

ارزیابی مقاومت برشی و میزان خردشدگی مخلوط ماسه‌ی کربناته و خرده‌لاستیک

Research Note

نادر شریعتمداری (استاد)

حسن عشقی‌نژاد* (کارشناس ارشد)

محسن نوروزی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

سواحل خلیج فارس در جنوب ایران از ماسه‌های کربناته پوشیده شده است. مهم‌ترین ویژگی رفتاری ماسه‌های کربناته، خردشدگی ذرات آن تحت برش است که منجر به کاهش مقاومت برشی می‌شود و در رفتار تنش - کرنش خاک تأثیر می‌گذارد. از سوی دیگر، با توجه به حجم بالای حمل و نقل در مناطق مذکور، معضل انباشته شدن لاستیک‌های فرسوده و پیامدهای زیست‌محیطی آن، یکی از نگرانی‌های جدی است. استفاده از ضایعات لاستیکی مخلوط با خاک به‌عنوان مصالح پرکننده‌ی پشت دیوارهای حائل می‌تواند راهکاری مناسب برای کاهش معضلات زیست‌محیطی ناشی از انباشته شدن لاستیک‌های فرسوده باشد. در مطالعه‌ی حاضر، آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم‌یافته و زهکشی‌شده روی مخلوط ماسه‌ی کربناته و خرده‌لاستیک با ۰، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درصد حجمی کل مخلوط با تراکم‌های نسبی ۳۰ و ۶۰ درصد و در فشارهای همه‌جانبه‌ی ۱۰۰، ۳۵۰ و ۶۰۰ کیلوپاسکال انجام و مقاومت برشی و میزان خردشدگی مخلوط ماسه‌ی کربناته و خرده‌لاستیک ارزیابی شده است.

واژگان کلیدی: خرده‌لاستیک، ماسه‌ی کربناته، مقاومت برشی، خردشدگی، محیط زیست.

shariatmadari@iust.ac.ir
eshghinezhad@civileng.iust.ac.ir
m_norouzi@iust.ac.ir

۱. مقدمه

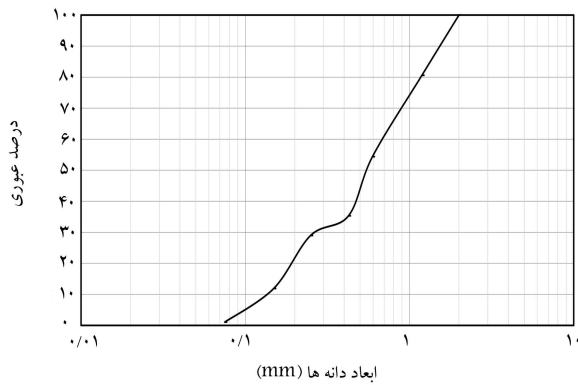
با افزایش تعداد وسائط نقلیه، بر میزان لاستیک‌های فرسوده‌ی انباشته‌شده افزوده می‌شود. امروزه، انباشته شدن لاستیک‌های فرسوده با توجه به طول عمر بالا، به یکی از نگرانی‌های زیست‌محیطی جدی تبدیل شده است. در حال حاضر در اتحادیه‌ی اروپا، ژاپن و ایالات متحده که از پیشگامان استفاده‌ی مجدد از ضایعات لاستیکی هستند، بین ۸۰ تا ۹۵ درصد از لاستیک‌های فرسوده، استفاده‌ی مجدد می‌شود.^[۱] در ایران، فقط بخش اندکی از لاستیک‌های فرسوده بازیافت می‌شوند و بخش اعظم آن‌ها در طبیعت رها و یا در خوشبینانه‌ترین حالت در مراکز دفن بهداشتی انباشته می‌شوند. تجمع تیره‌های فرسوده در مراکز دفن، می‌تواند سبب وقوع آتش‌سوزی، رشد جانوران موذی، شیوع بیماری‌ها، و مشکلات زیست‌محیطی بسیاری شود. از سوی دیگر، پُرشدن فضای مراکز دفن نیز یکی از مواردی است که مهندسان را به سمت استفاده از مصالح ذکرشده در مقاصد مهندسی سوق می‌دهد. ایده‌ی تسلیح خاک در سال ۱۹۶۹ معرفی شد،^[۱] و نشان داده شد که استفاده از المان تسلیح، مقاومت برشی خاک را افزایش می‌دهد. در فرانسه در سال ۱۹۸۴، برای اولین بار در خاکریزی یک دیوار حائل به ارتفاع ۵ متر و طول ۱۰ متر از لاستیک به‌عنوان المان تسلیح

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۴/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۵/۹/۲۴، پذیرش ۱۳۹۵/۱۲/۱۱.

DOI:10.24200/J30.2018.1565.1872

با وجود مطالعات فراوان صورت‌گرفته روی مقاومت برشی مخلوط ماسه و لاستیک فرسوده، در گزارش‌ها دوگانگی مشاهده می‌شود و بسته به اندازه‌ی ذرات



شکل ۱. منحنی دانه بندی ماسه.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی ماسه‌ی کر بنانه‌ی قشم.

پارامتر	مقدار
$D_{10} (mm)$	۰٫۱۳
$D_{30} (mm)$	۰٫۲۷
$D_{50} (mm)$	۰٫۵۴
$D_{60} (mm)$	۰٫۶۸
ضریب یکنواختی (C_U)	۵٫۲۳
ضریب انحنای (C_C)	۰٫۸۲

در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به ویژگی‌های ذکر شده در جدول، خاک مصرفی از نوع ماسه‌ی بد دانه بندی شده است.

چگالی ویژه ماسه ۲٫۶۶ (γ_d) و مقدار بیشینه و کمینه وزن مخصوص ($\gamma_d \max$) و ($\gamma_d \min$) ماسه‌ی کر بنانه‌ی قشم به ترتیب ۱۵٫۹۸ و ۱۳٫۲۴ کیلونیوتن بر مترمکعب است ($ASTM D 4253$) و ($ASTM D 4254$) نسبت منافذ بیشینه (e_{max}) ۰٫۹۷ و نسبت منافذ کمینه (e_{min}) ۰٫۶۳ است.

۲.۲. خرده لاستیک

همان‌طور که در بخش مقدمه ذکر شد، افزودن لاستیک‌های ضایعاتی با ابعاد بزرگ‌تر معمولاً موجب افزایش مقاومت ماسه‌ی سیلیکاته می‌شود و انتخاب ضایعات لاستیکی با ابعاد کوچک، تأثیری در افزایش مقاومت ندارد. همچنین با توجه به استانداردهای موجود، اندازه‌ی نمونه باید دست‌کم ۶ برابر قطر ذرات مورد آزمایش باشد، تا اثر اندازه‌ی ذرات در نتیجه‌ی آزمایش تأثیر نداشته باشد و موجب خطا نشود. با توجه به اینکه قطر نمونه‌ی دستگاه آزمایش سه محوری در مطالعه‌ی حاضر ۷۰ میلی‌متر است، سعی شده است که بزرگ‌ترین اندازه‌ی ممکن برای ضایعات لاستیک انتخاب شود، که برابر ۱۰ میلی‌متر است. با توجه به نتایج ارائه شده توسط گاتلند، جهت قرار گرفتن تراشه‌های لاستیک در مقاومت برشی تأثیرگذار است (در صورتی که نسبت ابعادی بیش از ۱ باشد).^[۳۵] لاستیک فرسوده‌ی استفاده شده در مطالعه‌ی حاضر پس از بیرون کشیدن سیم‌ها به صورت قطعات مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 8$ میلی‌متر خرد شده است (شکل ۲). علت انتخاب خرده لاستیک با ابعاد 10×10 ، از بین بردن تأثیر جهت‌گیری قرار گرفتن خرده‌های لاستیک در سطح برش، در مقاومت برشی مخلوط است. مقدار چگالی ویژه خرده لاستیک استفاده شده در آزمایش‌ها برابر ۱٫۱ بوده است، که در محدوده‌ی بین ۱٫۲ تا ۱٫۳ گزارش شده توسط سایر پژوهشگران قرار دارد.^[۳۸، ۱۹، ۱۷، ۷]

