مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
پاییز و زمستان ۱۳۹۲، جلد ششم، شماره ۳ و ٤، صفحه ۷۹ تا ۸۸

بررسی آزمایشگاهی رفتار خاک مخلوط با خرده‌لاستیک به منظور بکارگیری در بستر خطوط ریلی

مرتضی اسماعیلی [۱]، نوید نخعی [۲*]

دریافت مقاله: ۹۱/۱۱/۱۹ پذیرش مقاله: ۹۳/۰۲/۰۳

چکیده

از جمله کاربردهای پیشنهادی برای بکارگیری لاستیک فرسوده مخلوط کردن این مصالح به فرم خرده شده با مصالح خاکی و بکارگیری در پشت دیوارهای حائل و خاکریزها می‌باشد. در این خصوص مطالعات جامعی در حوزه مهندسی راه صورت گرفته ولیکن در حوزه مهندسی راه‌آهن تحقیق مشخصی انجام نشده است. با توجه به آنکه در بستر و خاکریز خطوط ریلی یکی از پارامترهای کلیدی، مدول ارتجاعی در دومین مرحله بارگذاری(Ev_2) است. لذا در تحقیق حاضر مخلوطی از خاک GW-GC با مقادیر ۰، ۵، ۱۰و ۱۵درصد خرده‌لاستیک با محدوده دانه‌بندی ۰/٤۷۵ تا ۲/۵ سانتی‌متر تحت یکسری آزمایش‌های استاتیکی فیزیکی و مکانیکی شامل تراکم، هم‌ارز ماسه، ظرفیت باربری کالیفرنیا، برش مستقیم و بارگذاری صفحه مرحله‌ای قرار گرفته و سپس در اتاقک بارگذاری به ابعاد ۱.۲×۲/۵×۲/۵ متر، ریخته و به تراکم حداکثر آزمایشگاهی مطابق استاندارد ASTM D6270-2006 رسانده شده است. در ادامه با استفاده از جک ۳۰ تن، بارگذاری در سه گام و به صورت مرحله‌ای بر روی صفحه مربعی به ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی‌متر صورت گرفته است. نتایج آزمایش بیانگر آن است که در مقایسه با خاک بدون خرده‌لاستیک کاهش وزن مخصوص به میزان ۱۱/۸٦ تا ۱۹/۳٦ درصد، ظرفیت باربری کالیفرنیا به میزان ۳٤/۳۵ تا ٦۷/٤۷ درصد، پارامترهای مقاومت برشی همچون چسبندگی در ابتدا به مقدار ۲/۱ درصد افزایش یافته ولی پس از آن مجدداً به میزان ۲۷/۱ درصد کاهش پیدا کرده و زاویه اصطکاک داخلی به میزان ۱۰/۸ تا ۲۱/٦۲ درصد کاهش داشته است و مقدار E_{v2} به میزان ۲۷/۵٤ تا ۵٤/۲۹ درصد کاهش را به دنبال داشته است. با مقایسه نتایج بدست آمده با مقادیر مجاز آیین‌نامه‌ی UIC R719-1996 مشخص گردید که حداکثر تا ۱۰ درصد از خرده‌لاستیک را می‌توان بصورت مخلوط با مصالح بستر مورد استفاده قرار داد لیکن استفاده از آن بعنوان بخشی از بدنه خاکریز توصیه نمی‌شود.

کلید واژه‌ها: *بستر و خاکریز راه‌آهن، خرده‌لاستیک، CBR، PLT، E_{V2}، آیین‌نامه UIC R719*

۱. دانشیار دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی راه‌آهن m_esmaeili@iust.ac.ir
۲. کارشناسی ارشد دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی راه‌آهن nakhaie_navid@rail.iust.ac.ir
* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر در حوزه حمل و نقل خطوط ریلی همانند سایر صنایع، پیشرفت‌های قابل توجهی صورت گرفته است. ارائه خدمات مناسب، ایمنی زیاد، سرعت بالا، راحتی بیشتر و ... رقابت‌هایی را بین این سیستم با سایر سیستم‌های حمل و نقل ایجاد نموده است (محمدزاده، ۱۳۷۸).

بستر یکی از مهمترین اجزاء خط ریلی است که می‌بایست تکیه‌گاهی پایدار و قابل اطمینان را برای عبور قطار فراهم نماید. برای این منظور می‌بایست ضمن تأمین باربری لازم میزان نشست اندکی داشته باشد. معمولاً هر دو بحث باربری و نشست در مفهوم دیگری تحت عنوان سختی بستر مستتر می‌باشد و لذا در توسعه خطوط ریلی علاوه بر توسعه آزمایش‌های برجا مانند تراکم و نسبت باربری کالیفرنیا CBR، آزمایش بارگذاری صفحه نیز مورد توجه قرار گرفته و برای کنترل بستر در شرایط اجرا به کار گرفته می‌شود. سه شکل گسیختگی بستر بر اساس بارگذاری قطار به صورت زیر قابل تشخیص است (اسماعیلی و بلوکیان ۱۳۸۹):

۱- گسیختگی برشی توده*(Massive Shear Failure)*: نیروی محرک این نوع گسیختگی وزن قطار، وزن روسازی و وزن بخش نامتقارن زیرسازی است. از آنجا که بخش اعظم محدوده گسیختگی در بستر قرار می‌گیرد، خواص مقاومتی بستر تأثیر زیادی بر ضریب ایمنی در برابر گسیختگی برشی توده‌ای خواهد داشت.

