

بررسی آزمایشگاهی عملکرد بلندمدت مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی سرباره فولاد و

تراشه آسفالتی

امین احمدی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

منصور فخری، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

علیرضا عاملی^{*}، مربی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

مصطفی آدرسی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

^{*}پست الکترونیکی نویسنده مسئول: amelii@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۱۸ – پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۵

صفحه ۲۳-۳۸

چکیده

بازریافت سرباره فولاد در مخلوط‌های آسفالتی عملکرد آنها را بهبود می‌بخشد ولی افزایش مصرف قیر در اثر این بازیافت کاربرد گسترده آنها را با مانع مواجه کرده است. برای رفع این مانع در این تحقیق اثر بازیافت همزمان سرباره فولاد و تراشه آسفالتی در مخلوط‌های آسفالتی گرم مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور شش مخلوط آسفالتی با دو درصد مختلف از درشت‌دانه سرباره فولاد (۰ و ۴۰٪) و سه درصد مختلف از ریزدانه تراشه آسفالتی (۰، ۲۰ و ۴۰٪) در دو حالت پیرشده کوتاه و بلند مدت ساخته شد و مقاومت آنها در برابر شیارشدگی، ترک خوردگی و آسیب‌های رطوبتی اندازه‌گیری شده و به شکل آماری با هم مقایسه شدند. نتایج نشان داد که افزودن سرباره فولاد و تراشه آسفالتی به شکل چشمگیری مقاومت در برابر شیارشدگی و ترک خوردگی را افزایش می‌دهد. با این حال افزودن تراشه آسفالتی و سرباره فولاد به ترتیب منجر به کاهش و افزایش شکل‌پذیری مخلوط‌های آسفالتی در آزمایش کشش غیر مستقیم شدند. از طرف دیگر در حالی که افزودن تراشه آسفالتی حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها را کاهش داد، افزودن سرباره فولاد این حساسیت را تشدید کرد. در مجموع ثابت شد که مخلوط‌هایی که همزمان هر دو این مصالح در آنها بازیافت شده است، نه تنها به لحاظ اقتصادی و زیست محیطی بسیار مطلوب ارزیابی می‌شوند بلکه عملکردی قابل قبول و در برخی جهات بهتری از مخلوط‌های کنترل و یا مخلوط‌هایی که تنها یکی از دو این مصالح را دربردارند از خود نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی گرم، تراشه آسفالتی، سرباره فولاد، نسبت مارشال، کشش غیر مستقیم، حساسیت رطوبتی، پیرشدگی

۱- مقدمه

صنعت راهسازی یکی از مهمترین تولیدکنندگان گازهای گلخانه‌ای و مصرف کنندگان انرژی است (Barandica et al., 2013)، لذا همواره فشار زیادی بر این صنعت وجود دارد تا نقشی فعال در کاهش اثرات مخرب زیست محیطی داشته باشد. یکی از این فعالیت‌ها کاهش مصرف منابع تجدیدناپذیر از طریق بازیافت مصالح دورریختنی (Blankendaal et al., 2016) است. بازیافت سرباره فولاد نه تنها از جهت کاهش

صنعت راهسازی یکی از مهمترین تولیدکنندگان گازهای گلخانه‌ای و مصرف کنندگان انرژی است (Barandica et al., 2013)، لذا همواره فشار زیادی بر این صنعت وجود دارد تا نقشی فعال در کاهش اثرات مخرب زیست محیطی داشته باشد. یکی از این فعالیت‌ها کاهش مصرف منابع تجدیدناپذیر از طریق بازیافت مصالح دورریختنی (Blankendaal et al., 2016) است. بازیافت سرباره فولاد نه تنها از جهت کاهش

مصرف مصالح تجدید ناپذیر حائز اهمیت است بلکه با بازیافت این ماده هزاران هکتار از زمین‌های کارخانه‌های آسفالت که برای دپوی این مصالح استفاده شده آزاد می‌شود (Mladenović et al., 2015). خواص بی نظیر این ماده از جمله سطوح شکسته، مقاومت سایشی بالا و شکل مکعبی باعث شده که مهندسان راهسازی از آن برای افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی (Shafabakhsh and Ani, 2015) و افزایش اصطکاک (Liapis and Likoydis, 2012) در مخلوط‌های آسفالتی بهره جویند. با این وجود، به دلیل شکل گوشه‌دار و سطح بسیار زبر این ماده استفاده از آن تا حدودی کارایی مخلوط را کاهش داده (Pasetto and Baldo, 2012) و مصرف قیر در مخلوط را افزایش می‌دهد (Kavussi and Qazizadeh, 2014). از این رو برخی منابع (ASTM D5106-15) توصیه کرده‌اند که کاربرد سنگدانه‌های سرباره‌ای در مخلوط‌های آسفالتی به یکی از بخش‌های درشت و یا ریزدانه محدود شود. لذا با توجه به گزارشات مبنی بر افزایش غیرقابل قبول مصرف قیر (Kavussi and Qazizadeh, 2014) و عمق شیارشدگی (Ameri et al., 2013) در نتیجه کاربرد ریزدانه سرباره فولاد در تحقیقات گذشته، بیشتر محققان ترجیح داده‌اند که برای دستیابی به عملکردی مطلوب تنها درشت‌دانه سرباره فولاد را در مخلوط آسفالتی بازیافت کنند. نگرانی دیگر در رابطه با استفاده از سرباره فولاد در مخلوط آسفالتی، پتانسیل افزایش حجم این سنگدانه‌ها به دلیل حضور آهک و منیزیم آزاد در ترکیب شیمیایی آن‌هاست (Chen and Wei, 2016) از این رو توصیه شده است که سرباره‌های تازه تولید شده قبل از مصرف حداقل شش ماه هوادهی شوند (Patel, 2008) تا این ترکیبات هیدراته شده و مقدارشان کاهش پیدا کند.

