

بررسی آزمایشگاهی استفاده از پلی اتیلن کراس لینک بازیافتی به عنوان سنگدانه در آسفالت متخلخل

ایمان آقایان (مسئول مکاتبات)، دانشیار گروه راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

E-mail: iman.aghayan@shahroodut.ac.ir

ایمان محمدیان نامقی، کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

علیرضا داننده، کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

رضا بهزادیان، دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۰۷

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۰

چکیده

پلی اتیلن کراس لینک (XLPE) نوعی عایق برای کابل های فشار قوی است که به دلیل مقاومت الکتریکی و حرارتی مطلوب، به طور گسترده در پوشش کابل های انتقال الکتریسیته استفاده می شود. به دلیل نبود تکنولوژی مناسب برای بازیافت XLPE عمدتاً از روش های سوزاندن و دفن کردن برای ضایعات این مواد استفاده می گردد. در این پژوهش از ضایعات XLPE به عنوان جایگزین مصالح سنگی ریزدانه مخلوط های آسفالت متخلخل بهره گرفته شده است. به این منظور مقادیر ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد حجمی از مصالح سنگی ۲/۳۶ تا ۴/۷۵ میلیمتر با ذرات XLPE هم اندازه جایگزین گردیدند. جهت تخمین درصد قیر بهینه از آزمایش های کانتابرو و تعیین درصد فضاهای خالی مخلوط استفاده گردید. در گام بعد عملکرد نمونه ها از طریق آزمون های لاتمن اصلاح شده و کانتابرو بر روی نمونه های پیر شده و فرونشست قیر مورد ارزیابی واقع شد. بررسی ها نشان داد که ذرات XLPE به علت قابلیت جذب پایین، می توانند توانایی مخلوط های آسفالت متخلخل را برای مقاومت در برابر شرایط رطوبتی افزایش دهند. همچنین ارزیابی نتایج آشکار نمود که نمونه های حاوی XLPE جایگزین شده با ۲۵ درصد حجمی مصالح سنگی بین ۲/۳۶ تا ۴/۷۵ میلیمتر، بهترین عملکرد را نسبت به نمونه های شاهد و دیگر نمونه های حاوی XLPE دارا هستند.

واژه های کلیدی: آزمایش کانتابرو، آسفالت متخلخل، حساسیت رطوبتی، ضایعات XLPE

۱. مقدمه

2003]. همچنین در کشور سوئد این ضایعات در حدود چهل هزار

تن در سال ۲۰۰۷ برآورد گردیده است [Christéen, 2007].
 روسازی‌های نفوذپذیر^۲ نوع متمایزی از روسازی‌ها هستند که اجازه عبور آزادانه مایعات ناشی از بارش یا هر منشاء دیگر را از درون ساختار خود می‌دهند. این روسازی‌ها به‌عنوان بخشی از راهبردهای منابع آب، ذیل عناوینی چون سیستم‌های پایدار زهکشی شهری (SUDS^۳) در اروپا، طراحی شهری حساس به آب (WSUD^۴) در استرالیا و توسعه کم اثر (LID^۵) در ایالات متحده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. روسازی‌های نفوذپذیر به‌علت داشتن ساختار سازه‌ای متفاوت نسبت به روسازی‌های سنتی، سبب عبور رواناب‌های سطحی در کوتاه‌ترین زمان به داخل لایه‌های زیرین شده و از این طریق می‌توانند زمینه‌ساز مزایای متعددی همچون کاهش حجم رواناب و حداکثر نرخ تخلیه آن، افزایش تغذیه منابع آب زیرزمینی از رواناب‌های سطحی، بهبود کیفیت آب، کاهش دمای رواناب و تأثیر بر جزیره گرمایی ناشی از روسازی شوند. همچنین این روسازی‌ها می‌توانند با کاهش خطر هیدروپلانینگ^۶ و تابشهای خیره‌کننده از سطوح خیس روسازی^۷ و نیز کاهش و حذف سطوح یخ‌زده از سطح راه سبب ارتقاء ایمنی آنها گردند [Lucke, 2014; Park et al., 2014; Lucke, Boogaard and van de Ven, 2014; Mullaney and Lucke, 2014; Lucke et al., 2015; Eisenberg, Lindow and Smith, 2015; Weiss et al., 2015; Palla et al., 2015].

آسفالت متخلخل^۸ یکی از انواع رویه‌های روسازی‌های نفوذپذیر است که اغلب برای پارکینگ‌ها و یا جاده‌های با ترافیک سبک مورد استفاده قرار می‌گیرد. دانه‌بندی مخلوط‌های آسفالت متخلخل برخلاف دانه‌بندی مخلوط‌های آسفالتی متداول، باز^۹ یا میان تهی^{۱۰} است و مصالح درشت‌دانه به مقدار نسبتاً زیادی در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته در آنها مصرف می‌گردد. مصالح درشت‌دانه اسکلت اصلی باربر در مخلوط‌های آسفالت

در دهه‌های اخیر متعاقب رشد چشمگیر فعالیت‌های عمرانی، برداشت از منابع طبیعی شدت یافته است. علاوه بر این، حجم بالای تولیدات صنعتی، میزان قابل توجهی ضایعات در پی داشته که منجر به تأثیرات منفی بر محیط‌زیست گردیده‌ند. به عنوان نمونه تولید پلیمرها در سرتاسر جهان روز به روز در حال افزایش بوده و امروزه به بیش از ۳۵۰ میلیون تن در سال می‌رسد [PlasticsEurope, 2018]. اغلب ضایعات پلیمری شامل پلاستیک، لاستیک و مواد پلی‌اتیلنی، از جمله XLPE^{۱۱}، هستند که از صنعت بسته‌بندی، صنایع خودرو و کابل‌های الکتریکی تولید می‌شوند. از یک سو ایجاد این ضایعات باعث آلودگی محیط‌زیست شده و از سویی دیگر هزینه‌های زیادی را برای جداسازی و بازفرآوری تحمیل می‌نماید؛ به نحوی که بازیافت این مواد به چالشی بزرگ بدل گردیده است [Struik and Schöen, 2000].

به دلیل ویژگی‌های عایقی مناسب XLPE، از این ماده به طور گسترده در پوشش سیم‌ها و کابل‌های الکتریکی فشار قوی استفاده می‌شود. خصوصیات فیزیکی XLPE و عدم دسترسی به تکنولوژی مناسب برای بازفرآوری آن، سبب شده است که این ماده به ندرت قابل بازیافت باشد. سوزاندن و دفن کردن در زیر خاک از پرکاربردترین روش‌های دفع این مواد محسوب می‌شود. این درحالی است که سوزاندن XLPE سبب ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی شده و نیازمند هزینه اولیه بالا است. همچنین دفن این مواد با مشکل تملک زمین‌های بلا استفاده مواجه است.

طبق بررسی‌های انجام شده در نقاط مختلف دنیا، حجم ضایعات XLPE به بیش از هزاران تن در سال می‌رسد. برای مثال در ژاپن میزان دفن ضایعات XLPE مقدار قابل توجهی در حدود ده هزار تن در سال ۲۰۰۳ تخمین زده شده است [Tokuda et al.,]

