

# بررسی تأثیر افزودن خرده لاستیک صنعتی در خواص فیزیکی و مکانیکی مصالح رس کائولینیتی

میلاد تاج دینی\* (دانشجوی دکتری)

حسین زرتاج (دانشجوی دکتری)

دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

حسن طاهرخانی (استادیار)

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۳۹۶)  
دوره ۲-۱۳۳، شماره ۲/۲، ص. ۹۹-۱۰۹، (پاداشت فنی)

امروزه روش های متعددی برای اصلاح خصوصیات فیزیکی و رفتار مکانیکی خاک های نامناسب موجود است. روش های مذکور شامل: تراکم، تحکیم، پیش بارگذاری، تزریق، تشبیت با افزودن مواد شیمیایی و ... است. امروزه به کارگیری خرده لاستیک فرسوده جهت تسلیح خاک ها، روشی مناسب برای افزایش مقاومت و ظرفیت باربری خاک هاست. استفاده از خرده لاستیک علاوه بر جنبه های تأثیر آن در پارامترهای مقاومتی خاک می تواند تأثیر به سزایی در بازیافت این مواد دور ریز ایجاد کند. در پژوهش حاضر، آزمایش های مقاومت برشی بر روی مصالح رس کائولینی به عنوان مصالح مینا و همچنین با افزودن خرده لاستیک به عنوان مصالح مسلح شده انجام شده است. آزمایش ها شامل آزمایش سه محوری در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده و همچنین آزمایش های نسبت باربری کالیفرنیا بر روی هر دو مصالح است. نتایج آزمایش ها بهبود پارامترهای مقاومت برشی و شکل پذیری رس های مسلح شده با خرده لاستیک را نسبت به رس مینا نشان می دهد.

واژگان کلیدی: خاک رس مینا، خاک رس مسلح شده، خرده لاستیک فرسوده، آزمایش سه محوری، آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا.

## ۱. مقدمه

نسوز و ... کاربرد وسیعی دارند. از سوی دیگر با توجه به صنعتی شدن جوامع، تولید ضایعات لاستیک در سال های گذشته به شدت رو به افزایش است.<sup>[۱]</sup> از آنجا که این مواد زائد به راحتی تجزیه نمی شوند، انباشتگی غیر کنترل شده آن ها باعث وقوع مشکلات و به خطر انداختن سلامت جامعه و مردم می شود که از اهم آن می توان به تولید شیرابهی مضر در مدفن آن ها و تولید گرمای زیاد و گازهای سمی حاصل از سوزاندن آن ها و ... اشاره کرد.

بسیاری به صنعت بازیافت فقط از دید محیط زیستی و حمایت های آن می نگرند یا اینکه به صنعتی که دست کم مواد اولیه ارزان و در دسترس داشته است که این امر بازدهی چندان مطلوبی ندارد. با توجه به بحث های انجام شده و با در نظر گرفتن اینکه اتحادیه های اروپا و آمریکا، صنعت اتومبیل سازی و تیرسازی گسترده بی دارند، از دیرباز با معضل انباشتگی حجیم تیرهای فرسوده و اثرات زیست محیطی آن مواجه بوده اند، امروزه مشاهده می شود که با انجام مطالعات و ایجاد صنایع بازیافت و کاربری مفید، موفق به کاهش دپوی تیرهای فرسوده و استفاده ی بهینه از آن ها شده اند.

از مزایای استفاده از لاستیک و خرده لاستیک می توان به وزن سبک آن نسبت

واژه ی کائولین از سلسله جبال بلند کائولینگ به معنی قله ی مرتفع در ناحیه ی جیانگسی در کشور چین گرفته شده است که از خاک چینی سفید رنگ تشکیل شده است. کائولین با نام کانی شناسی کائولینیت با فرمول شیمیایی  $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$  در سیستم تری کلینیک و سختی حدود ۲/۵-۱ و نقطه ذوب آن  $1785^{\circ}C$  است. رنگ آن سفید مایل به زرد و گاهی هم کمی سبز یا آبی رنگ است و طعم خاک دارد و به صورت مرطوب، بوی شدید خاک می دهد. کانی مذکور اغلب حالت خمیری دارد و عملاً در آب، اسیدهای سرد و رقیق، اسید کلریدریک و اسید سولفوریک گرم و غلیظ و یدروکسیدهای قلیایی نامحلول حل می شود. از انواع رس مذکور در طبیعت می توان به رس تویی، هالوزیت، دیکیت و ناگریت اشاره کرد.

از دلایل استفاده ی فراوان این کانی می توان به: پرکننده و پوشش دهنده ی مناسب، نرم کننده ی سطح و غیرسایشی، قابلیت اندک هدایت جریان الکتریسیته و گرما و خواص کاتالیزوری آن اشاره کرد که در صنایع مصالح ساختمانی، سرامیک، مصالح

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۴/۸/۲۶، پذیرش ۱۳۹۴/۹/۱۷.

به خاک (حدود یک سوم چگالی خشک خاک)، پایداری زیاد، ضریب فشار جانبی کم (برای خاک با مخلوط خرده لاستیک حدود ۰/۵)، شکل پذیری زیاد (به ویژه در بارگذاری‌های سیکلیک) و ... اشاره کرد، که این عوامل استفاده از آن‌ها را در پشت دیوارهای حائل از جنبه‌های فنی و اقتصادی مورد توجه قرار می‌دهد.<sup>[۲۱]</sup>

ظرفیت باربری و نشست ماسه‌ی مسلح‌شده با لاستیک از طریق آزمایش بارگذاری صفحه‌ی مورد مطالعه قرار گرفته (۲۰۰۴) و نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که ظرفیت باربری ماسه‌ی سست مسلح‌شده با تیرهای فرسوده بیش از ۲ برابر ظرفیت باربری ماسه‌ی سست است و همچنین کاهش نشست ناشی از تسلیج با ترکیب آج لاستیک و کناره‌های لاستیک بیش از ۷۰٪ برای ماسه‌ی سست و بیش از ۳۴٪ برای ماسه‌ی متراکم بوده است.<sup>[۱]</sup>

همچنین در همان سال، تحلیل عددی دیوار حائل مسلح‌شده با استفاده از مخلوط تراشه‌ی لاستیک‌های فرسوده و ماسه به‌عنوان مصالح مورد استفاده با به‌کارگیری برنامه‌ی عددی FLAC بررسی و نتیجه شده است که با افزایش وزن تراشه‌های لاستیکی در مخلوط، حرکات جانبی دیوار و ضریب فشار جانبی خاک افزایش می‌یابد و نیز با افزایش سختی مسلح‌کننده، مجموع نیروی کششی نرمال‌شده افزایش و تغییرشکل‌های جانبی دیوار کاهش یافته است.<sup>[۲]</sup>

رفتار مخلوط ماسه-تراشه‌ی لاستیک با آزمایش سه‌محوری (۲۰۰۴) بررسی شده و این نتیجه به‌دست آمده است که نمونه‌هایی که فقط شامل تراشه‌های لاستیک بودند، رفتار تنش انحرافی-کرنش محوری خطی و رفتار کرنش حجمی انقباضی دارند. پوش مقاومت برشی نمونه‌ی تراشه‌ی لاستیک خالص، خطی و مقدار چسبندگی آن ناچیز بوده است. مقاومت برشی مخلوط ماسه-تراشه‌ی لاستیک با افزایش نسبت مقدار تراشه‌ی لاستیک افزایش یافته است. همچنین مطالعاتی در زمینه‌ی میزان درصد جرمی خرده لاستیک، که براساس آن بیشینه‌ی مقاومت برشی حاصل می‌شود، صورت گرفته و مشخص شده است که جرم بهینه‌ی خرده لاستیک در حدود ۳۵٪ جرم مخلوط است.<sup>[۳]</sup>

با استفاده از درصد‌های وزن مختلفی از ماسه و لاستیک (۰، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد) در سال ۲۰۰۴ نیز به بررسی مقاومت برشی نمونه‌ها پرداخته و برای تمام آزمایش‌ها دو حالت تراکمی در نظر گرفته شده است. نتایج پژوهش نشان داده است که تنش نرمال وارده، وزن مخصوص مخلوط و میزان لاستیک به‌کاررفته در تنش برشی تأثیرگذار است و همچنین براساس نتایج آن‌ها در تمامی مخلوط‌ها، نقطه‌ی اوج در نمودار تنش-کرنش مشاهده شده است که بسته به مقدار لاستیک به‌کار برده شده تغییر کرده است. همچنین افزایش مقاومت برشی به‌صورت یک روند افزایشی با اضافه کردن لاستیک‌ها ارتباط نداشته است.<sup>[۴]</sup>

در مطالعاتی در سال ۲۰۰۵ نیز تحقیقات نشان داده است که به علت وزن مخصوص کم این مصالح در مقایسه با خاک فقط می‌توان خصوصیات و پارامترهای مقاومتی خاک را بهبود بخشید. در آزمایش‌های انجام‌شده بر روی شیب‌های خاک مسلح با خرده‌تایر توسط دستگاه سانتریفیوژ با اندازه‌های مختلفی از ارتفاع شیروانی نسبت به عمق بستر خاک نشان داده شده است که ضریب اطمینان شیروانی از ۲/۵ تا ۱۰ درصد افزایش یافته است.<sup>[۵]</sup>