تراشه آسفالتی نوع دیگر از مصالح دور ریختنی است که از آسیاب کردن لایه‌های روسازی مضمحل شده بدست می‌آید. کاربرد این ماده در لایه‌های غیرچسبنده روسازی از گذشته متداول بوده است (Kazmee et al., 2016)، اما با توجه به حضور قیر در این ماده بازیافت آن در مخلوط آسفالتی می‌تواند بسیار سودمندتر باشد. اما به کار بستن درصد زیادی از این ماده

در مخلوط‌های آسفالتی داغ می‌تواند منجر به کاهش کارایی و افزایش سختی مخلوط شود (Kusam et al., 2016)، لذا برخی آیین‌نامه‌ها بدون تغییر در مقدار و درجه عملکردی قیر کاربرد تراشه آسفالتی در مخلوط‌های آسفالتی داغ را به ۱۵٪ محدود کرده‌اند (West et al., 2013). در نقطه مقابل، مخلوط‌های آسفالتی گرم بدون به مخاطره افتادن عملکردشان، پتانسیل بازیافت مقادیر بیشتری از تراشه آسفالتی را دارند (Lu and Saleh, 2016) چرا که تکنولوژی‌های آسفالت گرم باعث می‌شوند که مخلوط با وجود اضافه شدن تراشه آسفالتی همچنان کارا باقی بماند (Copeland et al., 2010) همچنین این مخلوط‌ها نسبت به مخلوط‌های داغ انرژی کمتری برای تولید نیاز دارند و لذا آلودگی هوای کمتری نیز به دنبال دارند (Rogers, 2011). بیشتر تحقیقاتی که تاکنون در این حوزه انجام پذیرفته بر روی آثار بازیافت تنها یکی از این دو ماده در مخلوط‌های آسفالتی تمرکز کرده‌اند، در حالی که با توجه به محاسن و معایبی که ذکر شد با بازیافت همزمان درشت‌دانه سرباره فولاد و ریزدانه تراشه آسفالتی در مخلوط‌های آسفالتی گرم می‌توان به مخلوطی اقتصادی و دوست‌دار محیط زیست دست یافت که انتظار می‌رود عملکردی حداقل برابر با مخلوط‌های متداول داشته باشد. به این منظور در این تحقیق شش مخلوط آسفالت گرم حاوی درصد‌های مختلفی از درشت‌دانه سرباره فولاد و ریزدانه تراشه آسفالتی آماده شد و مقاومت شیارشدگی، پتانسیل ترک خوردگی و حساسیت رطوبتی آنها مورد ارزیابی قرار گرفت و تاثیر هر یک از این فاکتورها (سرباره و تراشه) و برهم کنش آنها بر عملکرد مخلوط آنالیز شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مصالح

قیر خالص مصرفی در این تحقیق قیر ۷۰-۶۰ تولید شرکت نفت پاسارگاد با درجه عملکردی PG 58-16 است که درجه

نفوذ و کشسانی آن در دمای ۲۵ درجه به ترتیب برابر با ۶/۴ میلی‌متر و ۱۰۳ سانتی‌متر و نقطه نرمی آن ۴۸ سانتی‌گراد می‌باشد. این مقادیر برای قیر استخراج شده از تراشه آسفالتی به ترتیب برابرند با ۳/۵ میلی‌متر، ۲۲ سانتی‌متر و ۵۶ سانتی‌گراد همچنین درصد قیر تراشه آسفالت برابر با ۶/۱٪ بود. جدول یک خواص فیزیکی مصالح سنگی را با در نظر گرفتن الگ شماره ۴ به عنوان مرز درشت و ریزدانه نشان می‌دهد.

جدول ۲ جدول دو نیز ترکیبات شیمیایی بدست آمده از آزمایش XRF^۱ برای سنگدانه طبیعی و سربراه‌ای نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود میزان آهک آزاد در سربراه فولاد ۰/۲٪ است که این میزان خیلی کمتر است از میزان این ترکیب در سربراه‌های تازه تولید شده (۵٪) (Palankar et al., 2015)، که این امر حکایت از آن دارد که این مصالح به خوبی دوره عمل‌آوری را طی کرده‌اند و خطر افزایش حجم ندارند. ساسوبیت نیز نوعی افزودنی تجاری با نقطه ذوب ۱۱۵ سانتی‌گراد است که در این تحقیق برای کاهش ویسکوزیته قیر و تولید مخلوط‌های آسفالتی گرم به کار برده شده است.

جدول ۱. مشخصات فنی مصالح سنگی

سنگدانه تراشه	طبیعی		سربراه‌ای		ویژگی
	ریزدانه	درشت‌دانه	ریزدانه	درشت‌دانه	
۲۴۹۱	۲۵۵۳	۲۶۸۷	۳۰۸۲	۲۶۸۷	وزن مخصوص حقیقی (kg/m ³)
۲/۱	۰/۸	۰/۵	۱/۶	۰/۵	جذب آب (%)
-	-	۲۵	۱۷	۲۵	ضریب لوس آنجلس (%)
-	-	۸۶	۱۰۰	۸۶	وجوه شکسته (دو و یا بیشتر) (%)

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی سنگدانه سربراه‌ای و آهکی

نوع سنگدانه	Free Cao	P ₂ O ₅	MnO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	CaO	Others
سربراه	۰/۲	۲	۱	۵	۲۷	۱۶	۵	۴۰	۳/۴
آهکی	-	۰/۱	۰/۰۳	۰/۲	۰/۴	۹	۶/۲	۴۵	۵/۳

جدول ۳. دانه‌بندی منتخب و دانه‌بندی سنگدانه تراشه آسفالتی

درصد عبوری						
۰/۰۷۵	۰/۳	۲/۳۶	۴/۷۵	۱۲/۵	۱۹	سایز الگ (mm)
۴	۱۱	۴۰	۶۰	۹۵	۱۰۰	منتخب
۲	۹	۴۶	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	تراشه آسفالتی

۲-۲- طرح اختلاط

دمای اختلاط و تراکم در این تحقیق به ترتیب برابر با ۱۳۵ و ۱۲۵ درجه سانتیگراد انتخاب شدند و ساسوییت، بر اساس توصیه (، به نسبت Sasol wax, 2016 ۱/۵ تولیدکننده آن) درصد وزنی قیر به شکل مستقیم در مرحله اختلاط به مخلوط اضافه شد. سنگدانه‌های طبیعی و سرباره‌ای قبل از اختلاط به مدت پنج ساعت درون اون و در دمای اختلاط نگهداری شدند ولی تراشه‌های NCHRP بر اساس توصیه (۲۰۰۱)

آسفالتی

به منظور جلوگیری از پیرشدن بیشتر تنها دو ساعت در دمای ۱۱۰ درجه درون اون قرار گرفتند. قیر نیز به شکل جداگانه یک ساعت پیش از ساخت نمونه‌ها درون اون به دمای اختلاط رسید. سپس با توجه به نسبت‌های جدول ۴ مقدار مطلوب از هر یک از این ۴ ماده اولیه برای ساخت نمونه‌ها با یکدیگر ترکیب شده و درون قالب‌هایی استوانه‌ای به قطر ۱۰۲ میلیمتر ریخته شده و با استفاده از چکش مارشال با ۷۵ ضربه به هر دو سوی آنها متراکم شدند.