آسفالت متخلخل ساخته شده با سرباره حاصل از کوره های آهن-گدازی نسبت به نمونه های شاهد با افزایش همراه بوده است [Hainin et al., 2014]. لو و همکاران [Liu et al., 2019] و اسکاف و همکاران [Skaf et al., 2017; Skaf et al., 2019] نیز طی پژوهش هایی جداگانه عملکرد مخلوط های آسفالت متخلخلی که مصالح سنگی آنها تماماً با سرباره های آهن گدازی جایگزین شده بود را مناسب برآورد نمودند. چن و وُنْگ در سال ۲۰۱۵ طی تحقیقی نتیجه گیری نمودند که می توان از مخلوط های حاوی مصالح سنگی حاصل از بتن بازیافتی و ضایعات شیشه در روسازی های با مقاومت پایین همچون پیاده روها و مسیرهای دوچرخه سواری استفاده نمود [Chen and Wong, 2015]. نورهفیزا و هاینین در سال ۲۰۱۶ گزارش نمودند که علی رغم عملکرد مکانیکی نامناسب آسفالت های متخلخل حاوی پوست نارگیل، این مخلوط ها می توانند ضریب سر و صدا^۳ی ترافیک را نسبت به نمونه های شاهد به میزان مناسبی کاهش دهند [Norhafizah and Hainin, 2016]. در سال ۲۰۱۶ مشاهده نمودند که جایگزینی فیلر رس سفیدکننده ضایعاتی بجای فیلر آهکی می تواند مقاومت کششی غیرمستقیم، سختی و مقاومت در برابر تغییر شکل های دائمی را در مخلوط های آسفالت متخلخل بهبود دهد [Sangiorgi et al., 2016]. مقایسه عملکرد مخلوط های آسفالت متخلخل حاوی فیلر آهکی با مخلوط های دارای فیلر لجن قرمز توسط ژانگ و همکاران نشان داد که مخلوط های دارای لجن قرمز از مقاومت بیشتری در برابر عربان-شدگی و شیارشدگی برخوردار هستند [Zhang et al., 2018]. مطالعات انجام پذیرفته در رابطه با تأثیر ضایعات پلاستیکی بر مخلوط های آسفالت متخلخل را می توان به دو گروه ضایعات لاستیک های تایرهای وسایل نقلیه و سایر ضایعات پلاستیکی تقسیم بندی نمود. در سال ۲۰۰۹ آزمایشات ویل ترک، فشاری سه

متخلخل می باشند و بکارگیری مصالح ریزدانه در آنها بگونه ای است که اختلالی در تماس سنگدانه ها درشت با یکدیگر ایجاد نمی نماید [Kandhal, 2002]. در مطالعه حاضر امکان استفاده از ضایعات XLPE به عنوان سنگدانه در مخلوط های آسفالت متخلخل بررسی شده است. جهت نیل به این مقصود، آزمایش های کانتابرو^{۱۱} و تعیین درصد فضای خالی مخلوط های آسفالتی انجام گردیده است. همچنین از آزمون های فرونشست قیر، کانتابرو بر روی نمونه های پیرشده و لاتمن اصلاح شده^{۱۲} برای ارزیابی مخلوط های حاوی مقادیر مختلف XLPE بهره گرفته شده است.

۲. ادبیات پژوهش

تاریخچه آسفالت متخلخل به اوایل دهه ۱۹۷۰ میلادی باز می گردد ولی استفاده وسیع آن از دهه ۱۹۸۰ آغاز شد. گرچه در سالهای اولیه عمدتاً دو کشور انگلستان و ایالات متحده از آسفالت متخلخل استفاده می کردند ولی با گذشت سالهای متمادی، کشورهای مختلف اروپایی نیز به طور گسترده ای از آن استفاده نمودند [Colwill et al., 1992]. تفاوت عمده آسفالت متخلخل استفاده شده در ایالات متحده با اروپا در میزان فضاهای خالی آنها می باشد. میزان فضاهای خالی مخلوط های آسفالت متخلخل در آمریکا حداکثر ۱۵ درصد و در اروپا حدود ۱۸ درصد است [Smith, Rice and Spelman, 1974].

تاکنون تلاش های متعددی جهت بکارگیری ضایعات صنایع مختلف در مخلوط های آسفالت متخلخل صورت پذیرفته است. این ضایعات طیف گسترده ای شامل: شیشه، سرباره کوره های آهن-گدازی، رس های سفیدکننده، لجن قرمز، پلاستیک ها و... را در بر می گیرند. در سال ۲۰۱۴ هاینین و همکاران مشاهده نمودند که مدول برجهنگی و مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط های

ضایعاتی می‌توانند بدون تأثیر قابل توجه بر روی میزان فضا‌های خالی و نفوذپذیری، حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت متخلخل را کاهش دهند [Suresha, Varghese and Shankar, 2010].

علی‌رغم حجم قابل توجه مطالعات صورت پذیرفته بر روی رفتار مخلوط‌های آسفالتی حاوی ضایعات بازیافتی، بررسی منابع در دسترس نشان می‌دهد که تحقیقات اندکی پیرو ارزیابی ضایعات XLPE در مخلوط‌های آسفالتی وجود دارند. در یکی از این محدود پژوهش‌ها، شانگ و همکاران در سال ۲۰۱۱ واکس پیرولیز شده^{۱۵} حاصل از ضایعات XLPE را به عنوان افزودنی در قیرهای مخلوط‌های ولرم آسفالتی^{۱۶} اصلاح شده با اس بی اس^{۱۷} بکار گرفتند. مشاهدات آنها آشکار نمود که واکس پیرولیز شده حاصل از ضایعات XLPE سبب کاهش درجه نفوذ و زاویه فازی شده و افزایش نقطه نرمی و مدول مختلط^{۱۸} را در پی دارد [Shang et al., 2011]. در مطالعه دیگری، کاستا و همکاران از ضایعات XLPE به عنوان افزودنی و مصالح جایگزین سنگدانه، در مخلوط‌های آسفالتی استفاده نمودند. مقاومت در برابر خستگی و شیارشدگی، حساسیت رطوبتی و مدول سختی نمونه‌های حاوی ۵ درصد وزنی مصالح سنگی XLPE با نمونه‌های فاقد آنها مورد مقایسه واقع شد. نتایج نشان داد که ضایعات XLPE تغییرشکل‌های دائمی را در مخلوط‌های آسفالتی کاهش می‌دهند، اما سبب افزایش حساسیت رطوبتی و کاهش عمر خستگی می‌گردند [Costa et al., 2017]. در تحقیق مشابهی، محمدیان نامقی و همکاران در سال ۲۰۱۹ ضایعات XLPE را به عنوان مصالح سنگی ریزدانه در مخلوط‌های آسفالتی بکار گرفتند. بر خلاف مشاهدات [Costa et al., 2017]، آنها گزارش نمودند که نمونه‌های حاوی XLPE حساسیت رطوبتی کمتری نسبت به نمونه‌های بدون آنها

محوری و فشاری متناوب^{۱۴} سه محوری بر روی مخلوط‌های آسفالت متخلخل حاوی قیرهای اصلاحی با لاستیک بازیافتی نشان دادند که این مخلوط‌ها برای مسیرهای با ترافیک سنگین مناسب نمی‌باشند [Yang and Yin, 2009]. ستین در سال ۲۰۱۳ با بهره‌گیری از آزمون‌های نفوذپذیری، سایش کانتابرو (کانتابرو)، مقاومت کششی غیرمستقیم، حساسیت رطوبتی و مدول برجهندگی نتیجه‌گیری نمود که با افزایش ابعاد و میزان بکارگیری تایرهای ضایعاتی، خصوصیات عملکردی مخلوط‌های آسفالت متخلخل تنزل می‌یابد [Cetin, 2013]. تأثیر ابعاد لاستیک‌های بازیافتی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالت متخلخل در پژوهش دیگری نیز در سال ۲۰۱۴ توسط ابراهیم و همکاران مورد بررسی واقع شد [Ibrahim et al., 2014]. مطالعه سانجورجی و همکاران در سال ۲۰۱۷ بر روی مخلوط‌های آسفالت متخلخل اصلاح شده با لاستیک تایرهای ضایعاتی نشان داد که اگرچه لاستیک‌های بازیافتی سبب کاهش مقاومت در برابر تغییرشکل‌های دائمی و کاستن از نفوذپذیری در راستای قائم می‌گردند، با این حال می‌توانند از حساسیت حرارتی آسفالت متخلخل و میزان فرو نشست (ریزش) قیر در آن نیز بکاهند [Sangiorgi et al., 2017]. در سال ۲۰۱۹ چنگ و همکاران [Cheng et al., 2019] و ماوآرنی و فازیای [Mawarni and Fauziah, 2019] نیز مطالعاتی بر روی مخلوط‌های آسفالت متخلخل حاوی لاستیک تایرهای ضایعاتی صورت دادند.