ماسه و لاستیک فرسوده، افزایش یا کاهش مقاومت برشی گزارش شده است. در تمامی پژوهش‌هایی که افزودن لاستیک‌های فرسوده (خرده لاستیک یا تکه‌های لاستیک) تا درصد معینی سبب افزایش مقاومت برشی شده است، از تکه‌های لاستیک با ابعاد بیش از ۱ سانتی‌متر استفاده شده است.^[۲۲-۱۷، ۷] همچنین در مطالعاتی که پژوهشگران با افزودن خرده لاستیک، کاهش مقاومت برشی را گزارش کرده‌اند، ابعاد لاستیک‌های ضایعاتی کمتر از ۵ میلی‌متر بوده است.^[۲۶-۲۳] مطالعات نشان می‌دهد که مدول برشی مخلوط‌های خاک و لاستیک اندک است و نسبت میرایی بالایی دارند.^[۲۹-۲۷] با افزودن تکه‌های لاستیک به خاک، شکل پذیری مخلوط به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.^[۲۶-۲۳، ۱۸، ۷] خاک‌های کر بنانه عموماً در مناطق گرم حاره‌ی و استوایی و نیز در مناطق دارای ذخایر نفت و گاز، از جمله سواحل کشور استرالیا، هند، و نیز سواحل خلیج فارس یافت می‌شوند.^[۳۰] این خاک‌ها به صورت معمول به دو شکل سیمان و غیرسیمانه با چگالی کاملاً متغیر در طبیعت یافت می‌شوند. مهم‌ترین ویژگی خاک‌های مذکور، خوردشدگی دانه‌های آن‌ها در برابر بارهای معمول است. در اثر بارگذاری و خوردشدگی دانه‌ها، خاک دچار تغییر حجم می‌شود و مشکلات جدی بروز می‌کند. در حین ساخت و ساز روی خاک‌های ذکر شده، علاوه بر خوردشدگی شدید، مشکلات سازشی بسیاری ناشی از مقاومت کم شمع‌ها، ظرفیت باربری پایین گزارش شده است.^[۳۲، ۳۱] برخی پژوهشگران نیز با تعریف خوردشدگی به صورت تابعی از نسبت تنش مؤثر، بیان کردند که خوردشدگی حین بارگذاری برشی بسیار بیشتر از خوردشدگی پس از تحکیم نمونه است.^[۳۳] ماسه‌های کر بنانه به دلیل نرم و شکننده بودن دانه‌هایشان در حین برش دچار شکستگی می‌شوند. شکستن دانه‌ها در حین برش موجب کاهش حجم نمونه و بغرنج شدن مفهوم حالت بحرانی می‌شود. در حالت بحرانی ماسه به یک حالت پایدار خواهد رسید، به گونه‌ی که تنش‌های تماسی بین دانه‌ها برای شکستگی بیشتر دانه‌ها کافی نخواهد بود.^[۳۴]

در آزمایش سه محوری، حالت بحرانی در واقع تعادل بین کاهش حجم ناشی از خوردشدگی و اتساع ناشی از آرایش مجدد دانه‌هاست.^[۳۵] با افزایش تنش همه‌جانبه، خوردشدگی خاک رخ می‌دهد و از شدت رفتار اتساعی خاک کاسته می‌شود.^[۳۶] با توجه به اینکه خاک‌های ذکر شده هم از نظر منشأ و هم از نظر رفتار مهندسی نسبت به خاک‌های متداول و معمول سیلیکاته متفاوت هستند،^[۳۷] لذا شناسایی دقیق و بررسی چگونگی رفتار آن‌ها در اثر افزودن خرده لاستیک ضرورت دارد. موقعیت ویژه‌ی مناطق جنوبی ایران در حوزه‌ی ترانزیت کالا و به تبع آن تولید بیشتر لاستیک‌های فرسوده از یک سو و مشکلات دفن ضایعات مورد اشاره‌ی با ارزش از نظر زیست محیطی و اقتصادی از سوی دیگر، اهمیت شناخت دقیق رفتار مخلوط ماسه‌ی کر بنانه و لاستیک را دو چندان می‌کند. در مطالعه‌ی حاضر، با استفاده از آزمایش‌های سه محوری تحکیم یافته و زهکشی شده، تأثیر افزودن خرده لاستیک‌های ضایعاتی در مقاومت برشی ماسه‌های کر بنانه‌ی جزیره‌ی قشم بررسی و در انتها رفتار خوردشدگی ماسه‌ی کر بنانه در اثر افزودن خرده لاستیک ارزیابی شده است.

۲. مصالح مصرفی

۱.۲. ماسه

ماسه‌ی مصرفی در مطالعه‌ی حاضر، ماسه‌ی کر بنانه‌ی جزیره‌ی قشم با درصد کر بنات کلسیم ۵۳٫۸٪ است که از منطقه‌ی درگهان در شمال جزیره‌ی قشم تهیه شده است. منحنی دانه بندی در شکل ۱ و مشخصات فیزیکی ماسه‌ی مورد آزمایش

جدول ۲. وزن مخصوص مخلوط‌های ماسه و لاستیک.

نمونه	$\gamma_{d \min} (\frac{KN}{m^3})$	$\gamma_{d \max} (\frac{KN}{m^3})$	$\gamma_{Dr=30\%} (\frac{KN}{m^3})$	$\gamma_{Dr=60\%} (\frac{KN}{m^3})$
ماسه خالص	۱۳,۲۳	۱۵,۹۷	۱۴,۰۰	۱۴,۸۰
مخلوط ۱۰٪	۱۲,۵۴	۱۵,۲۹	۱۳,۳۰	۱۴,۱۰
مخلوط ۱۵٪	۱۲,۱۵	۱۴,۹۰	۱۲,۹۰	۱۳,۷۰
مخلوط ۲۰٪	۱۱,۸۶	۱۴,۶۰	۱۲,۶۰	۱۳,۴۰
مخلوط ۳۰٪	۱۱,۲۷	۱۳,۷۲	۱۱,۹۰	۱۲,۶۰

جدول ۳. وزن ماسه و خرده‌لاستیک مورد نیاز برای ساخت نمونه.

درصد حجمی لاستیک (%)	تراکم ۳۰٪		تراکم ۶۰٪	
	وزن ماسه (گرم)	وزن خرده‌لاستیک (گرم)	وزن ماسه (گرم)	وزن خرده‌لاستیک (گرم)
۰	۷۲۶	۰	۷۶۸	۰
۱۰	۶۶۱	۲۷	۷۰۱	۲۹
۱۵	۶۲۸	۳۹	۶۶۷	۴۲
۲۰	۶۰۰	۵۰	۶۳۸	۵۳
۳۰	۵۴۲	۶۸	۵۷۵	۷۲

که در آن: D_r تراکم نسبی نمونه، γ_d وزن مخصوص مخلوط، $\gamma_{d \min}$ وزن مخصوص مخلوط در سست‌ترین حالت، $\gamma_{d \max}$ وزن مخصوص مخلوط در متراکم‌ترین حالت، γ_m وزن مخصوص ماتریس، هستند.

پس از محاسبه‌ی $\gamma_{Dr} = 30\%$ و $\gamma_{Dr} = 60\%$ که مقادیر آن در جدول ۲ نمایش داده شده است، با استفاده از روابط ۲ و ۳، وزن خرده‌لاستیک و ماسه برای هر کدام از نمونه‌ها به دست آمده است. در جدول ۳، مقادیر ماسه و خرده‌لاستیک برای ساخت هر نمونه به تفکیک ذکر شده است.

$$\gamma_m = \frac{w_s}{v_m - v_t \left(\frac{G_t}{G_s} \right)} \quad (2)$$

$$w_t = \left(R \frac{G_t}{G_s} \right) w_s \quad (3)$$

که در آن‌ها: w_s وزن خاک خشک، V_m حجم قالب، V_t حجم خرده‌لاستیک، G_t و G_s چگالی ویژه خرده‌لاستیک و ماسه، R درصد حجمی لاستیک در مخلوط، هستند.