همچنین در سال ۲۰۰۵ تأثیر اندازه‌ی تراشه‌ها در مقاومت برشی ماسه بررسی و از سه عرض ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر لاستیک استفاده شده است. لاستیک‌ها نیز با ۴ نسبت طول به عرض و میزان تراشه‌های مذکور ۱۵، ۳۰، ۵۰ درصد وزنی خاک در نظر گرفته شده و کلیه نمونه‌ها با وزن مخصوص ۱۵/۵ و ۱۶/۸ کیلونیوتن بر مترمکعب آزمایش شده‌اند. نتایج آزمایش‌های مذکور نشان داده است که پارامترهای تأثیرگذار در مقاومت برشی عبارت‌اند از: تنش نرمال وارده، وزن مخصوص، میزان

تراشه‌ها، عرض تراشه‌ها، و نسبت طول به عرض تراشه‌ها. نتایج به‌دست آمده نشان داده است که در نمونه‌های حاوی تراشه‌ی لاستیک، چسبندگی اضافه تا مقدار معینی مشاهده شده و پوش گسیختگی مور-کولمب به‌صورت غیرخطی در آمده است که این پدیده با افزایش مقدار تراشه بیشتر شده است.<sup>[۶]</sup>

در آزمایش‌های سه‌محوری انجام‌شده بر روی مخلوط خرده لاستیک و ماسه (۲۰۰۵)، دو موضوع مورد بررسی قرار گرفته است که شامل استفاده از خرده لاستیک با ماسه، با وزنی در حدود ۱۰۰ تا ۱۰ درصد وزن مخلوط و استفاده از خرده لاستیک با ماسه در ۴ جهت متفاوت (افقی، عمودی، افقی و عمودی به‌صورت هم‌زمان و به‌صورت تصادفی) بوده است. همچنین رفتار تنش-کرنش مخلوط‌های مختلف ماسه با خرده لاستیک مورد بررسی قرار گرفته و میزان زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی هر یک از مخلوط‌ها تعیین شده و هدف تعیین درصد جرمی و وزنی خرده لاستیک برای بیشینه‌ی مقاومت برشی بوده است. نتایج به‌دست آمده حاکی از درصد بهینه‌ی لاستیک در مخلوط در حدود ۱۵-۲۰ درصد وزن خشک خاک بوده است.<sup>[۷]</sup>

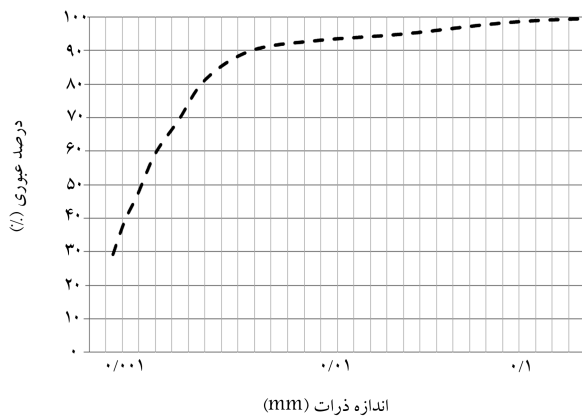
در مطالعه‌ی اثر مقدار و ابعاد خرده‌های لاستیک در پی‌های دایروی و میزان افزایش باربری و نشست پی (۲۰۰۵)، تغییرات نسبت C.B.R. (نسبت باربری پی در حالت خاک تقویت‌شده به باربری خاک تقویت‌نشده) در درصد‌های حجمی گوناگون از خرده لاستیک مورد بررسی قرار گرفته و برای انجام آزمایش‌ها از یک مخزن فلزی دایروی به قطر ۱ متر و ارتفاع ۱ متر با ۵ لایه خاک ۲۰ سانتی‌متری که هر لایه به گونه‌ی خاص متراکم شده بودند، استفاده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که با افزایش تعداد و ابعاد لاستیک، به ازاء یک میزان بار مشخص، میزان نشست کاهش پیدا کرده است.<sup>[۸]</sup> در بررسی اثر خرده لاستیک و الیاف مصنوعی (بای‌پروپیلن و پلی‌اتیلن ترفتلات) در خواص استاتیکی و دینامیکی خاک رس مسلح (۲۰۰۷)، نتیجه گرفته شده است که مدول برشی استاتیکی و دینامیکی با افزودن خرده لاستیک به مقدار بهینه (۵٪ وزنی)، افزایش و ضریب میرایی آن به مقدار مناسبی (حدود ۱۰٪) کاهش می‌یابد که سبب بهبود رفتار مصالح مسلح در برابر زمین‌لرزه شده است.<sup>[۹]</sup>

همچنین در سال ۲۰۰۸، با استفاده از مدل عددی به بررسی اثر مخلوط خرده لاستیک در پدیده‌هایی نظیر روان‌گرایی و نشست پرداخته شده است که در آن پارامترهایی نظیر: ارتفاع مخلوط و درصد خرده لاستیک نیز تغییر یافته است. با توجه به مطالعات پیشین، لاستیک قابلیت جذب انرژی مناسبی دارد؛ لذا حین زلزله، بخش اعظم بارهای وارده جذب شده و تغییرمکان‌های جانبی کاهش یافته است. علاوه بر این، مقاومت برشی مخلوط خاک و خرده لاستیک بیشتر از خاک تنها است، که این دو عامل سبب شده است که در مدل‌سازی مذکور از این نوع مخلوط استفاده شود و نتایج نشان داده است که استفاده از خرده لاستیک، باعث شده است که دامنه‌ی ارتعاشات و شتاب بارگذاری تا حد زیادی در هر دو حالت افقی و قائم کاهش یابد که این امر را می‌توان با استفاده از خاصیت جذب انرژی و نوسان لاستیک توجیه کرد.<sup>[۱۰]</sup>

مطالعاتی (۲۰۰۹) نیز به منظور بررسی اثر خرده لاستیک در میرایی و مدول برشی مخلوط با استفاده از آزمایش ستون تشدید پیشگی انجام شده و این نتیجه به‌دست آمده است که با افزایش میزان خرده لاستیک در مخلوط، مدول برشی مخلوط کاهش می‌یابد که به این دلیل است که خرده لاستیک خاصیت کشسان مخلوط را افزایش می‌دهد و بنابراین انتظار می‌رود که از میزان سختی مخلوط در مقابل بارگذاری کاسته شود.<sup>[۱۱]</sup>

در بررسی خواص مکانیکی مخلوط ماسه و خرده لاستیک (۲۰۰۹) و با توجه

توسط شرکت خاک چینی ایران واقع در شهرستان مرند تولید شده است. با توجه به اینکه بیش از ۹۵٪ ذرات خاک رس از الک نمره ۲۰۰ ریزتر بوده‌اند. به منظور تعیین دانه‌بندی آن از آزمایش هیدرومتری استفاده شده است، که نمودار دانه‌بندی آن در شکل ۱ و همچنین مشخصات فیزیکی آن در جدول ۱ ارائه شده است. مصالح دیگر مورد استفاده در پژوهش حاضر، خرده لاستیک با دو نوع دانه‌بندی مختلف با نام‌های تجاری G<sup>۳۰</sup> و G<sup>۸۰</sup> بوده است که از ضایعات شرکت کویر تاپر یزد در آزمایش‌ها تهیه شده است. در شکل ۲، شمای ظاهری و در شکل ۳، نمودار دانه‌بندی آن‌ها نشان داده شده است. یادآور می‌شود این دسته‌بندی به چرخه‌ی تولید لاستیک‌ها (نوع حرارت‌دهی و ترکیب‌های هیدروکربوی) بر می‌گردد و با افزایش عدد پس از G، مصالح خرده لاستیک وزن مخصوص کمتری می‌گیرند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، خرده لاستیک G<sup>۸۰</sup>، دانه‌بندی ریزتر و غیر یکنواخت‌تری نسبت به



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک رس کائولینیت.

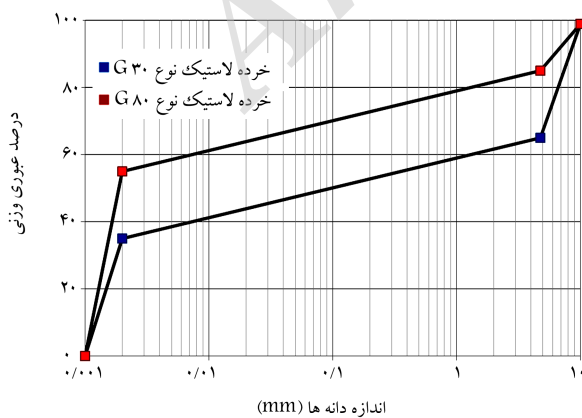


(ب) خرده لاستیک نوع G<sup>۸۰</sup>.



(الف) خرده لاستیک نوع G<sup>۳۰</sup>؛

شکل ۲. شکل ظاهری دو نوع خرده لاستیک.



شکل ۳. مقایسه‌ی دانه‌بندی خرده لاستیک‌های G<sup>۳۰</sup> و G<sup>۸۰</sup>.