در سال ۲۰۰۲ پژوهش کامادا و یامادا نشان داد که مقاومت در برابر روانی و نیز مقاومت در برابر خرابی‌های خستگی و عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالت متخلخل حاوی ضایعات پلی‌اتیلن، نسبت به نمونه‌های شاهد افزایش پیدا نموده است [Kamada and Yamada, 2002]. بررسی‌های سورشا و همکاران در سال ۲۰۱۰ نشان داد که الیاف‌های خردشده حاصل از کیسه‌های پلاستیکی

جدول ۱. مشخصات قیر مصرفی

نتایج	استاندارد	آزمایش
۶۵	ASTM-D5	درجه نفوذ (mm، ۰/۱، ۲۵ °C)
۵۵	ASTM-D36	نقطه نرمی (°C)
حداقل ۱۰۰	ASTM-D113	کشش پذیری (cm، ۲۵ °C)
۲۸۸	ASTM-D92	نقطه اشتعال (°C)
۱/۰۲۷	ASTM-D70	وزن مخصوص (g/cm ³)

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی

حدود مجاز	نتایج	واحد	استاندارد	ویژگی
حداکثر ۲۰	۲۰	%	ASTM-D131	سایش لس آنجلس
-	۲/۷۷	g/cm ³	ASTM-C127	وزن مخصوص درشت دانه
حداکثر ۲	۰/۲۹	%	ASTM-C127	جذب آب درشت- دانه
حداکثر ۱۵	۱/۶	%	ASTM-C88	درصد افت وزنی با سولفات سدیم (درشت دانه)
حداقل ۹۰	۹۱	%	ASTM-D5821	درصد شکستگی
حداقل ۵۰	۷۸	%	ASTM-D2419	ارزش ماسه‌ای
-	۲/۷۱	g/cm ³	ASTM-C128	وزن مخصوص ریزدانه
حداکثر ۲	۲/۲	%	ASTM-C128	جذب آب ریزدانه
-	۲/۷۳	g/cm ³	ASTM-C188	وزن مخصوص فیلر

داشته‌اند. علاوه بر این، مطالعه آنها آشکار نمود که رفتار مخلوط-های آسفالتی حاوی XLPE در دماهای نزدیک به صفر درجه مطلوب‌تر از دماهای میانی است [Mohammadian Nameghi et al., 2019].

مرور ادبیات صورت پذیرفته نشان داد که تاکنون تأثیر ضایعات XLPE بر مخلوط‌های آسفالت متخلخل مورد تحقیق واقع نگردیده است. از این رو هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی امکان استفاده از ضایعات XLPE به عنوان جایگزین بخشی از مصالح سنگی مخلوط‌های آسفالت متخلخل تعیین شده است.

۳. مواد و مصالح

۳-۱ سنگدانه و قیر

قیر مصرفی در این مطالعه از نوع خالص ۶۰/۷۰ بوده که از پالایشگاه پاسارگاد تهران تهیه گردیده و مشخصات آن مطابق با مندرجات جدول ۱ می‌باشد. همچنین سنگدانه مورد استفاده، از نوع سنگ آهکی بوده که از کارخانه آسفالت راه‌سازان کویر واقع در شهر میامی تهیه شده است. مشخصات مصالح سنگی در جدول ۲ و محدوده دانه‌بندی انتخابی در جدول ۳ نشان داده شده است. دانه‌بندی طرح بر مبنای دانه‌بندی‌های مندرج در نشریه ۱-۳۸۴ ذیل عنوان: دستورالعمل طرح، اجرا و نگهداری آسفالت متخلخل [Technical Specifications No. 384-1, 2015]، انتخاب گردیده است. برای دانه‌بندی انتخاب شده، نمونه‌ها با درصدهای مختلف قیر و با استفاده از ۵۰ ضربه چکش مارشال تهیه گردیدند. فضای خالی برای هر مخلوط کوبیده شده، شامل مصالح سنگی درشت، توسط آزمایش میله تعیین شده و منطبق بر توصیه آیین‌نامه مذکور از تماس سنگدانه با سنگدانه اطمینان حاصل گردید. آزمایش تعیین فضای خالی مصالح درشت‌دانه براساس استاندارد [AASHTO T19, 2014] انجام شد.

گردیده و سپس غربال شدند. ابعاد ضایعات انتخاب شده بین ۲/۳۶ تا ۴/۷۵ میلی‌متر (مانده بر روی الک شماره ۸) بودند تا بتوان آنها را با مصالح‌سنگی همین رده در درصدهای مورد نظر جایگزین نمود.

۴. روش تحقیق

۴-۱ ساخت نمونه‌ها

نمونه‌های مورد بررسی با استفاده از روش مارشال منطبق بر استاندارد [ASTM D1559, 1989] ساخته شدند. پیرو این استاندارد، قطر نمونه‌ها ۴ اینچ (۱۰۱/۶ میلی‌متر) و ارتفاع آنها ۲/۵ اینچ (۶۳/۵ میلی‌متر) در نظر گرفته شد، که با اعمال ۵۰ ضربه چکش مارشال در هر طرف متراکم گردیدند. برای ساخت گروه نمونه‌های شاهد (فاقد XLPE) و همچنین گروه‌های با جایگزینی ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد حجمی XLPE بجای مصالح‌سنگی مانده بر روی الک شماره ۸^{۱۹}، از چهار میزان قیر ۴، ۴/۵، ۵ و ۵/۵ درصد استفاده شد.

۴-۲ تصویربرداری به روش سی تی اسکن^{۲۰}

هدف از تصویربرداری سی تی اسکن نمایان ساختن درون نمونه‌های ساخته شده و اطمینان از توزیع مناسب ذرات XLPE در ساختار آن است. پیش از این، ابزار تصویربرداری سی تی اسکن توسط محققین مختلفی برای بررسی مخلوط‌های آسفالتی بکار گرفته شده است [Zhang et al., 2015; Zhang et al., 2016]. ذکر این نکته ضروری است که نتایج سی تی اسکن مبتنی بر تفاوت چگالی مواد می باشد. به عبارت دیگر، تشخیص و تفکیک موادی که دارای چگالی یکسانی هستند با این روش کمی دشوار است [Hassan et al., 2015].

شکل ۱ تصویر سی تی اسکن برای مخلوط آسفالتی شاهد و همچنین نمونه حاوی XLPE را به نمایش گذاشته است. در شکل ۱ ب مشاهده می‌گردد که در نمونه حاوی XLPE سنگدانه‌ها به دلیل چگالی بیشتر پررنگ تر دیده شده و XLPE موجود در نمونه

درصد افت وزنی با سولفات سدیم (ریزدانه)	ASTM-C88	%	۱/۸	حداکثر
				۱۲

جدول ۳. دانه‌بندی مصالح‌سنگی

شماره دانه‌بندی (اندازه الک)	حدود آیین‌نامه	درصد وزنی (درصد انتخابی)	حدود رواداری مجاز
۱۹ میلی‌متر	۱۰۰	۱۰۰	-
۱۲/۵ میلی‌متر	۸۵-۱۰۰	۹۲/۶	±۶
۹/۵ میلی‌متر	۵۵-۷۵	۶۵/۵	±۶
۴/۷۵ میلی‌متر	۱۰-۲۵	۱۸/۷	±۵
۲/۳۶ میلی‌متر	۵-۱۰	۸/۹	±۴
۰/۰۷۵ میلی‌متر	۲-۴	۴/۴	±۲

۳-۲ فیلر

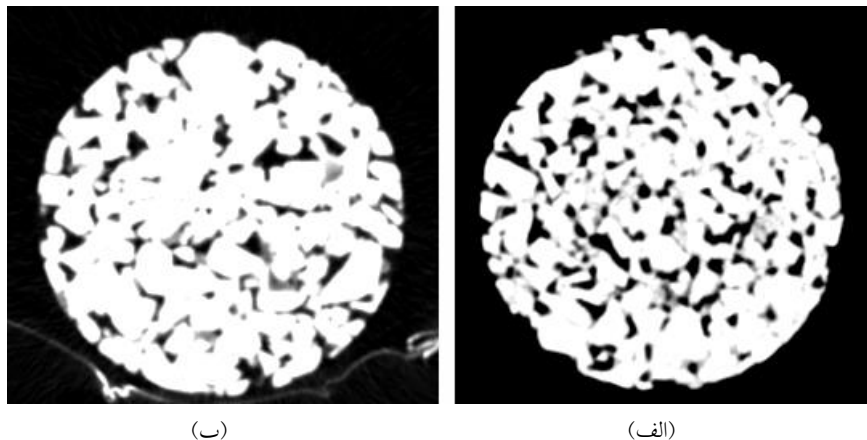
فیلر مصرفی در این مطالعه از نوع آهکی بوده و به میزان ۴/۴ درصد استفاده شده است. با توجه به اینکه مخلوط آسفالت متخلخل به طور دائم در معرض آب قرار دارد، پدیده عریان‌شدگی یکی از مهمترین عیوب آن محسوب می‌گردد. از رایج‌ترین فیلرهای مصرفی که خاصیت ضد عریان‌شدگی دارند فیلر آهکی است، که علاوه بر کاهش استعداد عریان‌شدگی، به طور مؤثری حساسیت رطوبتی و پیرشدگی قیر را کاهش می‌دهد.