در مطالعه‌ی حاضر، نمونه‌ها براساس روش بارش خشک ارائه شده در برخی مطالعات،^[۳۹، ۴۰] انجام شده‌اند. چون اندازه‌ی لاستیک‌ها بزرگ بود، به جای استفاده از قیف با قطر دهانه‌ی ۱۳ میلی‌متر، از یک قاشق برای ریختن خاک درون قالب استفاده شده است.^[۴۱] قطر و ارتفاع قالب سه‌محوری به ترتیب ۷ و ۱۴ میلی‌متر است. برای دست یافتن به شرایط اشباع کامل، ابتدا گاز کربن دی‌اکسید با فشار معین و سپس آب هواگیری شده از نمونه عبور داده می‌شوند. در انتها، پس فشاری معادل ۲۰۰ کیلوپاسکال به نمونه اعمال می‌شود و پارامتر فشار آب منفذی اسکیمپتون (B-Value) کنترل می‌شود که مقدار آن دست‌کم برابر ۰/۹۵ در نظر گرفته می‌شود.^[۴۲] پارامتر B به صورت رابطه‌ی ۴ تعریف می‌شود:

$$B = \frac{\Delta U}{\Delta \sigma} \quad (4)$$

که در آن، ΔU تغییرات فشار آب حفره‌یی و $\Delta \sigma$ تغییرات فشار مؤثر جانبی است. کلیه‌ی آزمایش‌ها با نرخ کرنش ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه و به صورت کرنش کنترل انجام

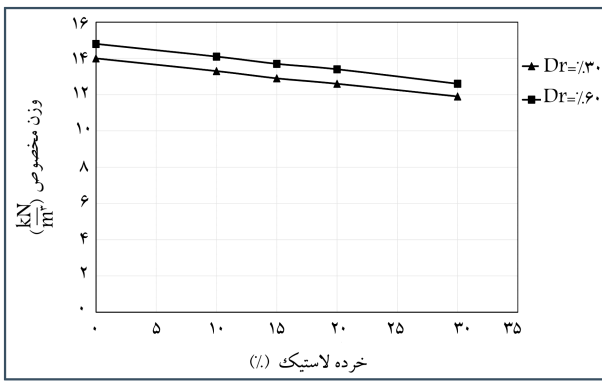


شکل ۲. خرده‌لاستیک استفاده شده در آزمایش‌ها.

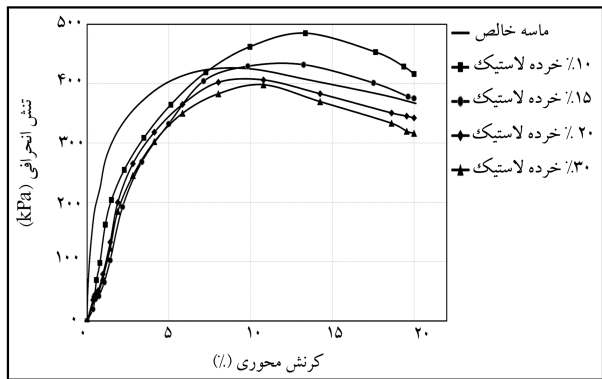
۳. آماده‌سازی نمونه‌ها و برنامه‌ی آزمایش

برنامه‌ی آزمایش شامل آزمایش سه‌محوری تحکیم یافته‌ی زهکشی شده (CD) براساس استاندارد ASTM D ۷۱۸۱-۱۱ با فشار همه‌جانبه‌ی مؤثر ۱۰۰، ۳۵۰ و ۶۰۰ کیلوپاسکال است. درصدهای حجمی خرده‌لاستیک استفاده شده در خاک ۰، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ بوده است که در ۳ مرحله درون قالب ریخته و نمونه‌هایی با تراکم نسبی ۳۰ و ۶۰ درصد آزمایش شدند. به منظور ساخت نمونه‌هایی با تراکم نسبی ۳۰ و ۶۰ درصد لازم است ابتدا وزن مخصوص کمینه و بیشینه‌ی مخلوط‌های مختلف ماسه و لاستیک با استفاده از استانداردهای ASTM D۴۲۵۳ و ASTM D۴۲۵۴ تعیین شود. سپس با استفاده از رابطه‌ی ۱، مقدار وزن مخصوص مخلوط برای درجه‌ی تراکم نسبی ۳۰ و ۶۰ درصد به دست آمده است. مقادیر محاسبه شده در جدول ۲ نشان داده شده است.

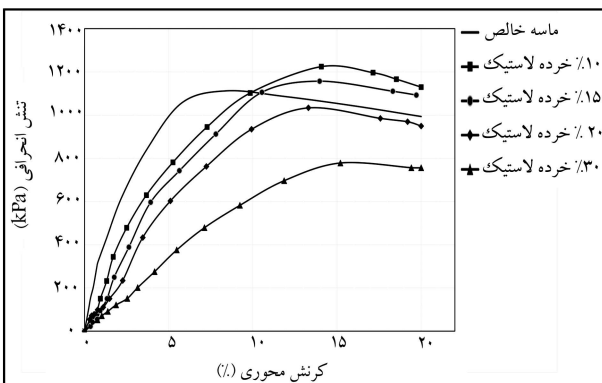
$$D_r = \left(\frac{\gamma_d - \gamma_{d \min}}{\gamma_{d \max} - \gamma_{d \min}} \right) \left(\frac{\gamma_{d \max}}{\gamma_d} \right) \quad (1)$$



شکل ۴. تغییرات وزن مخصوص با افزایش درصد لاستیک.



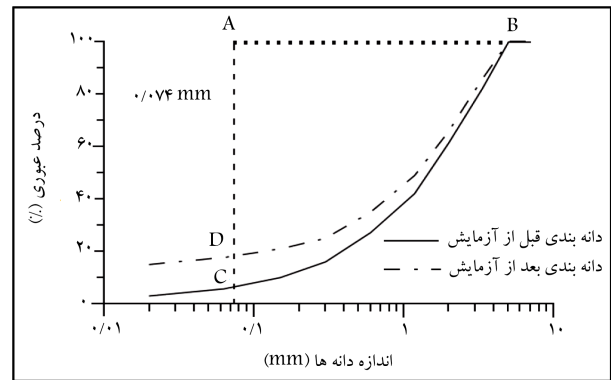
شکل ۵. نمودار تنش انحرافی - کرنش محوری، تراکم نسبی ۳۰٪ و فشار همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ کیلوپاسکال.



شکل ۶. نمودار تنش انحرافی - کرنش محوری، تراکم نسبی ۳۰٪ و فشار همه‌جانبه‌ی ۳۵۰ کیلوپاسکال.

۲.۴. اثر خرده‌لاستیک در مقاومت برشی

به منظور بررسی مقاومت برشی، نمودارهای مقاومت برشی مخلوط ماسه‌ی کربناته و خرده‌لاستیک در دو تراکم نسبی ۳۰٪ و ۶۰٪ و فشارهای همه‌جانبه‌ی ۱۰۰، ۳۵۰ و ۶۰۰ کیلوپاسکال رسم شدند. همان‌طور که از نتایج مشاهده می‌شود، در نمونه‌های سست ($D_r = 30\%$)، با افزودن ۱۰٪ خرده‌لاستیک، مقاومت برشی مخلوط نسبت به ماسه‌ی خالص افزایش یافته است (شکل‌های ۵ الی ۷ برای فشار همه‌جانبه‌ی ۱۰۰، ۳۵۰ و ۶۰۰ کیلوپاسکال). در نمونه‌های نیمه‌تراکم ($D_r = 60\%$)، مقاومت برشی مخلوط در تنش همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ کیلوپاسکال نسبت به ماسه‌ی کربناته‌ی خالص در همان تراکم نسبی کمی افزایش (شکل ۸) و در تنش همه‌جانبه‌ی ۳۵۰



شکل ۳. روش هاردین برای محاسبه‌ی خردشدگی.