به نتایج به‌دست آمده، مشخص شده است که افزودن پودر لاستیک به ماسه، موجب افزایش کرنش تسلیم در مخلوط شده است، در حالی که به طور هم‌زمان سختی و مقاومت نمونه کاهش یافته است. همچنین نتیجه گرفته شده است که دانه‌های ریز لاستیک، در واقع مواد مؤثری در جذب انرژی هستند و محدوده‌ی تنش را افزایش می‌دهند. افزودن خرده لاستیک به ماسه موجب کاهش مدول کشسانی مخلوط می‌شود، به طوری که می‌تواند به‌عنوان یک جاذب انرژی زلزله در هنگام وقوع آن عمل کند.<sup>[۱۲]</sup> در بررسی تأثیر افزودن خرده لاستیک و سیلیکافوم به خاک‌های رسی (۲۰-۱۳)، این نتیجه به‌دست آمده است که افزودن خرده لاستیک نسبت به سیلیکافوم، باعث افزایش مقاومت فشاری و برشی خاک مسلح می‌شود و همچنین پرکردن فضاهای خالی بین خاک، سبب کاهش نفوذپذیری خاک مسلح می‌شود که در نتیجه می‌توان از مصالح مذکور در سدهای خاکی کوچک استفاده کرد.<sup>[۱۳]</sup>

بنابراین، رفتار خاک‌های مسلح‌شده با خرده لاستیک بسیار پیچیده است و این پیچیدگی بیشتر ناشی از اندرکنش این دو نوع مصالح در کنار همدیگر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشتر مطالعات پیشین بر روی خاک‌های ماسه‌یی مسلح‌شده با خرده لاستیک بوده و پژوهش‌های چندانی بر روی رس مسلح صورت نگرفته است و با توجه به اندرکنش متفاوت رس با مصالح خرده لاستیک بهتر است آزمایش‌های متفاوتی بر روی این مصالح نیز انجام پذیرد که این بخش جنبه‌ی نوآرانه‌ی پژوهش حاضر است، زیرا خاک‌های رسی به مقادیر متناهی در طبیعت یافت می‌شوند و نیاز به بهسازی در آن‌ها بیشتر احساس می‌شود که کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. لذا در نوشتار حاضر سعی شده است تا پارامترهای مختلف تأثیرگذار در مقاومت برشی بین این دو ماده از جمله: نوع بارگذاری، مقدار، اندازه، و نوع خرده لاستیک و پارامترهای فیزیکی نظیر: مدول کشسانی و شکل‌پذیری بررسی شوند.

## ۲. دستگاه، مصالح و روش انجام آزمایش

### ۲.۱. دستگاه

جهت بررسی اندرکنش خرده لاستیک فرسوده و مصالح رس کائولینی از دستگاه سه‌محوری در دو شرایط تحکیم‌یافته‌ی زهکشی‌شده (CD) مطابق استاندارد ASTM D۲۸۵۰-۸۷ و تحکیم‌نیافته‌ی زهکشی‌نشده (UU) مطابق استاندارد ASTM D۴۶۷۶-۰۲ استفاده شده است. در این آزمایش، ابتدا مصالح تحت تنش قائم معینی قرار گرفته و سپس تنش برشی با سرعت ثابت ۱ میلی‌متر بر دقیقه به مصالح خاک مسلح وارد شده است تا نمونه گسیخته شود (آزمایش کرنش کنترل). ضمناً آزمایش‌های مذکور به این دلیل در سرعت نسبتاً کند ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است که بتوان رفتار تنش-کرنش را با دقت بیشتری بررسی کرد، زیرا در سرعت‌های نسبتاً تند، عموماً مصالح سختی بیشتری از خود نشان می‌دهند، که هدف پژوهش حاضر، یعنی اثر افزودن لاستیک در شکل‌پذیری و نرمی را ارضا نمی‌کند. همچنین آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (C.B.R.) نیز مطابق با استاندارد BS ۱۳۷۷-۱۹۷۵ انجام شده است، به طوری که در آن یک سنبه‌ی استوانه‌یی استاندارد، با سرعت نسبی نفوذ معین و برابر ۱ میلی‌متر در دقیقه به نمونه‌ها وارد شده است، تا میزان استحکام نسبی خاک نسبت به میزان مقاومت استاندارد سنجیده شود.

### ۲.۲. مصالح

مصالح خاکی مورد استفاده در پژوهش حاضر، رس بوده است که به عنوان کائولینیت

جدول ۱. مشخصات فیزیکی مصالح رسی.

طبقه بندی	چگالی ذرات خاک	حد خمیری (%)	حد روانی (%)	شاخص خمیری (%)	PH خاک
CL	۲٫۶	۲۵	۴۴	۱۹	۹٫۶

جدول ۲. مشخصات فیزیکی لاستیک [۱۴].

خصوصیات فیزیکی	زاویه اصطکاک	چسبندگی	نسبت پواسون	مدول ارتجاعی
مقادیر	۱۹-۲۶ درجه	۱-۵ کیلو پاسکال	۰٫۲-۰٫۳۵	۱-۲ مگاپاسکال

اکسیدکربن (CO<sub>2</sub>) به نمونه تزریق شده است. این عمل باعث شده است که هوای محبوس درون نمونه، جای خود را به گاز دی اکسیدکربن بدهد و این گاز در نهایت، با سرعت بیشتری با آب ترکیب شود و سرعت اشباع سازی نمونه افزایش یابد. لذا، این امر سبب کاهش مدت زمان لازم برای اشباع شدن نمونه از ۴۸ ساعت به ۲۴ ساعت شده است. همچنین برای آماده سازی نمونه ها جهت انجام آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (C.B.R.) خاک با درصد های مختلفی از خرده لاستیک به صورت خشک به خوبی مخلوط شده است، تا خرده لاستیک به صورت مساوی و یکسان در نمونه پخش شود. سپس با استفاده از آب پاش، آب به صورت مرحله به مرحله به مخلوط اضافه شده است، تا میزان رطوبت در کل نمونه کاملاً یکسان باشد. لازم به ذکر است که از نتایج آزمایش تراکم برای تهیه نمونه های آزمایش C.B.R. استفاده شده است. ذکر این نکته ضروری است که در پژوهش حاضر از نتایج آزمایش های مقاومت لازم برای نفوذ پیستون به مقدار ۲٫۵ میلی متر در مصالح مرغوب استفاده شده است.

با توجه به انتخاب مصالح، ادامه ی آزمایش ها در سه حالت: ۱. آزمایش سه محوری تحکیم یافته ی زهکشی شده بر روی نمونه های مینا و مسلح شده؛ ۲. آزمایش سه محوری تحکیم نیافته ی زهکشی نشده بر روی نمونه های مینا و مسلح شده؛ ۳. آزمایش تعیین نسبت باربری کالیفرنیا بر روی نمونه های مینا و مسلح شده انجام شده است. بدین منظور نمونه هایی با درصد های اختلاط مختلف: ۵، ۱۰ و ۱۵ از دو نوع خرده لاستیک در داخل غشاء تهیه شده است، تا آزمایش های مذکور با اعمال سه تنش هم جابه ی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال آغاز شود. پس از این مرحله با افزودن تنش انحرافی در بالا و پایین نمونه، به نمونه اجازه ی برش داده شده و نیروی برشی تا مرحله ی پس از گسیختگی نیز ادامه یافته است. شایان ذکر است نحوه ی بارگذاری و زهکشی به نوع آزمایش بستگی دارد که در بخش مرتبط توضیح داده شده است. در ادامه، عوامل تأثیرگذار در مقاومت برشی مصالح نظیر: شرایط بارگذاری و زهکشی، تنش هم جابه، نوع و مقدار خرده لاستیک در مخلوط که به کمک آزمایش سه محوری انجام شده است بررسی شده اند.

### ۳. بررسی آزمایش های مقاومت برشی مصالح مینا و

#### تسلیم شده

۱.۳. آزمایش های سه محوری تحکیم یافته ی زهکشی شده (CD) در شکل های ۴ و ۵، منحنی های تنش انحراف بر حسب تغییر مکان افقی ( $\delta_h$ ) و تغییر مکان عمودی ( $\delta_v$ ) بر حسب تغییر مکان افقی مربوط به شرایطی که مصالح مینا و مصالح مسلح با خرده لاستیک از نوع G<sub>30</sub> به مقدار ۱۰٪ و تحت تنش هم جابه ی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال در حالات زهکشی شده و زهکشی نشده

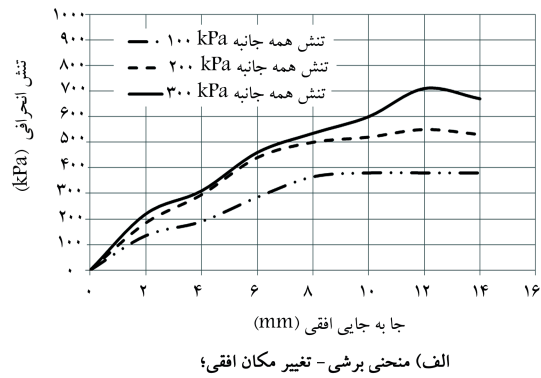
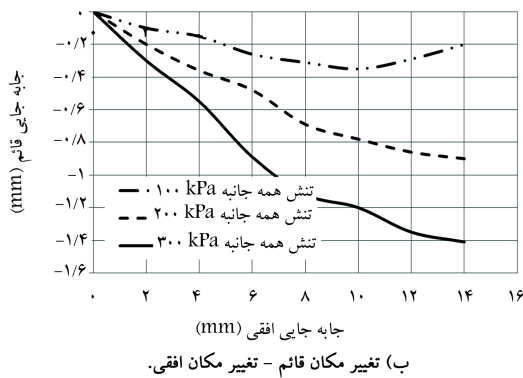
خرده لاستیک G<sub>30</sub> دارد. همچنین در جدول ۲ نیز مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح خرده لاستیک ارائه شده است، که این مقادیر با استناد به تارنمای وزارت صنایع و معادن ایران در زیربخش صنایع غیرفلزی به دست آمده است. [۱۴] شایان ذکر است که مشخصات مذکور به شناخت رفتار خاک مسلح در اندرکنش خاک و لاستیک کمک به سزایی می کند.