۳-۳ پلی‌اتیلن کراس لینک (XLPE)

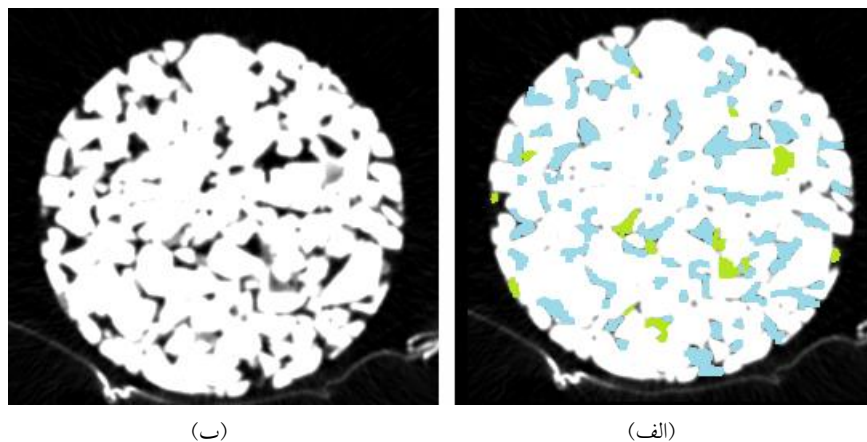
به دلیل ویژگی‌های فیزیکی مناسب XLPE، این ماده به عنوان یک عایق به طور گسترده در پوشش سیم‌ها و کابل‌های الکتریکی فشار قوی مورد استفاده می‌باشد. ضایعات XLPE بکارگرفته شده در این مطالعه از شرکت کابل مغان شاهرود تهیه گردیده است. این XLPE دارای وزن مخصوص ۰/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. در گام نخست ضایعات XLPE توسط دستگاه آسیاب خرد

XLPE جایگزین سنگدانه‌های موجود (ناحیه‌های سبز رنگ) در مخلوط آسفالتی را به تفکیک نشان می‌دهد.

به دلیل چگالی کمتر نسبت به سنگدانه‌ها کم رنگ تر می‌باشد. ضمناً فضاهای خالی نمونه، تیره‌ترین رنگ را دارند. شکل ۲، برخی از فضاهای خالی نمونه (ناحیه‌های آبی رنگ) و برخی از ذرات



شکل ۱. تصویربرداری سی تی اسکن از (الف) نمونه شاهد، (ب) نمونه حاوی ۷۵ درصد XLPE



شکل ۲. نمونه حاوی ۷۵ درصد XLPE (الف) تصویر تفکیک برخی از ذرات XLPE و فضاهای خالی نمونه، (ب) تصویر از نمونه اصلی

۳-۴ انجام آزمایش‌ها

منطبق بر [Technical Specifications No. 384-1, 2015] آزمایش‌های مورد نیاز برای تعیین درصد قیر بهینه مخلوط آسفالت متخلخل شامل: آزمون کانتابرو (به منظور تعیین حد پایین میزان قیر)، آزمون تعیین درصد فضاهای خالی نمونه (به منظور تعیین حد

بالای میزان قیر)، آزمون فرونشست (ریزش) ^{۳۱} قیر و آزمون لاتمن اصلاح شده می‌شوند.

۴-۳-۱ آزمایش کانتابرو

در سال ۱۹۸۱ سه محقق اسپانیایی، در کنفرانس کن اعلام نمودند که آزمایش مارشال برای طرح اختلاط آسفالت متخلخل کافی نیست. آنها روش کانتابرو را ارائه دادند [Isenring, Koster

درون یک سبد سیمی کوچک با اندازه سوراخ‌های $6/4$ میلیمتر گذاشته و این سبد را بر روی یک بشقاب با وزن معلوم قرار می‌دهند. سپس نمونه به همراه سبد و بشقاب در یک آون از پیش گرم شده - در دمایی 10 درجه سانتیگراد بیشتر از درجه حرارت تولید مخلوط - قرار می‌گیرد. پس از گذشت یک ساعت، نمونه به همراه بشقاب از آون بیرون آورده شده و وزن می‌شود. در پایان مقدار فرونشست چسباننده بر حسب درصد گزارش می‌گردد. [Technical Specifications No. 384-1, 2015] حداکثر میزان فرونشست را $0/3$ درصد تعیین نموده است. در پژوهش حاضر دمای آزمون 160 درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد.

۴-۳-۴ آزمایش لاتمن اصلاح شده

پیرو استاندارد [AASHTO T283, 2007]، برای نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی XLPE در درصد قیرهای مختلف، ابتدا 6 نمونه به روش مارشال تهیه شده و سپس در دو گروه سه تایی خشک و اشباع، به گونه‌ای تقسیم گردیدند که متوسط میزان فضاهای خالی برای هر سری تقریباً با هم برابر باشد. در گام بعد، نمونه‌های خشک توسط پلاستیک پوشانده شده و پس از گذراندن 2 ساعت در حمام آب 25 درجه سانتیگراد، مقاومت کششی غیرمستقیم آنها اندازه‌گیری شد. نمونه‌های دیگر تحت شرایط خلاء نسبی بگونه‌ای اشباع گردیدند که بین 55 تا 80 درصد اشباع شوند. پس از آن توسط سلفون پوشانده شده و در یک کیسه پلاستیکی به همراه 10 میلی‌لیتر آب تحت یک چرخه ذوب‌یخبندان واقع شدند؛ به این ترتیب که به مدت 16 ساعت در دمای $18-$ درجه سانتیگراد و سپس به مدت 24 ساعت در دمای 60 درجه سانتیگراد قرار گرفتند. در پایان نمونه‌های اشباع به مدت 2 ساعت در حمام آب 25 درجه سانتیگراد قرار گرفته و سپس در دمای اتاق تحت آزمون مقاومت کششی با نرخ بارگذاری 55 میلیمتر بر دقیقه واقع گردیدند. نتیجه آزمایش (نسبت مقاومت کششی) از تقسیم مقاومت کششی

[and Scazziga, 1990]. در این روش نمونه مارشال را در درون دستگاه آزمایش لس‌آنجلس (بدون گلوله‌های فلزی) قرار داده و درصد وزن جدا شده از نمونه اولیه را پس از 300 بار چرخش با سرعت 30 دور در دقیقه به دست می‌آورند. منطبق بر استاندارد اسپانیایی [NLT-352/86, 1986]، مقدار متوسط سایش برای پنج نمونه نباید از میزان 25 درصد در دمای 25 درجه سانتیگراد تجاوز نماید؛ همچنین برای هیچ نمونه‌ای نباید از 50 درصد بیشتر باشد. حدود بیان گردیده ارضاکنده محدودیت [Technical Specifications No. 384-1, 2015] نیز می‌باشد. درصد قیر تعیین شده با این آزمون، حد پایین میزان قیر بهینه مخلوط را معین می‌نماید.

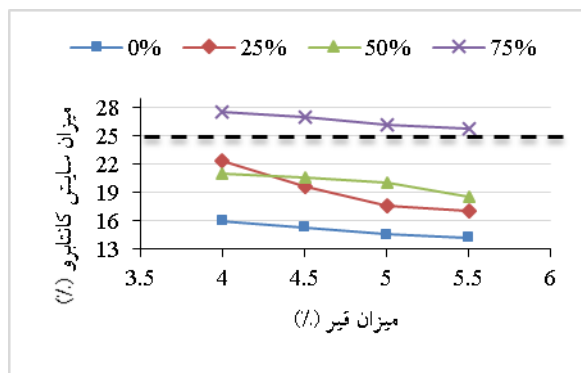
۴-۳-۴ آزمایش تعیین درصد فضای خالی نمونه

محدودیت در میزان فضای خالی مخلوط جهت تعیین حد بالای قیر بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرد. توصیه می‌شود که میزان فضاهای خالی برای مخلوط آسفالت متخلخل از 20 درصد کمتر نگردد [Technical Specifications No. 384-1, 2015]. چنانچه درصد فضای خالی مورد نظر تأمین نشود، بایستی دانه‌بندی مصالح - سنگی را - در دامنه انتخاب شده - تغییر داد و یا درصد قیر بکار گرفته شده را اصلاح نمود. در این مطالعه به منظور تعیین وزن مخصوص واقعی مخلوط از استاندارد [ASTM D6752, 2011] استفاده گردید.