می‌گیرد. آزمایش‌های مذکور با استفاده از دستگاه آزمایش سه محوری ELE ساخت کشور انگلستان در مرکز تحقیقات ژئوتکنیک دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شده است.

در مطالعه‌ی حاضر، تعداد ۳۰ آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته و زهکشی‌شده روی ماسه‌ی کربناته‌ی جزیره‌ی قشم و مخلوط ماسه و لاستیک با ۰، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درصد حجمی کل مخلوط در دو تراکم نسبی ۳۰ و ۶۰ درصد، در فشارهای همه‌جانبه‌ی ۱۰۰، ۳۵۰ و ۶۰۰ کیلوپاسکال انجام شدند. همچنین به‌منظور بررسی پارامتر خردشدگی، تمامی نمونه‌ها پس از پایان آزمایش، مجدداً دانه‌بندی شدند و با استفاده از روش هاردین، ضریب خردشدگی محاسبه شد. هاردین برای تعیین مقدار خردشدگی ذرات از تغییرات کل منحنی دانه‌بندی استفاده کرده است (شکل ۳). براساس روش مذکور، خردشدگی ذرات زمانی به انتها می‌رسد که منحنی دانه‌بندی به یک حالت پایدار برسد. هاردین این حالت را زمانی پایدار دانست که همه‌ی ذرات کوچک‌تر از الک نمره ۲۰۰ رد شوند. خردشدگی خاک به‌صورت نسبت تغییرات منحنی دانه‌بندی قبل و بعد از آزمایش به کل تغییر ممکن محاسبه می‌شود (رابطه‌ی ۵).

$$B_r = \frac{B_t}{B_p}$$

$$\text{symbol Area}_{BCDB} B_t =$$

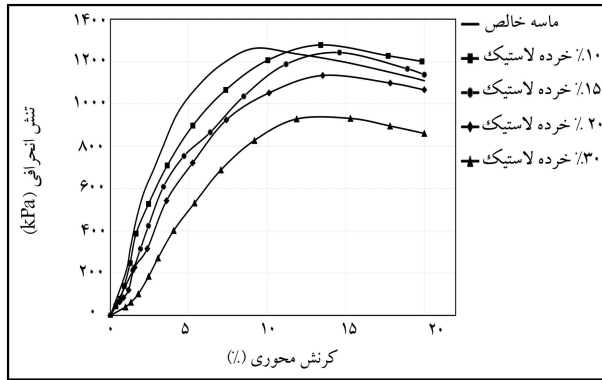
$$B_p = \text{Area}_{ABCD} \quad (5)$$

که در آن B_r ، ضریب خردشدگی است.

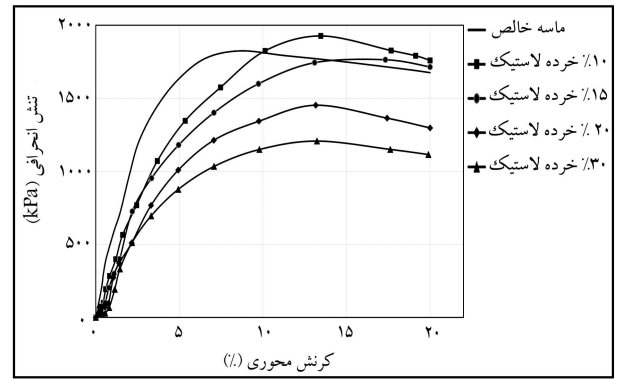
۴. نتایج آزمایش‌ها

۱.۴. تغییرات وزن مخصوص

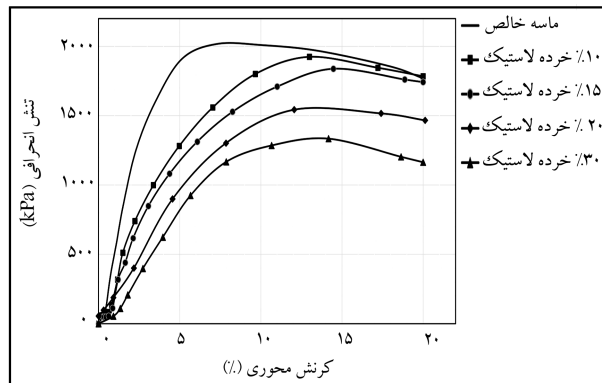
با توجه به کم‌تر بودن وزن مخصوص لاستیک نسبت به ماسه‌ی کربناته، افزودن خرده‌لاستیک به ماسه سبب کاهش وزن مخصوص مخلوط با شیب تقریباً ثابتی می‌شود که بیانگر اثر سبک‌سازی افزودن لاستیک به خاک است. در واقع با افزودن ۳۰٪ خرده‌لاستیک به ماسه‌ی کربناته، وزن مخصوص نمونه‌های با تراکم ۳۰٪ از ۱۴ به ۱۱/۹ و نمونه‌های با تراکم ۶۰٪ از ۱۴/۸ به ۱۲/۶ کاهش می‌یابد (۱۵٪). کاهش وزن مخصوص مخلوط نسبت به ماسه‌ی خالص، این موضوع در شکل ۴ مشاهده می‌شود.



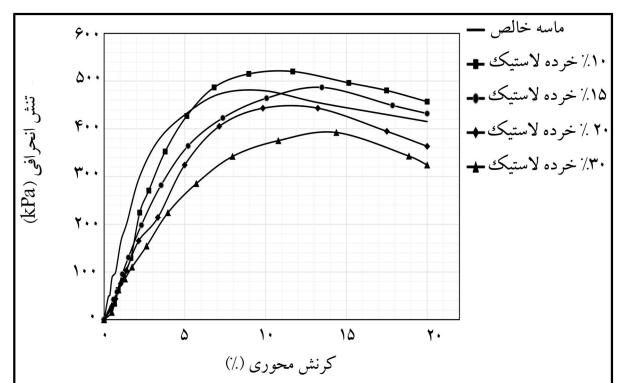
شکل ۹. نمودار تنش انحرافی - کرنش محوری، تراکم نسبی ۶۰٪ و فشار همه جانبه‌ی ۳۵۰ کیلو پاسکال.



شکل ۷. نمودار تنش انحرافی - کرنش محوری، تراکم نسبی ۳۰٪ و فشار همه جانبه‌ی ۶۰۰ کیلو پاسکال.



شکل ۱۰. نمودار تنش انحرافی - کرنش محوری، تراکم نسبی ۶۰٪ و فشار همه جانبه‌ی ۶۰۰ کیلو پاسکال.



شکل ۸. نمودار تنش انحرافی - کرنش محوری، تراکم نسبی ۶۰٪ و فشار همه جانبه‌ی ۱۰۰ کیلو پاسکال.

با توجه به اینکه خرده لاستیک در کشش عمل می‌کند، تغییر حجم بیشتر سبب می‌شود که کرنش کششی بیشتری در لاستیک مشاهده شود. به همین دلیل افزایش مقاومت برشی در تنش همه جانبه‌ی پایین، محسوس تر است. این موضوع با نتایج برخی مطالعات، [۱۸] هم خوانی دارد.

۲. با توجه به خواص ماسه‌ی کربناته، باید اثر هم‌زمان خردشدگی و افزایش مقاومت ناشی از افزودن لاستیک را مدنظر قرارداد (مباحث مربوط به خردشدگی در بخش ۵.۴ توضیح داده شده است). با افزایش تنش همه جانبه، خردشدگی ماسه‌ی کربناته افزایش می‌یابد. وقوع خردشدگی متناظر با کاهش زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک است. از طرفی میزان ۱۰٪ لاستیک به عنوان مقدار بهینه‌ی افزایش مقاومت مخلوط در نظر گرفته شد. یعنی از طرفی قفل و بست بین دانه‌ها موجب افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی و از سوی دیگر، وقوع خردشدگی موجب کاهش زاویه‌ی اصطکاک داخلی می‌شود.