### ۳.۲. روش انجام آزمایش

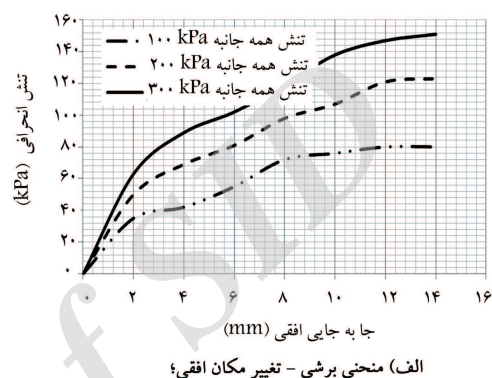
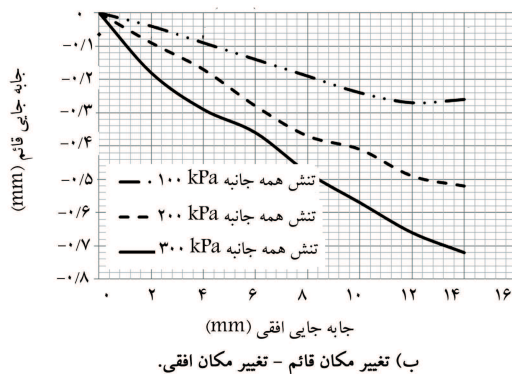
در پژوهش حاضر، نمونه هایی که برای انجام آزمایش های سه محوری CD و UU مورد استفاده قرار گرفته اند، براساس چگالی خشک بیشینه و رطوبت بهینه تهیه شده اند. به این ترتیب که ابتدا خاک و خرده لاستیک به صورت خشک به وسیله ی دستگاه مخلوطکن با یکدیگر به خوبی مخلوط شده و زمان مخلوط شدن برای تمامی نمونه ها کاملاً یکسان بوده است. سپس آب به صورت تدریجی به مخلوط اضافه شده و عمل اختلاط تا به دست آوردن مخلوطی کاملاً همگن ادامه یافته است. برای تهیه ی هر نمونه، مخلوط به صورت ۵ لایه ی یکسان (از نظر وزن) در قالب ریخته و متراکم شده است. پس از کوبش هر لایه، در سطح لایه با استفاده از کاردک شیاری ایجاد شده است، تا پیوند مناسب بین لایه های متوالی برقرار شود. درصد اختلاط خرده لاستیک با خاک رسی به ترتیب ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی خشک خاک بوده است. با افزایش میزان خرده لاستیک به بیش از ۱۵٪، عملاً امکان تهیه ی نمونه از بین رفته و نمونه های مذکور پس از خارج شدن از قالب متلاشی شده اند. زیرا به دلیل خاصیت ارتجاعی فراوان خرده های لاستیک و تمایل بازگشت به حالت اولیه، پس از عمل تراکم و خارج کردن نمونه از قالب، ترک های فراوانی ایجاد شده است که در هنگام کشیدن غشاء بر نمونه متلاشی شده است.

هر سری آزمایش شامل ۳ نمونه ی مشابه (از لحاظ درصد و نوع لاستیک، درصد رطوبت و چگالی خشک بیشینه) تحت فشارهای هم جابه ی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال انجام شده است. شایان ذکر است با توجه به اینکه از خاک تثبیت شده با خرده لاستیک عموماً در لایه های روسازی استفاده می شود، این مقادیر نسبتاً پایین تنش انتخاب شده اند و همچنین برای رسم دوایر موهر نیاز به دست کم ۳ سطح تنش است تا بتوان پارامترهای مرتبط را به دست آورد. در ابتدا، یک سری آزمایش بر روی نمونه های کائولینیت بدون خرده لاستیک جهت مقایسه و استفاده از آن به عنوان مصالح مینا انجام شده است. بدین ترتیب می توان تأثیر مقادیر مختلف خرده لاستیک با دانه بندی های متفاوت و همچنین تنش محصورکنندگی های متفاوت را در رفتار مخلوط های کائولینیت-خرده لاستیک مورد بررسی قرار داد.

ذکر این نکته شایان توجه است که در حین آماده سازی نمونه ها برای تسریع در زمان اشباع شدن با توجه به اینکه قدرت ترکیب دی اکسیدکربن با آب بسیار بیشتر از ترکیب آب با هوا (اکسیژن) است، قبل از انتقال آب برای مدت زمان ۵ دقیقه گاز دی



شکل ۴. رفتار مصالح رسی مسلح با ۱۰٪ خرده لاستیک  $G_{30}$  در شرایط زهکشی شده تحت تنش‌های قائم ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ (kPa).



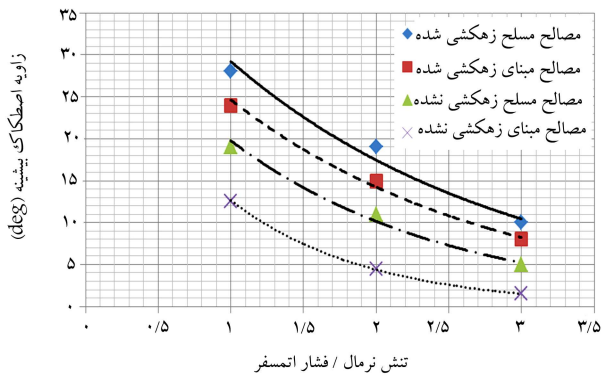
شکل ۵. رفتار مصالح رسی مسلح با ۱۰٪ خرده لاستیک  $G_{30}$  در شرایط زهکشی نشده تحت تنش‌های قائم ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ (kPa).

با اشیاع کامل نمونه‌ها، مقاومت برشی برای تمامی آنها تحت فشارهای همه‌جانبه‌ی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ (kPa) مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌های زهکشی نشده نیز با میزان تراکم مشابهی، که در آزمایش‌های برش زهکشی به‌کار رفته است، برای ۳ تنش قائم اولیه‌ی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ (kPa) تکرار شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، از لحاظ کیفی منحنی‌های مذکور تقریباً به حالت زهکشی شده شباهت دارند و تفاوت آن‌ها، کاهش مقاومت بیشینه و رفتار اتساعی نامحسوس‌تر آن‌ها در شرایط متناظر مصالح زهکشی نشده نسبت به زهکشی شده است. اثرات این خرده لاستیک‌ها را می‌توان در شیب منحنی‌ها و نیز کرنش در لحظه‌ی گسیختگی نمونه‌ها مشاهده کرد. همچنین می‌توان ملاحظه کرد که با افزایش فشار همه‌جانبه، میزان شکل‌پذیری نمونه‌ها افزایش یافته است. عدم تأثیر خرده لاستیک در رفتار خاک رس تحت شرایط UU جذب آب توسط ذرات رسی بوده که این امر باعث شده است اندرکنش بین خرده‌های لاستیک و ذرات رس کمتر شود و ذرات مذکور به راحتی بر روی هم بلغزند و باعث شکست هرچه سریع‌تر نمونه‌ها شوند. در شکل ۶، نمونه‌های مینا و مسلح، پیش از آزمایش و پس از آن نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌ی مسلح‌شده در حالت شکل‌پذیر در برش نسبت به نمونه‌ی مینا برش خورده است که این مطلب بیان‌گر افزایش شکل‌پذیری نمونه در حالت مسلح‌شده با خرده لاستیک است، زیرا مصالح در حالت ترد به علت حاکمیت تنش برشی در صفحه تحت زاویه‌ی حدوداً ۴۵ درجه نسبت به افق گسیخته می‌شوند که وقتی این مصالح به حالت شکل‌پذیر در می‌آیند، زاویه‌ی ذکرشده از لحاظ مبنایی نظری به سمت صفر درجه میل می‌کند.