های فاقد در این تحقیق ابتدا قیر بهینه مخلوط (S4 تراشه آسفالتی) (مخلوط کنترل و مخلوط برای) (ASTMD-6927-07 مبنای استاندارد) دستیابی به فضای خالی ۴٪ محاسبه شد و میزان قیر بهینه سایر مخلوط‌های که حاوی تراشه آسفالتی هستند با در نظر گرفتن سهمی از قیر پیر

تراشه آسفالتی که با قیر خالص ترکیب می‌شود محاسبه شد.

نحوه‌ی محاسبه قیر خالص برای مخلوط‌های حاوی تراشه (Nejad et al., 2014 آسفالتی به شکلی مبسوط در مرجع) ارائه شده است که برای اختصار از تکرار آن پرهیز می‌شود. میزان قیرخالصی که می‌بایست به هر مخلوط اضافه شود در جدول ۴ آورده شده است.

۲-۳- آماده‌سازی نمونه‌های آسفالتی

پس از تعیین قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی تعداد ۱۰۸ نمونه آسفالتی مارشال (۳۶ نمونه با سه تکرار) با فضای خالی ۴٪ ساخته شدند. نمونه‌ها پس از اختلاط به منظور شبیه‌سازی پیرشدگی کوتاه مدت ابتدا به مدت چهار ساعت در دمای تراکم نگهداری شدند و سپس با چکش مارشال برای استحصال فضای خالی ۴٪ متراکم شدند. سپس، نیمی از نمونه‌ها برای شبیه‌سازی پیرشدگی بلندمدت طبق استاندارد (AASHTO R30, 2001) به مدت ۵ روز در گرم‌خانه در ۸۵°C نگهداری شدند.

۲-۴- مقاومت در برابر شیارشدگی

شیارشدگی یکی از مودهای مهم در خرابی روسازی‌های آسفالتی است که می‌تواند ناشی از ضعف لایه‌های روسازی و یا مخلوط آسفالتی باشد. شیارشدگی‌ها نه تنها کیفیت سطح

روسازی را به خطر می‌اندازد بلکه در آن‌ها آب-های سطحی گیر افتاده و به راحتی به طرفین زهکشی نمی‌شود. لذا می‌تواند به خرابی‌های دیگری از جمله عریان‌شدگی آسفالت منجر شود. در این تحقیق برای ارزیابی مقاومت

منحنی دانه‌بندی منتخب به همراه دانه‌بندی سنگدانه‌های استخراج شده از تراشه آسفالتی را نشان می‌دهد. همانگونه که پیداست در دانه‌بندی منتخب نسبت درشت‌دانه به ریزدانه ۶:۴ است و سنگدانه‌های تراشه آسفالتی ریزتر از الک ۴ هستند. جدول ۴ شش ترکیب مختلف از سنگدانه طبیعی، سرباره و تراشه آسفالتی به کار رفته در تولید مخلوط‌های آسفالتی را نشان می‌دهد.

از آنجایی که درشت‌دانه سرباره‌ها ($4/75 \text{ mm}$) وزن مخصوص بیشتری نسبت به سنگدانه طبیعی دارند، آن‌ها به سایزهای مختلف الک شده و درون ظرف‌های جداگانه‌ای نگهداری شدند و با در نظر داشتن وزن مخصوص حقیقی‌شان در هر مخلوط دقیقاً به همان نسبت حجمی با سنگدانه‌های طبیعی جایگزین شدند.

در نقطه مقابل الک کردن تراشه‌های آسفالتی به دلیلی وجود لایه‌ای از قیر به دور سنگدانه‌های آنها منجر به نتایج غلطی می‌شد، لذا این مصالح به شکل کلی بر اساس نسبت مورد نیاز برداشت و به مخلوط‌ها اضافه شد. از طرفی دیگر از آنجایی که دانه‌بندی سنگدانه‌های این مصالح کمی با دانه‌بندی منتخب اختلاف دارد (دمای اختلاط و تراکم در این تحقیق به ترتیب برابر با ۱۳۵ و ۱۲۵ درجه سانتیگراد انتخاب شدند و ساسویت، بر اساس توصیه تولیدکننده آن (Sasol wax, 2016)، به

مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیار شدگی از شاخص نسبت مارشال استفاده شد. نسبت مارشال از تقسیم استقامت مارشال به روانی بدست می‌آید.

نسبت ۱/۵ درصد وزنی قیر به شکل مستقیم در مرحله اختلاط به مخلوط اضافه شد. سنگدانه‌های طبیعی و سرباره‌ای قبل از اختلاط به مدت پنج ساعت درون اون و در دمای اختلاط نگهداری شدند ولی بر اساس توصیه (۲۰۰۱) NCHRP آسفالتی تراشه‌های

به منظور جلوگیری از پیرشدن بیشتر تنها دو ساعت در دمای ۱۱۰ درجه درون اون قرار گرفتند. قیر نیز به شکل جداگانه یک ساعت پیش از ساخت نمونه‌ها درون اون به دمای اختلاط رسید. سپس با توجه به نسبت‌های جدول ۴ مقدار مطلوب از هر یک از این ۴ ماده اولیه برای ساخت نمونه‌ها با یکدیگر ترکیب شده و درون قالب‌هایی استوانه‌ای به قطر ۱۰۲ میلیمتر ریخته شده و با استفاده از چکش مارشال با ۷۵ ضربه به هر دو سوی آنها متراکم شدند.

در این تحقیق ابتدا قیر بهینه مخلوط‌های فاقد تراشه آسفالتی (مخلوط کنترل و مخلوط S4) بر مبنای استاندارد (ASTM-D-6927-07) برای دستیابی به فضای خالی ۴٪ محاسبه شد و میزان قیر بهینه سایر مخلوط‌های که حاوی تراشه آسفالتی هستند با در نظر گرفتن سهمی از قیر پیر تراشه آسفالتی که با قیر خالص ترکیب می‌شود محاسبه شد.

نحوه‌ی محاسبه قیر خالص برای مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالتی به شکلی مبسوط در مرجع (Nejad et al., 2014)

ارائه شده است که برای اختصار از تکرار آن پرهیز می‌شود. میزان قیرخالصی که می‌بایست به هر مخلوط اضافه شود در جدول ۴ آورده شده است.

