

مطالعه آزمایشگاهی پارامترهای مقاومت برشی خاک ماسه‌ای مخلوط با خرده لاستیک تحت اثر اعمال مسیر تنش‌های متفاوت

عبدالحسین حداد*، دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

دانیال رضازاده عیدگاهی، دانشجوی دکتری مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه

سمنان

Email: Haddad@semnan.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۵ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۲۷

چکیده

مخلوط‌های خرده لاستیک و خاک دانه‌ای از جمله مصالح جدید و دارای ویژگی‌های متفاوت نسبت به مصالح اولیه تشکیل دهنده می‌باشند که با توجه به روند افزایش لاستیک‌های فرسوده، استفاده از آن‌ها مرسوم شده است. این نوع مصالح، با تراکم‌پذیری کنترل شده و وزن نسبی سبک، می‌توانند در صنعت مهندسی عمران، عملیات راه‌سازی و سازه‌های ژئوتکنیک به‌کار روند. تاکنون مطالعات آزمایشگاهی محدودی برای ارائه نسبت اختلاط بهینه خرده لاستیک و ماسه به منظور دستیابی به اهداف مورد نظر مهندسی، از جمله بیشترین ظرفیت باربری و مناسب‌ترین تراکم‌پذیری، انجام شده است. با این حال، تعیین یک نسبت اختلاط مشخص و شناخت پارامترهای مقاومت برشی خاک‌های مخلوط با خرده لاستیک تحت اثر مسیرهای تنش مختلف، نیاز به مطالعه بیشتری دارد. در این پژوهش، نتایج آزمایش‌های سه‌محوری با در نظر گرفتن شرایط مسیرهای تنش فشار مؤثر همه‌جانبه ثابت (CRS) و فشار محوری ثابت (CAS)، روی خاک ماسه‌ای و همچنین مخلوط‌های چپس‌های لاستیکی و دانه‌های لاستیکی ارائه شده است. نسبت اختلاط در نظر گرفته شده برای نمونه‌های مخلوط ۳۰٪ وزنی خرده لاستیک بوده که به عنوان نسبت اختلاط بهینه از طریق آزمون‌های تراکم تعیین شده است. نتایج آزمایش روی ماسه تنها نشان‌دهنده پوش گسیختگی خطی دارای شیب معادل با $36/8$ درجه در هر دو مسیر تنش می‌باشد. در حالی که پوش گسیختگی به‌دست آمده از اعمال مسیر تنش‌های مخلف روی نمونه‌های مخلوط به صورت دو خطی می‌باشد. زاویه اصطکاک داخلی مخلوط چپس‌های لاستیکی از ماسه تنها به ترتیب حدود $8/5$ و 4 درجه در شرایط CAS و CRS بیشتر می‌باشد. این پارامتر برای مخلوط خرده لاستیک‌های دانه‌ای در شرایط CAS و CRS به ترتیب حدود $1/5$ و 5 درجه از ماسه تنها کمتر بوده است.

واژه‌های کلیدی: خاک ماسه‌ای، مصالح خاکریزهای راه، چپس‌های لاستیکی، مسیرهای تنش، آزمایش سه‌محوری

۱. مقدمه

تن تاورهای فرسوده در جهان تولید می‌شود که سهم

ایران از این مقدار ۳۵۰ هزار تن می‌باشد که این مقدار با

بر مبنای آمار موجود هر سال بالغ بر ۱۳/۵ میلیون

لرزه‌ای، عملیات ساخت زیرسازی قطارهای سبک و شهری و همچنین ترانشه‌های اطراف سازه‌های زیرزمینی از جمله موارد کاربرد خرده لاستیک‌های بازیافتی به صورت تنها و یا مخلوط با ماسه می‌باشند. استفاده از توده مصالح خرد شده‌ی لاستیکی در سازه‌های دائمی ژئوتکنیک و زیرساخت‌ها، به علت تراکم‌پذیری زیاد باید با احتیاط و در نظر گرفتن اثر اختلاط و نسبت تهیه مخلوط با توجه به قابلیت تراکم‌پذیری ایجاد شده، صورت پذیرد. مصالح حاصل از اختلاط دارای خواص مکانیکی متفاوتی نسبت به مصالح اولیه تشکیل دهنده (خرده لاستیک به تنهایی و ماسه به تنهایی) می‌باشند. روش‌های مختلفی برای بهسازی خاک‌ها وجود دارند که مستلزم صرف هزینه به منظور تهیه مواد مورد نیاز می‌باشند (جاودانیان و همکاران، ۲۰۱۲؛ جاودانیان، ۲۰۱۷). در سال‌های اخیر، پژوهشگران زیادی برای به‌کارگیری دوباره مواد لاستیکی تلاش‌های فراوانی را به انجام رسانده و آزمون‌های آزمایشگاهی متفاوتی برای تعیین خواص آن‌ها به صورت مخلوط با خاک و همچنین به صورت توده دانه‌های لاستیک خرد شده انجام داده‌اند (فاکس و همکاران، ۲۰۱۸؛ رضازاده عیدگاهی و همکاران، ۲۰۱۸).

خواص فیزیکی و مهندسی خرده لاستیک‌ها سبب می‌شود تا به عنوان مصالح خام ثانویه مناسبی به شمار روند. این مصالح، دارای وزن سبک (به طور تقریبی یک سوم وزن خاک)، قابلیت خوب عایق بودن (حدود هشت برابر بیشتر از شن)، فشار جانبی کم (در حدود نصف خاک)، توانایی زهکشی بسیار خوب (به صورت تقریبی ده برابر بیشتر از خاک) و در نهایت دوام و

افزایش تولید خودرو و به نسبت آن افزایش تولید واردات محصولات لاستیکی مورد نیاز در سال‌های اخیر افزایش یافته است (شفابخش و همکاران، ۲۰۱۴). چرخه بازگشت این مواد به طبیعت میلیون‌ها سال به طول می‌انجامد؛ چرا که لاستیک در مقابل تجزیه به صورت زیست‌تخریب‌پذیر^۱، مقاوم می‌باشد (WBCSD، ۲۰۰۸). با توجه به روند صعودی تولید خودرو به دلیل افزایش جمعیت کشور در آینده و در نظر گرفتن نرخ فرسودگی ۳۰ درصدی سالانه برای تایرهای موجود، در سال‌های نه چندان دور باید منتظر مشکلات عمده‌ی زیست‌محیطی ناشی از لاستیک‌های فرسوده بود (قادری و همکاران، ۱۳۹۰). طبق آمارهای موجود در انجمن تولیدات لاستیکی آمریکا^۲ و اروپا^۳ در سال ۲۰۱۶، سالانه مقادیر انبوهی از لاستیک‌های فرسوده وسایل نقلیه در طبیعت رها می‌شوند که بسیاری از این انباشت‌ها به صورت غیرقانونی بوده و مشکلات زیست‌محیطی و بهداشتی را در پی خواهند داشت (ETRMA، ۲۰۱۴؛ RMA، ۲۰۱۶). لذا، به منظور تسریع در امر بازیافت و مدیریت انباشت، تایرهای فرسوده و لاستیک‌ها به قطعات کوچک‌تر تبدیل شده و با هدف تولید انرژی و یا استفاده مجدد آماده‌سازی می‌شوند.

بنابراین، در انواع پروژه‌هایی که با انبوه توده خاک در ارتباط می‌باشند، این مواد به صورت خرد شده به کار گرفته شده‌اند. بهسازی خاک، عملیات خاک‌ریزی‌های مربوط به راه‌سازی، کنترل فرسایش زمین، خاکریزهای پشت دیوارها و سازه‌های نگهبان و پایه پل‌ها، جداسازهای حرارتی، پایداری شیب، ساخت مدفن‌های زباله، ساخت سیستم فاضلاب شهری، جداسازهای

^۳ European Tire & Rubber Manufacturers Association (ETRMA)

^۱ Biodegradation

^۲ Rubber Manufacturers Association (RMA)

در کشور کانادا (مِلس و همکاران، ۲۰۱۴) و قطعه‌ای از یک جاده در ایالت ایندیانا در کشور آمریکا (یون و همکاران، ۲۰۰۶) می‌باشد که استفاده از مصالح مخلوط به افزایش مقاومت برشی و همچنین کاهش انتقال بار به لایه‌های زیرین، به علت خاصیت جذب انرژی مصالح مخلوط به‌کار رفته، منجر شده است.