۴-۳-۴ آزمایش فرونشست قیر

هدف از انجام این آزمایش، سنجش میزان جداشدگی مصالح از نمونه آسفالت متخلخل است. مصالحی که زهکشی می‌شوند ممکن است ترکیبی از چسباننده‌های قیری، یا ترکیبی از چسباننده قیری و افزودنی‌ها و یا به همراه مصالح سنگی ریزدانه باشند. منطبق بر استاندارد [AASHTO T305, 2005]، روش آزمایش به این ترتیب است که مخلوط غیرمترکم تهیه شده با مقدار قیر بهینه را

علاوه بر این، داده‌های خروجی آزمون نشان می‌دهد که برای نمونه‌های با ۷۵ درصد XLPE مقادیر سایش بیش از حد مجاز (۲۵ درصد) می‌باشند. این به آن معنی خواهد بود که این گروه از نمونه‌ها نمی‌توانند الزامات حداقل را برآورده نموده و برای بکارگیری در شرایط واقعی مناسب نیستند. تقارن افزایش میزان سایش نمونه‌ها با افزایش میزان XLPE در آنها، به دلیل تضعیف تماس و اتصال سنگدانه‌ها (به‌خصوص مصالح سنگی درشت‌دانه) با یکدیگر، ناشی از تغییر در اسکلت دانه‌بندی است.



شکل ۳. تغییرات درصد سایش کانتابرو با تغییر در میزان قیر

۲-۵ آزمایش تعیین درصد فضاهای خالی نمونه

نتایج آزمایش تعیین درصد فضاهای خالی در شکل ۴ قابل مشاهده است. همان‌گونه که مورد انتظار می‌باشد با افزایش میزان قیر، درصد فضاهای خالی در تمام نمونه‌ها کاهش یافته است. علاوه بر این دیده می‌شود که با افزایش مقدار XLPE، میزان فضاهای خالی نمونه‌ها در درصد قیرهای مختلف با افزایش همراه بوده است. دلیل این موضوع خاصیت ارتجاعی XLPE و متعاقب آن کاهش تراکم نمونه‌ها - تحت تعداد ضربات مشابه - به ازای افزایش میزان XLPE در نمونه‌ها است.

با توجه به یافته‌های آزمون‌های سایش کانتابرو (حد پایین میزان قیر) و تعیین فضاهای خالی (حد بالای میزان قیر) و نیز محدودیت حداقل میزان قیر ۴/۵ درصد جهت تأمین دوام مناسب برای

نمونه‌های اشباع به مقاومت کششی نمونه‌های خشک به دست آمد. حداقل مقدار قابل قبول برای این نسبت ۰/۸ می‌باشد [Technical Specifications No. 384-1, 2015].

۴-۳-۵ آزمایش کانتابرو بر روی نمونه‌های پیرشده

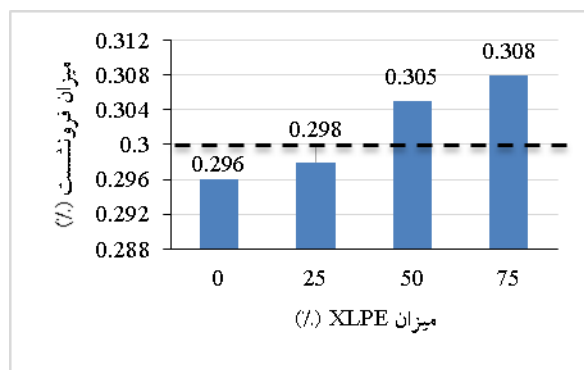
وجود فضاهای خالی نسبتاً زیاد در مخلوط‌های آسفالت متخلخل باعث می‌شود تا قیر موجود در آنها با سرعت بیشتری نسبت به مخلوط‌های متراکم آسفالتی سخت شود. این امر در کاهش چسبندگی و دوام مؤثر بوده و در نتیجه جداسازی اجزای مصالح-سنگی را در پی دارد. بنابراین در طراحی این مخلوط‌ها بایستی شرایط پس از پیرشدگی نیز مد نظر قرار گیرد. [Technical Specifications No. 384-1, 2015] توصیه می‌نماید که از آزمون کانتابرو جهت ارزیابی حساسیت مخلوط‌های آسفالت متخلخل نسبت به پیرشدگی زودرس استفاده گردد. در این آزمایش نمونه‌های مارشال به مدت ۷ روز در داخل آون با دمای ۶۰ درجه سانتیگراد قرار گرفته و سپس در دمای محیط سرد می‌شوند. در نهایت آزمایش کانتابرو بر روی این نمونه‌ها انجام می‌پذیرد. میانگین میزان افت وزنی نمونه‌ها نباید از ۳۰ درصد تجاوز نماید [Technical Specifications No. 384-1, 2015].

۵. نتایج و بحث در آن

۱-۵ آزمایش کانتابرو

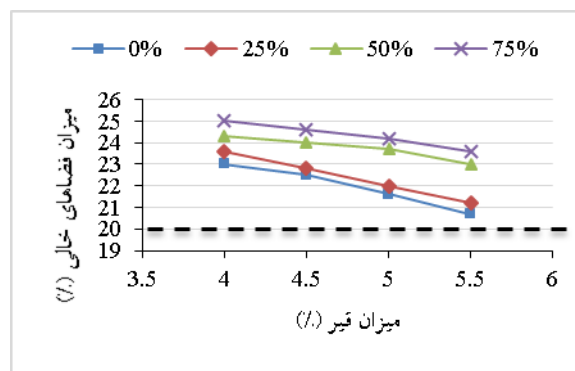
نتایج آزمایش کانتابرو در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد، در شکل ۳ نشان داده شده است^{۲۲}. همان‌طور که مشاهده می‌گردد برای تمام نمونه‌ها با افزایش درصد قیر، میزان سایش کاهش یافته است. این روند کاهشی درصد سایش ناشی از افزایش میزان قیر، در همه نمونه‌های حاوی ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد XLPE قابل مشاهده است. علت کاهش ملاحظه گردیده می‌تواند افزایش چسبندگی مصالح در اثر افزایش میزان قیر و نیز کاهش فضاهای خالی درون مخلوط باشد.

مقاومت کششی نمونه‌ها در حالت خشک و پس از شرایط اشباع-شدگی در شکل ۶ نشان داده شده است. بررسی داده‌های این شکل آشکار می‌نماید که مطابق انتظار، مقاومت کششی مخلوط‌های قرار گرفته تحت شرایط رطوبتی کمتر از نمونه‌های خشک بوده است. همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌گردد، نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (عدد TSR) برای کلیه نمونه‌های اصلاح شده با XLPE در محدوده مجاز (بیشتر از ۰/۸) می‌باشد. علاوه بر این دیده می‌شود که افزایش میزان XLPE سبب افزایش نسبت مقاومت کششی شده است. به دیگر بیان افزایش XLPE کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت متخلخل را در پی داشته است. علت این موضوع، همچون میزان فرونشست، ریشه در قابلیت جذب پایین ذرات XLPE دارد [Shamsaei, Aghayan and Kazemi, 2017]. عدم جذب آب توسط XLPE سبب حفظ بیشتر ظرفیت باربری مخلوط‌ها در حضور رطوبت، نسبت به نمونه‌های شاهد گردیده است.



شکل ۵. مقدار فرونشست نمونه‌ها

مخلوط‌های آسفالت متخلخل [Ruiz et al., 1990; Technical Specifications No. 384-1, 2015]، در ادامه این پژوهش از میزان قیر ۴/۵ درصد به عنوان میزان قیر بهینه جهت ساخت نمونه‌ها استفاده گردیده است.