۲-۴- مقاومت در برابر شیارشدگی

شیارشدگی یکی از مدهای مهم در خرابی روسازی‌های آسفالتی است که می‌تواند ناشی از ضعف لایه‌های روسازی و یا مخلوط آسفالتی باشد. شیارشدگی‌ها نه تنها کیفیت سطح روسازی را به خطر می‌اندازد بلکه در آن‌ها آب‌های سطحی گیر افتاده و به راحتی به طرفین زهکشی نمی‌شود. لذا می‌تواند به خرابی‌های دیگری از جمله عریان‌شدگی آسفالت منجر شود. در این تحقیق برای ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر شاخص نسبت مارشال استفاده شد. نسبت شیار شدگی از مارشال از تقسیم استقامت مارشال به روانی بدست می‌آید.

ساعت پیش از ساخت نمونه‌ها درون اون به دمای اختلاط رسید. سپس با توجه به نسبت‌های جدول ۴ مقدار مطلوب از هر یک از این ۴ ماده اولیه برای ساخت نمونه‌ها با یکدیگر ترکیب شده و درون قالب‌هایی استوانه‌ای به قطر ۱۰۲ میلیمتر ریخته شده و با استفاده از چکش مارشال با ۷۵ ضربه به هر دو سوی آنها متراکم شدند.

در این تحقیق ابتدا قیر بهینه مخلوط‌های فاقد تراشه آسفالتی (مخلوط کنترل و مخلوط S4) بر مبنای استاندارد (ASTM D-6927-07) برای دستیابی به فضای خالی ۴٪ محاسبه شد و میزان قیر بهینه سایر مخلوط‌های که حاوی تراشه آسفالتی هستند با در نظر گرفتن سهمی از قیر پیر تراشه آسفالتی که با قیر خالص ترکیب می‌شود محاسبه شد.

۲-۳- آماده‌سازی نمونه‌های آسفالتی

پس از تعیین قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی تعداد ۱۰۸ نمونه آسفالتی مارشال (۳۶ نمونه با سه تکرار) با فضای خالی ۴٪ ساخته شدند. نمونه‌ها پس از اختلاط به منظور شبیه‌سازی پیرشدگی کوتاه مدت ابتدا به مدت چهار ساعت در دمای تراکم نگهداری شدند و سپس با چکش مارشال برای استحصال فضای خالی ۴٪ متراکم شدند. سپس، نیمی از نمونه‌ها برای AASHTO شبیه‌سازی پیرشدگی بلندمدت طبق استاندارد (R30, 2001) به مدت ۵ روز در گرم‌خانه در دمای ۸۵ (°C) نگهداری شدند.

لذا در مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالتی، با استفاده از تغییر در اوزان سنگدانه‌های طبیعی این اختلاف جبران شد تا همه مخلوط‌ها منحنی دانه‌بندی دقیقاً یکسانی داشته باشند.

دمای اختلاط و تراکم در این تحقیق به ترتیب برابر با ۱۳۵ و ۱۲۵ درجه سانتیگراد انتخاب شدند و ساسوبیت، بر اساس توصیه تولیدکننده آن (Sasol wax, 2016)، به نسبت ۱/۵ درصد وزنی قیر به شکل مستقیم در مرحله اختلاط به مخلوط اضافه شد. سنگدانه‌های طبیعی و سرباره‌ای قبل از اختلاط به مدت پنج ساعت درون اون و در دمای اختلاط نگهداری شدند ولی بر اساس توصیه (NCHRP (۲۰۰۱) تراشه‌های آسفالتی به منظور جلوگیری از پیرشدن بیشتر تنها دو ساعت در دمای ۱۱۰ درجه درون اون قرار گرفتند. قیر نیز به شکل جداگانه یک

نحوه‌ی محاسبه قیر خالص برای مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالتی به شکلی مبسوط در مرجع (Nejad et al., 2014) ارائه شده است که برای اختصار از تکرار آن پرهیز می‌شود. میزان قیرخالصی که می‌بایست به هر مخلوط اضافه شود در جدول ۴ آورده شده است.

۲-۳- آماده‌سازی نمونه‌های آسفالتی

پس از تعیین قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی تعداد ۱۰۸ نمونه آسفالتی مارشال (۳۶ نمونه با سه تکرار) با فضای خالی ۴٪ ساخته شدند. نمونه‌ها پس از اختلاط به منظور شبیه‌سازی پیرشدگی کوتاه مدت ابتدا به مدت چهار ساعت در دمای تراکم نگهداری شدند و سپس با چکش مارشال برای استحصال فضای خالی ۴٪ متراکم شدند. سپس، نیمی از نمونه‌ها برای شبیه‌سازی پیرشدگی بلندمدت طبق استاندارد (AASHTO R30, 2001) به مدت ۵ روز در گرم‌خانه در دمای ۸۵ °C نگهداری شدند.

۲-۴- مقاومت در برابر شیارشدگی

شیارشدگی یکی از مودهای مهم در خرابی‌های روسازی‌های آسفالتی است که می‌تواند ناشی از ضعف لایه‌های روسازی و یا مخلوط آسفالتی باشد. شیارشدگی‌ها نه تنها کیفیت سطح روسازی را به خطر می‌اندازد بلکه در آن‌ها آب‌های سطحی گیر افتاده و به راحتی به طرفین زهکشی نمی‌شود. لذا می‌تواند به خرابی‌های دیگری از جمله عریان‌شدگی آسفالت منجر شود. در این تحقیق برای ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیار شدگی از شاخص نسبت مارشال استفاده شد. نسبت مارشال از تقسیم استقامت مارشال به روانی بدست می‌آید.

جدول ۴. درصد حجمی ترکیب سنگدانه‌های مختلف و قیر بهینه هر مخلوط

درصد قیر	تراشه آسفالتی		سرباره	سنگدانه طبیعی		نوع مخلوط
	خالص	ریزدانه		ریزدانه	درشت‌دانه	
-	۵/۱	-	-	۶۰	۴۰	C
-	۵/۸	-	۴۰	۶۰	-	S4
۱/۲۳	۳/۸۷	۲۰	-	۴۰	۴۰	R2
۱/۲۲	۴/۵۸	۲۰	۴۰	۴۰	-	S4R2
۲/۴۷	۲/۶۳	۴۰	-	۲۰	۴۰	R4
۲/۴۵	۳/۳۵	۴۰	۴۰	۲۰	-	S4R4

۲-۵- حساسیت رطوبتی

غیر مستقیم بر روی نمونه‌های آسفالتی با قطر ۱۰۰ میلیمتر و ارتفاع ۶۳ میلی‌متر استفاده شد. نمونه‌های آسفالتی پیش از آزمایش به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۸ °C- نگهداری شدند و سپس با سرعت ۵۰ mm/min در شرایط کشش غیر مستقیم تا شکست کامل بارگذاری شدند و تنش کششی در مرکز نمونه بر اساس (۲) محاسبه شد.

$$\sigma = \frac{2p}{\pi dt} \quad (2)$$

که در این رابطه σ مقاومت کششی نمونه آسفالتی (MPa)، P نیروی اعمالی حداکثر (N)، d و t نیز به ترتیب عرض و ضخامت نمونه آسفالتی (mm) هستند.

حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش مقاومت باقی‌مانده مارشال بر اساس استاندارد ASTM D1075 ارزیابی شد. در این آزمایش نمونه‌های آسفالتی به مدت یک شبانه‌روز درون حمام آب در دمای ۶۰ سانتی‌متر نگهداری می‌شوند و سپس مقاومت مارشال آنها محاسبه می‌شود. مقاومت باقی‌مانده مارشال از تقسیم نسبت مقاومت مارشال نمونه‌های عمل‌آوری شده به مقاومت مارشال نمونه‌های شاهد (نگهداری در حمام آب به مدت ۳۵ دقیقه) طبق (۱) محاسبه می‌شود.

$$RMS = \left(\frac{MS_{cond}}{MS_{uncond}} \right) \times 100 \quad (1)$$

۲-۶- مقاومت کششی

یکی دیگر از مودهای مهم خرابی مخلوط‌های آسفالتی ترک خوردگی در دمای پایین است. در این تحقیق از آزمایش کشش

۳- بررسی و تحلیل نتایج

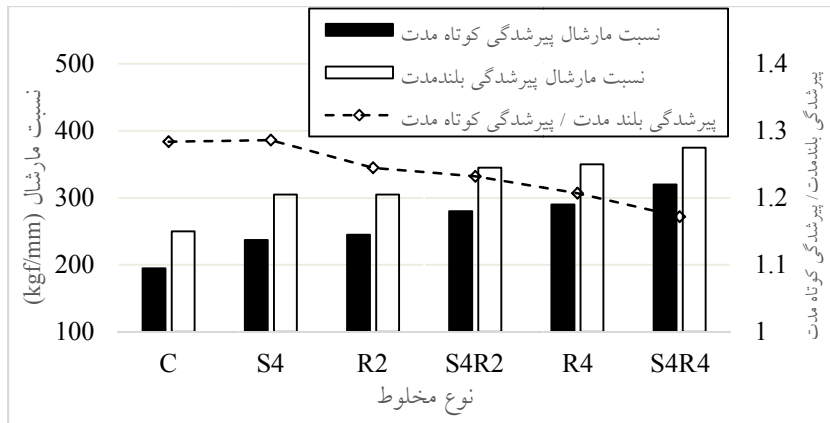
۳-۱- مقاومت شیارشدگی

شده است. در برخی تحقیقات ذکر شده که در اثر پیرشدگی، مخلوط آسفالتی حالتی الاستیک‌تر پیدا می‌کند و در نتیجه می‌تواند تغییرشکل دائمی کمتری را در دمای بالا تجربه کند (Tarbox and Daniel, 2012). نکته قابل ذکر دیگر این است که مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالتی در برابر پیرشدگی حساسیت کمتری نشان داده‌اند. شاید دلیل این موضوع آن باشد که قیر موجود در این مخلوط‌ها به دلیل ترکیب با قیر تراشه تا حدودی پیرشده و پتانسیل کمتری برای پیرشدگی بیشتر دارد. به منظور ارزیابی تکرارپذیری و اعتبار نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها در این بخش از تحقیق ضریب تغییرات نتایج مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۲). ضریب تغییرات از تقسیم انحراف معیار به میانگین ضربدر ۱۰۰ حاصل می‌شود و به شکل نسبی پراکندگی داده‌ها از میانگین را نشان می‌دهد که به

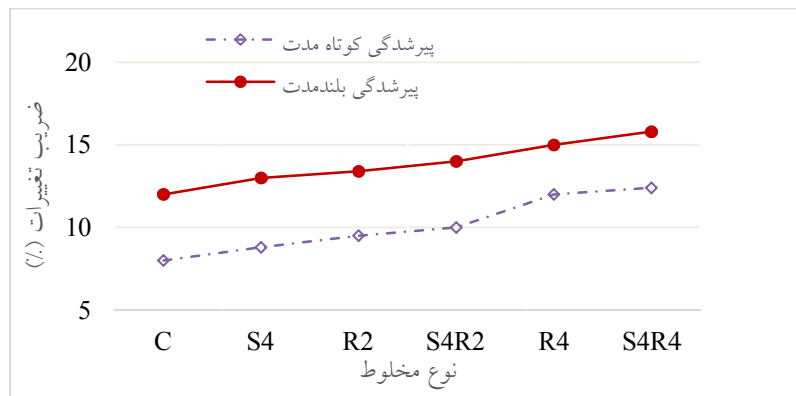
شکل ۱ نتایج نسبت مارشال را در دو حالت پیرشده کوتاه و بلندمدت برای هر مخلوط نشان می‌دهد. همانگونه که پیداست جایگزین شدن بخش درشت‌دانه سنگدانه طبیعی با سرباره فولاد منجر به افزایش نسبت مارشال شده است. دلیل این موضوع قفل و بست بهتر سنگدانه‌های سرباره‌ای به دلیل سطوح شکسته و سطح زیر آن‌هاست که از طریق بالا بردن ضریب اصطکاک داخلی قدرت باربری مخلوط آسفالتی را بهبود می‌بخشد. از سویی دیگر افزودن تراشه آسفالتی نیز منجر به افزایش ضریب مارشال شده است. برای مثال ضریب مارشال مخلوط کنترلی با افزوده شدن ۲۰ و ۴۰٪ تراشه آسفالتی در حالت پیرشده کوتاه مدت به ترتیب ۲۶۳ و ۴۸۹٪ بهبود پیدا می‌کند. همچنین واضح است که پیرشدگی بلندمدت نیز منجر به افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیارشدگی

کمک آن می‌توان نتایج نمونه‌های مختلف را با یکدیگر مقایسه کرد. همانگونه که ملاحظه می‌شود ضریب تغییرات با افزوده شدن تراشه آسفالتی بزرگتر می‌شود دلیل این موضوع این است که معمولاً میزان پیرشدگی لایه آسفالتی مضمحل شده که از آن تراشه بدست می‌آید در عمق آن متفاوت است به طوری که در بخش روئین آن که در تماس مستقیم با هواست بیشتر و در عمق آن کمتر پیرشده است. در طی فرایند تولید تراشه آسفالتی بخش‌های مختلف این لایه با هم ترکیب شده و در نتیجه این مصالح خواص یکسانی ندارد که منجر به پراکندگی داده‌ها در نتایج نیز می‌شود از سویی دیگر افزوده شدن سرباره فولاد نیز

ضریب تغییرات را افزایش داده است. این موضوع نیز می‌توان مرتبط با پراکندگی در خواص این مصالح در نتیجه تعداد زیادی از فاکتور های غیر قابل کنترل در تولید سرباره فولاد دانست. همچنین نتایج در حالات پیرشدگی بلندمدت نیز از حالت پیرشدگی کوتاه مدت پراکندگی بیشتری دارند که این موضوع می‌تواند ناشی از عدم پیرشدگی یکسان نمونه‌های آسفالتی در روند استاندارد AASHTO R30 باشد. اما به طور کلی ضریب تغییرات در همه نمونه‌ها و آزمایش‌ها زیر ۱۶٪ و در محدوده متداول نتایج آزمایش‌های آسفالتی است (Carvajal Munoz et al., 2015).

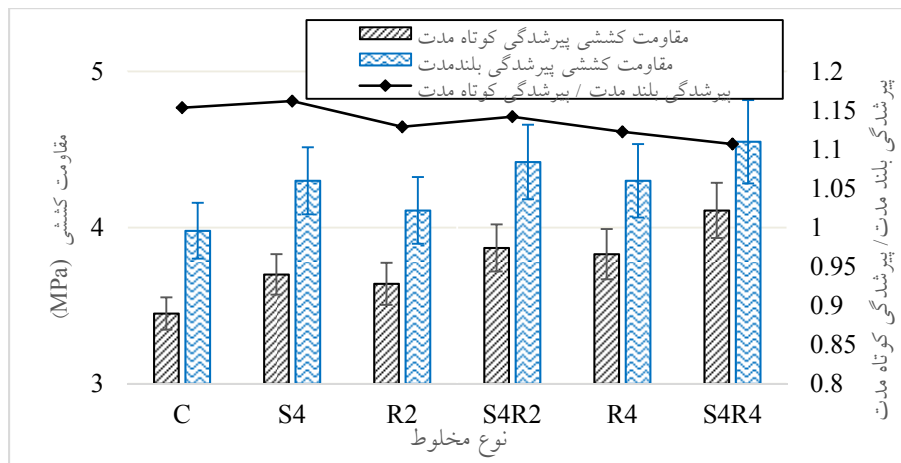


شکل ۱. نسبت مارشال در مخلوط‌های آسفالتی در حالت پیرشده کوتاه و بلند مدت



شکل ۲. ضریب تغییرات در نتایج نسبت مارشال

است. بهبود مقاومت کششی با افزوده شدن تراشه آسفالتی قابل پیش‌بینی بود چرا که اینکار منجر به افزایش سختی قیر مخلوط می‌شود. این نتیجه با یافته‌های سایر محققان نیز تا حدودی همخوانی دارد (Johnson et al., 2013; Mensching et al., 2014). همچنین همین توجیه می‌تواند توضیح دهد که چرا پیرشدگی بلندمدت منجر به افزایش مقاومت کششی مخلوطها می‌شود. البته افزایش مقاومت ناشی از پیرشدگی بلندمدت در همه مخلوطها به یک شکل نیست و مخلوطهای حاوی تراشه آسفالتی افزایش کمتری را نسبت به مخلوطهای فاقد تراشه آسفالتی (S4 و C) تجربه می‌کنند.



شکل ۳. میانگین و انحراف معیار مقاومت کششی نمونه‌ها در آزمایش کشش غیر مستقیم در دو حالت پیرشده کوتاه و بلند مدت

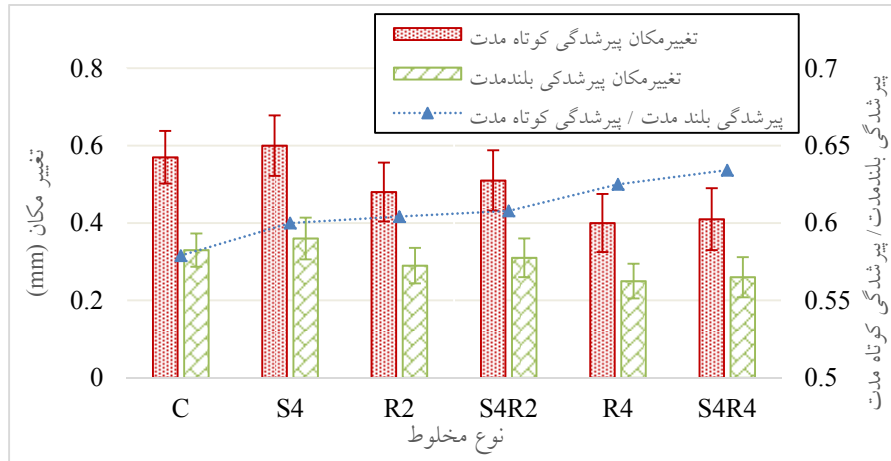
شدن ۲۰ و ۴۰٪ تراشه آسفالتی با ریزدانه طبیعی تغییر مکان مخلوط در لحظه بار حداکثر به ترتیب ۵/۲ و ۱۲/۳٪ کاهش می‌یابد، به معنی که این مخلوطها شکست ترد و ناگهانی تری نسبت به مخلوط کنترلی تجربه می‌کنند. در نقطه مقابل اما جایگزینی درشت‌دانه طبیعی با سرباره فولاد منجر به افزایش این تغییر مکان شده است که بدین معناست که این مخلوطها شکست نرم‌تری را تجربه می‌کنند. همانگونه که پیداست این خاصیت مفید افزودن سرباره فولاد در افزایش شکل‌پذیری مخلوط در مخلوطهای S4R2 و S4R4 باعث شده که شدت کاهش تغییر مکان شکست تا حدی التیام یابد و این مخلوطها