کاهش مقاومت برشی مخلوط ۱۰٪ در صد حجمی با تراکم نسبی ۶۰٪ در تنش همه جانبه‌ی ۶۰۰ را می‌توان به صورت برآیند این موارد تفسیر کرد:

- با افزودن ۱۰ تا ۱۵ درصد حجمی کل نمونه‌ی لاستیک به خاک، تکه‌های لاستیک در سطح برش، ذرات ماسه را احاطه و حفره‌های موجود را پر می‌کنند و موجب افزایش مقاومت برشی مخلوط می‌شوند.
- تنش محصورکننده‌ی ۶۰۰ کیلو پاسکال به ذرات تیرگوشه‌ی ماسه‌های کربناته، فشار بیشتری وارد می‌کند و سبب خردشدن ذرات کربناته می‌شود، که این خردشدگی سبب کاهش مقدار زاویه‌ی اصطکاک می‌شود.

کیلو پاسکال، مقدار افزایش مقاومت کاهش یافته است، اما همچنان مقاومت برشی مخلوط، ۱۰٪ بیش از ماسه‌ی خالص بوده است (شکل ۹). در تنش همه جانبه‌ی ۶۰۰ کیلو پاسکال، ماسه‌ی خالص بیشترین مقاومت برشی را داشته و افزودن خرده‌های لاستیک، سبب کاهش مقاومت برشی شده است.

با افزایش بیش از ۱۰٪ خرده‌لاستیک در مخلوط، مقاومت برشی مخلوط کاهش می‌یابد. در واقع در مخلوط ۱۰٪ حجمی خرده‌لاستیک و ماسه‌ی کربناته با تراکم نسبی ۳۰٪، در فشار همه جانبه‌ی ۱۰۰ کیلو پاسکال به میزان ۱۴٪ افزایش مقاومت مشاهده می‌شود. در حالی که در فشارهای همه جانبه‌ی ۳۵۰ و ۶۰۰ کیلو پاسکال، میزان افزایش مقاومت به ترتیب ۱٪ و ۵٪ بوده است (شکل‌های ۵ الی ۷).

در تراکم نسبی ۶۰٪، مقاومت برشی مخلوط ۱۰٪ حجمی نسبت به ماسه‌ی خالص، در تنش همه جانبه‌ی ۱۰۰ کیلو پاسکال، ۸٪ افزایش پیدا کرده است. در تنش همه جانبه‌ی ۳۵۰ کیلو پاسکال فقط ۱٫۵٪ افزایش مشاهده می‌شود و در تنش همه جانبه‌ی ۶۰۰ کیلو پاسکال، نه فقط افزایش مقاومتی مشاهده نمی‌شود، بلکه ۵٪ کاهش مقاومت مشاهده می‌شود. هر چه تنش‌های همه جانبه افزایش می‌یابد و نیز نمونه متراکم‌تر می‌شود، نقش خرده‌لاستیک در افزایش مقاومت برشی مخلوط کم‌رنگ‌تر می‌شود. در مطالعه‌ی حاضر، بهینه‌ترین مقدار افزودن خرده‌لاستیک به ماسه، ۱۰٪ حجمی است (شکل‌های ۸ الی ۱۰).

در بررسی نمودارهای اخیر، اثر هم‌زمان چندین عامل در افزایش یا کاهش مقاومت برشی دخیل است، که در اینجا به آن پرداخته شده است:

۱. تنش‌های محصورکننده‌ی پایین، اجازه‌ی تغییر حجم بیشتری به نمونه می‌دهند و

کتر از ۳۵° کیلوپاسکال محاسبه و پس از آن پوش گسیختگی غیرخطی شده است.

برای ذرات در مخلوط ماسه و لاستیک، ۳ نوع تماس بین ذرات تشکیل دهنده را می‌توان متصور شد: ۱. تماس ماسه با ماسه، ۲. تماس ماسه با لاستیک و ۳. تماس لاستیک با لاستیک. در حالت ماسه‌ی خالص، تمامی تماس‌های بین ذرات از نوع اول است و با توجه به تیزگوشه بودن برخی از ذرات ماسه‌ی کربناته، قفل و بست بین ذرات و همچنین زاویه‌ی اصطکاک داخلی بیشتر بوده است. با افزایش میزان لاستیک در مخلوط، تماس بین ذرات از نوع لاستیک با لاستیک و نیز لاستیک با خاک افزایش می‌یابد و با توجه به کمتر بودن اصطکاک بین تماس‌های ذکرشده از اصطکاک بین ذرات ماسه با یکدیگر مشاهده می‌شود که در هر دو حالت سست و نیمه‌متراکم، زاویه‌ی اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد، که مقدار آن در حالت سست بیشتر است.

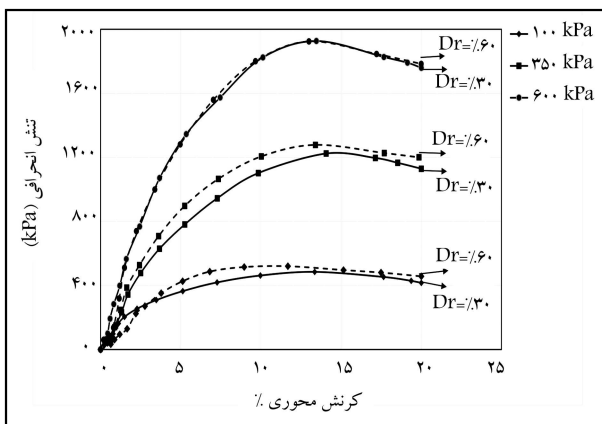
۴.۴. اثر تراکم و تنش همه‌جانبه

به منظور بررسی تأثیر تراکم نسبی نمونه‌ها و همچنین تنش همه‌جانبه‌ی اعمال شده بر نمونه‌ها، نمودارهای تنش- کرنش در دو تراکم ۳۰٪ و ۶۰٪ و در ۳ تنش همه‌جانبه‌ی ۱۰۰، ۳۵۰ و ۶۰۰ کیلوپاسکال برای درصد‌های لاستیک ۰٪ تا ۳۰٪ رسم شد که برای نمونه به ذکر یک مورد آن اکتفا شده است (شکل ۱۱).

با بررسی نمودار مذکور مشاهده می‌شود که منحنی تنش - کرنش برای درجه تراکم‌های ۳۰٪ و ۶۰٪ تقریباً بر هم منطبق است. همچنین با افزایش تنش همه‌جانبه، مقاومت برشی نمونه‌ها به مقدار قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. این مطلب توسط بسیاری از پژوهشگران گزارش شده است و از جمله نکاتی است که پژوهشگران درباری آن اتفاق نظر دارند. صرف‌نظر از وجود یا عدم وجود لاستیک در مخلوط، این موضوع را می‌توان به‌صورت ساده با استفاده از نظریه‌ی گسیختگی موهر - کلمب توجیه کرد ($\tau = \sigma \tan \varphi + c$) با افزایش تنش همه‌جانبه، مقاومت برشی نیز افزایش می‌یابد.

۵.۴. خردشدگی

به منظور بررسی خردشدگی ماسه‌ی کربناته در مخلوط‌های آزمایش شده از پارامتر ضریب خردشدگی (رابطه‌ی ۵) استفاده^[۲۴] و مقادیر ضریب خردشدگی نمونه‌ها در جدول ۶ ارائه شده است.



شکل ۱۱. نمودار تنش انحرافی - کرنش مخلوط ۱۰٪.