با توجه به اینکه اندازه خرده لاستیک‌های بازیافتی در رفتار مکانیکی آن‌ها اثرگذار می‌باشد، استاندارد ASTM D6270 با لحاظ اندازه مجموعه دانه‌ها، نام‌های متفاوتی را برای این مصالح معرفی نموده است (ASTM D6270-12، ۲۰۱۴). در این تحقیق نیز اصطلاحات فنی مذکور در استاندارد ASTM D6270 استفاده شده است. در این استاندارد، خرده لاستیک دانه‌ای^۱ به دانه‌های لاستیکی کوچکتر از ۱۲ میلی‌متر و به دانه‌های با اندازه‌ی بین ۱۲ تا ۵۰ میلی‌متر چپس‌های لاستیکی^۲ اطلاق می‌گردد. خرده لاستیک‌هایی با اندازه‌های بزرگتر (۵۰ تا ۳۰۵ میلی‌متر) نیز پاره لاستیک^۳ نام‌گذاری شده‌اند.

پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که مخلوط کردن خاک‌های ماسه‌ای با چپس‌های لاستیکی سبب افزایش مقاومت و بهبود پارامترهای مقاومت برشی نسبت به ماسه تنها شده است (رضازاده عیدگاهی و حسینی‌نیا، ۲۰۱۳؛ ماشیری، ۲۰۱۴؛ ماشیری و همکاران، ۲۰۱۵؛ بالی ردی و همکاران، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷). این در حالی است که افزودن خرده لاستیک‌های دانه‌ای به خاک‌های ماسه‌ای سبب کاهش مقاومت برشی و افزایش خاصیت تراکم‌پذیری آن‌ها شده است (ادینکلیر و همکاران، ۲۰۱۲؛ نیاز شیخ و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین، اختلاط

خاصیت تراکم‌پذیری زیاد (مناسب برای کاهش لرزش) هستند. بر اساس تحقیقات انجام شده پیشین، با افزودن خرده لاستیک به خاک‌های ماسه‌ای تا درصد مشخصی (بین ۲۵ تا ۳۵ درصد) مقاومت برشی این خاک‌ها افزایش می‌یابد (تاتلیسوز و همکاران، ۱۹۹۸؛ فوس و همکاران، ۱۹۹۶؛ زورنبرگ و همکاران، ۲۰۰۴؛ اتم، ۲۰۰۵؛ ماشیری، ۲۰۱۴؛ ماشیری و همکاران، ۲۰۱۵). بعلاوه، خرد شدن دانه‌های مجموعه ماسه تحت اثر بارگذاری‌های تناوبی، به‌ویژه در خاک‌های کربناتی، از دیگر مواردی است که اختلاط با خرده لاستیک‌های بازیافتی برای آن مؤثر گزارش شده است (فو و همکاران، ۲۰۱۴؛ جاودانیان و همکاران، ۲۰۱۵؛ جعفریان و همکاران، ۲۰۱۶). به‌عنوان نمونه دیگری از کاربرد این مصالح، می‌توان به استفاده از آن‌ها در خاکریزهای پشت دیوار حائل (هامفری و مانیون، ۱۹۹۲؛ لی و همکاران، ۱۹۹۹)، پشته‌های خاکی در جاده‌ها (بوشر و همکاران، ۱۹۹۷)، لایه‌های زیرین زهکش‌ها (کیار تانسون و همکاران، ۱۹۹۳)، خاکریزهای اطراف لوله‌های مدفون (تفرشی و همکاران، ۲۰۱۲) و همچنین سایر سازه‌های ژئوتکنیک (گرگا و اُشافنسی، ۲۰۰۰) اشاره نمود. در سازه‌های ساخته شده از مصالح لاستیکی باید مسئله‌ی ایجاد حرارت داخلی و خطر آتش گرفتن خود به خودی آنها نیز در طراحی لحاظ گردد که در صورت اختلاط با ماسه این مشکل حل می‌شود (رائو و دوتا، ۲۰۰۶). با در نظر گرفتن خواص مکانیکی خاک‌های مخلوط با خرده لاستیک، استفاده از این مصالح در زیر سازی مربوط به خاکریز جاده‌ها مناسب ارزیابی شده است (یون و همکاران، ۲۰۰۶؛ مِلس و همکاران، ۲۰۱۴). این پژوهش‌های موردی، شامل یک خاکریز راه در ادمونتون

^۱ Rubber shreds

^۱ Granulated rubber

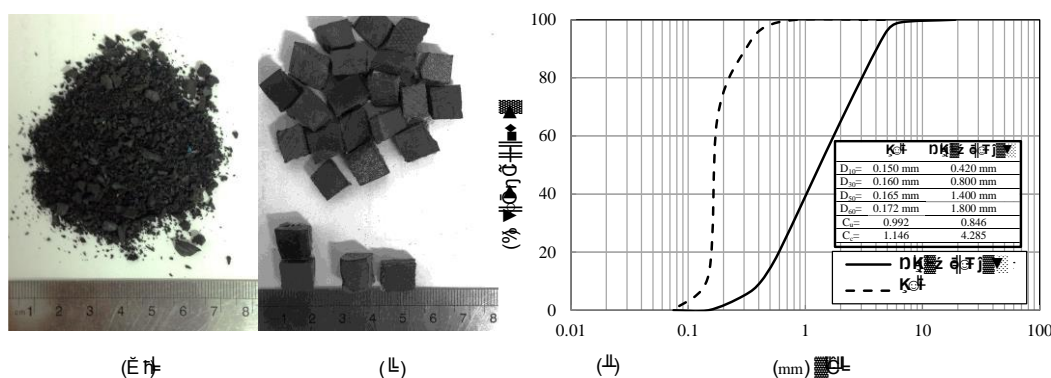
^۲ Rubber chips

است. این ماسه دارای دانه‌بندی یکنواخت بوده و بر اساس طبقه‌بندی متحد منطبق با استاندارد ASTM D2487 با عنوان ماسه بد دانه‌بندی شده (SP) نام‌گذاری می‌گردد. شایان ذکر است که چگالی ویژه دانه‌های جامد (G_s) برای این خاک ۲/۶۴ می‌باشد. دو نوع خرده لاستیک بازیافتی استفاده شده در این پژوهش، از تایرهای فرسوده خودروهای سواری تهیه شده است که سیم و الیاف فلزی آن‌ها پیش‌تر از لاستیک‌ها خارج شده‌اند. چپس‌های لاستیکی (RC) به صورت مکعب مستطیل‌هایی به ضخامت حدود ۵ میلی‌متر و طول و عرض تقریبی ۱۰ میلی‌متر تهیه شده‌اند. خرده لاستیک‌های دانه‌ای (GR) دارای شکل‌های نامنظم بوده که با استفاده از دستگاه‌های خردکن تهیه شده و ابعاد آن‌ها بین ۰/۱ تا ۵ میلی‌متر متغیر می‌باشد. نمودار دانه‌بندی خاک ماسه‌ای و خرده لاستیک‌های دانه‌ای استفاده شده در این پژوهش در شکل ۱-۱ ارائه شده است.

