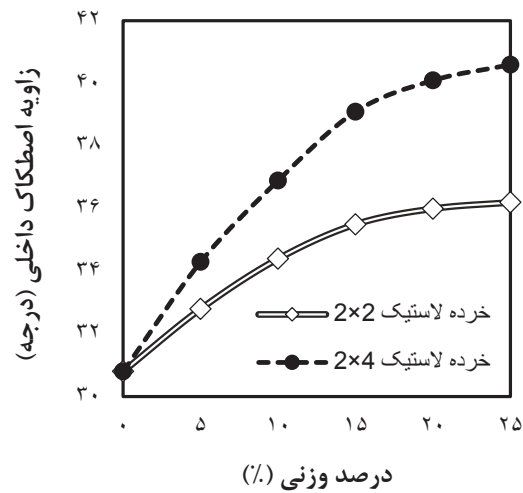


شکل ۷. تنش برشی حداکثر مربوط به نمونه های با درصد های وزنی مختلف تسلیح کننده

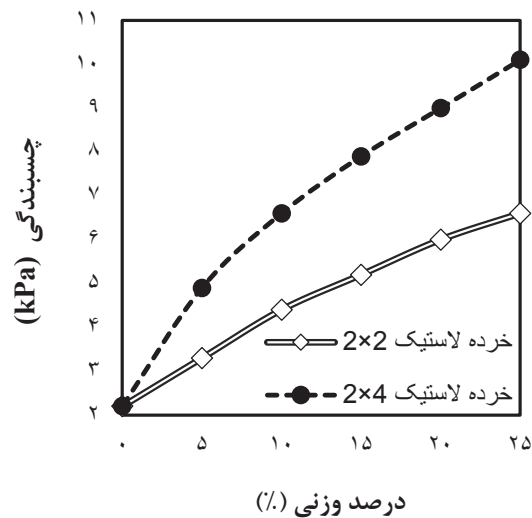
Fig. 7. Maximum shear stress related to samples with different weight percentages of reinforcement

شکل ۷ مقادیر تنش برشی حداکثر مربوط به نمونه های با درصد های وزنی مختلف تسلیح کننده را نشان می دهد. مطابق با این نمودارها، با افزایش درصد وزنی خرده لاستیک، تنش برشی افزایش می یابد، علت این افزایش حضور قطعات لاستیک در مرز برش می باشد. نرخ افزایش تنش برشی برای مخلوط های ماسه و خرده لاستیک ۲×۴ cm بسیار بیشتر از خرده لاستیک ۲×۲ cm می باشد، به دلیل ابعاد بزرگتر خرده لاستیک های ۲×۴ cm پدیده اتفاق می افتد، اول اینکه ابعاد بزرگتر خرده لاستیک منجر به احتمال

به ماسه، تنش برشی مخلوط در نمونه تحت تنش قائم ۳۰ kPa تا ۴۵/۷٪، تحت تنش قائم ۶۰ kPa تا ۳۰/۶٪ و تحت تنش قائم ۱۲۰ kPa تا ۲۸/۴٪ افزایش می یابد. همچنین با اضافه کردن خرده لاستیک ۲×۴ به ماسه، تنش برشی مخلوط در نمونه تحت تنش قائم ۳۰ kPa تا ۹۱/۴٪، تحت تنش قائم ۶۰ kPa تا ۵۲/۸٪ و تحت تنش قائم ۱۲۰ kPa تا ۵۴/۵٪ افزایش می یابد علت افزایش تنش برشی، حضور لاستیک در مخلوط و ایجاد خاصیت اصطکاکی بین دانه ها است.



الف: زاویه اصطکاک داخلی



ب: چسبندگی

شکل ۸. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی مخلوط ماسه-خرده لاستیک بر اساس درصدهای وزنی مختلف

Fig. 8. Variations of the angle of internal friction and adhesion of sand-crumbed rubber mixture based on different weight percentages

می‌گردد. علت این امر، اصطکاک بیشتر بین ذرات خاک و خرده لاستیک در سربارهای بیشتر است و در نتیجه در سطح برش، لاستیک توانایی تحمل نیروی بیشتری دارد.