شکل ۳ مقاومت کششی مخلوطهای آسفالتی را در دو حالت پیرشده کوتاه و بلندمدت به همراه انحراف معیار استاندارد نشان می‌دهد. همانگونه که پیداست افزودن سرباره فولاد و تراشه آسفالتی به مخلوطها مقاومت کششی مخلوط را افزایش می‌دهد. برای مثال در حالت پیرشده کوتاه مدت افزودن ۴۰٪ درشت‌دانه سرباره فولاد و یا ریزدانه تراشه آسفالتی به شکل جداگانه به مخلوط کنترل منجر به افزایش مقاومت کششی مخلوط آسفالتی به ترتیب به اندازه ۷/۲ و ۱۱٪ خواهد شد. این افزایش برای مخلوطی S4R4 که همزمان حاوی ۴۰٪ درشت‌دانه سرباره فولاد و ریزدانه تراشه آسفالتی است برابر با ۱۹/۱٪

به طور کلی این باور وجود دارد که با رسیدن بار به مقدار حداکثر خود، در نمونه ترک ایجاد می‌شود (Park et al., 2015)، از همین رو در این تحقیق تغییر مکان معادل با این بار در مخلوطهای مختلف آسفالتی به منظور ارزیابی شکل‌پذیری مخلوط در دمای پایین بررسی شد. شکل ۴ تغییر مکان نمونه‌های آسفالتی در لحظه بار حداکثر در آزمایش کشش غیر مستقیم را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل پیداست، برعکس روندی که در مورد مقاومت کششی مشاهده شد با اضافه شدن ریزدانه تراشه آسفالتی این پارامتر اندکی کاهش می‌یابد. برای مثال در حالت پیرشده کوتاه مدت، با جایگزین

از مخلوط‌هایی که صرفاً حاوی تراشه آسفالتی هستند شکستی نرم‌تر توام با اتلاف انرژی بیشتری داشته باشند. نکته جالب توجه دیگر در این شکل این است که با پیرشدن مخلوط در شرایط بلندمدت تغییر مکان مخلوط‌ها نیز کاهش یافته است.

بیشترین کاهش تغییر مکان در اثر پیرشدگی بلندمدت متعلق به مخلوط کنترل است که در این حالت تغییر مکانش به ۰.۵۸٪ حالت پیرنشده می‌رسد و کمترین آن متعلق به مخلوط S4R4 است که تغییر مکانش به ۰.۶۳٪ حالت پیرنشده رسیده است.



شکل ۴. میانگین و انحراف معیار استاندارد تغییر مکان در لحظه بار حداکثر در آزمایش کشش غیر مستقیم

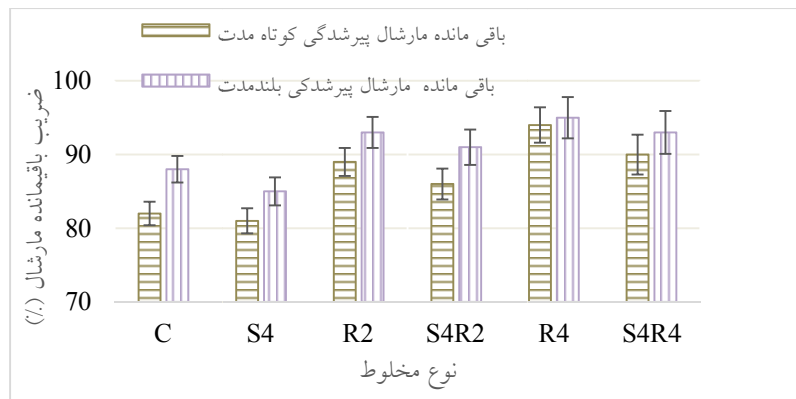
۳-۳- حساسیت رطوبتی

حساسیت رطوبتی نمونه‌های آسفالتی با افزودن تراشه آسفالتی بهبود یافت. برای مثال افزودن ۲۰ و ۴۰٪ تراشه آسفالتی به مخلوط کنترل منجر به بهبود مقاومت باقی‌مانده مارشال به ترتیب به اندازه ۸/۵ و ۱۴/۶٪ شد (شکل ۵). برخی محققان بر این باورند که در طی اختلاط تراشه آسفالتی با مصالح طبیعی درون آسفالت همواره بخشی از قیر تراشه به سنگدانه تراشه می‌چسبد و با قیر خالص ترکیب نمی‌شود (Stimilli et al., 2016). حضور همین لایه نازک قیر به دور سنگدانه‌های تراشه از آنها در برابر تماس مستقیم آب محافظت می‌کند و از این رو حساسیت رطوبتی مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالتی بهبود پیدا می‌کند. از سوی دیگر افزوده شدن سرباره فولاد به مخلوط‌ها، افزایش حساسیت رطوبتی را به دنبال دارد. برای مثال ضریب باقیمانده مارشال در مخلوط‌های S4R2 و S4R4 نسبت به مخلوط‌های R2 و R4 به ترتیب ۳/۳ و ۴/۲٪ کاهش یافته است. با مراجعه به

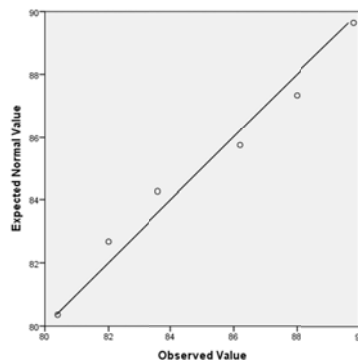
جدول ۲ و آنالیز ترکیب شیمیایی مصالح سنگدانه‌ای می‌توان به این حقیقت دست یافت که سنگدانه‌های سرباره‌ای نسبت به سنگدانه‌های آهکی خاصیت بازی کمتری دارند چرا که نسبت مجموع عناصر بازی به عناصر اسیدی $(\text{SiO}_2)/(\text{CaO} + \text{MgO})$ در سرباره کمتر از این نسبت در سنگدانه آهکی $(+\text{Al}_2\text{O}_3)$ است (۲/۲۵ > ۵/۴). به طور کلی مصالح سنگی با خاصیت بازی بیشتر چسبندگی بهتری با قیر که خاصیتی اسیدی دارد برقرار می‌کند (Pasetto and Baldo, 2011; Xie et al., 2012; Xie et al., 2014). مقایسه نتایج در دو حالت پیرشده کوتاه و بلند مدت نشان می‌دهد که مقاومت در برابر آسیب‌های رطوبتی با افزایش عمر مخلوط‌های آسفالتی افزایش پیدا می‌کند. این یافته در تحقیقات سایر محققین نیز یافت می‌شود. برای مثال برخی محققان با آنالیز نتایج بدست آمده از آزمایش چرخ هامبورگ نشان داده‌اند که با پیرشدگی، عربان-شدگی مخلوط آسفالتی به تعویق می‌افتد (Buss et al., 2016; Fakhri and Hosseini, 2017). همانگونه که در شکل ۵ پیداست نتایج آزمایش باقی‌مانده مارشال بین حالات