خاک‌های ماسه‌ای و خرده لاستیک‌های دانه‌ای سبب افزایش خاصیت جذب انرژی مجموعه مخلوط نیز شده است (تسانگ، ۲۰۰۸؛ نیاز شیخ و همکاران، ۲۰۱۳؛ انبازاگان و منوهار، ۲۰۱۵؛ عبدالرازق و همکاران، ۲۰۱۸). همانطور که پیش‌تر نیز گفته شد، خاک‌های ماسه‌ای مخلوط با خرده لاستیک‌های بازیافتی به عنوان مصالح سبک و دارای خواص ویژه مورد استفاده قرار می‌گیرند. لذا، مسیرهای تنش مختلفی نیز می‌تواند بر آن‌ها اثرگذار شده و شرایط متفاوتی برای شکست مجموعه را فراهم سازد. هدف از انجام این پژوهش، مطالعه اثر اعمال مسیرهای تنش مختلف بر پارامترهای مقاومت برشی مجموعه مخلوط‌های با نسبت اختلاط ثابت می‌باشد.

۲. مشخصات مصالح استفاده شده

خاک ماسه‌ای استفاده شده در این تحقیق از سواحل جنوبی دریای خزر و منطقه ساحلی بابلسر تهیه شده



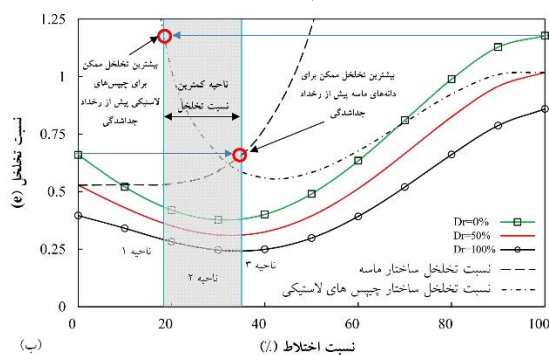
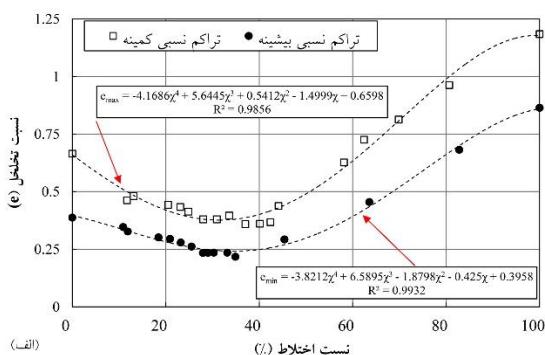
شکل ۱. مصالح استفاده شده در آزمایش‌ها: الف) خرده لاستیک‌های دانه‌ای (GR)، ب) چپس‌های لاستیکی (RC) و ج) نمودار دانه‌بندی خاک ماسه‌ای و خرده لاستیک‌های دانه‌ای

ASTM D854 و C127 برابر ۱/۱۳ و ۱/۱۷ اندازه‌گیری شده‌اند.

به منظور انتخاب نسبت اختلاط برای تهیه نمونه‌های مورد مطالعه، روش ساده‌ای بر مبنای روابط وزنی و

همانطور که در شکل ۱ می‌توان دید، اندازه میانگین (D_{50}) خرده لاستیک‌های دانه‌ای به طور تقریبی ۱۰ برابر خاک ماسه‌ای می‌باشد. مقدار چگالی ویژه چپس‌ها و دانه‌های لاستیکی به ترتیب مطابق استانداردهای ASTM

حالت با استفاده از روش ارائه شده در استانداردهای ASTM D4253 و ASTM D4254 قابل دست‌یابی می‌باشند. با توجه به بیشترین و کمترین مقدار نسبت تخلخل به دست آمده برای نمونه‌های حاوی نسبت‌های متفاوت اختلاط، می‌توان بهترین منحنی‌های گذرکننده از هر دسته را ترسیم نموده و معادله آن را نیز بر حسب نسبت اختلاط به دست آورد. بنابراین، می‌توان به ازای هر تراکم دلخواه، با توجه به نسبت اختلاط انتخاب شده، نسبت تخلخل متناظر را به دست آورد. همانطور که در شکل ۲ الف - الف می‌توان دید، با استفاده از رابطه منحنی برازش داده شده به نسبت‌های تخلخل کمینه و بیشینه موجود، روابطی بر حسب نسبت اختلاط به دست آمده‌اند که می‌توان از آن‌ها برای یافتن مقادیر نسبت تخلخل در هر نسبت اختلاط مطلوب استفاده نمود.



شکل ۲. الف) منحنی‌های برازش داده شده بر نسبت‌های تخلخل کمینه و بیشینه به ازای نسبت‌های اختلاط متفاوت و

ب) انتخاب ناحیه‌ای از اختلاط به ازای کمترین نسبت تخلخل

آن‌ها را چپس‌های لاستیکی احاطه کرده و از کماتش ستون‌های فرضی باربر جلوگیری می‌کند. این موضوع سبب می‌شود که باربری مجموعه و در نتیجه آن، مقاومت برشی نمونه افزایش یابد. بعلاوه، با توجه به اختلاف اندازه موجود بین دانه‌های ماسه و چپس‌های لاستیکی، تخلخل مجموعه به علت پر شدن فضاهای خالی توسط دانه‌های ماسه کاهش می‌یابد. در ناحیه ۳، رفتار مجموعه به سمت رفتار چپس‌های لاستیکی به تنهایی سوق می‌یابد و باربری مجموعه به علت عدم وجود دانه‌های

حجمی به کار گرفته شده است. این روش، همچنین در پژوهش‌های پیشین نیز به منظور یافتن نسبت اختلاط بهینه مخلوط‌های خاک ماسه‌ای و خرده لاستیک استفاده شده است (ماشیری و همکاران، ۲۰۱۵؛ بالی ردی و همکاران، ۲۰۱۶). نسبت تخلخل مجموعه مخلوط خاک ماسه‌ای و چپس‌های لاستیکی را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$e_{total} = \frac{V_m - \left(\frac{W_s}{G_{s,s}} + \frac{W_{RC}}{G_{s,RC}} \right)}{\frac{W_s}{G_{s,s}} + \frac{W_{RC}}{G_{s,RC}}} \quad (1)$$

در رابطه فوق، V_m حجم کل نمونه، W_s و W_{RC} به ترتیب وزن دانه‌های ماسه و چپس‌های لاستیکی در مخلوط، $G_{s,RC}$ و $G_{s,s}$ به ترتیب چگالی ویژه دانه‌های ماسه و چپس‌های لاستیکی می‌باشند. بعلاوه، وزن مخصوص نمونه‌های مخلوط در متراکم‌ترین حالت و سست‌ترین

با توجه به شکل ۲- ب و طبقه‌بندی رفتار مخلوط به ازای مقادیر مختلف اختلاط در پژوهش‌های پیشین، سه ناحیه متفاوت رفتاری معرفی می‌شوند (لی و همکاران، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۴؛ ماشیری، ۲۰۱۴؛ ماشیری و همکاران، ۲۰۱۵؛ بالی ردی و همکاران، ۲۰۱۶). در ناحیه ۱، رفتار مجموعه مخلوط بیشتر شبیه رفتار دانه‌های ماسه تنها می‌باشد و اسکلت باربر را به طور عمده دانه‌های ماسه تشکیل می‌دهند. ناحیه ۲، ناحیه انتقال می‌باشد که اسکلت باربر را دانه‌های ماسه‌ای تشکیل می‌دهند، اطراف

شده است.