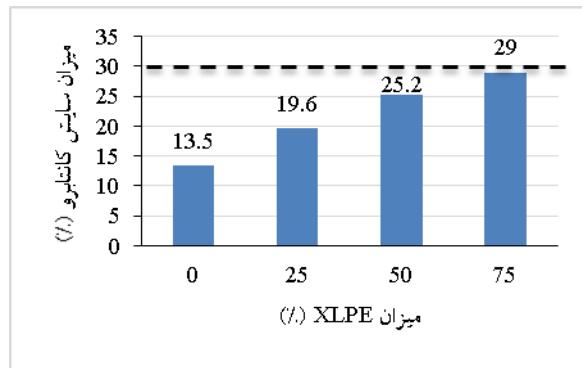
شکل ۴. تغییرات درصد فضاهای خالی با تغییر در میزان قیر

۳-۵ آزمایش فرونشست قیر

مقدار فرونشست قیر برای نمونه‌های مختلف در شکل ۵ نمایش داده شده است. دیده می‌شود که با افزایش میزان XLPE، مقدار فرونشست افزایش یافته است. میزان فرونشست برای نمونه‌های شاهد و دارای ۲۵ درصد XLPE تقریباً برابر بوده و در نمونه‌های حاوی ۵۰ و ۷۵ درصد XLPE با افزایش همراه بوده است. این افزایش به نحوی بوده که برای نمونه‌های با ۵۰ و ۷۵ درصد XLPE از حداقل مجاز (۰/۳ درصد) فراتر رفته است. علت این موضوع را می‌توان ناشی از خصوصیت جذب پایین XLPE دانست [Shamsaei, Aghayan and Kazemi, 2017]. عدم جذب کافی قیر توسط ذرات XPLE سبب می‌گردد تا در دماهای بالا نشست بیشتری از مخلوط آسفالت متخلخل رخ داده و نتیجتاً قیر لازم برای انسجام مخلوط (خصوصاً در سطوح بالایی لایه روسازی) تأمین نگردد.

۴-۵ آزمایش لاتمن اصلاح شده

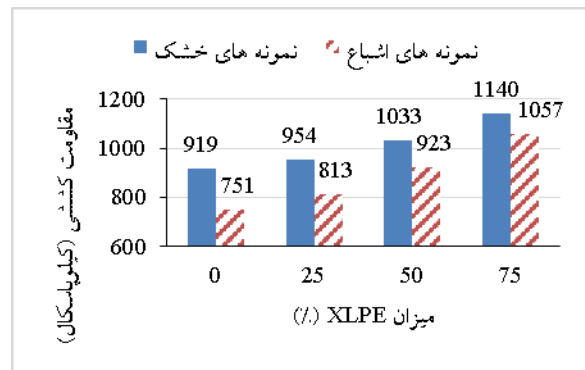
به نحوی که نمونه‌های حاوی ۷۵ درصد XLPE نتوانستند حداقل - های مورد نیاز را در این رابطه برآورده نمایند. علت این تناقض را می‌توان در تغییرات ضخامت فیلم قیر دور اجزای اسکت باربر مصالح سنگی و XLPE جست و جو نمود. همان‌گونه که پیش از این به آن اشاره شد، ذرات XLPE میزان قیر بسیار ناچیزی به خود جذب می‌نمایند. این موضوع سبب می‌گردد تا میزان قیر در دسترس برای چسباندن اجزای اسکت باربر افزایش یافته و نتیجتاً ضخامت فیلم قیر بیشتری به دور آنها شکل بگیرد. افزایش ضخامت فیلم قیر دور مصالح سنگی و اجزای XLPE، سبب کاهش میزان پیرشدگی چسباننده قیری شده است.



شکل ۸. تغییرات درصد سایش نمونه‌های پیرشده حاوی مقادیر

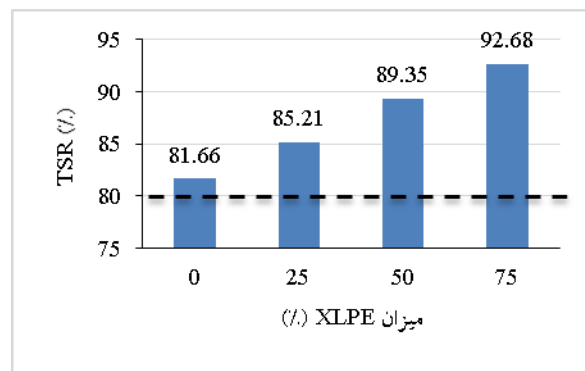
مختلف XLPE

با وجود آنکه [Technical Specifications No. 384-1, 2015] بکارگیری قیر خالص را برای ساخت مخلوط‌های آسفالت متخلخل منع ننموده است، برخی پژوهشگران عدم بکارگیری آن را برای این مخلوط‌ها توصیه نموده و عدم پایداری مخلوط آسفالت متخلخل ساخته شده با این نوع قیر را گزارش نموده‌اند [Ziari and Shadman, 2013]. نتایج پژوهش حاضر، آن‌گونه که ذکر گردید، نشان می‌دهد که مطابق با توصیه‌های [Technical Specifications No. 384-1, 2015]، اگرچه بایستی برای بکارگیری مخلوط‌های آسفالت متخلخل ساخته شده با قیر خالص



شکل ۶. مقاومت کششی نمونه‌های خشک و اشباع حاوی درصدهای

مختلف XLPE



شکل ۷. تغییرات TSR با درصدهای مختلف XLPE

۵-۵ آزمایش کانتابرو بر روی نمونه‌های پیرشده

با توجه به شکل ۸ دیده می‌شود که با افزایش درصد XLPE در نمونه‌ها، میزان سایش افزایش یافته، اما در تمام نمونه‌ها درصد سایش از حداکثر مجاز (۳۰ درصد) [Technical Specifications No. 384-1, 2015] کمتر بوده است. این در حالی است که پیش از این مشاهده گردیده بود به دلیل حضور XLPE در اسکت دانه‌بندی، میزان تراکم نمونه‌ها کاهش یافته و در نتیجه فضاهای خالی نسبتاً زیادی (تا حدود ۲۵ درصد) در مخلوط‌های مورد ارزیابی بوجود آمده است، که می‌تواند آنها را نسبت به هوازگی حساس نماید. ضمناً نتایج آزمون کانتابرو بر روی نمونه‌های بدون اعمال پیرشدگی از حساسیت مخلوط‌های آسفالت متخلخل حاوی XLPE نسبت به سایش حکایت داشته، فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال سیزدهم / شماره سوم (۵۲) / بهار ۱۴۰۱

(۲/۵ درصد)، ۴/۳۵ درصد بیشتر از نمونه‌های فاقد XLPE بوده است.

۳. ذرات XLPE به دلیل خاصیت ارتجاعی، توانایی تراکم مخلوط آسفالتی را کاهش می‌دهند. اگرچه این موضوع به دلیل حضور فضاهای خالی نسبتاً زیاد در مخلوط‌های آسفالت متخلخل ایرادی به ساختار کلی مخلوط وارد نمی‌نماید، اما بایستی در میزان و نحوه تراکم آزمایشگاهی و کارگاهی مدنظر قرار گیرد. وجود فضاهای خالی بیش از میزان پیش‌بینی شده می‌تواند سبب تخریب زودرس مخلوط‌های آسفالت متخلخل گردد.

علی‌رغم اینکه خروجی برخی از آزمون‌های انجام پذیرفته در پژوهش حاضر نشان دادند که بعضی از نمونه‌های مورد بررسی نمی‌توانند حداقل الزامات بکارگیری در شرایط واقعی را احراز نمایند، اما به نظر می‌رسد که به دلیل نزدیکی نتایج مورد قبول واقع نشده به مرز قبولی، امکان اصلاح و دستیابی به نتایج بهتر در آینده وجود دارد. به عنوان نمونه، در صورت بکارگیری قیرهای اصلاح شده با ویسکوزیته بالاتر (همچون قیرهای پلیمری، حاوی الیاف و...) بجای قیرهای خالص، می‌توان عملکرد بهتری از مخلوط‌های آسفالت متخلخل حاوی XLPE انتظار داشت. مجموعاً می‌توان بیان داشت که ضایعات XLPE به دلیل دارا بودن خاصیت ارتجاعی و قابلیت جذب پایین، پتانسیل مناسبی جهت بکارگیری به عنوان جایگزین بخشی از مصالح سنگی مخلوط‌های آسفالت متخلخل دارند. با این وجود لازم است تا مطالعات بیشتری بر روی اثرات XLPE در طیف گسترده انواع قیرهای مورد کاربرد و نیز ابعاد دانه‌بندی مصالح سنگی مخلوط‌های آسفالت متخلخل صورت پذیرد.