توسط دستگاه سه‌محوری برش خورده است، مشاهده می‌شود. از منحنی‌های تنش برشی بر حسب تغییرمکان افقی مصالح در شرایط زهکشی شده و زهکشی نشده می‌توان دریافت که در مصالح پس از رسیدن به تنش انحرافی بیشینه، که این مرحله با رفتار سخت‌شوندگی خاک همراه است، گسیختگی رخ داده و سپس در آنها تنش برشی کاهش یافته و در نهایت ثابت شده است. البته این شکل از تنش برشی بر حسب تغییرمکان مربوط به مصالح متراکم است. همچنین در منحنی‌های مذکور مشاهده می‌شود نمونه‌هایی که تحت تنش همه‌جانبه‌ی کوچک‌تر از  $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$  قرار گرفته‌اند، پس از رسیدن به بیشترین تنش برشی در تغییرمکان افقی کوچک‌تری به مقدار تقریباً ثابتی از تنش برشی می‌رسند. در منحنی تغییرمکان قائم بر حسب تغییرمکان افقی در وضعیت زهکشی شده نیز مشاهده می‌شود که مصالح پس از نشست اولیه، رفتاری اتساعی از خود بروز می‌دهند. لازم به یادآوری است که از کرنش‌سنج‌های مربوط به تغییرشکل‌های قائم و افقی، به ترتیب در بالا و دور نمونه، تغییرمکان‌های مذکور در هر ۳۰ ثانیه قرارت و به همراه تنش مرتبط ثبت شده است.

### ۲.۳. آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم نیافته‌ی زهکشی نشده (UU)

مقاومت برشی خاک‌های رسی به نوع کانی رس و درصد رطوبت آن بستگی دارد. در جایی که تغییرشکل برشی به وقوع می‌پیوندد، توجه به زهکشی آب، اهمیت خاصی دارد؛ چون بیشتر خاک‌های رسی در حالت طبیعی در وضعیت تقریباً اشیاع قرار دارند و نفوذپذیری کم خاک‌های رسی مانع از تغییر فشار منفذی یا به عبارت دیگر، کم‌شدن فشار منفذی در هنگام برش می‌شود. در آزمایش‌های سه‌محوری UU نیز



شکل ۸. منحنی تغییرات زاویه اصطکاک بیشینه بر حسب نسبت تنش قائم اولیه بر فشار اتمسفر برای مصالح مینا و مسلح در شرایط زهکشی شده و زهکشی نشده.

مذکور بیشتر شده است. لازم به ذکر است که برای پیدا کردن پارامترهای ژئوتکنیکی خاک با استفاده از آزمایش سه محوری ۲ آزمایش با دو تنش محصورکنندگی کافی است، اما برای دست‌یابی به مقادیر دقیق‌تر از ۳ آزمایش در پژوهش حاضر استفاده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود با افزایش درصد خرده لاستیک، شیب نمودار که بیانگر زاویه اصطکاک داخلی است، افزایش یافته است. افزایش زاویه اصطکاک داخلی تا ۱۰٪ خرده لاستیک مشهود است و با افزایش میزان آن به ۱۵٪، تغییرات چندانی در پارامتر مذکور حاصل نشده است و همچنین ملاحظه می‌شود که برای تمامی نمونه‌ها، میزان عرض از مبدأ نمودارها که بیانگر چسبندگی است، کاهش یافته است. با مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های ذکر شده با نتایج آزمایش‌هایی که قبلاً در این خصوص انجام شده است، ملاحظه می‌شود که هم‌پوشانی خوبی بین این نتایج وجود دارد.<sup>[۱۰]</sup> زاویه اصطکاک بیشینه ( $\phi_p$ ) مصالح ریزدانه از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید:

$$\phi_p = \tan^{-1} \left( \frac{\tau_p}{\sigma_n} \right) \quad (1)$$

که در آن،  $\tau_p$  بیشینه مقدار تنش برشی است. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، زاویه اصطکاک بیشینه مصالح رسی مینا و همچنین رسی مسلح شده برای هر دو حالت ذکر شده، رابطه‌ی غیرخطی با تنش قائم دارد و با افزایش تنش عمودی کاهش زاویه اصطکاک بیشینه در مصالح وجود دارد. با توجه به شکل ۸، زاویه اصطکاک بیشینه مصالح زهکشی نشده کمتر از مصالح زهکشی شده به دست آمده است. براساس شکل ۸، رابطه‌ی ۲ ارتباط بین زاویه اصطکاک بیشینه و تنش قائم را بیان می‌کند:<sup>[۱۲]</sup>

$$\phi_p = \phi_0 \left[ \frac{\sigma_n}{P_a} \right]^{-D} \quad (2)$$

که در آن،  $\phi_0$  زاویه اصطکاک مصالح به ازاء فشار قائم مساوی با ۱ اتمسفر بر روی نمونه و  $D$  مقداری ثابت است که براساس نوع مصالح انتخاب می‌شود و می‌توان آن‌ها را از روابط غیرخطی به دست آمده از شکل ۸ به دست آورد. پژوهشگران علاوه بر رابطه‌ی ۲، رابطه‌ی ۳ را نیز برای ارتباط زاویه اصطکاک بیشینه با تنش قائم بر روی نمونه‌های دانه‌ی ارائه داده‌اند:<sup>[۱۳]</sup>

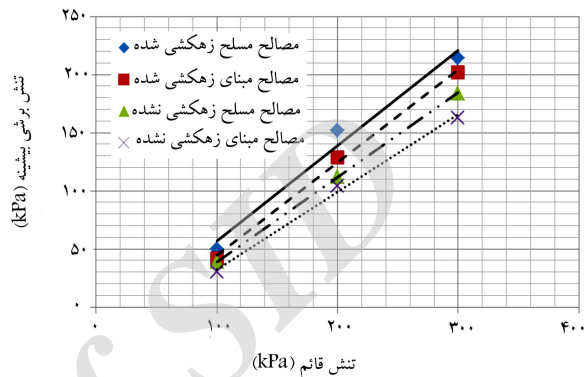
$$\phi_p = \phi_0 - \Delta\phi \log \left[ \frac{\sigma_n}{P_a} \right] \quad (3)$$

که در آن،  $\Delta\phi$  مقدار کاهش زاویه اصطکاک مصالح به ازاء ۱۰ برابر افزایش تنش قائم بر روی آن است. در جدول ۳، مقادیر  $D$  و  $\Delta\phi$  برای مصالح رسی مینا و



شکل ۶. نمونه‌های رسی مینا و مسلح شده با ۱۰٪ خرده لاستیک پیش و پس از آزمایش برش.

شکل ۶. نمونه‌های رسی مینا و مسلح شده با ۱۰٪ خرده لاستیک پیش و پس از آزمایش برش.



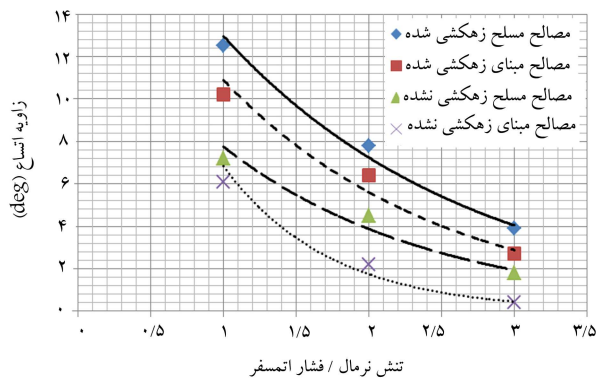
شکل ۷. منحنی تغییرات بیشینه تنش برشی بر حسب تنش قائم (پوش گسیختگی) برای مصالح رسی مینا و رسی مسلح شده با ۱۰٪ خرده لاستیک  $G^30$  در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده.

### ۳.۳. تحلیل نتایج آزمایش‌های مقاومت برشی

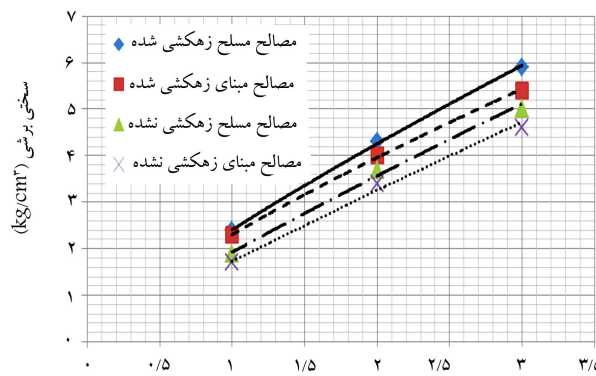
۳.۳.۱. پوش گسیختگی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در شرایط تحکیم یافته زهکشی شده و زهکشی نشده برای مصالح مینا و تسلیح شده با توجه به اینکه نتایج تنش انحرافی را به تنهایی نمی‌توان برای ارزیابی رفتار نمونه‌ها مورد استفاده قرار داد، بدین منظور و برای ارزیابی جامع‌تر رفتار مخلوط، مشخصه‌ها و پارامترهای مقاومتی خاک همانند چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی که محاسبات و عملیات ژئوتکنیکی براساس آنها صورت می‌پذیرد، را باید مورد مطالعه و بررسی قرار داد. بدین منظور برای هر سری آزمایش دوایر موه‌ر رسم و سپس با استفاده از پوش گسیختگی، زاویه اصطکاک داخلی و ضریب چسبندگی نمونه‌ها تعیین شده است.