۳. روش انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم یافته زهکشی شده روی نمونه‌های اشباع بر اساس استاندارد ASTM D4767 انجام شده است. آزمایش‌های انجام شده به دو دسته کلی تقسیم شده‌اند. دسته اول، که مشابه با آزمون‌های متداول سه‌محوری، فشار همه‌جانبه ثابت و فشار محوری (قائم) تا رسیدن به گسیختگی نمونه‌ها افزایش یافته است که با نام آزمون‌های CRS^۱ مشخص شده‌اند. دسته دوم، آزمون‌هایی هستند که در آن‌ها فشار محوری ثابت و فشار همه‌جانبه کاهش یافته است. این آزمون‌ها با عنوان CAS^۲ مشخص شده‌اند. بدین ترتیب، در تمامی آزمایش‌های انجام شده، نمونه‌ها تحت فشار مؤثر همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال تحکیم یافته‌اند. اما مسیر تنش رسیدن به گسیختگی نمونه‌ها پس از مرحله تحکیم متفاوت می‌باشد. انتخاب مسیرهای تنش مذکور بر مبنای موارد استفاده و کاربرد مصالح مخلوط می‌باشد. شرایط مسیر تنش CRS مانند شرایط افزایش فشار سطحی و یا بارگذاری مصالح و رسیدن به گسیختگی تحت فشار زیر پی و یا فشار وارد بر مصالح اساس و زیراساس را مدل می‌کند. همچنین، می‌توان گفت CAS شرایط باربرداری جانبی همچون شرایط توده مصالح به‌کار رفته در پشت سازه‌های حائل و شرایط پایداری از این قبیل را تداعی می‌کند. لذا، هر دو مسیر تنش در واقعیت مصداق داشته و شناخت پارامترهای مقاومت برشی در شرایط مذکور اهمیت می‌یابد. برنامه آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش به تفصیل در جدول ۱ ارائه شده است.

صلب در اسکلت باربر، کاهش می‌یابد. به منظور یافتن بازه‌ی قرارگیری ناحیه ۲، یا همان ناحیه انتقال که در آن کمترین نسبت تخلخل مجموعه رخ می‌دهد، از بیشترین مقدار نسبت تخلخل که دانه‌های ماسه در اختلاط با چپس‌های لاستیکی می‌توانند بدون ایجاد پدیده جداشدگی اتخاذ کنند استفاده شده است. این نسبت تخلخل در واقع همان بیشترین مقدار نسبت تخلخل مجموعه فقط شامل دانه‌های ماسه است. همچنین، بیشترین مقدار نسبت تخلخل که چپس‌های لاستیکی می‌توانند بدون رخداد پدیده جداشدگی داشته باشند، در واقع همان بیشترین نسبت تخلخل مجموعه فقط شامل چپس‌های لاستیکی می‌باشد. با استفاده از روابط وزنی و حجمی، می‌توان منحنی مجموعه‌های فقط شامل ساختار ماسه و فقط شامل ساختار چپس‌های لاستیکی را ترسیم نمود. در شکل ۲-ب می‌توان به وضوح مشاهده کرد که با در نظر گرفتن تراکم نسبی ۵۰٪، در نسبت اختلاط بین ۱۸ تا ۳۴ درصد کمترین نسبت تخلخل در مخلوط خاک ماسه‌ای و چپس‌های لاستیکی رخ می‌دهد. از آنجا که وجود ساختار جامد موجود در مخلوط با کمترین نسبت تخلخل نشان‌دهنده بیشترین مقاومت برشی خواهد بود، مقدار نسبت اختلاط بهینه ۳۰٪ وزنی لاستیک در نظر گرفته شده است.

شایان ذکر است که با توجه به آزمایش‌های انجام شده، می‌توان گفت که دست‌یابی به ناحیه انتقال (ناحیه ۲) که در آن کمینه نسبت تخلخل رخ دهد، فقط برای چپس‌های لاستیکی مشاهده شده است. به ازای اختلاط خاک ماسه‌ای با خرده لاستیک‌های دانه‌ای، نسبت تخلخل همواره افزایش می‌یابد. با توجه به فراهم آوردن امکان مقایسه بین مخلوط‌های تهیه شده، نسبت اختلاط برای ماسه و خرده لاستیک‌های دانه‌ای نیز همان ۳۰٪ انتخاب

^۲ Constant Axial Stress

^۱ Constant Radial Stress

جدول ۱. برنامه آزمایش‌های انجام شده

فشار همه‌جانبه	شرایط بارگذاری	نوع آزمایش	نوع نمونه
۱۰۰ کیلوپاسکال	فشار همه‌جانبه ثابت (CRS) فشار محوری ثابت (CAS)	سه‌محوری زهکشی شده	ماسه تنها
۱۰۰ کیلوپاسکال	فشار همه‌جانبه ثابت (CRS) فشار محوری ثابت (CAS)	سه‌محوری زهکشی شده	ماسه و ۳۰٪ وزنی دانه‌های لاستیکی (S70G30)
۱۰۰ کیلوپاسکال	فشار همه‌جانبه ثابت (CRS) فشار محوری ثابت (CAS)	سه‌محوری زهکشی شده	ماسه و ۳۰٪ وزنی چپس‌های لاستیکی (S70C30)

تنش محوری، تنش همه‌جانبه، تغییرات حجم نمونه و تغییر مکان‌های محوری را ثبت نموده و کنترل نماید. نمونه‌های تحت آزمایش قرار گرفته به قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر آماده سازی شده و در سه لایه به صورت خشک تهیه شده‌اند. به منظور دستیابی به درجه اشباع مورد نظر، ابتدا از نمونه‌ها گاز کربن دی‌اکسید و سپس آب بدون هوا گذر داده شده است. با توجه به روش‌های اشباع‌سازی ذکر شده در استاندارد ASTM D7181، اعمال پس‌فشار به نمونه‌ها نیز صورت پذیرفته و در کلیه موارد آزمایش درجه اشباع بیش از ۹۵٪ حاصل شده است. پس از این مرحله، تحکیم نمونه‌ها، تحت فشار مؤثر همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال انجام شده و تراکم نسبی ۵۰٪ حاصل شده است. در تمام مراحل انجام آزمایش، خروج آب از نمونه اندازه‌گیری و ثبت شده است. در آزمایش با شرایط CRS، نرخ کرنش محوری ۰/۱ درصد بر دقیقه اعمال شده و شرایط آزمایش کنترل کرنش برقرار شده است. انتخاب این سرعت با توجه به عدم رشد فشار آب منفذی در نمونه‌ها بر مبنای استاندارد ASTM D4767 می‌باشد. آزمایش‌های با شرایط CAS تحت کنترل تنش انجام شده و گام‌های کاهش فشار همه‌جانبه به اندازه کافی کند صورت پذیرفته است. در شرایط CAS تا رسیدن به گسیختگی، فشار محوری ۱۰۰ کیلوپاسکال ثابت حفظ شده و تغییر مکان‌های محوری

همانطور که پیش‌تر نیز گفته شد، نسبت اختلاط مصالح به صورت ۳۰٪ وزنی خرده لاستیک از وزن کل نمونه انتخاب شده است. نمونه‌های شامل چپس‌های لاستیکی با عنوان S70C30 و نمونه‌های دارای خرده لاستیک‌های دانه‌ای با عنوان S70G30 نشان داده شده‌اند. به منظور ساخت نمونه‌های مورد آزمایش، از روش ریزش خشک و تحت تراکم^۱ استفاده شده است (لد، ۱۹۷۸). نمونه‌های ماسه تنها و همچنین ماسه مخلوط با خرده لاستیک‌های دانه‌ای در پنج لایه با ارتفاع‌های مساوی و نمونه شامل چپس‌های لاستیکی در سه لایه در قالب صلب ریخته شده و به تراکم مورد نظر رسیده‌اند. به منظور کنترل توزیع اختلاط در نمونه شامل چپس‌های لاستیکی، مقدار وزنی ماسه و چپس مورد نیاز هر لایه به طور جداگانه توزین شده و سپس در هر لایه جای داده شده است. همچنین، ابتدا چپس‌های لاستیکی در هر لایه ریخته شده و پس از آن خاک ماسه‌ای در میان چپس‌ها جای داده شده است و تا رسیدن به ارتفاع مورد نظر متراکم شده‌اند. به منظور ایجاد تراکم، در مواقع لازم، از ضربات آرامی به جداره قالب استفاده شده است. کلیه آزمایش‌های انجام شده توسط دستگاه آزمون سه‌محوری با کنترل رایانه‌ای ساخت شرکت GDS در آزمایشگاه مکانیک خاک پیشرفته دانشگاه سمنان صورت پذیرفته است. این دستگاه قادر است به دقت تغییرات