بررسی نمودارهای شکل ۸ نشان می‌دهد که مقدار افزایش مقاومت برای خرده‌های ۲×۲ کمتر از ۲×۴ می‌باشد که می‌تواند ناشی از عدم بسیج مقاومت خرده‌های ۲×۲ در سطح برش باشد. در واقع خرده‌های ۲×۲

بیشتر حضور لاستیک با مقاومت کششی بالا در سطح برش می‌گردد، دوم اینکه بیشتر بودن ابعاد خرده لاستیک ۲×۴ در مقایسه با خرده لاستیک ۲×۲، طول موثر گیرداری لاستیک‌ها را در سطح برش افزایش می‌دهد که منجر به نیروی بیشتری برای بیرون کشیدگی آنها می‌شود.

نکته قابل ذکر دیگر نرخ افزایش مقاومت می‌باشد که در مخلوط ماسه-خرده لاستیک با افزایش تنش قائم، نرخ افزایش مقاومت نیز بیشتر

جدول ۵. میزان تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مخلوط ماسه با درصدهای مختلف خرده لاستیک

Table 5. The amount of changes in adhesion and internal friction angle of sand mixture with different percentages of crumbed rubber

الف: خرده لاستیک ۲×۲
(a) crumbed tires (2×2)

میزان تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مخلوط ماسه با درصدهای مختلف خرده لاستیک ۲×۲

خرده لاستیک (%)	چسبندگی (ضریب)	زاویه اصطکاک داخلی (%)
۵	۱/۵	۷
۱۰	۲	۱۲
۱۵	۲/۴	۱۵
۲۰	۲/۷	۱۷
۲۵	۳	۱۸

ب: خرده لاستیک ۲×۴
(b) crumbed tires (2×4)

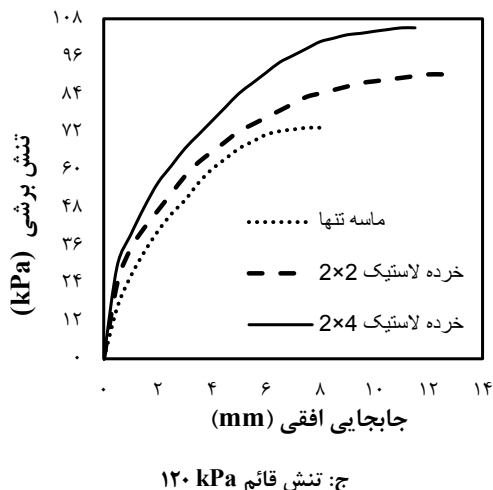
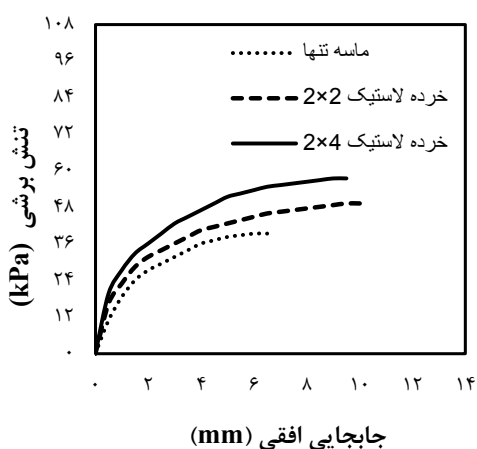
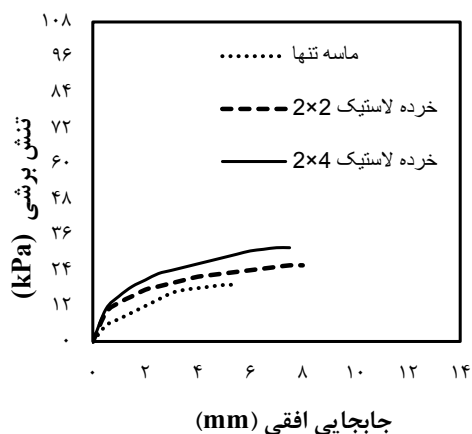
میزان تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مخلوط ماسه با درصدهای مختلف خرده لاستیک ۲×۴

خرده لاستیک (%)	چسبندگی (ضریب)	زاویه اصطکاک داخلی (%)
۵	۲/۲	۱۱
۱۰	۳	۲۰
۱۵	۳/۶	۲۷
۲۰	۴/۱	۳۰
۲۵	۴/۶	۳۲