در شکل ۷، به ترتیب منحنی تغییرات تنش برشی بیشینه بر حسب تنش قائم و زاویه اصطکاک بیشینه بر حسب نسبت تنش قائم بر فشار اتمسفر (Pa) برای مصالح رسی مینا و مصالح مسلح شده با خرده لاستیک، در ۲ حالت زهکشی شده و زهکشی نشده نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸، پوش گسیختگی در هر حالت تقریباً خطی است، بنابراین معیار خطی موه‌رکولمب ( $\tau_p = \sigma_n \tan(\phi) + c$ ) برای تعریف رفتار این مصالح مناسب است، زیرا مصالح ریزدانه هستند و شکستگی و انساع قابل توجهی با بالا رفتن سطح تنش در آنها صورت نمی‌پذیرد. نکته‌ی قابل ذکر در مورد شکل ۸ این است که نمونه‌های مینا و مسلح شده در حالت زهکشی نشده نسبت به وضعیت زهکشی شده تحت تنش برشی پایین‌تری به گسیختگی می‌رسند و با بالا رفتن تنش قائم اولیه، اختلاف میان پوش گسیختگی مصالح در حالت‌های

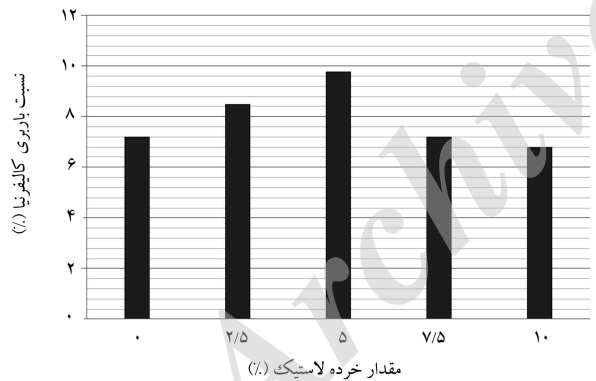




شکل ۹. تغییرات زاویه اتساع با نسبت تنش قائم اولیه مصالح مینا و مسلح در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده.



شکل ۱۰. تغییرات سختی برشی با نسبت تنش قائم اولیه مصالح مینا و مسلح در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده.



شکل ۱۱. تغییرات نسبت باربری کالیفرنیا (C.B.R.) نسبت به درصد های مختلف خرده لاستیک.

اینچ است به کار می رود. این آزمایش که توسط مهندسان ایالت کالیفرنیا ابداع شده است و اغلب کشورها نیز آن را به عنوان تعیین معیاری از توان باربری و مقاومت زمین به کار می برند، یکی از عوامل مهم در تعیین ضخامت رویه راه است.

در شکل ۱۱، منحنی تغییرات ضریب C.B.R. بر حسب درصد خرده لاستیک نشان داده شده است. مشاهده می شود که ضریب نمونه ها با افزودن خرده لاستیک به نمونه ها افزایش و سپس کاهش یافته است. افزایش C.B.R. تا ۵٪ خرده لاستیک بوده و پس از آن افزایش بیشتر میزان خرده لاستیک موجب

جدول ۳. مقایسه ای مقادیر پارامترهای روابط ۲ و ۳ و زاویه اصطکاک داخلی (از پوش خطی موهر-کولمب) مصالح رسی مینا و مسلح شده در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده.

نوع آزمایش	D	φ (°) از رابطه ی		φ (°)
		۳	۲	
مصالح مسلح زهکشی شده	۰/۱۵	۲۷/۸	۲۸/۱	۲۵/۱
مصالح مبنای زهکشی شده	۰/۱۳	۲۳/۹	۲۴/۲	۲۱/۲
مصالح مسلح زهکشی نشده	۰/۰۹	۱۹/۱	۱۹/۴	۱۷/۶
مصالح مبنای زهکشی نشده	۰/۰۸	۱۲/۵	۱۲/۷	۱۰/۷

مسلح شده ی مورد استفاده، در ۲ حالت ارائه شده است. شایان ذکر است مقادیر D برای هر نمونه از توان نمودار نمایی شکل ۸ (رابطه ی ۲) به دست می آید. همچنین جهت مقایسه ی مقدار φ به دست آمده از دو رابطه ی ۲ و ۳ می توان به جدول ۳ مراجعه کرد، که البته مقدار φ از دو رابطه ی مذکور اختلاف چندانی وجود ندارد. در شکل ۸، چنانچه پوش گسیختگی مصالح مینا و مسلح در نظر گرفته شود، با توجه به رابطه ی خطی موهر-کولمب، شیب آن خط مقدار تانژانت زاویه ی اصطکاک داخلی مصالح (φ) را بیان می کند، که در جدول ۳ این مقادیر برای مصالح در دو حالت آمده است.

۲.۳.۳. زاویه ی اتساع و سختی برشی مصالح رسی مینا و مسلح شده در ۲ حالت زهکشی شده و زهکشی نشده

با مراجعه به نمودارهای به دست آمده از آزمایش، می توان دو پارامتر سختی برشی ( $K_s$ ) و زاویه ی اتساع ψ را مطابق روابط ۴ و ۶ تعریف کرد:

$$K_s = \left. \frac{d\tau}{d(\delta_h)} \right|_{\delta_h=0} \quad (4)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left[ \left. \frac{d(\delta_v)}{d(\delta_h)} \right]_{\max} \quad (5)$$

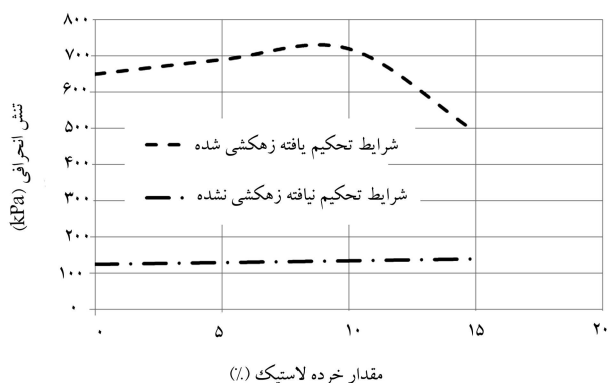
شکل های ۹ و ۱۰، تغییرات زاویه ی اتساع و سختی برشی را بر حسب نسبت تنش قائم اولیه بر فشار اتمسفر برای مصالح رسی مینا و مسلح شده در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده نشان می دهند که مطابق آن ها با افزایش تنش قائم اولیه بر روی نمونه، زاویه ی اتساع به صورت غیرخطی کاهش یافته است. در جدول ۴، نیز نسبت دو پارامتر سختی برشی و زاویه ی اتساع برای مصالح رسی مینا و مصالح رسی مسلح شده ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، نمونه ی رسی مینا نسبت به مصالح رسی مسلح شده، زاویه ی اتساع کمتری از خود نشان می دهد؛ که این امر به سبب تغییر حجم ناچیز مصالح مینا به دلیل صلب بودن نسبت به مصالح مسلح شده است. همچنین در حالت زهکشی نشده، مقدار زاویه ی اتساع کوچک تر است و کاهش کمتری از خود نشان می دهد، که این مطلب با توجه به تأثیر مثبت زاویه ی اتساع در مقاومت برشی مصالح تأیید می شود. مقدار سختی برشی نیز با افزایش تنش قائم به صورت غیرخطی بیشتر شده است و با بالا رفتن تنش قائم اولیه، مصالح سخت تر شده اند. با مقایسه ی نمودارهای سختی برشی و زاویه ی اتساع این نتیجه به دست می آید که مصالح مسلح در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده، مقدار سختی برشی و زاویه ی اتساع بیشتری نسبت به مصالح مینا دارند.

### ۳.۳.۳. آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (C.B.R.)

آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا برای سنجش مقاومت سابگرید و بعضی مواقع مصالح زیر اساس و اساس که شامل کمی دانه های مانده روی الک ۳/۴

جدول ۴. نسبت پارامترهای سختی برشی و زاویه‌ی اتساع بیشینه‌ی مصالح مینا و مسلح در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده.

زهکشی نشده		زهکشی شده		تنش قائم اولیه (KPa)
مسلح $K_s/\Psi$ مینا	مسلح $K_s/\Psi$ مینا	مسلح $K_s/\Psi$ مینا	مسلح $K_s/\Psi$ مینا	
۰٫۶۳	۰٫۵۴	۰٫۴۹	۰٫۶۸	۱۰۰
۰٫۷۱	۰٫۶۴	۰٫۷۰	۰٫۷۷	۲۰۰
۰٫۸۱	۰٫۷۶	۰٫۸۶	۰٫۸۱	۳۰۰



مقدار خرده لاستیک (%)

شکل ۱۲. تأثیر شرایط زهکشی شده و زهکشی نشده در تنش تفاضلی در لحظه‌ی گسیختگی نمونه‌ها.

است، در حالی که برای نمونه‌هایی که تحت شرایط تحکیم نیافته‌ی زهکشی نشده آزمایش شده‌اند، زاویه‌ی اصطکاک با افزودن خرده لاستیک تغییر محسوسی نشان نداده است. افزودن خرده لاستیک به نمونه‌هایی که تحت شرایط CD مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، موجب کاهش چسبندگی نمونه‌ها شده است؛ در حالی که تحت آزمایش UU این امر باعث افزایش میزان چسبندگی آن‌ها شده است.