۲- گسیختگی برشی پیشرونده*(Progressive Shear Failure)*: که به آن گسیختگی کلی بستر گفته می‌شود، تنش‌های وارده بر بستر توسط بار محوری ممکن است دارای بزرگی کافی جهت ایجاد گسیختگی برشی پیشرونده باشد. این شرایط اغلب در بخش بالایی بستر جایی که تنش‌های ناشی از بار ترافیک مقدار بیشتری دارد رخ می‌دهد.

۳- فرسایش*(Erosion)*: که به گسیختگی موضعی بستر نیز معروف است، فرسایش بستر توسط بالاست در حضور آب می‌تواند به تشکیل دوغاب در سطح مشترک بالاست / بستر بیانجامد. تحت شرایط خاص، بارگذاری سیکلیک ناشی از ترافیک عبوری می‌تواند باعث پمپاژ این دوغاب به سطح بالاست گردد. چنین گسیختگی‌هایی معمولاً به مصالح سخت و ریزدانه بستر همچون رس و سنگ‌های نرم مانند گچ مربوط می‌شود.

٤- علاوه بر این برای خطوطی که روی خاکریز قرار دارند، می‌بایست از گسیختگی حجیم و گسترده پی خط در اثر وزن خاکریز نیز جلوگیری گردد. معمولاً این نوع گسیختگی تنها در مورد خاکریزهای تازه احداث شده در نظر گرفته می‌شود. از میان سه شکل گسیختگی یاد شده دو مورد اول بسیار تابع مشخصات باربری و شکل‌پذیری مصالح خاکریز می‌باشند و از این رو در آیین‌نامه‌های مربوط به عملیات خاکی در حوزه راه‌آهن مانند آیین‌نامه اروپایی (UIC 719R, 1994)، آیین‌نامه آمریکایی 2006) ,(AREMA، آیین‌نامه راه‌آهن هند (۲۰۰۳)، آیین‌نامه راه‌آهن سنگین هند (۲۰۰۹) و همچنین نشریه ۳۹٤ راه و ترابری ایران (۱۳۸٦) علاوه بر مقادیر مجاز دانسیته و CBR، مدول ارتجاعی به دست آمده برای مصالح بستر و خاکریز در دومین مرحله آزمایش بارگذاری صفحه نیز به مقادیر مجازی محدود شده است. به طور مثال آیین‌نامه UIC 719R مدول ارتجاعی برای مصالح بستر را حداقل ٤٥ مگاپاسکال و برای مصالح خاکریز در شرایط استفاده از مصالح چسبنده ٤٥ مگاپاسکال و برای شرایط مصالح دانه‌ای ٦۰ مگاپاسکال منظور نموده همچنین مقادیر مجاز دانسیته و CBR برای بستر برابر ۳ و ۱۰۰٪ و برای مصالح خاکریز معادل ٦ و ۹۵ درصد است. از این‌رو هرگونه مصالح خاکی مورد استفاده در بستر و خاکریز می‌بایست، این الزام آیین‌نامه‌ای را پاسخگو باشد چرا که حصول به مقادیر یاد شده برای E_{V2} قطعاً باربری کافی و نشست مجاز را برای بدنه خاکریز و بستر تأمین خواهد نمود.

۵- یکی از مسائلی که در سال‌های اخیر به دنبال توسعه قابل ملاحظه صنعت خودرو در کشورهای مختلف جهان مورد توجه قرار گرفته است لاستیک‌های فرسوده و مشکلات زیست‌محیطی مرتبط با آنهاست. میزان مصرف تایر در

نقاط مختلف دنیا متأثر از تعداد خودروها، قوانین، فرهنگ مصرف، میزان دسترسی به تایر، رشد اقتصادی کشورها و ... است. طبق آمار به دست آمده در کشورهای صنعتی در هر سال به‌ازاء هر شهروند یک حلقه تایر مصرف می‌شود و این به معنی سرانه مصرف تقریبی ۹ کیلوگرم تایر در سال است. طبق آمارهای موجود جمعیت ٦٥ میلیون نفری ایران نیز در هر سال حدود ۱۰ میلیون حلقه تایر مصرف می‌کنند که این به معنی مصرف بیش از ۲۰۰ هزار تن تایر در سال می‌باشد. گرچه کاربردهای متنوعی مانند ساخت ایزوگام و عایق‌های حرارتی، تولید نوار و باندهای بلند، عایق و درزگیر، تهیه مالچ مخصوص تثبیت شن‌های روان، برای این مصالح تعریف شده است، ولی در کشورهای پیشرفته صنعتی نظیر آمریکا، کانادا، هند و غیره از این محصول به‌شکل لاستیک‌های خردشده در اندازه‌های مختلف در زهکشی جاده، ساخت خاکریز سبک راه، زیرسازی راه و در کوله پل‌ها بعنوان جاذب ارتعاش استفاده شده است. یکی دیگر از کاربردهایی که در دهه ۸۰ مورد توجه محققین قرار گرفته بکارگیری این مصالح به عنوان مخلوط با مصالح خاکی در خاکریز کوله پل‌ها و یا به صورت مخلوط با خاک خاکریز راه‌ها بوده است.