۷. پی‌نوشت‌ها

1- Cross-Linked Polyethylene (XLPE)

2- Permeable pavements

3- Sustainable urban drainage systems

فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال سیزدهم / شماره سوم (۵۲) / بهار ۱۴۰۱

محدودیت‌هایی قائل گردید، اما می‌توان از آن برای ساخت مخلوط- های آسفالت متخلخل استفاده نمود و از منظر کلی منعی در این رابطه وجود ندارد.

۶. نتیجه‌گیری

هدف این مطالعه ارزیابی اثر استفاده از ضایعات XLPE به عنوان سنگدانه در مخلوط‌های آسفالت متخلخل بوده است. به این منظور مقادیر ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد XLPE برای جایگزینی با مصالح- سنگی دارای ابعاد بین ۲/۳۶ تا ۴/۷۵ میلیمتر در نظر گرفته شد. در گام نخست آزمایشات سایش کانتابرو و تعیین درصد فضاهای خالی بر روی مخلوط‌های آسفالت متخلخل با و بدون XLPE انجام پذیرفته و میزان قیر ۴/۵ درصد به عنوان مقدار قیر بهینه برای آنها، بر مبنای نتایج آزمون‌ها انتخاب گردید. سپس آزمایش‌های کانتابرو بر روی نمونه‌های پیرشده، فرونشست قیر و لاتمن اصلاح شده، جهت ارزیابی عملکرد نمونه‌های ساخته شده انجام گرفت. بر مبنای مشاهدات حاصل از آزمایشات صورت پذیرفته، نتایج زیر بدست آمده است:

۱. نمونه‌هایی که در آنها ۲۵ درصد حجمی مصالح سنگی بین ۲/۳۶ تا ۴/۷۵ میلیمترشان با XLPE جایگزین شده است، بهترین عملکرد را نسبت به نمونه‌های شاهد و دیگر نمونه‌های حاوی XLPE نشان می‌دهند. این میزان جایگزینی تقریباً برابر با ۲/۵ درصد حجم کل مصالح سنگی مخلوط آسفالت متخلخل بررسی گردیده می‌باشد.

۲. ذرات XLPE جایگزین گردیده بجای مصالح سنگی متداول، به علت قابلیت جذب پایین می‌توانند توانایی مخلوط- های آسفالت متخلخل را برای مقاومت در برابر شرایط رطوبتی افزایش دهند. نتایج آزمون لاتمن اصلاح شده نشان داد که نسبت مقاومت کششی در نمونه‌های اصلاح شده با میزان بهینه XLPE

مدیریت و برنامه ریزی کشور، معاونت فنی و توسعه امور زیربنایی، امور نظام فنی و اجرایی.

- AASHTO T19 (2014) "Standard Method of Test for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.

- AASHTO T283 (2007) "Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.

- AASHTO T305 (2005) "Standard method of test for determination of draindown characteristics in uncompacted asphalt mixtures", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.

- ASTM D1559 (1989) "Test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using marshall apparatus", ASTM International.

- ASTM D6752 (2011) "Standard test method for bulk specific gravity and density of compacted bituminous mixtures using automatic vacuum sealing method", ASTM International.

- Cetin, A. (2013) "Effects of crumb rubber size and concentration on performance of porous asphalt mixtures", International Journal of Polymer Science, Vol.2013, pp.1-10.

- Chen, M. J., and Wong, Y. D. (2015) "Porous asphalt mixture with a combination of solid waste aggregates", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.27, No.6, pp.04014194-1-04014194-9.

- 4- Water sensitive urban design
- 5- Low impact development
- 6- Hydroplaning
- 7- Wet-weather glare
- 8- Porous asphalt
- 9- Open graded
- 10- Gap graded
- 11- Cantabro
- 12- Modified Lottman test
- 13- Noise
- 14- Cyclic
- 15- Pyrolyzed wax
- 16- Warm mix asphalt (WMA)
- 17- Styrene-Butadiene-Styrene (SBS)
- 18- Complex modulus

۱۹- از این به بعد جهت رعایت اختصار، برای اشاره به نمونه‌های حاوی مقادیر متفاوت XLPE، تنها به بیان درصد جایگزینی اکتفا گردیده و اشاره‌ای به نام الک شماره ۸ نخواهد شد. به عنوان مثال منظور از نمونه با ۲۵ درصد XLPE، نمونه‌هایی است که تنها ۲۵ درصد مصالح سنگی بین ۲/۳۶ تا ۴/۷۵ میلیمتر آنها با XLPE جایگزین گردیده است.

- 20- X-ray Computed Tomography (CT) scanning
- 21- Drain down

۲۲- خطوط خط‌چین موازی محور Xها در تمامی نمودارها، نشان‌دهنده حدود مجاز آیین‌نامه‌ها برای هر آزمون می‌باشند.

۸ منابع

- زیاری، حسن و شادمان بجاربنه، مجید (۱۳۹۲) "ارائه مدل پیش بینی عمر خستگی آسفالت متخلخل پلیمری با رویکرد پدیده شناختی تجربی"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال چهارم، شماره سوم، ص. ۲۳۱-۲۲۱.

- نشریه شماره ۱-۳۸۴ (۱۳۹۴) "نشریه شماره ۱-۳۸۴: دستورالعمل طرح، اجرا و نگهداری آسفالت متخلخل"، سازمان

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال سیزدهم / شماره سوم (۵۲) / بهار ۱۴۰۱

of crumb rubber particle size to the optimum binder content for open graded friction course", *The Scientific World Journal*, Vol.2014, pp.1-8.

- Isenring, T., Koster, H., and Scazziga, I. (1990) "Experiences with porous asphalt in Switzerland", *Transportation Research Record*, No.1265, pp.41-53.

- Kamada, O., and Yamada, M. (2002) "Utilization of waste plastics in asphalt mixtures", *Memoirs of the Faculty of Engineering, Osaka City University*, Vol.43, pp.111-118.

- Kandhal, P. S. (2002) "Design, construction, and maintenance of open-graded asphalt friction courses", *National Asphalt Pavement Association*.

- Liu, H., Zhu, B., Wei, H., Chai, C., and Chen, Y. (2019) "Laboratory Evaluation on the Performance of Porous Asphalt Mixture with Steel Slag for Seasonal Frozen Regions", *Sustainability*, Vol.11, No.24, pp.1-17.

- Lucke, T. (2014) "Using drainage slots in permeable paving blocks to delay the effects of clogging: Proof of concept study", *Water*, Vol.6, No.9, pp.2660-2670.

- Lucke, T., Boogaard, F., and van de Ven, F. (2014) "Evaluation of a new experimental test procedure to more accurately determine the surface infiltration rate of permeable pavement systems", *Urban, Planning and Transport Research*, Vol.2, No1, pp.22-35.

- Lucke, T., White, R., Nichols, P., and Borgwardt, S. (2015) "A simple field test to evaluate the maintenance requirements of permeable interlocking concrete pavements", *Water*, Vol.7, No.6, pp.2542-2554.

- Cheng, Y., Chai, C., Liang, C., and Chen, Y. (2019) "Mechanical Performance of Warm-Mixed Porous Asphalt Mixture with Steel Slag and Crumb-Rubber-SBS Modified Bitumen for Seasonal Frozen Regions", *Materials*, Vol.12, No.6, pp.1-15.

- Christéen, J. (2007) "Swedish cable waste for recovery in China or Sweden" (Doctoral dissertation, Master thesis report, LiTH, Linköping).

- Colwill, D. M., Bowskill, G. J., Nicholls, J. C., and Daines, M. E. (1992) "Porous asphalt trials in the United Kingdom", *Transportation Research Record*, Vol.1427, pp.13-21.

- Costa, L., Peralta, J., Oliveira, J. R., and Silva, H. M. (2017) "A new life for cross-linked plastic waste as aggregates and binder modifier for asphalt mixtures", *Applied Sciences*, Vol.7, No.6, pp.1-16.