#### ۲.۴. تأثیر خرده لاستیک بر مدول کشسانی

هر ماده، رفتار تنش-کرنش خاص خود را دارد. موادی که تاب تحمل مقادیر زیاد کرنش را دارند، به مواد نرم و موادی که تاب تحمل مقادیر زیاد کرنش را ندارند، به مواد ترد نام‌گذاری می‌شوند. ارتباط بین تنش و کرنش که توسط مدول کشسانی یا مدول ینگ (Es) بیان می‌شود، در حقیقت همان شیب منحنی تنش-کرنش در حالت فشاری است. برای نمونه، شکل ۱۳ الف نشان‌دهنده‌ی تغییرات مدول کشسانی نمونه‌ها تحت فشار همه‌جانبه‌ی ۲۰۰ kPa برای دو نوع خرده لاستیک در مقادیر متفاوت (۲٫۵، ۷، ۱۰ و درصد) است. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد خرده لاستیک به رس از شیب نمودارهای تنش-کرنش کاسته شده و بنابراین مدول کشسانی نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است. زیرا رس خود ماده‌ی نرمی است، که در اندرکنش با خرده لاستیک، تنش فشاری کمتری تحمل می‌کند، زیرا خاصیت ارتجاعی زیاد لاستیک مانع از تحمل فشار توسط رس مسلح می‌شود. همچنین همان‌گونه که مشاهده می‌شود، برای لاستیک ریزدانه‌تر (G<sub>A</sub><sup>o</sup>)، روند کاهش مدول کشسانی کندتر است و این بدان دلیل است که مصالح ریزدانه‌تر، قفل و بست بهتری با رس (به دلیل ریزدانه بودن) ایجاد کرده است که مخلوطی همگن‌تر را تشکیل و رفتار نرم‌تر و شکل پذیرتری از خود نشان می‌دهند. به عنوان نمونه در شکل ۱۳ ب، نمودار

کاهش ضریب مذکور شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، که با افزودن ۲٫۵ و ۵ درصد خرده لاستیک به میزان فشار اضافه و در مقابل از نشست متناظر آن کاسته شده است. افزایش میزان خرده لاستیک تا ۷٫۵٪، فرایند مرحله‌ی قبلی معکوس و به میزان نشست افزوده شده است و همچنین فشار متناظر نسبت به حالتی که نمونه با ۵٪ خرده لاستیک مخلوط شده است، کاهش یافته است. کاهش فشار و همچنین افزایش میزان نشست را می‌توان به وضوح در نمونه‌یی که با ۱۰٪ خرده لاستیک مخلوط شده است، نیز مشاهده کرد. علت این امر احتمالاً ناشی از تماس بیشتر خرده‌های لاستیک با یکدیگر است، زیرا در حالتی که نمونه با ۲٫۵ و ۵ درصد خرده لاستیک مخلوط شده است، ذرات خرده لاستیک کمتری با یکدیگر در تماس بوده و حالت ارتجاعی لاستیک در مخلوط تأثیر چندانی در رفتار مخلوط نداشته است، در حالی که با افزایش درصد خرده لاستیک، میزان ذرات ارتجاعی در خاک افزایش یافته و باعث کاهش مقاومت کمتری در نمونه شده است.

#### ۴. عوامل مؤثر در رفتار مصالح مینا و مصالح تسلیح شده

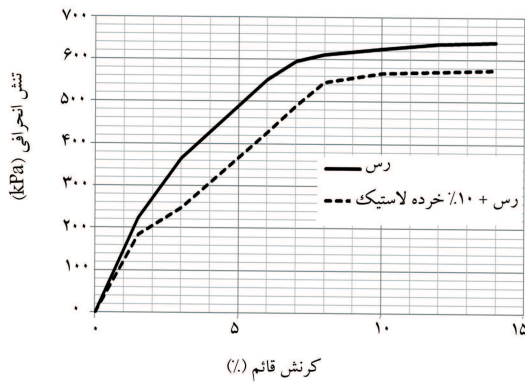
مصالح رسی مسلح شده به دلیل ساختن محیطی ناهمگون، رفتار متفاوتی نسبت به مصالح رسی مینا که همگون است، از خود نشان می‌دهند. در مصالح مسلح شده به علت افزایش مقاومت، قفل و بستنی به نوعی گیرایی ایجاد شده است و از خود مقاومت برشی بیشتری نشان می‌دهند که این موضوع مطابق با مطالعات سایر پژوهشگران است.<sup>[۱۱]۱۰</sup> در ادامه، تأثیر مسلح ساختن رس با خرده لاستیک در عوامل رفتاری نظیر: مدول کشسانی، شکل‌پذیری، و پارامترهای مقاومت برشی در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده برای دو نوع لاستیک مورد آزمایش بررسی شده است.

#### ۱.۴. تأثیر شرایط زهکشی شده و زهکشی نشده در تنش انحرافی در

##### لحظه‌ی گسیختگی نمونه‌ها

در شکل ۱۲، تأثیر نوع آزمایش در تنش تفاضلی نمونه‌ها در لحظه‌ی گسیختگی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تأثیر خرده لاستیک در تنش تفاضلی نمونه‌هایی که تحت شرایط CD مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، در لحظه‌ی گسیختگی به مراتب بیشتر از نمونه‌هایی است که تحت آزمایش UU قرار گرفته‌اند. همچنین شیب منحنی‌های تنش تفاضلی در لحظه‌ی گسیختگی برای نمونه‌هایی که تحت شرایط CD آزمایش شده‌اند، بیشتر از نمونه‌هایی است که تحت شرایط UU مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. با بررسی رفتار نمونه‌هایی که تحت آزمایش تحکیم یافته‌ی زهکشی شده قرار گرفته‌اند، ملاحظه می‌شود که عامل اصطکاک بسیار تأثیرگذار بوده



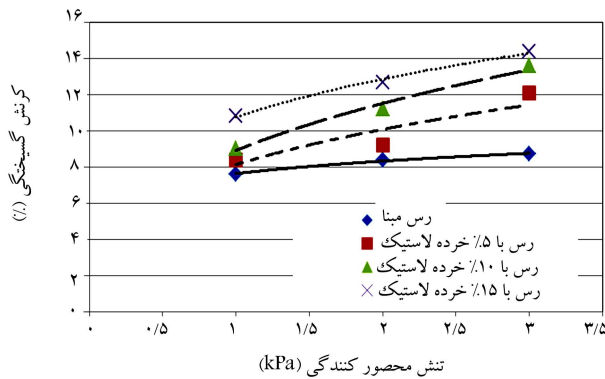


ب) نمودار تنش - کرنش رس مسلح و مینا.

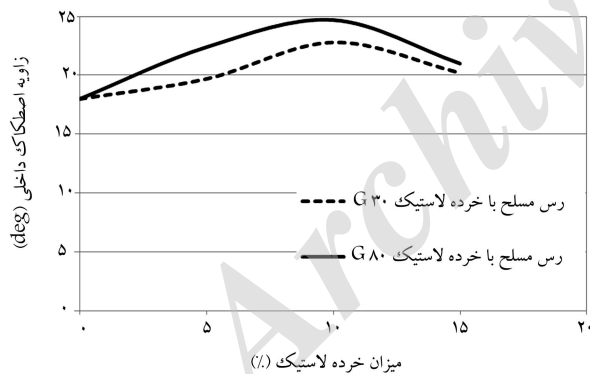
شکل ۱۳. تأثیر درصد و نوع خرده لاستیک در مدول کشسانی تحت فشار همه جانبه ی یکسان.



الف) نمونه ها با مقادیر مختلف لاستیک؛



شکل ۱۴. تأثیر فشار همه جانبه در میزان شکل پذیری نمونه های مخلوط شده با خرده لاستیک G30.



شکل ۱۵. تغییرات زاویه ی اصطکاک داخلی در درصدهای مختلف برای انواع خرده لاستیک.

داخلی افزایش و سپس کاهش یافته است که دلیل این کاهش را می توان به کاهش تراکم مصالح از ۱۰٪ به بعد حساب کرد، که قاعدتاً باعث کاهش زاویه ی اصطکاک داخلی مصالح می شود. همچنین نتایج نشان داده است که نمونه های مخلوط شده با خرده لاستیک با دانه های درشت تر (G30) مقاومت برشی و زاویه ی اصطکاک داخلی بیشتری به دست داده است که علت آن احتمالاً اندرکنش بهتر این مصالح با خاک بوده است. همچنین چسبندگی مصالح نیز به طور کلی با افزایش مقدار خرده لاستیک کاهش می یابد که دلیل آن را می توان

تنش کرنش خاک رس به تنهایی و مخلوط خاک رس و ۱۰٪ خرده لاستیک G30 نشان داده شده است. شیب اولیه ی دو نمودار ذکر شده، مدول کشسانی مصالح را مشخص می کنند و همان گونه که مشاهده می شود، نمونه ی محتوای لاستیک در کرنش تقریبی ۱۰٪ گسیخته شده است در حالی که نمونه ی رس مینا در کرنش حدوداً ۷٪ دچار گسیختگی شده است. شایان ذکر است که کرنش گسیختگی این گونه محاسبه می شود، که کرنش سنج پس از ۴ قرانت متوالی یا تغییری از خود نشان نمی دهد و یا اینکه تغییراتی در جهت عکس تغییرات قبلی از خود نشان می دهد.