نتایج بیانگر آن است که با افزایش درصد وزنی خرده لاستیک، چسبندگی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. به نحوی که با افزایش ۲۵٪ وزنی خرده لاستیک ۲×۲ و ۲×۴ cm به ماسه خالص، چسبندگی به بیشترین مقدار خود می‌رسد. همچنین زاویه اصطکاک داخلی نیز با افزایش درصد وزنی خرده لاستیک، افزایش می‌یابد. ابتدا زاویه اصطکاک داخلی ۳۰/۸° می‌باشد با افزودن خرده لاستیک به ماسه، زاویه اصطکاک داخلی افزایش می‌یابد. در

۲×۲ موجود در سطح برش نمی‌توانند مقاومت خود را به دلیل طول گیرداری کم بسیج کنند و رفتار مشابه خاک دانه‌ای دارد. اما خرده‌های ۲×۴ cm با طول زیاد، هم احتمال حضور بیشتری در سطح برش و هم طول گیرداری بیشتری دارند.

میزان چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مخلوط ماسه و درصدهای مختلف خرده لاستیک در شکل ۸ و جدول ۵ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۹. نمودار تنش برشی-جابجایی افقی در ۱۵٪ وزنی لاستیک تحت سربار ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ kPa

Fig. 9. Diagram of shear stress-horizontal displacement in 15% by weight of crumbed rubber with the effect of 30, 60 and 120 kPa forces

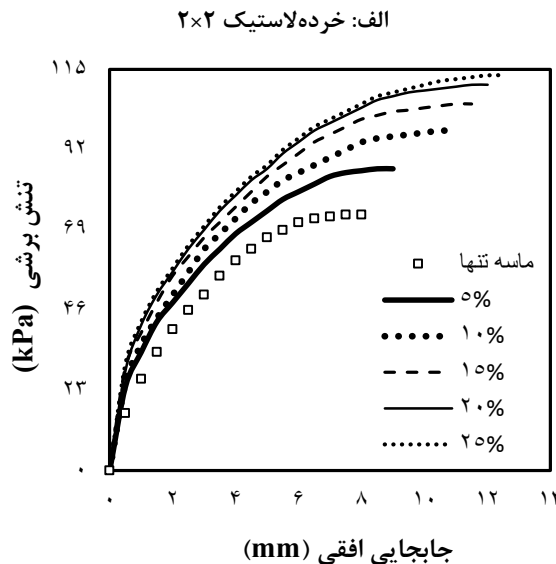
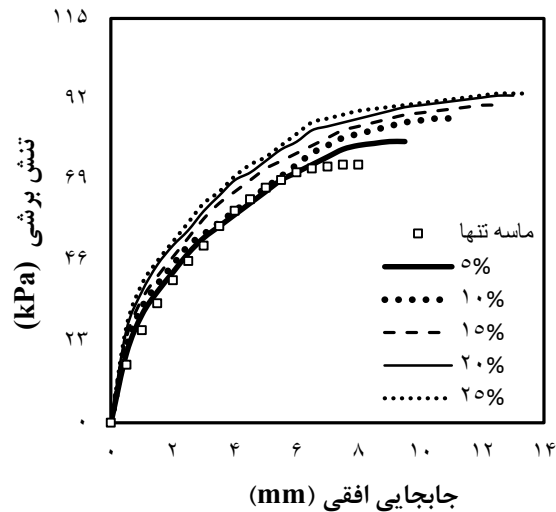
هر دو مخلوط ماسه-خرده لاستیک ۲×۲ و ماسه-خرده لاستیک ۲×۴، تا ۱۵٪ وزنی مسلح کننده، افزایش زاویه اصطکاک داخلی مشهود است اما بعد از آن تا ۲۵٪ وزنی، روند افزایش، کاهش می یابد. لذا بهینه ترین حالت برای زاویه اصطکاک داخلی در این تحقیق، ۱۵٪ وزنی مسلح کننده می باشد. از آنجایی که نمودار نیرو-تغییر مکان در خاک کمیت های مهمی از جمله سختی و ظرفیت نهایی تغییر شکل را تعیین می کند، منحنی تنش برشی-تغییر مکان افقی نمونه ها با درصد های مختلف مسلح کننده در شکل ۹ نشان داده شده است. جهت مقایسه نمودارها با یکدیگر، نمودار تنش برشی-جابجایی افقی کلیه درصد های مسلح کننده در فشار قائم ۱۲۰ kPa در شکل ۱۰ آورده شده اند.