از جمله تحقیقات انجام گرفته در این زمینه می‌توان به کار، Humphrey و همکاران طی سال‌های ۱۹۸٦ تا ۱۹۹۹ اشاره نمود که در آنها، وضعیت ۳۷ خاکریز مخلوط با خرده لاستیک مورد بررسی قرار گرفته و عملکرد مثبت آنها مورد تأیید قرار گرفته است (Humphery and Holtz, 1986;, Humphery, 1999). از دیگر تحقیقات صورت گرفته می‌توان به کار Edil and Bosscher (1994) در خصوص تعیین خواص مهندسی همچون تراکم‌پذیری، مقاومت، قابلیت تغییر شکل و میزان نفوذپذیری خرده لاستیک به تنهایی و یا به صورت مخلوط با خاک اشاره نمود. نتیجه این مطالعات در قالب پیشنهاداتی به منظور کاربرد مخلوط خاک و تراشه‌های تایر فرسوده به عنوان مصالح پر کننده سبک، مصالح زهکش در ساخت بزرگراه‌ها، ساخت محل دفن زباله ارائه گردید. Ghazavi and Amel (2000) Sakhi تأثیر ابعاد خرده لاستیک‌ها به فرم نوارهایی به طول ۲ تا ٦ میلی‌متر را بر انرژی تراکم و نتایج آزمایش CBR در مخلوط ماسه و خرده لاستیک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده بیانگر این مطلب می‌باشد که، حجم لاستیک خردشده، عرض تکه‌های خردشده، نسبت ظاهری دانه‌ها و انرژی تراکم از مقادیر و فاکتورهای کلیدی و تأثیرگذار بر آزمایش CBR می‌باشد. در تحقیق دیگری نخعی و همکاران (۱۳۸۹) با انجام آزمایش‌های تراکم، برش مستقیم و سه‌محوری سیکلیک بر روی مخلوط خاک و خرده لاستیک نشان دادند که با افزایش درصدخرده لاستیک به ١٤ درصد دانسیته خشک ماکزیمم کاهش و در مقابل درصد رطوبت بهینه افزایش یافته است. همچنین چسبندگی خاک در ابتدا با افزایش خرده‌لاستیک به ۵ درصد افزایش و سپس کاهش یافته است. Sivakumar Babu and chouksey (2011) پاسخ تنش-کرنش لاستیک فرسوده مخلوط شده با خاک ریزدانه مورد بررسی قرار گرفته و مشاهده شده است که با افزودن این مصالح به خاک، مقاومت بهبود یافته و قابلیت فشردگی بطور قابل ملاحظه‌ای با افزودن درصد کوچکی از لاستیک فرسوده کاهش یافته است.

همانگونه که ملاحظه می‌شود در تمامی تحقیقات یادشده امکان‌سنجی استفاده از خاک مخلوط با خرده‌لاستیک به عنوان بستر یا خاکریز خطوط ریلی مورد توجه نبوده است، لذا در این مقاله با تمرکز به مدول الاستیسیته خاک مخلوط با خرده‌لاستیک، در ابتدا یک سری آزمایش‌های اولیه شامل دانه‌بندی، تراکم، ارزش ماسه‌ای، تعیین Gs، ظرفیت باربری کالیفرنیا (CBR) برش مستقیم، تک محوری و بارگذاری صفحه مرحله‌ای (PLT) روی خاک GW-GC خالص مخلوط با ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد خرده‌لاستیک انجام گرفته و در ادامه متناظر با همین شرایط، خاک مورد نظر به تنهایی و به صورت مخلوط با خرده‌لاستیک در اتاقک بارگذاری دانشکده مهندسی راه‌آهن کوبیده شده و سپس آزمایش بارگذاری صفحه با استفاده از جک بارگذاری ۳۰ تنی به صورت مرحله‌ای در طی سه مرحله انجام شده، و مقدار مدول ارتجاعی E_{V2} از نتایج آن

استخراج گردیده است. سپس مقایسه‌ای میان مقادیر مجاز آیین‌نامه‌ای با این مقادیر صورت گرفته و حداکثر مقدار خرده‌لاستیک قابل استفاده در مصالح خاکی خطوط ریلی اعم از بستر و بدنه خاکریز تعیین گردیده است.

۱. مشخصات مصالح مصرفی

مصالح خاکی مورد استفاده در این مقاله از مصالح سنگ شکسته رودخانه‌ای با دانه‌بندی مشخص می‌باشد. خرده‌لاستیک خردشده مورد استفاده در این تحقیق از تایرهای فرسوده وسایل نقلیه تشکیل شده که به صورت مکانیکی در چند مرحله و دارای دانه‌بندی یکنواختی می‌باشد. در ادامه مشخصات این مصالح به تفکیک مورد بررسی قرار داده می‌شود (Feng and Sutter, 2000).

۱-۱. *مصالح خاکی*

مصالح خاکی مورد استفاده در این تحقیق خاک درشت‌دانه با مقدار کمی رس و مطابق با تیپ پنج مصالح رودخانه‌ای (بر اساس نشریه ٢٣٤ وزارت راه و ترابری ایران) می‌باشد که مطابق طبقه‌بندی متحد با نام اختصاری GW-GC نامیده می‌شود(شکل۱). علت انتخاب این نوع خاک، درشت‌دانه بودن و ظرفیت باربری بالا می‌باشد که مطابق استاندارد UIC R719 در رده QS_3 قرار داشته و می‌توان از آن در خاکریز راه‌آهن و در قسمت اساس و زیر اساس بهره گرفت. جدول۱ مشخصات فنی و مهندسی خاک درشت‌دانه مورد استفاده که به وسیله آزمایش‌های اولیه شامل دانه‌بندی، تراکم، ارزش ماسه‌ای، تعیین Gs، ظرفیت باربری کالیفرنیا (CBR)، برش مستقیم، تک‌محوری و بارگذاری صفحه مرحله‌ای (PLT) استخراج شده است، به همراه آیین‌نامه‌های مربوطه نشان می‌دهد.