^۱ Undercompaction

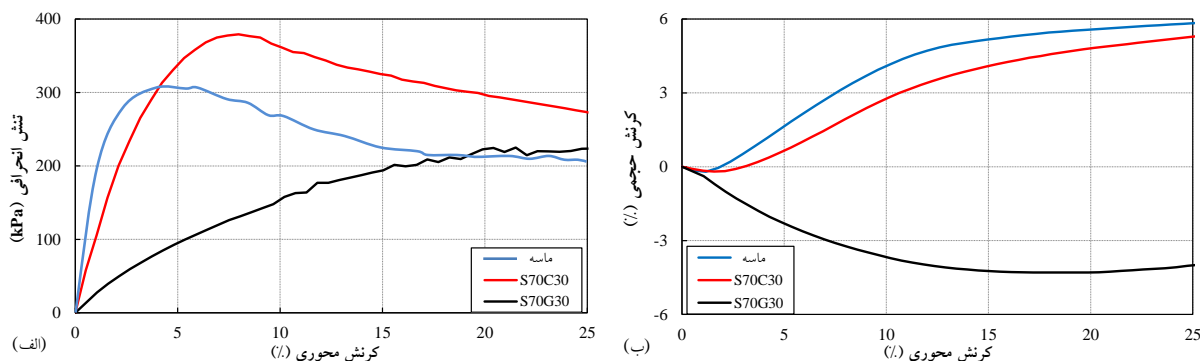
متناظر با آن ثبت شده‌اند.

همان مدول الاستیسیته نمونه S70C30، کمتر از نمونه ماسه تنها می‌باشد. این موضوع نشان‌دهنده نرم‌تر شدن مجموعه مخلوط در مقایسه با حالت بدون اختلاط می‌باشد. این روند برای مخلوط خاک ماسه‌ای و خرده لاستیک‌های دانه‌ای متفاوت می‌باشد و پاسخ تنش انحرافی بیشینه به دست آمده به طور تقریبی ۹۰ کیلوپاسکال کمتر از مجموعه ماسه تنها می‌باشد. هرچند این موضوع نشان‌دهنده کاهش مقاومت برشی نمونه‌های حاوی خرده لاستیک‌های دانه‌ای است، کرنش متناظر با گسیختگی نمونه، که می‌تواند پارامتر مناسبی برای جذب انرژی سیستم باشد، در نمونه S70G30 افزایش چشمگیری داشته است. همچنین، این عامل در نمونه‌های دارای چپس‌های لاستیکی نیز نسبت به ماسه تنها حدود ۳٪ افزایش یافته است.

۴. تحلیل نتایج و بحث

۴-۱. شرایط فشار همه‌جانبه ثابت (CRS)

نتایج به دست آمده از آزمایش سه‌محوری در شرایط فشار همه‌جانبه ثابت به اندازه ۱۰۰ کیلوپاسکال برای نمونه‌های دارای ۳۰٪ وزنی خرده لاستیک در شکل ۳ نشان داده است. در شکل ۳-الف، تنش انحرافی ($q = \sigma_1 - \sigma_3$) که در آن σ_3 تنش همه‌جانبه و σ_1 تنش محوری می‌باشد) نمونه‌های ماسه، S70C30 و S70G30 بر حسب کرنش محوری اعمال شده ترسیم شده است. همانطور که در این شکل می‌توان دید، بیشترین تنش انحرافی تحمل شده توسط نمونه S70C30 حدود ۷۰ کیلوپاسکال بیشتر می‌باشد. این در حالی است که شیب اولیه نمودار، یا



شکل ۳. نتایج آزمون سه‌محوری در حالت CRS: الف) تنش انحرافی بر حسب کرنش محوری و

ب) کرنش حجمی بر حسب کرنش محوری

ساختار چیدمان دانه‌ها در مجموعه مخلوط نسبت داد. همانطور که پیش‌تر گفته شد، نمونه‌های مخلوط با چپس‌های لاستیکی دارای یک ناحیه انتقال هستند که در آن مقدار کمینه نسبت تخلخل رخ می‌دهد. این در حالی است که در نمونه‌های دارای خرده لاستیک‌های دانه‌ای این فرآیند وجود ندارد. لذا، با توجه به نسبت اختلاط انتخاب شده (۳۰٪ وزنی خرده لاستیک) می‌توان گفت که علت بهبود مقاومت برشی در نمونه‌های دارای

با توجه به شکل ۳-ب، با مقایسه پاسخ کرنش حجمی بر حسب کرنش محوری نمونه‌های ماسه و S70C30 می‌توان گفت که رفتار اتساعی ماسه تنها با افزودن چپس‌های لاستیکی کاهش یافته است. هرچند نمونه‌ی شامل خرده لاستیک‌های دانه‌ای فقط انقباضی داشته و هیچ‌گونه اتساعی نداشته است. بنابراین، پاسخ‌های تنش - کرنش متفاوت بین نمونه‌های S70C30 و S70G30 را می‌توان به شرایط متفاوت

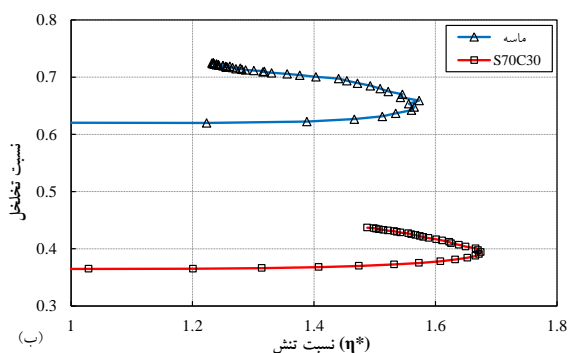
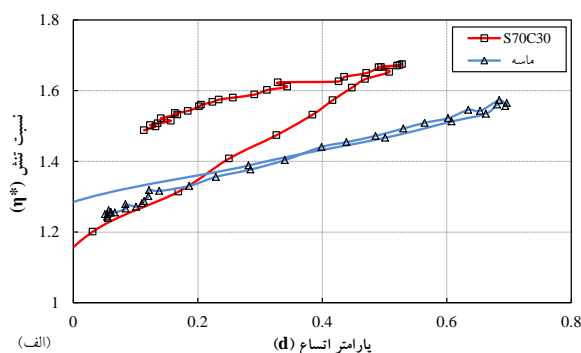
$$\eta^* = \frac{dq}{dp'} \quad (۳)$$

در روابط فوق، ε_v و ε_q به ترتیب کرنش‌های انحرافی و حجمی می‌باشند که کرنش انحرافی در واقع معادل کرنش محوری است. بعلاوه، q و p' به ترتیب تنش‌های انحرافی و تنش مؤثر میانه $(p' = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3)$ می‌باشند. بنابراین، می‌توان پارامترهای اتساع و نسبت تنش را در هر مرحله از آزمایش با استفاده از داده‌های موجود محاسبه کرد. در شکل ۴، تغییرات پارامتر اتساع بر حسب نسبت تنش و همچنین تغییرات نسبت تخلخل بر حسب نسبت تنش در حالت مسیر تنش CRS، برای نمونه S70C30 و خاک ماسه‌ای تنها، نشان داده شده است.

چیپس‌های لاستیکی را حداقل شدن نسبت تخلخل و کاهش فضا‌های خالی موجود در ساختار و همچنین ایجاد ناحیه انتقال که در آن اسکلت باربر را دانه‌های ماسه احاطه شده با چیپس‌های لاستیکی تشکیل می‌دهند (رفتار بین ماسه مانند تا لاستیک مانند) دانست.