نتایج نشان می دهد تنش برشی مخلوط با خرده لاستیک های ۲×۴ همواره بیشتر از مخلوط با خرده لاستیک های ۲×۲ است. علاوه بر این، در سربار ثابت با افزایش درصد وزنی خرده لاستیک مقدار تنش برشی و نرخ افزایش تنش برشی، افزایش می یابد. همانطور که در شکل ۱۰ نمایش داده شده است، با افزودن خرده لاستیک به خاک، خاصیت شکنندگی آن کاهش یافته و خاک حالت نرم تری به خود می گیرد. این فرآیند باعث افزایش شکل پذیری خاک می گردد.

۷- نتیجه گیری

در این تحقیق ملاک، انتخاب درصد و ابعاد مناسب خرده لاستیک به منظور دستیابی به مناسب ترین مقاومت برشی بوده است. از آن جایی که مقاومت برشی مخلوط وابسته به پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی است، به همین دلیل هدف این تحقیق، بررسی این پارامترها بوده است. همچنین به دلیل نوع خاک مورد آزمایش (ماسه) و از آن جایی که در خاک های ماسه ای زاویه اصطکاک داخلی از اهمیت بالاتری نسبت به چسبندگی برخوردار است، معیار اصلی برای بیان درصد مناسب خرده لاستیک، زاویه اصطکاک داخلی مخلوط خواهد بود. زاویه اصطکاک داخلی برای نمونه هایی با خرده لاستیک ۲×۴ بیشتر از نمونه هایی با خرده لاستیک ۲×۲ می باشد. علت افزایش بیشتر زاویه اصطکاک داخلی برای خرده لاستیک با ابعاد ۲×۴ نیز طول موثر بیشتر همراه با احتمال حضور بیشتر در سطح شکست می باشد.

۱- با افزایش درصد وزنی خرده لاستیک از ۵ الی ۲۵٪ زاویه اصطکاک داخلی در نمونه با خرده لاستیک ۲×۲ و ۲×۴ به ترتیب در محدوده ۶/۵٪ تا ۱۷/۵٪ و ۱۱/۴٪ تا ۳۱/۸٪ افزایش می یابد، بطوری که بیشترین



شکل ۱۰. نمودار تنش برشی-جابجایی افقی در سربار ۱۲۰ kPa در درصدهای وزنی مختلف خرده لاستیک ۲×۲ cm و ۲×۴ cm

Fig. 10. Shear stress-horizontal displacement diagram due to the force of 120 kPa in different weight percentages of crumbed rubber (2 × 2) and (2 × 4)cm

۳- حالت بهینه، نمونه حاوی ۱۵٪ خرده لاستیک ۲×۴ cm است که زاویه اصطکاک داخلی را تا ۲۷٪ افزایش می‌دهد.

۴- وجه تمایز این مقاله با سایر مقالاتی که درباره‌ی خرده لاستیک ارائه شده است، تفاوت ابعاد خرده لاستیک مصرفی می باشد که در این مقاله هدف مقایسه اثر خرده لاستیک در دو اندازه ۲×۲ cm و ۲×۴ cm در خاک ماسه سواحل خزر بوده است.

مقدار افزایش زاویه اصطکاک داخلی، در نمونه‌های حاوی ۲۵٪ خرده لاستیک مشاهده گردیده است. همچنین چسبندگی نیز از ۲/۲ kPa به ترتیب به ۶/۶ kPa و ۱۰/۱ kPa افزایش می‌یابد.

۲- با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت برشی خاک‌های ماسه با افزایش درصد وزنی خرده لاستیک و افزایش تنش نرمال رابطه مستقیم دارد.