#### ۳.۴. تأثیر خرده لاستیک ها در شکل پذیری

عموماً با افزایش درصد خرده لاستیک به نمونه ها، میزان شکل پذیری آن ها افزایش و شکست آنها از حالت ترد به حالت نرم تغییر یافته است. در شکل ۱۴، تغییرات کرنش گسیختگی بر حسب میزان و نوع خرده لاستیک در تنش های همه جانبه ی ثابت نشان داده شده است. چنان که مشاهده می شود، در یک تنش همه جانبه ی ثابت با افزایش میزان خرده لاستیک، شکل پذیری مخلوط افزایش یافته است که برای اندازه های درشت تر خرده لاستیک (G30) قدری محسوس تر است. به عبارت دیگر، افزایش میزان خرده لاستیک موجب افزایش نقش لاستیک در جذب انرژی کرنشی (شکل پذیری) شده و هر چه اندازه ی ذرات خرده لاستیک در نمونه بزرگ تر باشد، فضای بیشتری در داخل نمونه اشغال کرده است، که این امر موجب آن می شود که رفتار نمونه ی مورد آزمایش تحت تأثیر بیشتری از لاستیک قرار گیرد. با توجه به اینکه ذرات لاستیک، شکل پذیری بیشتری دارند، نمونه ها شکل پذیرتر شده و رفتاری ارتجاعی از خود نشان می دهند. هر چه اندازه ی ذرات لاستیکی کوچک تر شود، نقش مؤثر آن در داخل نمونه کمتر خواهد شد و باعث می شود رفتار نرم تری که در نمونه های مخلوط شده با ذرات بزرگ تر لاستیک شاهد آن بوده ایم مشاهده نشود.

#### ۴.۴. تأثیر خرده لاستیک در پارامترهای مقاومت برشی

در شکل های ۱۵ و ۱۶، تغییرات زاویه ی اصطکاک داخلی و چسبندگی نمونه های مخلوط شده با خرده لاستیک بر حسب میزان خرده لاستیک نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، با افزایش میزان خرده لاستیک برای نمونه ی مخلوط شده با خرده لاستیک های G30 و G80 تا ۱۰٪ زاویه ی اصطکاک

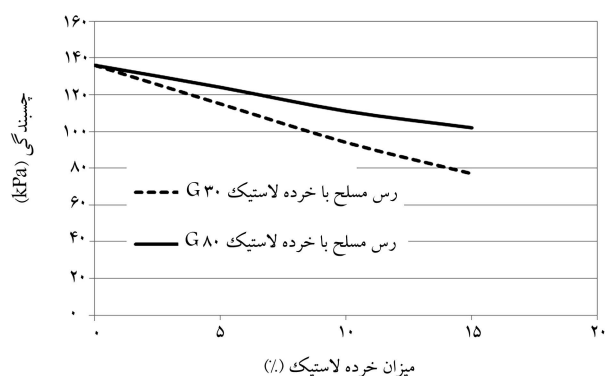
عوامل بهبود پارامترهای مقاومت برشی و شکل پذیری نمونه‌های مسلح شده بوده است.

-- تحت تنش همه‌جانبه‌ی یکسان و میزان یکسان خرده لاستیک با افزایش ابعاد خرده لاستیک تنش انحرافی نمونه‌های مسلح شده همواره روندی افزایشی داشته است که این روند تا درصد مناسبی ادامه پیدا کرده است. لازم به ذکر است برای نمونه‌های مسلح شده با ابعاد و درصد یکسان خرده لاستیک، با افزایش تنش همه‌جانبه میزان تنش تفاضلی و کرنش گسیختگی نیز افزایش یافته است.

-- تحت تنش همه‌جانبه‌ی یکسان و ابعاد یکسان خرده لاستیک، با افزایش درصد خرده لاستیک به‌طور کلی کرنش گسیختگی و شکل پذیری نمونه‌های مسلح شده افزایش یافته است. با افزودن خرده لاستیک و افزایش درصد آن، مدول کشسانی نمونه‌ها کاهش یافته است، که بیانگر آن است که خرده لاستیک به‌عنوان یک جاذب انرژی عمل می‌کند.

-- تحت شرایط آزمایش UU با افزایش خرده لاستیک تا درصد مناسبی، میزان چسبندگی نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است. تحت شرایط آزمایش CD با افزودن خرده لاستیک تا درصد مناسبی، میزان زاویه‌ی اصطکاک داخلی نمونه‌ها نیز افزایش یافته است. تأثیر افزودن خرده لاستیک در مقاومت برشی نمونه‌هایی که تحت شرایط UU آزمایش شده‌اند، چندان محسوس نبوده است.

-- با افزودن خرده لاستیک به نمونه‌ها تحت آزمایش C.B.R، میزان نشست نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است. همچنین ملاحظه می‌شود که ضریب باربری کالیفرنیا و توان باربری نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است. این افزایش تا ۵٪ خرده لاستیک مشاهده و با افزایش درصد خرده لاستیک از میزان ضریب باربری کالیفرنیا کاسته شده و نشست افزایش پیدا کرده است. استفاده از خرده لاستیک با اندازه‌های کوچک‌تر برای انجام آزمایش C.B.R. تأثیر چندانی در نتایج حاصل از این آزمایش نگذاشته است.



شکل ۱۶. تغییرات مقاومت چسبندگی در درصدهای مختلف برای انواع خرده لاستیک.

به جدایی ذرات رسی و کاهش نیروی الکترومغناطیس حاکم بر آن‌ها جستجو کرد.

## ۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، آزمایش سه‌محوری بر روی مصالح رسی مینا و مصالح رسی مسلح شده با خرده لاستیک در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده انجام شده است. اثر پارامترهای قفل و بستنی در مصالح مسلح شده مورد ارزیابی قرار گرفته است و برخی از نتایج حاصل از آزمایش به این شرح هستند:

-- همان‌گونه که انتظار می‌رفت، پارامترهای مقاومت برشی، زاویه‌ی انبساط، و سختی برشی در مصالح زهکشی شده، تماماً نسبت به مصالح زهکشی نشده بیشتر هستند.

-- نتایج نشان می‌دهد که افزودن خرده لاستیک موجب افزایش مقاومت فشاری و شکل پذیری مخلوط شده است. همچنین وجود خرده لاستیک به‌طور کلی از

## منابع (References)

1. Yoon, Y.W., Cheon, S. and Kang, D. "Bearing capacity and settlement of tire-reinforced sands", *Geotextiles and Geomembranes*, **22**(5), pp. 439-453 (2004).
2. Youwai, S. and Bergado, T. "Numerical analysis of reinforced wall using rubber tire chips-sand mixture as backfill material", *Computers and Geotechnics*, **31**(2), pp. 103-114 (2004).
3. Zornberg, J.G., Cabral, A.R. and Viratjandr, C. "Behaviour of tire shred-sand mixture", *Canadian Geotechnical Journal*, **41**(2), pp. 227-241 (2004).
4. Ghazavi, M. "Shear strength characteristics of sand-mixed with granular rubber", *Geotechnical & Geological Engineering*, **22**(3), pp. 11-19 (2004).
5. Mandal, J., Kumar, S. and Meena, C. "Centrifuge modeling of reinforced soil slopes using tire chips", *Slopes and Retaining Structures Under Seismic and Static Conditions*, *Geo-Frontiers Congress*, pp. 1-8 (2005).
6. Ghazavi, M. and Amel Sakhi, M. "Influence of optimized tire shreds on shear strength parameters of sand", *International Journal of Geomechanics*, **5**(1), pp. 479-482 (2005).
7. Gotteland, P.L. "Strength characteristics of tyre chips-sand mixtures", Polytech Grenoble Joseph Fourier University, Masion des Geosciences, BP 38041 Grenoble cedex 9, France (2005).

8. Hataf, N. and Rahimi, M.M. "Experimental investigation of bearing capacity of sand reinforced with randomly distributed tire shreds", *Construction and Building Materials*, **20**(10), pp. 910-916 (2005).
9. Akbulut, S., Arasan, S. and Kalkan, E. "Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers", *Applied Clay Science*, **38**(1-2), pp. 23-32 (2007).
10. Hing-Ho, T., Sheikh, N.M and Lam, N. "Rubber-soil CUSHION for earthquake protection", *Geotechnical Testing Journal*, **19**(3), pp. 297-304 (2008).
11. Prasad, D.S.V. and Raju, G.V.R. "Performance of waste tyre rubber on model flexible pavement", *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, **4**(6), pp. 164-168 (2009).
12. Guler, E. and Kasay, A.E. "Mechanical properties of granular rubber-sand mixtures determined by triaxial test", Department of Civil Engineering, Bogazici university, Turkey (2009).
13. Kalkan, E. "Preparation of scrap tire rubber fiber-silica fume mixtures for modification of clayey soils", *Applied Clay Science*, **80-81**, pp. 117-125 (2013).
14. [www.Mimt.gov.ir](http://www.Mimt.gov.ir).

Archive of SID