آزمایش برش مستقیم بر روی هر ٤ نمونه خاک مورد نظر مخلوط با درصدهای وزنی ۰،۵،۱۰ و۱۵ درصد خرده‌لاستیک با وزن مخصوص‌های به دست آمده از آزمایش‌های تراکم در جداول ۱ و ۳ با وزنه‌های ۱۹/۵، ۲۹/۵ و ۳۹/۵ کیلوگرم که با روش کنترل تغییر شکل‌ها (تغییر شکل‌ها را اعمال می‌کنند و نیروی برشی نظیر هرکدام را به دست می‌آورند) انجام شد که نتایج آن در جداول مذکور موجود می‌باشد.

جدول۱. مشخصات فنی خاک درشت‌دانه

استاندارد مورد استفاده	مقادیر	پارامتر
ASTM D698 [2000]	۲۲/۵۱	وزن واحد حجم (KN/m^3)
ASTM D2216 [2000]	٦/۸۲	درصد رطوبت (%)
ASTM D854 [2000]	۲/٥٤٦	چگالی
ASTM D1883 [2000]	۳۳/۲۱	نسبت باربری کالیفرنیا (%)
ASTM D3080 [2000]	۱۲/٦٦	چسبندگی (KN/m^2)
ASTM D3080	۳٦/۸۸	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)

۱-۲. *مصالح خاک و خرده‌لاستیک*

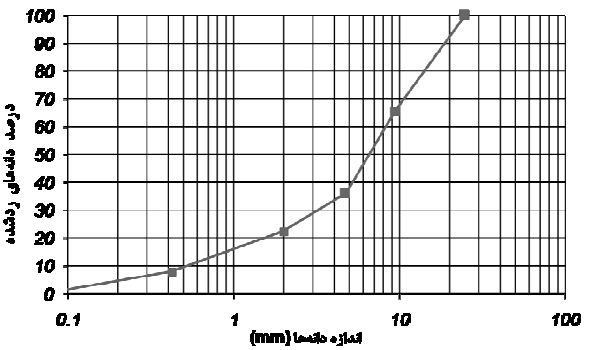
خرده های لاستیک مورد استفاده در این مطالعه، ذرات حاصله از خردکردن و آسیاب کردن تایرهای فرسوده اتومبیل‌هاست که توسط شرکت پرنیان لاستیک شرق تهیه و دانه‌بندی گردیده است. منحنی دانه‌بندی خرده‌لاستیک مورد استفاده در (شکل۲) ارائه شده است. جداول ذیل مشخصات فنی و مکانیکی این مصالح را به صورت خالص و همچنین مخلوط با خاک در درصدهای مختلف را نشان می‌دهد.

جدول۲. مشخصات فنی خرده‌لاستیک دانه‌بندی شده

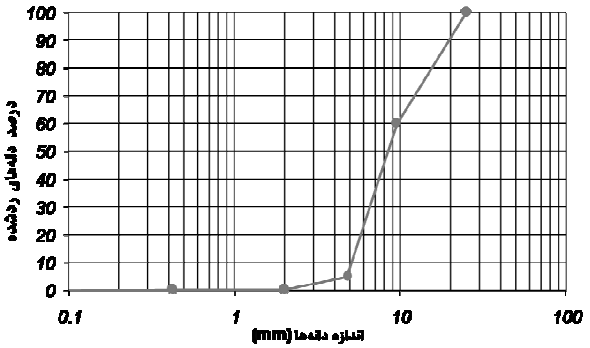
استاندارد مورد استفاده	خرده‌لاستیک خالص	پارامتر
ASTM D698	٦	وزن واحد حجم (KN/m^3)
ASTM D2216	-	درصد رطوبت (%)
ASTM C 127[2000]	۱/۱	چگالی
ASTM D1883	۱۷/۰۷	نسبت باربری کالیفرنیا (%)
ASTM D3080	-	چسبندگی (KN/m^2)
ASTM D3080	۳۷	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
ASTM D6270[2006]	۱۰/۰۲	مدول الاستیسیته (MPa)

جدول۳. مشخصات فنی مخلوط خاک با خرده‌لاستیک دانه‌بندی شده

استاندارد مورد استفاده	خاک با ۱۵٪ خرده لاستیک	خاک با ۱۰٪ خرده لاستیک	خاک با ۵٪ خرده لاستیک	پارامتر
ASTM D698	۱۸/۱۵	۱۹/۲۲	۱۹/۸٤	وزن واحد حجم (KN/m^3)
ASTM D2216	۹/۸۲	۸/۵۹	۸/۱	درصد رطوبت (%)
ASTM D1883	۱۰/۸	۲۱/۳۳	۲۱/۸	نسبت باربری کالیفرنیا (%)
ASTM D3080	۹/۲۳	۱۱/۲۸	۱۲/۹٤	چسبندگی (KN/m^2)
ASTM D3080	۲۸/٦	۲۹/۹۵	۳۳/۰٤	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)



شکل۱. منحنی دانه‌بندی ذرات خاک درشت دانه



شکل۲. منحنی دانه‌بندی ذرات خرده‌لاستیک

نتایج به دست آمده از آزمایش‌های استاتیکی فوق نشان می‌دهد، با افزایش میزان خرده‌لاستیک از ۵ تا ۱۵ درصد نسبت به حالت بدون خرده‌لاستیک وزن مخصوص به میزان ۱۱/۸٦ تا ۱۹/۳٦ درصد، ظرفیت باربری کالیفرنیا به میزان ۳٤/۳۵ تا ٦۷/٤۷ درصد، زاویه اصطکاک داخلی به میزان ۱۰/۸ تا ۲۱/٦۲ درصد کاهش داشته است. همچنین میزان چسبندگی در مخلوط ۵ درصد خرده‌لاستیک نسبت به خاک خالص به مقدار ۲/۱ درصد افزایش یافته ولی پس از آن مجدداً به میزان ۲۷/۱ درصد کاهش پیدا کرده است. همچنین نتایج آزمایش‌های به دست آمده برای آزمایش CBR و مقایسه آنها با آیین‌نامه UIC R719 معلوم شد که مقادیر CBR به دست آمده در هر ٤ مخلوط از حداقل مقادیر آیین‌نامه‌ای بیشتر بوده و الزامات را رعایت کرده است از طرفی دانسیته مخلوط‌ها در محل آزمایش به میزان ۹۸ درصد دانسیته آزمایشگاهی بوده و از این منظر نیز الزامات آیین‌نامه‌ای رعایت شده است.