• تنش محصورکننده، علاوه بر اینکه سبب خردشدگی بیشتر ذرات ماسه کربناته می‌شود، موجب محدودشدن تغییر حجم‌ها در نمونه نیز می‌شود و مقاومت کششی تکه‌های لاستیک به‌صورت کامل بسیج نمی‌شود، که این مسئله نیز موجب کاهش زاویه‌ی اصطکاک می‌شود.

در انتها می‌توان گفت هر چه نمونه متراکم‌تر باشد، افزایش مقاومت برشی ناشی از افزودن خرده‌لاستیک به خاک کمتر است، که در برخی دیگر از پژوهش‌ها،^[۲۵،۱۸] نیز گزارش شده است (برای نمونه با تراکم نسبی ۰.۵٪، افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی به میزان ۵/۹٪ گزارش شده است، در حالی که برای تراکم نسبی ۰.۷۵٪، ۲/۹٪ گزارش شده است).^[۲۰]

در واقع مکانیزم اصلی تسلیخ خرده‌های لاستیک، در مخلوط‌های خاکی در تراکم‌های پایین است و با افزایش درجه‌ی تراکم، از میزان افزایش مقاومت برشی کاسته می‌شود و در برخی موارد حتی موجب کاهش مقاومت برشی مخلوط نسبت به ماسه‌ی خالص می‌شود. با افزودن لاستیک به ماسه‌ی کربناته در تمامی تنش‌های همه‌جانبه مشاهده می‌شود که کرنش نظیر نقطه‌ی گسیختگی افزایش می‌یابد و در واقع مصالح شکل‌پذیرتر می‌شوند.

۳.۴. پارامترهای مقاومت برشی

ماسه‌ی خالص فاقد چسبندگی است، ولی با افزایش درصد خرده‌لاستیک در مخلوط، مقدار چسبندگی به‌تدریج افزایش می‌یابد. پس از رسم دایره‌ی موهر برای مخلوط‌های مختلف، هم‌زمان با کاهش زاویه‌ی اصطکاک داخلی، چسبندگی در خاک ظاهر می‌شود. در نوشتار حاضر، به منظور درک بهتر و مقایسه‌ی درست نمونه‌ها از مفهوم زاویه‌ی اصطکاک داخلی معادل استفاده شده است. در واقع، در روش مذکور مقدار چسبندگی به سمت صفر میل داده می‌شود و زاویه‌ی اصطکاک معادل آن به‌دست می‌آید. این اصطلاح پیش از این در برخی دیگر از مطالعات نیز ارائه شده است.^[۲۳،۱۹،۱۸] پارامترهای مقاومت برشی در دو حالت سست و نیمه‌متراکم برای مخلوط‌های مختلف به ترتیب در جدول‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. زاویه‌ی اصطکاک معادل در محدوده‌ی تنش

جدول ۴. پارامترهای مقاومت برشی در تراکم نسبی ۳۰٪.

نمونه	φ (°)	c (kPa)	φ_{eq} (°)
ماسه خالص	۳۴	۰	۳۴
مخلوط ۱۰٪	۳۴	۲۹	۳۷
مخلوط ۱۵٪	۲۹	۳۰	۳۲٫۶۲
مخلوط ۲۰٪	۲۶	۳۱	۲۹٫۹۵
مخلوط ۳۰٪	۱۳	۸۵	۲۵٫۳۵

جدول ۵. پارامترهای مقاومت برشی در تراکم نسبی ۶۰٪.

نمونه	φ (°)	c (kPa)	φ_{eq} (°)
ماسه خالص	۳۶	۰	۳۶
مخلوط ۱۰٪	۳۲	۴۳	۳۶٫۷۹
مخلوط ۱۵٪	۳۱	۳۵	۳۵
مخلوط ۲۰٪	۲۸	۳۱	۳۱٫۸۱
مخلوط ۳۰٪	۲۲	۴۴	۲۷٫۹۱

۲.۵.۴. اثر تنش همه‌جانبه و تراکم نسبی

بررسی نمودار در شکل ۱۲ نشان می‌دهد که همواره ضریب خردشدگی نمونه‌های سست بیش از نمونه‌های نیمه متراکم است. در واقع با افزایش درجه‌ی تراکم نسبی، صرف‌نظر از وجود یا عدم وجود لاستیک، خردشدگی ذرات ماسه‌ی کربناته کاهش یافته است.

با توجه به اینکه ماسه‌ی مورد بررسی از نوع کربناته است، با بررسی شکل و نحوه‌ی قرارگیری ذرات می‌توان پدیده‌ی خردشدگی را توجیه کرد. دانه‌های ماسه‌ی کربناته به‌صورت ذرات صفحه‌یی و کروی در چند نقطه در تماس با یکدیگر قرار دارند. با فرض اینکه نیروی ثابتی به ذرات اعمال شود، اگر تعداد نقاط اتکای ذرات کم باشد و نیرو بیش از مقاومت تماسی در محل اتکا باشد، ماسه دچار خردشدگی می‌شود. حال اگر چینش دانه‌ها تغییر کند و تعداد نقاط اتکای بین ذرات افزایش یابد و همان نیرو به ذرات اعمال شود، نیرو بین تعداد نقاط تکیه‌گاهی بیشتری تقسیم می‌شود و نیروی وارد شده در سطح تماس کاهش می‌یابد و اگر تنش وارده در سطح اتکا کمتر از مقاومت تماسی باشد، خردشدگی اتفاق نمی‌افتد.

با کاهش تراکم نسبی در یک تنش همه‌جانبه‌ی ثابت، نسبت منافذ درون نمونه افزایش می‌یابد و تعداد نقاط تماس بین ذرات کاهش می‌یابد. کاهش تعداد نقاط تماس بین دو ذره سبب می‌شود که نیروی بیشتری در سطح اتکا به ذرات وارد شود که منجر به خردشدگی بیشتر می‌شود. در درجه‌ی تراکم ثابت در اثر افزایش تنش همه‌جانبه، فشار وارده به ذرات کربناته و در نتیجه سطح تماس بین ذرات کربناته و همچنین خردشدگی افزایش می‌یابد. همان‌طور که در جدول ۶ نیز مشاهده می‌شود، با افزایش تنش همه‌جانبه از مقدار ۱۰۰ کیلوپاسکال به ۶۰۰ کیلوپاسکال، ضریب خردشدگی ماسه‌ی خالص با تراکم ۳۰٪ از ۰٫۶۵ به ۰٫۸۹ (۱۴۷٪ افزایش) و در ماسه با تراکم ۶۰٪ از ۰٫۳۶ به ۰٫۸۹ رسیده است (۱۴۷٪ افزایش).

۵. نتیجه‌گیری

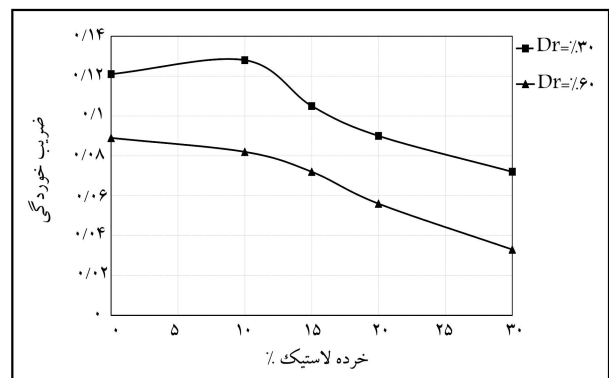
۱. در مخلوط ۱۰٪ با تراکم نسبی ۳۰٪، در تنش‌های همه‌جانبه‌ی ۱۰۰، ۳۵۰ و ۶۰۰ کیلوپاسکال، مقاومت برشی مخلوط ماسه و لاستیک نسبت به ماسه‌ی خالص به ترتیب به میزان ۱۴٪، ۱۰٪ و ۵٪ افزایش می‌یابد.