از طرف دیگر، با توجه به روابط (۲) و (۳)، می‌توان شرایط رخداد اتساع در نمونه‌ها را با پارامترهای اتساع (d) و نسبت تنش (η^*) نیز بررسی نمود:

$$d = \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_q} \quad (۲)$$



شکل ۴. الف) تغییرات نسبت تنش بر حسب پارامتر اتساع و ب) تغییرات نسبت تخلخل به ازای نسبت تنش در حالت CRS

توجه به اینکه رفتار نمونه ماسه مخلوط با خرده لاستیک‌های دانه‌ای به صورت انقباضی بوده و نمونه پیوسته دچار فشردگی شده است، پاسخ‌های مربوط به نسبت تنش و در نتیجه آن، مقاومت برشی نمونه مخلوط در مقایسه با ماسه تنها کمتر می‌باشد.

با توجه به پژوهش ادینکلیر و همکاران (۲۰۱۲) و همچنین نیاز شیخ و همکاران (۲۰۱۳)، اختلاط خاک ماسه‌ای و خرده لاستیک‌های دانه‌ای سبب کاهش مقاومت برشی و بروز رفتار فشردگی در مجموعه می‌گردد که این موضوع با رفتار مجموعه S70G30 در مطالعه حاضر مطابقت دارد. بعلاوه، مطابق پژوهش‌های ماشیری و همکاران (۲۰۱۵)، بالی ردی و همکاران (۲۰۱۵) و انبازاگان و همکاران (۲۰۱۶)، مخلوط

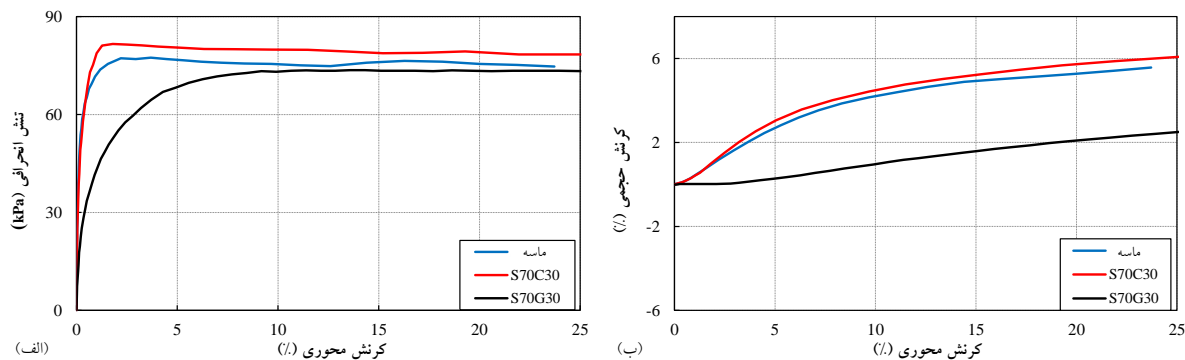
همانطور که در شکل ۴-الف مشاهده می‌گردد، مقادیر نسبت تنش به دست آمده به ازای اتساع رخ داده برای نمونه S70C30 بیشتر از نمونه ماسه می‌باشد. بعلاوه، می‌توان مشاهده نمود که نمونه ماسه به مقادیر اتساع حدود ۰/۷ رسیده است که این مقدار حدود ۰/۲۵ از مخلوط ماسه و چیپس‌های لاستیکی بیشتر می‌باشد. علت این موضوع را می‌توان در شکل ۴-ب دید. با توجه به اینکه نسبت تخلخل نمونه مخلوط S70C30 از ابتدای انجام آزمایش تا رسیدن به مرحله گسیختگی، از نمونه ماسه تنها بیشتر می‌باشد، می‌توان دریافت که ساختار فشرده‌تر و همچنین وجود اسکلت باربر متشکل از دانه‌های ماسه‌ای احاطه شده با چیپس‌های لاستیکی سبب پیدایش نسبت تنش‌های بیشتر از ماسه تنها شده است. با

همچنین تغییرات کرنش حجمی به ازای کرنش محوری در شرایط مسیر تنش فشار محوری ثابت در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵-الف می‌توان دید که بیشترین تنش انحرافی نمونه S70C30 از نمونه ماسه تنها بیشتر بوده است. از طرف دیگر، نمونه S70G30 مقاومت برشی کمتری در مقایسه با نمونه ماسه تنها داشته است. هرچند اثر اختلاط ماسه و خرده لاستیک‌ها به طور تقریبی در هر دو مسیر تنش CSR و CAS یکسان بوده، اما مقدار بهبود و همچنین کاهش بیشینه تنش انحرافی تحمل شده توسط نمونه‌های به ترتیب دارای چیپس‌های لاستیکی و خرده لاستیک‌های دانه‌ای در دو مسیر یکسان نبوده است. بعلاوه، با توجه به شکل ۵-ب می‌توان گفت که رفتار اتساعی موجود در مرحله برش برای تمامی نمونه‌ها رخ داده است. هرچند مقدار اتساع رخ داده برای نمونه ماسه تنها از نمونه دارای چیپس‌های لاستیکی کمتر می‌باشد.

خاک‌های ماسه‌ای در اختلاط با چیپس‌های لاستیکی سبب افزایش مقاومت برشی بیشینه قابل تحمل برای نمونه‌های مورد آزمایش شده است. در پژوهش حاضر نیز پاسخ‌های به دست آمده از آزمایش سه‌محوری تحت شرایط فشاری معمول (CRS) مبین نتیجه مشابهی برای نمونه S70C30 می‌باشد. شایان ذکر است که مقدار کاهش و یا افزایش مقاومت برشی به ترتیب برای نمونه‌های مخلوط با دانه‌های لاستیکی و چیپس‌های لاستیکی تابع جنس خاک ماسه‌ای پایه و همچنین جنس و اندازه منبع تهیه خرده لاستیک‌های بازیافتی می‌باشد. این در حالی است که روند کلی بهبود و یا کاهش پارامترهای مقاومتی و همچنین رفتار انقباضی و یا اتساعی در پژوهش حاضر با گزارش‌های نام‌برده یکسان می‌باشد.

۲-۴. شرایط فشار محوری ثابت (CAS)

پاسخ‌های تنش انحرافی بر حسب کرنش محوری و



شکل ۵. نتایج آزمون سه‌محوری در حالت CAS: الف) تنش انحرافی بر حسب کرنش محوری و

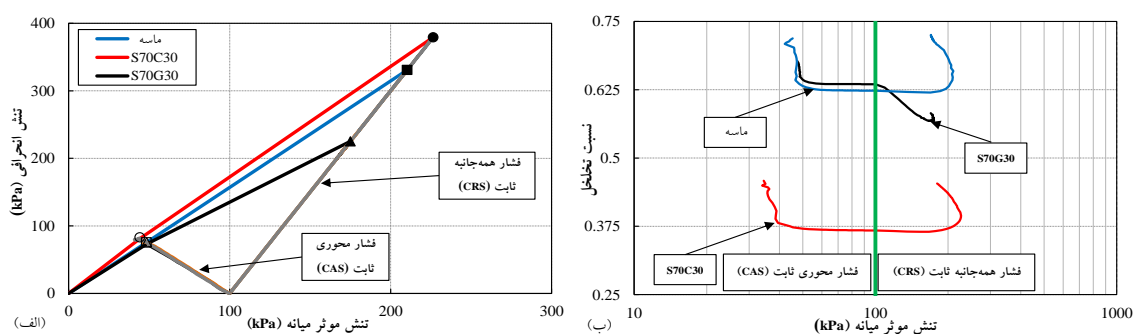
ب) کرنش حجمی بر حسب کرنش محوری

گسیختگی دو خطی می‌باشد که نشان‌دهنده تفاوت رفتار نمونه S70G30 در مسیر تنش CRS و CAS می‌باشد. این نمونه، در شرایط کاهش فشار همه‌جانبه مقاومت بیشتری نسبت به شرایط گسیختگی افزایش فشار محوری در شرایط فشار همه‌جانبه ثابت داشته است. به ازای نمونه‌های ماسه و S70C30 نیز می‌توان دریافت که شیب پوش گسیختگی در مسیر تنش CAS از مسیر CRS بیشتر