- Eisenberg, B., Lindow, K. C., and Smith, D. R. (Eds.). (2015) "Permeable pavements", *American Society of Civil Engineers*.

- Hainin, M. R., Rusbintardjo, G., Hameed, M. A. S., Hassan, N. A., and Yusoff, N. I. M. (2014) "Utilisation of steel slag as an aggregate replacement in porous asphalt mixtures", *Jurnal Teknologi*, Vol.69, No.1, pp.67-73.

- Hassan, N. A., Khan, R., Raaberg, J., and Presti, D. L. (2015) "Effect of mixing time on reclaimed asphalt mixtures: An investigation by means of imaging techniques", *Construction and Building Materials*, Vol.99, pp.54-61.

- Ibrahim, M. R., Katman, H. Y., Karim, M. R., Koting, S., and Mashaan, N. S. (2014) "The effect

- PlasticsEurope (2018) "An analysis of European plastics production, demand and waste data", Plastics—the facts.
- Ruiz, A., Alberola, R., Perez, F., & Sanchez, B. (1990) "Porous asphalt mixtures in Spain", Transportation Research Record, No.1265, pp.87-94.
- Sangiorgi, C., Eskandarsefat, S., Tataranni, P., Simone, A., Vignali, V., Lantieri, C., and Dondi, G. (2017) "A complete laboratory assessment of crumb rubber porous asphalt", Construction and Building Materials, Vol.132, pp.500-507.
- Sangiorgi, C., Tataranni, P., Simone, A., Vignali, V., Lantieri, C., and Dondi, G. (2016) "Assessment of waste bleaching clay as alternative filler for the production of porous asphalts", Construction and Building Materials, Vol.109, pp.1-7.
- Shamsaei, M., Aghayan, I., and Kazemi, K. A. (2017). "Experimental investigation of using cross-linked polyethylene waste as aggregate in roller compacted concrete pavement", Journal of Cleaner Production, Vol.165, pp.290-297.
- Shang, L., Wang, S., Zhang, Y., and Zhang, Y. (2011) "Pyrolyzed wax from recycled cross-linked polyethylene as warm mix asphalt (WMA) additive for SBS modified asphalt", Construction and Building Materials, Vol.25, No.2, pp.886-891.
- Skaf, M., Ortega-López, V., Aragón, Á., San-José, J. T., and González, J. J. (2017) "Porous asphalt mixtures with 100% Siderurgic aggregates", In Proceedings of the 3rd Pan American Materials Congress (pp. 235-243). Springer, Cham.
- Mawarni, O. S. T., and Fauziah, M. (2019, November) "The effect of sea water soak on asphalt porous characteristics with and without waste of rubber tire waste as an asphalt additive", In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol.669, No.1, pp.1-11). IOP Publishing.
- Mohammadian Nameghi, I., Aghayan, I., Behzadian, R., and Mosaberpanah, M. A. (2019) "Investigating the Effect of Using Cross-Linked Polyethylene Waste as Fine Aggregate on Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt", International Journal of Transportation Engineering, Vol.7, No.3, pp.233-247.
- Mullaney, J., and Lucke, T. (2014) "Practical review of pervious pavement designs", CLEAN—Soil, Air, Water, Vol.42, No.2, pp.111-124.
- NLT-352/86 (1986) "Caracterización de mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste", Normas NLT I.-Ensayos de carreteras. Cedex.
- Norhafizah, M., and Hainin, M. R. (2016) "The effect of coconut shell on engineering properties of porous asphalt mixture", Jurnal Teknologi, Vol.78, No.7-2, pp.127-132.
- Palla, A., Gnecco, I., Carbone, M., Garofalo, G., Lanza, L. G., and Piro, P. (2015) "Influence of stratigraphy and slope on the drainage capacity of permeable pavements: laboratory results", Urban Water Journal, Vol.12, No.5, pp.394-403.
- Park, D. G., Sandoval, N., Lin, W., Kim, H., and Cho, Y. H. (2014) "A case study: Evaluation of water storage capacity in permeable block pavement", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol.18, No.2, pp.514-520.

- Zhang, C., Wang, H., You, Z., and Yang, X. (2016) "Compaction characteristics of asphalt mixture with different gradation type through Superpave Gyrotory Compaction and X-Ray CT Scanning", *Construction and Building Materials*, Vol.129, pp.243-255.
- Zhang, H., Li, H., Zhang, Y., Wang, D., Harvey, J., and Wang, H. (2018) "Performance enhancement of porous asphalt pavement using red mud as alternative filler", *Construction and Building Materials*, Vol.160, pp.707-713.
- Zhang, Y., Verwaal, W., Van de Ven, M. F. C., Molenaar, A. A. A., and Wu, S. P. (2015) "Using high-resolution industrial CT scan to detect the distribution of rejuvenation products in porous asphalt concrete", *Construction and Building Materials*, Vol.100, pp.1-10.
- Skaf, M., Pasquini, E., Revilla-Cuesta, V., and Ortega-López, V. (2019) "Performance and Durability of Porous Asphalt Mixtures Manufactured Exclusively with Electric Steel Slags", *Materials*, Vol.12, No.20, pp.1-18.
- Smith, R. W., Rice, J. M., and Spelman, S. R. (1974) "Design of open-graded asphalt friction courses (No. FHWA-RD-74-2 Intrm Rpt.)", Federal Highway Administration.
- Struik, L. C. and Schöen, L. A. (2000, March) "Recycling and re- use of polymeric materials; the limited potential of biodegradables", In *Macromolecular Symposia* (Vol.152, No.1, pp.1-7), Weinheim: WILEY- VCH Verlag.
- Suresha, S. N., Varghese, G., and Shankar, A. U. R. (2010) "Properties of cellulose fibres and waste plastic modified porous friction course mixes", *Baltic J. Road Bridge Eng.*, Vol.5, No.3, pp.156-163.
- Tokuda, S., Horikawa, S., Negishi, K., Uesugi, K., and Hirukawa, H. (2003) "Thermoplasticizing technology for the recycling of crosslinked polyethylene", *Furukawa Rev*, Vol.23, pp.88-93.
- Weiss, P. T., Kayhanian, M., Khazanovich, L., and Gulliver, J. S. (2015) "Permeable pavements in cold climates: State of the art and cold climate case studies", Center for Transportation Studies, University of Minnesota.
- Yang, J., and Yin, C. (2009) "Laboratory study of porous asphalt mixture made with rubber bitumen", In *Asphalt Material Characterization, Accelerated Testing, and Highway Management: Selected Papers from the 2009 GeoHunan International Conference* (pp.22-31).

ایمان آقایان، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۴ از دانشگاه صنعتی شاهرود و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران گرایش راه و ترابری را در سال ۱۳۸۷ از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی اخذ نمود. در سال ۱۳۹۱ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران گرایش راه و ترابری از دانشگاه Eastern Mediterranean University گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان ایمنی ترافیک، سیستم حمل و نقل هوشمند، بهینه‌سازی در مسائل برنامه‌ریزی ترافیک و طراحی روسازی راه بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه صنعتی شاهرود است.



ایمان محمدیان نامقی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه صنعتی سجاد مشهد و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران-راه و ترابری را در سال ۱۳۹۶ از دانشگاه صنعتی شاهرود اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان تکنولوژی قیر و آسفالت، روسازی‌های نفوذپذیر و طراحی روسازی راه بوده است.



علیرضا داننده، درجه کارشناسی در رشته مهندسی معدن را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه امام خمینی قزوین و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران-راه و ترابری در سال ۱۳۹۵ را از دانشگاه صنعتی شاهرود اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدیریت روسازی، طراحی روسازی و تکنولوژی قیر و آسفالت بوده و در حال حاضر داوطلب مقطع دکتری در دانشگاه RMIT است.



رضا بهزادیان، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه سمنان و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران-راه و ترابری را در سال ۱۳۹۶ از همان دانشگاه اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان تکنولوژی قیر و آسفالت، روسازی‌های نیمه‌انعطاف‌پذیر و روسازی‌های نفوذپذیر بوده و در حال حاضر دانشجوی دکتری در دانشگاه صنعتی شاهرود است.