منابع

- the International Workshop on Scrap Tire Derived Geomaterials—Opportunities and Challenges, H. Hazarika and K. Yasuhara, Eds., pp. 215–222.
- [10] Edinçliler A., Cabalar AF., Cagatay A., Cevik A., 2010. “Triaxial Compression Behavior of sand and Tire Waste using Neural Networks “ Neural Computer and application Journal. DOI10. 1007/s00521-010-0430-4.
- [11] Shahin A. M., Mardesic T., Nikraz H. R., 2011. “Geotechnical Characteristics of Bauxite Residue Sand Mixed With Crumbed Rubber From Recycled Car Tires” Journal of Geo-Engineering. Vol. 6. No. 1. pp. 63-27.
- [12] Anastasiadis A, Senetakis K, Pitilakis K, Gargala C, Karakasi I., 2012. “Dynamic behavior of sand/rubber mixtures, Part I: Effect of rubber content and duration of confinement on small-strain shear modulus and damping ratio “ J ASTM Int 9(2).
- [13] Anastasiadis A, Senetakis K, Pitilakis K, Gargala C, Karakasi I., 2012. “Dynamic behavior of sand/rubber mixtures, Part II: Effect of Rubber Content on G/GO-c-DT Curves and Volumetric Threshold Strain” J ASTM Int 9(2).
- [۱۴] مهران نیا، نیما. کوشا، بهروز. وفائیان، محمود. ۱۳۸۵. " بررسی رفتار مقاومتی و نفوذپذیری مخلوط ماسه با ذرات لاستیک"، هفتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، اردیبهشت، تهران.
- [15] Manafi S., 1390” The effect of fiber reinforcement and pieces of rubber the dynamic properties of the soil and reduce the effects of liquefaction With shaking table “,Master of Science, Urmia University, Department of Civil Engineering. (in persian).
- [16] Bahadori H., Mohammadi A.R., 1391. “The effect of adding rubber powder on undrained behavior of saturated sand using Triaxial “, the second conference of crisis management in the construction industry, vital arteries and underground structures. (in persian)
- [17] Saba H.R., Nokandeh M., gafuri amirbande S., 2016. “ Experimental Investigation improved geotechnical properties of mixed sand- rubber granule” Second International Conference on Advances in construction management, architecture and urban management,
- [۱] صمدیان، ف وزارت صنایع و معادن، معاونت امور تولید دفتر صنایع غیر فلزی “ گزارش بازیافت لاستیک ” مرداد ۱۳۸۵.
- [2] Lee, J. H., Salgado, R., Bernal, A. and Lovell, C. W. "Shredded tires and rubber – sand as lightweight backfill”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 125, pp.132-141,1999.
- [3] Edil, T. B. and Bosscher, P. J., 1994. “ Engineering Properties of Tire Chips and soil Mixtures” Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 17, No. 4, December 1994, PP. 453-464.
- [4] Edinçliler A, Baykal G and Dengili K., 2004 "Determination of static and dynamic behavior of recycled materials for highways" Conservation and Recycling, Vol. 42 (2004) , pp. 223-237.
- [5] Hataf, N., & Rahimi, M. M. (2006). "Experimental investigation of bearing capacity of sand reinforced with randomly distributed tire shreds". Construction and building materials, 20(10), 910-916.
- [6] Pamukcu S, Akbulut S., 2006. “Thermoelastic enhancement of damping of sand using synthetic ground rubber “ J Geotech. Geoenviron. Eng ASCE 132(4):501–510.
- [7] Hyodo, M., Yamada, S., Orense, R., Okamoto, M., and Hazarika, H., 2007. “Undrained Cyclic Shear Properties of Tire Chip-Sand Mixtures “ Proceedings of the International Workshop on Scrap Tire Derived Geomaterials—Opportunities and Challenges, H. Hazarika and K. Yasuhara, Eds., pp. 187–196.
- [8] Uchimura, T., Chi, N., Nirmalan, S., Sato, T., Meidani, M., and Towhata, I., 2007. “Shaking Table Tests on Effect of Tire Chips and Sand Mixture in Increasing Liquefaction Resistance and Mitigating Uplift of Pipe” Proceedings of the International Workshop on Scrap Tire Derived Geomaterials—Opportunities and Challenges, H. Hazarika and K. Yasuhara, Eds., pp. 179–186.
- [9] Hazarika, H., Yasuhara, K., Karmokar, A., and Mitarai, Y., 2007. “Shaking Table Test on Liquefaction Prevention Using Tire Chips and Sand Mixture” Proceedings of

- Conditions”, American Society for Testing and Materials.
- [21] ASTM D 422, “Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils “, American Society for Testing and Materials.
- [22] ASTM D854-92, “Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer “, American Society for Testing and Materials.
- [23] ASTM D4253, “Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table”, American Society for Testing and Materials.
- Tehran. (in persian)
- [18] ASTM D 2487-11, “Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) “, American Society for Testing and Materials.
- [19] “Sustainable Re-use of Tyres in Port, Coastal and River Engineering,” Guidance for planning, implementation and maintenance, March 2005.
- [20] ASTM D 3080-98, “Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Qafuri Amirbande, H.R. Saba , M. Nokandeh, Investigation of the effect of Sizes Crumbed of worn Tires in shear strength parameters of Sandy soil, Amirkabir J. Civil Eng., 55(4) (2023) 893-910.

DOI: 10.22060/ceej.2017.11800.5082