۲. مشخصات جعبه بارگذاری و تجهیزات مورد استفاده در آزمایش

در این پروژه برای انجام آزمایش بارگذاری صفحه (PLT) از یک جعبه بارگذاری (Loading Chamber) به ابعاد ۱/۲×۲/۵×۲/۵ متر استفاده شده است. آزمایش‌های بارگذاری صفحه بر روی صفحه مربعی به ترتیب به عرض و ضخامت، ۳۰ و ۲/۵ سانتی‌متر انجام شده است. همچنین برای انجام آزمایش از تجهیزات دیگری از قبیل جک هیدرولیکی با امکان بارگذاری محوری تا ۳۰ تن و نیز یک گیج تغییرمکان‌سنج با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شده است. این آزمایش با درصدهای وزنی مختلف خاک و خرده‌لاستیک (۰،۵،۱۰ و۱۵ درصد) انجام گرفته است (شکل۳).

شکل۳. نمایی از اتاقک بارگذاری جهت انجام آزمایش PLT

۳. آماده‌سازی نمونه و روش انجام آزمایش

به منظور تعیین شرایط خاک به صورت خالص و یا مخلوط با خرده‌لاستیک جهت قرار دادن آن در اتاقک بارگذاری لازم است خاک در ابتدا در یک مقیاس کوچکتر بوسیله غلتک آزمایشگاهی کوبیده شده و تعداد پاس غلتک برای رسیدن به تراکم مورد نیاز تعیین شود برای این منظور با استفاده از پنل نشان داده شده در شکل ۵ و غلتک ۲۰ کیلوگرمی، خاک مورد نظر کوبیده شده و سپس دانسیته آن به صورت برجا بدست آمده است (شکل۵). با انجام آزمایش دانسیته در محل برای مخلوط‌های موردنظر با توجه به جداول ۱ و۳ مشخص شد که برای رسیدن خاک خالص به تراکم آزمایشگاهی نیاز به ۳۰ بار عبور غلتک، و برای مخلوط‌های ۵،۱۰ و۱۵ درصد وزنی خرده‌لاستیک بین ۳۰ تا ٤۰ بار عبور غلتک نیاز خواهد بود.

شکل٤. خاک‌های مورد نیاز جهت ساختن نمونهGW-GC

لازم به ذکر است که برای رسیدن به تراکم مورد نظر لایه‌های خاک در ضخامت برابر ۷ سانتی‌متر اجرا می‌شود. در ادامه بر همین مبنا خاک‌های مورد نظر در اتاقک بارگذاری ریخته شده و برای انجام آزمایش بارگذاری صفحه آماده شده‌اند.(شکل٤)

شکل۵. آزمایش دانسیته درمحل جهت تعیین تعداد دفعات بور غلتک

پس از انجام مراحل آماده‌سازی که در بالا به آن اشاره شد، و رساندن ارتفاع مخلوط مورد نظر به اندازه تعیین شده، وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش بارگذاری صفحه بر روی سطح مسطح نمونه قرار داده شده و بارگذاری در سه مرحله متفاوت به همراه باربرداری انجام شده است. لازم به ذکر است که در مرحله اول بارگذاری در سه گام ۰/۵ تنی اعمال و در ۲ گام باربرداری شده است، در ادامه مرحله دوم با گام ۰/۵ تن تا رسیدن به بار ۳ تنی اعمال و مجدداً باربرداری در ٤ گام صورت گرفته است، در مرحله سوم بارگذاری تا جایی ادامه پیدا کرده است که خاک از خود گسیختگی نشان دهد. اشکال ٦ و ۷ سطوح آماده شده خاک بدون خرده لاستیک و خاک دارای ۱۰درصد خرده‌لاستیک را برای انجام آزمایش بارگذاری صفحه مرحله‌ای نشان می‌دهد.

شکل٦. آزمایش PLT بر روی خاک مخلوط با ۱۰٪ خرده‌لاستیک

شکل۷. آزمایش PLT بر روی خاک بدون خرده‌لاستیک

٤. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های بارگذاری صفحه

با توجه به آزمایش‌های بارگذاری صفحه انجام شده بر روی مخلوط‌های ۵،۱۰ و۱۵ درصد خرده‌لاستیک و نیز خاک خالص در اتاقک بارگذاری و نیز جداول و نمودارهای مرحله‌ای بدست آمده می‌توان بر روی تأثیر خرده‌لاستیک بعنوان یک پارامتر کلیدی طراحی از یک سو و از سوی دیگر از تأثیر خرده‌لاستیک بر کاهش میزان باربری یا افزایش میزان باربری بحث نمود به عبارتی دیگر می‌توان ظرفیت باربری خاک مخلوط با خرده لاستیک را در مقایسه با خاک خالص مورد بررسی قرار داد. در ادامه بررسی‌های انجام شده در این خصوص ارائه می‌گردد.