در حالت کلی، پوش‌های گسیختگی تنش برای مسیرهای تنش CAS و CRS و همچنین تغییرات نسبت تخلخل بر حسب تنش مؤثر میانه (p') در شکل ۶-الف و ب نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶-الف می‌توان تفاوت بین پوش گسیختگی مسیر تنش CRS و CAS را مشاهده نمود. همانطور که در این شکل می‌توان دید، نمونه شامل خرده لاستیک‌های دانه‌ای دارای پوش

فشار همه جانبه ثابت، رفتار به طور کامل انقباضی و تراکمی داشته است. این ساز و کار را می‌توان به عدم ایجاد ستون‌های باربر متشکل از دانه‌های ماسه در راستای ارتفاع نمونه ارتباط داد. این در حالی است که در مسیر تنش با شرایط فشار محوری ثابت، این نمونه دارای رفتار اتساعی می‌باشد که کمتر از ماسه تنها و نمونه S70C30 بوده است. در واقع، در این حالت، خاصیت کششی دانه‌های لاستیکی در امتداد صفحه فرضی سطح مقطع نمونه سبب این رفتار متفاوت شده است.

بوده و عملکرد متفاوتی که منجر به پوش گسیختگی دو خطی شده قابل مشاهده می‌باشد. بعلاوه، با در نظر گرفتن شکل ۶-ب، می‌توان گفت که نسبت تخلخل اولیه نمونه‌ها در شروع مرحله برش با یکدیگر متفاوت بوده و پاسخ تغییرات نسبت تخلخل با توجه به مسیر تنش اعمال شده تغییر نموده است. با توجه به اندازه دانه‌های لاستیکی، که به نرم‌تر شدن آن‌ها منجر شده، و همچنین ساز و کار حاصل از اختلاط آن‌ها با دانه‌های ماسه، نمونه S70G30 در مسیر تنش با شرایط



شکل ۶. الف) پوش گسیختگی تنش به ازای مسیرهای تنش اعمال شده و ب) تغییرات نسبت تخلخل بر حسب فشار مؤثر میانه در شرایط مسیرهای تنش CRS و CAS

و بر اثر ماهیت فیزیکی سطوح دانه‌های خرده لاستیک استفاده شده می‌باشد. لذا، برای فراهم آوردن امکان مقایسه، از زاویه اصطکاک داخلی بسیج شده معادل (با عبور خطی از مبدأ و نقطه گسیختگی) استفاده شده است. شیب پوش دوخطی گسیختگی تنش برای مصالح مخلوط مورد آزمایش و همچنین به صورت خطی برای ماسه مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است.

مقاومت برشی بسیج شده مصالح دانه‌ای در حالت کلی از زاویه اصطکاک داخلی مصالح تأثیر گرفته است. لذا، زاویه اصطکاک داخلی، مهم‌ترین پارامتر مقاومت برشی برای شناخت پاسخ مصالح دانه‌ای در شرایط بارگذاری به‌شمار می‌رود. زاویه اصطکاک داخلی بیشینه بسیج شده مصالح دانه‌ای در آزمایش سه‌محوری را می‌توان از رابطه ۴ به‌دست آورد. در این رابطه، q_f و p'_f به ترتیب مقادیر بیشترین تنش انحرافی و تنش مؤثر میانه متناظر با آن می‌باشند.

جدول ۲. مقادیر زاویه اصطکاک داخلی بیشینه برای

مسیرهای تنش CRS و CAS		
زاویه اصطکاک داخلی بسیج شده مؤثر بیشینه		
$(\phi'_{mob})_{peak}$		
فشار محوری ثابت	فشار همه‌جانبه ثابت	
(CAS)	(CRS)	
۳۶/۷۳	۳۶/۸۷	ماسه تنها
۴۵/۱۸	۴۰/۹۷	S70C30

$$(\phi'_{mob})_{peak} = \sin^{-1} \left(\frac{3(q_f / p'_f)}{6 + (q_f / p'_f)} \right) \quad (4)$$

لازم به ذکر است که در تحلیل آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، خاک ماسه‌ای استفاده شده از نوع ماسه بدون ریزدانه و شسته شده بوده، مقدار چسبندگی به‌دست آمده برای مصالح مخلوط به صورت چسبندگی ظاهری

مقادیر پاسخ‌های تنش به‌دست آمده بیشتری نسبت به نمونه ماسه تنها داشته است. در شرایط مسیر تنش CAS، شیب پوش گسیختگی تنش از شرایط CRS بیشتر می‌باشد که سبب دو خطی شدن پوش گسیختگی تنش می‌گردد. این موضوع نشان می‌دهد که کاربرد مصالح مخلوط به عنوان مصالح پُرکننده و همچنین در شرایطی که احتمال ناپایداری خاک ماسه‌ای به علت باربرداری جانبی وجود دارد (مانند سازه‌های حائل و یا پایداری شیب‌های خاکی) مناسب می‌باشند. شیب پوش گسیختگی خاک ماسه‌ای مخلوط با ۳۰٪ وزنی چیپس‌های لاستیکی، در شرایط فشار محوری ثابت و فشار همه‌جانبه ثابت، تقریباً ۸/۵ و ۴ درجه نسبت به نمونه ماسه تنها در شرایط بارگذاری مشابه افزایش یافته است. همچنین، خاک ماسه‌ای در اختلاط با خرده لاستیک‌های دانه‌ای به اندازه حدود ۱/۵ و ۵ درجه کمتر از نمونه ماسه تنها به ترتیب در شرایط بارگذاری فشار محوری ثابت و فشار همه‌جانبه ثابت بوده است. هرچند مقاومت برشی خاک ماسه‌ای در اختلاط با خرده لاستیک‌های دانه‌ای بهبود پیدا نکرده است، اما با توجه به نتایج می‌توان گفت که عملکرد خرده لاستیک‌های دانه‌ای در شرایط فشار محوری ثابت بهتر از فشار همه‌جانبه ثابت بوده است.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، نتایج آزمون‌های سه‌محوری روی نمونه‌های ماسه تنها، ماسه مخلوط با خرده لاستیک دانه‌ای و همچنین مخلوط با چیپس‌های لاستیکی در دو مسیر تنش متفاوت تحلیل شده است. این مسیرهای تنش به صورت شرایط تنش همه‌جانبه ثابت (CRS) و در شرایط فشار محوری ثابت (CAS) می‌باشند. همچنین، نسبت اختلاط بهینه ۳۰٪ وزنی خرده لاستیک در مصالح مخلوط مورد آزمایش، با توجه به مقدار کمینه نسبت تخلخل به دست آمده در اختلاط‌های مختلف از آزمایش‌های تعیین تراکم نسبی حداکثر و حداقل تعیین شده است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های سه‌محوری انجام پذیرفته می‌توان دریافت که مقاومت نمونه‌های مخلوط به شدت تحت تأثیر نوع خرده لاستیک و مسیر تنش اعمال شده قرار داشته است. از آنجا که خاک ماسه‌ای مخلوط با چیپس‌های لاستیکی در نسبت اختلاط مورد مطالعه، یعنی ۳۰٪ وزنی، دارای مقدار نسبت تخلخل کمتر از ماسه تنها می‌باشد و همچنین با توجه به وجود رفتار اتساعی در مرحله رخداد گسیختگی،

۶. مراجع

قادری، س.، محرم‌نژاد، ن. و جلیلی، م. ۱۳۹۰. "مدیریت لاستیک‌های فرسوده در کشور". اولین همایش فناوری‌های پالایش در محیط‌زیست.