۲. در مخلوط ۱۰٪ با تراکم نسبی ۶۰٪، در تنش‌های همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ و ۳۵۰ کیلوپاسکال مقاومت برشی مخلوط ماسه و لاستیک نسبت به ماسه‌ی خالص به ترتیب ۸٪ و ۱٫۵٪ افزایش، و در تنش همه‌جانبه‌ی ۶۰۰ کیلوپاسکال، ۵٪ کاهش می‌یابد.

۳. یکی از کاربردهای اصلی مخلوط‌های ذکر شده در پروژه‌های عملی، استفاده از آن‌ها در اجرای خاکریزهای مختلف، از جمله پشت سازه‌های نگهدارنده است. به دلیل سبکی لاستیک در مقایسه با خاک، استفاده از مخلوط باعث سبک‌سازی و کاهش نیروی وارده به سازه‌ی نگهدارنده می‌شود، ضمن آنکه می‌تواند باعث افزایش مقاومت توده‌ی خاک پشت دیوار نیز شود. با توجه به افزایش بیشتر مقاومت برشی نمونه‌های سست در تنش همه‌جانبه‌ی پایین توصیه می‌شود که از مخلوط‌های مذکور در لایه‌های بالایی خاکریز استفاده شود و تنش‌های همه‌جانبه در محدوده‌ی کمتر از ۳۵۰ کیلوپاسکال باشد.

جدول ۶. مقادیر ضریب خردشدگی نمونه‌های مختلف.

نمونه	$\sigma (KPa)$	تراکم ۳۰٪	تراکم ۶۰٪
ماسه‌ی خالص	۱۰۰	۰٫۶۵	۰٫۳۶
مخلوط ۱۰٪	۱۰۰	۰٫۷۴	۰٫۳۷
مخلوط ۱۵٪	۱۰۰	۰٫۶۷	۰٫۳۴
مخلوط ۲۰٪	۱۰۰	۰٫۶۱	۰٫۳۱
مخلوط ۳۰٪	۱۰۰	۰٫۵۲	۰٫۲۸
ماسه‌ی خالص	۳۵۰	۰٫۹۲	۰٫۵۳
مخلوط ۱۰٪	۳۵۰	۰٫۸۵	۰٫۶۹
مخلوط ۱۵٪	۳۵۰	۰٫۷۳	۰٫۶۰
مخلوط ۲۰٪	۳۵۰	۰٫۷۵	۰٫۵۵
مخلوط ۳۰٪	۳۵۰	۰٫۶۷	۰٫۱۹
ماسه‌ی خالص	۶۰۰	۱٫۲۱	۰٫۸۹
مخلوط ۱۰٪	۶۰۰	۱٫۲۸	۰٫۸۲
مخلوط ۱۵٪	۶۰۰	۱٫۰۵	۰٫۷۲
مخلوط ۲۰٪	۶۰۰	۰٫۹۰	۰٫۵۶
مخلوط ۳۰٪	۶۰۰	۰٫۷۲	۰٫۳۳



شکل ۱۲. نمودار تغییرات ضریب خردشدگی با افزودن خرده‌لاستیک برای ۲ حالت سست و نیمه متراکم.

در ادامه، تأثیر افزودن خرده‌لاستیک و اثر تراکم و تنش همه‌جانبه در ضریب خردشدگی بررسی شده است:

۱.۵.۴ اثر افزودن خرده‌لاستیک

در تراکم نسبی ۳۰٪، با افزودن ۳۰٪ خرده‌لاستیک، ضریب خردشدگی در تنش‌های همه‌جانبه‌ی ۱۰۰، ۳۵۰ و ۶۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب ۲۰٪، ۲۷٪ و ۴۰٪ نسبت به ماسه‌ی خالص کاهش یافته است. در تراکم نسبی ۶۰٪، با افزودن ۳۰٪ خرده‌لاستیک، ضریب خردشدگی در تنش‌های همه‌جانبه‌ی ۱۰۰، ۳۵۰ و ۶۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب ۲۲٪، ۶۴٪ و ۶۳٪ کاهش یافته است. در شکل ۱۲، تغییرات پارامتر ضریب خردشدگی ۱۰ نمونه‌ی آزمون شده در فشار همه‌جانبه‌ی ۶۰۰ کیلوپاسکال (مخلوط‌های ۰، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درصد حجمی در تراکم‌های ۳۰٪ و ۶۰٪) بر حسب افزایش درصد لاستیک در مخلوط نشان داده شده است.

وجود لاستیک در نمونه سبب می‌شود تا اتکای بین دانه‌های ماسه با یکدیگر کاهش پیدا کند و ذرات تیز گوشه‌ی ماسه‌ی کربناته به تکه‌های لاستیک انعطاف‌پذیر متکی و کمتر دچار خردشدگی شوند. در واقع، برخورد بین ذرات از نوع ماسه با ماسه کاهش یابد و برخورد‌های ماسه با لاستیک و لاستیک با لاستیک جایگزین شود.

۴. وجود لاستیک در مخلوط‌های ماسه‌ی کربناته، کرنش گسیختگی را افزایش و سبب شکل پذیرتر شدن نمونه‌ها می‌شود.
۵. با افزایش درصد لاستیک در مخلوط ماسه و لاستیک، زاویه‌ی اصطکاک داخلی کاهش و چسبندگی افزایش می‌یابد.
۶. چسبندگی مشاهده‌شده در نمونه‌ها، ناشی از مکانیزم تسلیح لاستیک در خاک است. برای مقایسه‌ی هم‌زمان اثر زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی از مفهوم زاویه‌ی اصطکاک داخلی معادل استفاده می‌شود. زاویه‌ی اصطکاک داخلی معادل با افزودن ۱۰٪ خردلاستیک در تراکم‌های ۳۰٪ و ۶۰٪ به ترتیب به میزان ۸/۸٪ و ۲/۲٪ افزایش می‌یابد.
۷. در یک تنش همه‌جانبه و درصد لاستیک یکسان، افزایش تراکم تأثیر چندانی در افزایش مقاومت برشی مخلوط ندارد. بنابراین متراکم‌کردن نمونه‌ها برای دستیابی به مقاومت برشی بیشتر توصیه‌پذیر نیست.
۸. در مخلوط ۳۰٪ خردلاستیک در درجه‌ی تراکم ۳۰٪، ضریب خردشدگی در تنش‌های همه‌جانبه‌ی ۱۰۰، ۳۵۰ و ۶۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب ۲۰٪، ۲۷٪ و ۴۰٪ نسبت به ماسه‌ی خالص کاهش یافته است.
۹. در تراکم نسبی ۶۰٪، با افزودن ۳۰٪ خردلاستیک، ضریب خردشدگی در تنش‌های همه‌جانبه‌ی ۱۰۰، ۳۵۰ و ۶۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب ۲۲٪، ۶۴٪ و ۶۳٪ کاهش یافته است.
۱۰. خردشدگی در نمونه‌های سست بیش از نمونه‌های نیمه‌متراکم است. در تمامی نمونه‌ها، افزودن خردلاستیک موجب کاهش ضریب خردشدگی ماسه‌ی کربناته می‌شود.
۱۱. خردشدگی ماسه‌ی کربناته با افزایش تنش همه‌جانبه، افزایش می‌یابد. هر چه درصد خردلاستیک در مخلوط بیشتر باشد، افزایش خردشدگی کمتر خواهد بود.