٤-١. تأثیر خرده لاستیک بر مدول بارگذاری

نمودارهای بار- تغییرشکل برای خاک بدون خرده‌لاستیک و خاک‌های دارای ۵،۱۰ و۱۵ درصد خرده‌لاستیک در شکل‌های ۸ تا ۱۱ نشان داده شده و بر این اساس مدول الاستیسیته در دومین مرحله بارگذاری برای چهار ترکیب مختلف استخراج و در جدول ٤ ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود با افزایش درصد خرده‌لاستیک میزان مدول الاستیسیته در مرحله اول و دوم بارگذاری کاهش نشان داده است و می‌توان این دو مدول را به طور مناسبی با معادلات زیر بر حسب درصد خرده‌لاستیک (Ratio of Shred Tire) بیان نمود.

$$E_{v1} = -2.505(RST) + 71.03 \qquad R^2 = 0.9571 \qquad (۱)$$

$$E_{V2} = -2.6552(RST) + 74.634 \qquad R^2 = 0.9571 \qquad (۲)$$

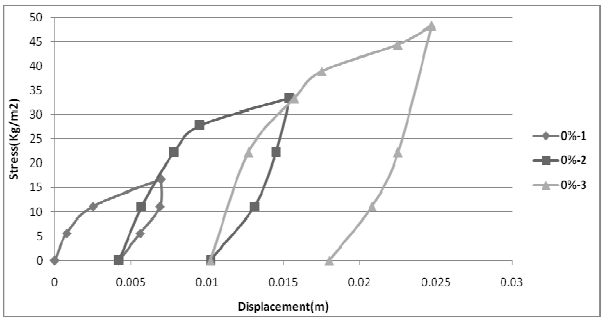
در این روابط مدول Ev_1، شیب منحنی بارگذاری در مرحله اول و مدول Ev_2 شیب خطی است که حلقه باربرداری و بارگذاری مجدد ایجاد می‌نماید و RST نیز بیانگر درصد خرده‌لاستیک مخلوط با خاک می‌باشد

جدول٤. خلاصه مقادیر مدول الاستیسیته برای مخلوط‌های خاک و خرده‌لاستیک

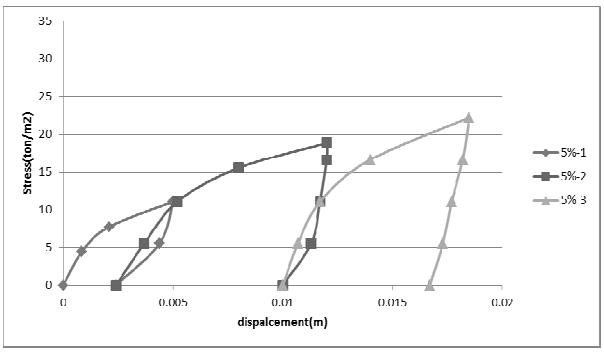
درصد خرده‌لاستیک مخلوط باخاک	E_{V1} (MPa)	E_{V2} (MPa)
۰	۷۳/٦٦	۷۷/٥٤
۵	۵۳/۵۸	٥٦/۱۸
۱۰	٤۷/۹٤	٤۹/۷۲
۱۵	۳۳/۷۹	۳٥/٤٤

با مقایسه مقادیر ارائه شده در جدول فوق برای مقادیر Ev_2 و Ev_1 ملاحظه می‌شود که مقدار مدول با افزایش تعداد مرحله‌ها افزایش یافته که این موضوع ناشی از کاهش تغییر شکل‌های تجمعی پلاستیک و غالب شدن رفتار دانه‌های خاک بر فضای خالی است.

نمودارهای مرحله‌ای نمونه خاک‌های مخلوط با درصدهای مختلف خرده‌لاستیک (۰،۵،۱۰ و۱۵درصد) به صورت زیر ارائه شده است:

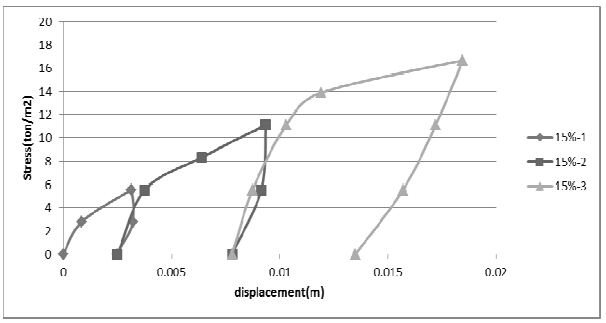


شکل۸. نمودار مرحله‌ای ۰٪ خرده‌لاستیک مخلوط با خاک

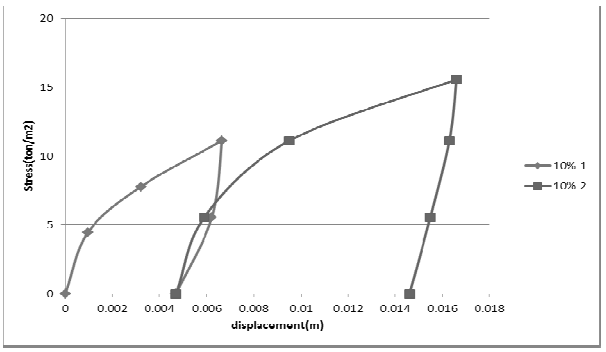


شکل۹. نمودار مرحله‌ای ۵٪ خرده‌لاستیک مخلوط با خاک

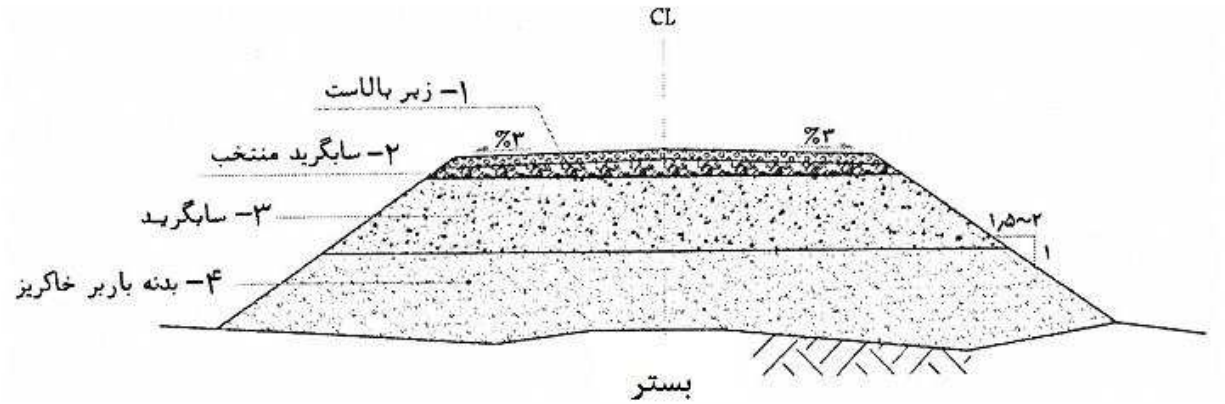
چنانچه این مقادیر با مقادیر مجاز آیین‌نامه UIC R719 مقایسه شود به راحتی می‌توان دریافت که از مقدار خرده‌لاستیک بالای ۱۰ درصد مقادیر Ev_2 به زیر ٤۵ مگاپاسکال می‌رسد، و لذا کاربرد آن در بستر خطوط ریلی امکان‌پذیر نیست. با توجه به آنکه مصالح دانه‌ای خاکریز نمی‌بایست مدول ارتجاعی زیر ٦۰ مگاپاسکال داشته باشد، ملاحظه می‌شود که وجود خرده‌لاستیک حتی به میزان ۵ درصد نیز باعث بروز مشکل در این خصوص خواهد شد و لذا از این منظر کاربرد خرده لاستیک در بدنه بستر با وجود خرده‌لاستیک توصیه نمی‌شود (شکل۱۲).



شکل۱۰. نمودار مرحله‌ای ۱۵٪ خرده‌لاستیک مخلوط با خاک



شکل۱۱. نمودار مرحله‌ای ۱۰٪ خرده‌لاستیک مخلوط با خاک



شکل۱۲. نمایی از ساختار خاکریز ریلی

٤-٢. تأثیر خرده‌لاستیک بر بار و تغییرشکل نظیر گسیختگی

در این بخش بار گسیختگی و تغییر شکل متناظر با آن برای خاک بدون خرده لاستیک با خاک‌های دارای خرده‌لاستیک مقایسه شده است. همانگونه که در جدول ۵ مشاهده می‌شود با افزودن ۵ درصد خرده لاستیک ظرفیت باربری حدوداً نصف شده است و پس از آن افزایش ۱۰ تا ۱۵ درصد خرده‌لاستیک تغییر مختصری در بار گسیختگی ایجاد نموده است و این در حالی است که تغییرشکل نظیر گسیختگی نسبت به خاک بدون خرده‌لاستیک کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است و با افزایش خرده‌لاستیک از ۵ به ۱۵ درصد، بار گسیختگی به میزان ٥٤ تا ٦٥/٥١ درصد کاهش یافته همچنین تغییر شکل نظیر گسیختگی تا ۱۰درصد خرده‌لاستیک به میزان ۳۲/۸ درصد کاهش یافته ولی از ۱۰ به ۱۵ این مقدار ۱۰ درصد افزایش می‌یابد، که ناشی از افزایش بیش از حد فضای خالی در مخلوط و کاهش ظرفیت باربری آن می‌باشد که باز هم حاکی از غیرقابل قبول بودن این درصد جهت استفاده در بستر راه‌آهن می‌باشد.

جدول۵. بار و تغییر شکل نظیر شرایط گسیختگی

تغییر شکل نظیر گسیختگی (mm)	بار گسیختگی (Ton)	درصد خرده لاستیک مخلوط با خاک
٢٤/٧	٤/٣٥	۰
١٨/٥	٢	٥
١٦/٦	١/٧	١٠
١٨/٤٥	١/٥	١٥

۵. نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر مجموعه‌ای از آزمایش‌های استاتیکی فیزیکی و مکانیکی شامل تراکم، هم‌ارز ماسه، ظرفیت باربری کالیفرنیا، برش مستقیم و بارگذاری صفحه مرحله‌ای روی خاک GW-GC به عنوان مصالح قابل استفاده در خاکریز خطوط ریلی به همراه درصدهای مختلفی از خرده‌لاستیک انجام شده است. برای انجام آزمایش بارگذاری صفحه مخلوط‌های خاک و خرده‌لاستیک با تراکم آزمایشگاهی درون اتاقک بارگذاری کوبیده شده و آزمایش بارگذاری صفحه مرحله‌ای روی آنها انجام شده است. عمده نتایج به دست آمده از این آزمایش‌ها به شرح زیر می‌باشد:

- افزایش میزان خرده‌لاستیک از ۵ تا ۱۵ درصد نسبت به حالت بدون خرده‌لاستیک وزن مخصوص به میزان ١١/٨٦ تا ١٩/٣٦ درصد کاهش یافت.
- همچنین با افزایش لاستیک فرسوده از ۵ به ۱۵ درصد از ظرفیت باربری کالیفرنیا به میزان ٣٤/٣٥ تا ٦٧/٤٧ درصد کاسته شد.
- پارامترهای مقاومت برشی شامل چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نیز با افزایش مقدار خرده‌لاستیک به ترتیب به میزان ٢١/٦٢ درصد و ٢٧/١ کاهش پیدا کردند.
- مقدار ارزش ماسه‌ای خاک مورد بررسی برابر ٤٨ درصد بوده که حاکی از مناسب بودن استفاده این نوع خاک بعنوان لایه‌های اساس، زیراساس و حتی قشر زهکش می‌باشد.
- با توجه به آزمایش‌های ظرفیت باربری کالیفرنیای انجام شده بر روی خاک تنها (۰٪ خرده لاستیک) با مقدار CBR، ۳۳/۲۱ درصد با توجه به ظرفیت باربری خوب آن می‌توان در مصالح اساس و زیراساس استفاده برد
- همچنین برای مخلوط‌های با ۵ و۱۰ درصد خرده‌لاستیک به ترتیب با عدد CBR، ۲۱/۸ و ۲۱/۳۳ درصد نیز همانند خاک بدون خرده‌لاستیک می‌توان در مصالح اساس و زیراساس استفاده شوند. و در نهایت از خاک مخلوط با ۱۵٪ خرده‌لاستیک با عدد CBR، ۱۰/۸ درصد به دلیل نسبتاً خوب بودن ظرفیت باربری آن تنها می‌توان در زیراساس بکار می‌رود
- با توجه به مقادیر به دست آمده برای مدول الاستیسیته در دومین مرحله بارگذاری در آزمایش بارگذاری صفحه، مقدار خرده‌لاستیک برای استفاده در بستر می‌بایست به ۱۰ درصد محدود گردد
- با افزایش تایر فرسوده خردشده به میزان ۵ تا ۱۵ درصد مقادیر E_{V1} و E_{V2} به ترتیب به میزان ٢٧/٢٦ تا ٥٤/١٢ درصد و ٢٧/٥٤ تا ٥٤/٢٩ کاهش می‌دهد.

- با توجه به مقادیر به دست آمده برای مدول الاستیسیته در دومین مرحله بارگذاری در آزمایش بارگذاری صفحه، استفاده از خرده‌لاستیک در ترکیب با مصالح دانه‌ای به عنوان بدنه خاکریز خطوط ریلی توصیه نمی‌شود.

مدول الاستیسیته در اولین و دومین مرحله بارگذاری در آزمایش بارگذاری صفحه، با دقت بسیار مناسبی به صورت خطی به درصد خرده‌لاستیک وابسته می‌باشد.

منابع

اسماعیلی، م.، بلوکیان، (متر جمین) ۱۳۸۹. ژئوتکنیک راه‌آهن و مدیریت زیرسازی، اصفهان: دانشگاه اصفهان.

محمدزاده، س.، ۱۳۷۸. تدوین و تالیف درس‌نامه روسازی راه‌آهن و ضوابط طراحی پل‌های راه‌آهن تهران، انتشارات دانشگاه علم و صنعت.

نخعی، ع.، مرندی، م.، ثانی کرمانی، س.، ۱۳۸۹. مطالعه آزمایشگاهی مخلوط‌های خاک و خرده‌های لاستیک. چهارمین همایش بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، تهران. انجمن ژئوتکنیک ایران.

وزارت راه و ترابری، ۱۳۸٦. نشریه شماره ۳۹٤: دستورالعمل طراحی و نظارت بر روسازی راه‌آهن سریع‌السیر. معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، وزارت راه و ترابری.

AREMA, and Manual, 2006. American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association.

ASTM D6270, 2006. Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications. ed. West Conshohocken, PA :Annual Book of ASTM Standards.

ASTM, D698, 2000. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. ed. West Conshohocken, PA,: Annual Book of ASTM Standards.

ASTM, D2216, 2000. Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. ed. West Conshohocken, PA,: Annual Book of ASTM Standards,

ASTM, D854, 2000. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ed. West Conshohocken, PA,: Annual Book of ASTM Standards.

ASTM, D1883, 2000. Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils. ed. West Conshohocken, PA,: Annual Book of ASTM Standards.

ASTM, D3080, 2000. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. ed. West Conshohocken, PA,: Annual Book of ASTM Standards.

ASTM, C127, 2000. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. ed. West Conshohocken, PA,: Annual Book of ASTM Standards.

Edil, T. B., and Bosscher, P. J., 1994. Engineering Properties of Tire Chips and Soil Mixtures. Geotechnical Testing. Journal., Vol. 17, Issue 4., No. 3.: 297–304.

Feng, Z-Y, Sutter, KG, 2000. Dynamic Properties of Granulated Rubber/Sand Mixtures. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 23, No. 3.: 338–344.

Ghazavi, M., Amel sakhi, M., 1380. Behavior of Sand-Reinforced with Waste Tire Shreds Using CBR Tests. The first conference on soil Improvement Amirkabir University of Technology.

Guidelines, 2009. Specifications for Design of Formation Heavy Axle Load. Report No. RDSO/2007/GE : 0014.

Guidelines, 2003. for earthwork in railway projects. Guideline No. GE: G-1.

Humphrey, D. N., Holtz, R. D., 1986. Reinforced Embankments A Review of Case Histories. Geotextiles and Geomembranes, 4 : 129-144.

Humphrey D. N., 1999. Civil Engineering Application of Tire Shreds. University of Maine

Sivakumar Babu, G. L., Chouksey, S. K., 2011. Stress-strain response of plastic waste mixed soil. Journal of Waste Management. Waste Management Journal, Elsevier publications, Volume 31, Issue 3: 481-488.

U1C Code 719R, 1994. Earthworks, and track-bed layers for railway lines. Leaflet to be classified in volume:VII - Way and Works, 2nd Edition, 1.1.