AbdelRazek, A., El-Sherbiny, R. M. and Lotfi, H. A. 2018. "Mechanical properties and time-dependent behaviour of sand-granulated rubber mixtures". Geomech. Geoeng., DOI: 10.1080/17486025.2018.1440013.

Anbazhagan, P. and Manohar, D. R. 2015. "Energy absorption capacity and shear strength characteristics of waste tire crumbs and sand mixtures". Int. J. Geotech. Earthq. Eng., 6(1): 28-49.

Anbazhagan, P., Manohar, D. R. and Rohit, D. 2016. "Influence of size of granulated rubber and tyre chips on the shear strength characteristics of sand-rubber mix". Geomech. Geoeng., 6025: 1-13.

ASTM D6270-12. 2014. "Standard practice for use of scrap tires in civil engineering applications". DOI: 10.1520/D6270-12.

Attom, M. F. 2005. "The use of shredded waste tires to improve the geotechnical engineering properties of sands". Environ. Geol., 49(4): 497-503.

Bali Reddy, S., Pradeep Kumar, D. and Murali Krishna, A. 2016. "Evaluation of the optimum mixing ratio of

- a sand-tire chips mixture for geoenvironmental applications". *J. Mater. Civ. Eng.*, 28(2): 6015007.
- Bali Reddy, S., Krishna, A. M. and Reddy, K. R. 2017. "Sustainable utilization of scrap tire derived geomaterials for geotechnical applications". *Indian Geotech. J.*, DOI: 10.1007/s40098-017-0273-3.
- Bosscher, P., Edil, T. B. and Kuraoka, S. 1997. "Design of highway embankments using tire chips". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 123(4): 295-304.
- Edinçliler, A., Cabalar, A. F., Cagatay, A. and Cevik, A. 2012. "Triaxial compression behavior of sand and tire wastes using neural networks". *Neural Comp. Appl.*, 21(3): 441-452.
- European Tyre and Rubber Industries Statistics. 2014. European Tyre and Rubber Manufacturers' Association (ETRMA).
- Foose, G. J. G., Benson, C. H. and Bosscher, P. J. 1996. "Sand reinforced with shredded waste tire". *J. Mater. Civ. Eng.*, 122(9): 760-767.
- Fox, P. J., Thielmann, S. S., Sanders, M. J., Latham, C., Ghaaowd, I. and McCartney, J. S. 2018. "Large-scale combination direct shear/simple shear device for tire-derived aggregate". *Geotech. Test. J.*, 41(2): 20160245.
- Fu, R., Li, X. Q. and Coop, M. R. 2014. "The mechanics of a compressive sand mixed with tyre rubber". *Géotech. Lett.*, 4: 238-243.
- Garga, V. K. and O'Shaughnessy, V. 2000. "Tire-reinforced earthfill. Part 1: Construction of a test fill, performance, and retaining wall design". *Can. Geotech. J.*, 37(1): 75-96.
- Humphrey, D. and Manion, W. 1992. "Properties of tire chips for lightweight fill". *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, American Society of Civil Engineers, New Orleans, pp. 1344-1355.
- Jafarian, Y., Haddad, A. and Javdanian, H. 2016. "Estimating the shearing modulus of Boushehr calcareous sand using resonant column and cyclic triaxial experiments". *Modares Civ. Eng. J.*, 15(4): 9-19.
- Javdanian, H. 2017. "The effect of geopolymerization on the unconfined compressive strength of stabilized fine-grained soils". *Int. J. Eng.-Trans. B: Appl.*, 30(11): 1673-1680.
- Javdanian, H., Haddad, A. and Jafarian, Y. 2015. "Evaluation of dynamic behavior of fine-grained soils using group method of data handling". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 1(3): 77-92.
- Javdanian, H., Haddad, A. and Mehrzad, B. 2012. "Experimental and numerical investigation of the bearing capacity of adjacent footings on reinforced soil". *Electron. J. Geotech. Eng.*, 17: 2597-2617.
- Kjartanson, B. H., Lohnes, R. A., Yang, S., Kerr, M. L., Zimmerman, P. S. and Gebhardt, M. A. 1993. "Use of waste tires in civil and environmental construction". Final Report, Iowa Department of Natural Resources Landfill Alternatives Financial Assistance Program.
- Ladd, R. 1978. "Preparing test specimens using undercompaction". *Geotech. Test. J.*, 1(1): 16.
- Lee, J. H., Salgado, R., Bernal, A. and Lovell, C. W. 1999. "Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 125(2): 132-141.
- Lee, J. S., Dodds, J. and Santamarina, J. C. 2007. "Behavior of rigid-soft particle mixtures". *J. Mater. Civ. Eng.*, 19(2): 179-184.
- Lee, C., Shin, H. and Lee, J. S. 2014. "Behavior of sand-rubber particle mixtures: Experimental observations and numerical simulations". *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 32: 189-213.
- Mashiri, M. S. 2014. "Monotonic and cyclic behaviour of sand-tyre chip (STCh) mixtures". Wollongong.
- Mashiri, M. S., Vinod, J. S., Neaz Sheikh, M. and Tsang, H. H. 2015. "Shear strength and dilatancy behaviour of sand-tyre chip mixtures". *Soils Found.*, 55(3): 517-528.
- Meles, D., Bayat, A., Hussien Shafiee, M., Nassiri, S. and Gul, M. 2014. "Investigation of tire derived aggregate as a fill material for highway embankment". *Int. J. Geotech. Eng.*, 8(2): 182-190.
- Neaz Sheikh, M., Mashiri, M. S., Vinod, J. S. and Tsang, H. H. (2013), "Shear and compressibility behavior of sand-tire crumb mixtures". *J. Mater. Civ. Eng.*, 25(10): 1366-1374.
- Rao, G. V. and Dutta, R. K. 2006. "Compressibility and strength behaviour of sand-tyre chip mixtures". *Geotech. Geol. Eng.*, 24(3): 711-724.
- Rezazadeh Eidgahee, D. and Hosseininia, E. S. 2013. "Mechanical behavior modeling of sand-rubber chips mixtures using discrete element method (DEM)". *AIP Conference Proceedings*, 1542(1): 269-272.
- Rezazadeh Eidgahee, D., Haddad, A. and Naderpour, H. 2018. "Evaluation of shear strength parameters of granulated waste rubber using artificial neural networks and group method of data handling". *Scient. Iranica*, (In Press), available at: <https://doi.org/10.24200/sci.2018.5663.1408>.
- Rubber-Manufacturers-Association (RMA). 2016. "2015 U.S. Scrap Tire Management Summary". Washington DC, USA, available at: https://www.ustires.org/publications_bulletins?publication_categories=398.
- Shafabakhsh, G. H., Sadeghnejad, M. and Sajed, Y. 2014. "Case study of rutting performance of HMA modified with waste rubber powder". *Case Stud. Constr. Mater.*, 1: 69-76.
- Tafreshi, S. N. M., Mehrjardi, G. T. and Dawson, A. R. 2012. "Buried pipes in rubber-soil backfilled trenches

- under cyclic loading". J. Geotech. Geoenviron. Eng., 138(11): 1346-1356.
- Tatlisoz, N., Edil, T. B. and Benson, C. H. 1998. "Interaction between reinforcing geosynthetics and soil-tire chip mixtures". J. Geotech. Geoenviron. Eng., 124(11): 1109-1119.
- Tsang, H. H. 2008. "Seismic isolation by rubber-soil mixtures for developing countries". Earthq. Eng. Struct. Dyn., 37(2): 283-303.
- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). 2008. "Managing end-of-life tires".
- Yoon, S., Prezzi, M., Siddiki, N. Z. and Kim, B. 2006. "Construction of a test embankment using a sand-tire shred mixture as fill material". Waste Manage., 26(9): 1033-1044.
- Zornberg, J. G., Cabral, A. R. and Viratjandr, C. 2004. "Behaviour of tire shred-sand mixtures". Can. Geotech. J., 41(2): 227-241.