منابع (References)

1. ETRMA, Annual Report (2012) (www.etrma.org/).
2. Vidal, H. "The principle of reinforced earth", Highway Research Record, 282, pp. 1-16 (1969).
3. Sayao, A.S.F.J., Gerscovich, D., Medeiros, L. and et al. "Scrap tire-an attractive material for gravity retaining walls and soil reinforcement", *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, **35**(3), pp. 135-155 (2009).
4. Kim, K.S., Yoon, Y.W. and Yoon, G.L. "Pullout behavior of cell-type tires in reinforced soil structures", *KSCIE Journal of Civil Engineering*, **15**(7), pp. 1209-1217 (2011).
5. Hazarika, H., Kohama, E. and Sugano, T. "Underwater shake table tests on waterfront structures protected with tire chips cushion", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **134**(12), pp. 1706-1719 (2008).
6. Lee, J.H., Salgado, R., Bernal, A. and et al. "Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **125**(2), pp. 132-141 (1999).
7. Bosscher, P.J., Edil, T.B. and Kuraoka, S. "Design of highway embankments using tire chips", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **123**(4), pp. 295-304 (1997).
8. Edinçliler, A. "Using waste tire-soil mixtures for embankment construction", *In Proceedings of the International Workshop on Scrap Tire Derived Geomaterials-Opportunities and Challenges*, Yokosuka, Japan, pp. 319-328 (2007).
9. Reddy, K.R. and Saichek, R.E. "Characterization and performance assessment of shredded scrap tires as leachate drainage material in landfills", *In Proc., 14th International Conf. on Solid Waste Technology and Management*, pp. 2A-2A (1998).
10. Senetakis, K. and Anastasiadis, A. "Effects of state of test sample, specimen geometry and sample preparation on dynamic properties of rubber-sand mixtures", *Geosynthetics International*, **22**(4), pp. 301-310 (2015).
11. Humphrey, D.N., and Sandford, T.C. "Tire chips as lightweight subgrade fill and retaining wall backfill", *In Proceedings of the Symposium on Recovery and Effective Reuse of Discarded Materials and By-Products for Construction of Highway Facilities*, pp. 5-87 (1993).
12. Ahmed, I. "Laboratory study on properties of rubber-soils", FHWA/IN/JHRP-93/04, Joint Highway Research Project, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana (1993).
13. Heimdahl, T.C. and Drescher, A. "Elastic anisotropy of tire shreds", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **125**(5), pp. 383-389 (1999).
14. Lee, J.H., Salgado, R., Bernal, A. and et al. "Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **125**(2), pp. 132-141 (1999).
15. O'Shaughnessy, V. and Garga, V.K. "Tire-reinforced earthfill. Part 2: Pull-out behaviour and reinforced slope design", *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(1), pp. 97-116 (2000).
16. Edil, T. and Bosscher, P.J. "Engineering properties of tire chips and soil mixtures", **17**(4), pp. 453-464 (1994).
17. Foote, G.J., Benson, C.H. and Bosscher, P.J. "Sand reinforced with shredded waste tires", *Journal of Geotechnical Engineering*, **122**(9), pp. 760-767 (1996).
18. Zornberg, J.G., Cabral, A.R. Viratjandr, Ch. "Behaviour of tire shred sand mixtures", *Canadian Geotechnical Journal*, **41**(2), pp. 227-241 (2004).

19. Ghazavi, M. and Sakhi, M.A. "Influence of optimized tire shreds on shear strength parameters of sand", *International Journal of Geomechanics*, **5**(1), pp. 58-65 (2005).
20. Rao, G.V. and Dutta, R.K. "Compressibility and strength behaviour of sand-tyre chip mixtures", *Geotechnical & Geological Engineering*, **24**(30), pp. 711-724 (2006).
21. Reddy, S.B., Kumar, D.P. and Krishna, A.M. "Evaluation of the optimum mixing ratio of a sand-tire chips mixture for geoenvironmental applications", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **28**(2), pp. (2015).
22. Vinod, J.S., Sheikh, N., Mastello, D. and et al. "The direct shear strength of sand-tyre shred mixtures", *Proceedings of the International Conference on Geotechnical Engineering*, pp. 193-196 (2015).
23. Masad, E., Taha, R., Ho, C. and et al. "Engineering properties of tire/soil mixtures as a lightweight fill material", *Geotechnical Testing Journal*, **19**(3), pp. 297-304 (1996).
24. Youwai, S. and Bergado, D.T. "Strength and deformation characteristics of shredded rubber tire sand mixtures", *Canadian Geotechnical Journal*, **40**(2), pp. 254-264 (2003).
25. Kawata, S., Hyodo, M., Orense, P. and et al. "Undrained and drained shear behavior of sand and tire chips composite material", *In Proceedings of the International Workshop on Scrap Tire Derived Geomaterials-Opportunities and Challenges*, Yokosuka, Japan, pp. 277-283 (2007).
26. Neaz Sheikh, M., Mashiri, M.S., Vinod, J.S. and et al. "Shear and Compressibility behavior of sand-tire crumb mixtures", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **25**(10), pp. 1366-1374 (2012).
27. Anastasiadis, A., Senetakis, K. and Pitilakis, K. "Small-strain shear modulus and damping ratio of sand-rubber and gravel-rubber mixtures", *Geotechnical and Geological Engineering*, **30**(2), pp. 363-382 (2012).
28. Kaneko, T., Orense, R.P., Hyodo, M. and et al. "Seismic response characteristics of saturated sand deposits mixed with tire chips", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **139**(4), pp. 633-643 (2012).
29. Anbazhagan, P., Mamatha, M., Soumyashree, P. and et al. "Laboratory characterization of tire crumbs soil mixture for developing low cost damping materials", *Int. J. Earth. Sci. Eng.*, **4**(6), pp. 63-66 (2011).
30. Airey, D.W. "Triaxial testing of naturally cemented carbonate soil", *Journal of Geotechnical Engineering*, **119**(9), pp. 1379-1398 (1993).
31. Wang, X.-Z., Jiao, Y.-Y., Wang, R. and et al. "Engineering characteristics of the calcareous sand in Nansha Islands, South China Sea", *Engineering Geology*, **120**(1), pp. 40-47 (2011).
32. Brandes, H.G. "Simple shear behavior of calcareous and quartz sands", *Geotechnical and Geological Engineering*, **29**(1), pp. 113-126 (2011).
33. Datta, M., Gulhati, S.K. and Rao, G.V. "Crushing of calcareous sands during drained shear", *Society of Petroleum Engineers Journal*, **20**(2), pp. 77-85 (1980).
34. Baharom, B. and Stallebrass, S.E. "A constitutive model combining the microscopic and macroscopic behaviour of sands in shear and volumetric deformation", *In Application of Numerical Methods to Geotechnical Problems*, pp. 263-272. Springer Vienna (1998).
35. Chandler, H.W. "A plasticity theory without Drucker's postulate, suitable for granular materials", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **33**(3), pp. 215-226 (1985).
36. Doherty, P., Spagnoli, G. and Doherty, M. "Laboratory investigations to assess the feasibility of employing a novel mixed-in-place offshore pile in calcareous deposits", *Ships and Offshore Structures*, **10**, pp. 1-11 (2015).
37. Shahnazari, H. and Rezvani, R. "Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: An experimental study", *Engineering Geology*, **159**, pp. 98-105 (2013).
38. Humphrey, D.N. "Civil engineering applications of tire shreds", *In Proceedings of the Tire Industry Conference*, Clemson University, pp. 1-16 (1999).
39. Bishop, A.W. and Henkel, D.J. "The measurement of soil properties in the triaxial test", London: E. Arnold (1960).
40. Ladd, R. "Preparing test specimens using undercompaction", *ASTM, Geotechnical Testing Journal*, **1**(1), pp. 16-23 (1978).
41. Mashiri, M.S., Vinod, J.S., Neaz Sheikh, M. and et al. "Shear strength and dilatancy behaviour of sand-tyre chip mixtures", *Soils and Foundations*, **55**(3), pp. 517-528 (2015).
42. Ghazavi, M. "Shear strength characteristics of sand-mixed with granular rubber", *Geotechnical & Geological Engineering*, **22**(3), pp. 401-416 (2004).
43. Gotteland, Ph., Lambert, S. and Balachowski, L. "Strength characteristics of tyre chips-sand mixtures", *Studia Geotechnica et Mechanica*, **27**(1-2), pp. 55-66 (2005).
44. Hardin, B.O. "Crushing of soil particles", *Journal of Geotechnical Engineering*, **111**(10), pp. 1177-1192