پیرشده کوتاه مدت و بلندمدت به یکدیگر بسیار نزدیک هستند. از این رو برای تشخیص تفاوت بین این حالات از آزمون آماری آنوا یک طرفه استفاده شد. به این منظور، برای هر نوع مخلوط بین دو حالت پیرشده کوتاه و بلند مدت این آزمون در سطح معناداری ۰.۰۵٪ انجام شد. به این ترتیب چنانچه مقدار p -value در آزمون کمتر از ۰/۰۵ شود بدین معناست که فرض عدم تفاوت بین نتایج رد می شود. برای سهولت در انجام این آزمون در این تحقیق از نرم افزار تجاری IBM SPSS بهره گرفته شد. لازم به ذکر است پیش از انجام این آزمون آماری همه فروض آن از جمله توزیع نرمال متغیر وابسته و یکنوایی واریانس داده ها از طریق $Q-Q$ plot و $Levene's$ test کنترل شدند. برای نمونه شکل ۶ نمودار $Q-Q$ را برای داده های نمونه کنترلی نشان می دهد. این شکل بیانگر این حقیقت است که این داده ها چقدر

نسبت به توزیع نرمال پراکندگی دارند. همانگونه که ملاحظه می شود داده ها به فاصله بسیار کم و قابل قبولی از توزیع نرمال قرار گرفته اند. جدول ۵ نتایج آزمون آنوا را نشان می دهد. بر اساس نتایج بدست آمده تفاوت مهمی بین نتایج پیرشده کوتاه و بلند مدت بین مخلوط های فاقد تراشه آسفالتی (C و S4) و مخلوط های حاوی ۲۰٪ تراشه آسفالتی (R2 و S4R2) به ترتیب در سطوح اطمینان ۹۵ و ۹۰٪ وجود دارد. با این حال تفاوت معناداری بین نتایج آزمون باقی مانده مارشال نمونه های آسفالتی حاوی ۴۰٪ تراشه آسفالتی در حالات پیرشده کوتاه و بلندمدت به لحاظ آماری مشاهده نمی شود. این یافته در راستای یافته قبلی این تحقیق است که مخلوط های حاوی تراشه آسفالتی حساسیت کمتری به پیرشده از خود نشان می دهند.



شکل ۵. میانگین و انحراف معیار استاندارد ضریب باقی مانده مارشال در حالات پیرشده کوتاه و بلند مدت



شکل ۶. نمودار $Q-Q$ داده های ضریب باقیمانده مارشال نمونه کنترلی

جدول ۵. نتایج آزمون آنوا برای بررسی معناداری تفاوت بین داده‌های آزمون باقی‌مانده مارشال بین حالات پیرشده کوتاه و بلندمدت

S4R4	R4	S4R2	R2	S4	C	نوع مخلوط
۰/۲۶	۰/۶۶۳	۰/۰۵۳	۰/۰۷۱	۰/۰۴۸	۰/۰۱۲	P-value
خیر	خیر	بله**	بله**	بله*	بله*	معناداری تفاوت؟

* تفاوت معنادار در سطح اطمینان ۹۵٪

** تفاوت معنادار در سطح اطمینان ۹۰٪

۴- نتیجه گیری

رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را کم کرد. لذا دیده شد که مخلوط‌هایی که همزمان هر دوی این مصالح دورریختنی را در بر داشتند رفتار بهتری نسبت به مخلوط‌های آسفالتی کنترلی و مخلوط‌های حاوی سرباره فولاد از خود نشان می‌دهند.

۵- پیرشدگی بلند مدت اثری مثبت بر عملکرد شیارشدگی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی داشت. با این حال مشاهده شد که این اثر مثبت در مخلوط‌های فاقد تراشه آسفالتی چشمگیرتر است به گونه‌ای که آنالیز آماری نیز نشان داد که تفاوتی بین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های حاوی ۴۰٪ تراشه آسفالتی در حالات پیرشده کوتاه و بلند مدت وجود ندارد.

۶- پیرشدگی بلندمدت منجر به کاهش شدید مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر ترک خوردگی در دمای پایین شد به گونه‌ای که مخلوط‌های پیرشده بلند مدت بین ۳۷ تا ۴۲٪ افت در مقاومت کششی را تجربه کردند.

۵- پی‌نوشت‌ها

1-X-ray Fluorescence Spectrometer

۶- مراجع

-AASHTO R30, (2001), "Standard practice for mixture conditioning of hot mix asphalt (HMA)". Standard Specification, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.

-Ameri M., Hesami S., Goli H. (2013), "Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF)

در مجموع نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که افزودن همزمان درشت‌دانه سرباره فولاد و ریزدانه تراشه آسفالتی در مخلوط آسفالتی گرم نه تنها منجر به مخلوطی اقتصادی و دوست‌دار محیط زیست می‌شود بلکه این مخلوط‌ها عملکردی قابل قبول و بعضاً بهتر از مخلوط‌های آسفالتی متداول و مخلوط‌هایی که تنها یکی از این دو ماده را در بردارند ارائه می‌کنند. مشخصاً نتایج زیر را می‌توان از این تحقیق استنتاج کرد:

۱- افزودن درشت‌دانه سرباره فولاد منجر به افزایش قابل توجه مصرف قیر در مخلوط آسفالتی شد (۱۳/۷٪)، اما با افزوده شدن تراشه آسفالتی به این مخلوط‌ها مصرف قیر خالص به مقدار چشمگیری کاهش یافت.

۲- افزودن سرباره فولاد و تراشه آسفالتی به مخلوط آسفالتی منجر به افزایش مقاومت مخلوط در برابر شیارشدگی می‌شود، از این جهت بهترین عملکرد را مخلوط S4R4 که حاوی ۴۰٪ درشت‌دانه سرباره‌ای و ۴۰٪ ریزدانه تراشه آسفالتی است نشان داد.

۳- افزودن سرباره فولاد و تراشه آسفالتی به مخلوط آسفالتی مقاومت کششی مخلوط را در دمای ۱۸- درجه نیز افزایش داد با این حال افزودن تراشه آسفالتی و سرباره فولاد به ترتیب منجر به کاهش و افزایش شکل‌پذیری مخلوط در لحظه شکست شد. به تبع افزودن سرباره فولاد به مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالتی تا حدودی مشکل شکست ترد آنها را بهبود بخشید.

۴- مخلوط‌هایی که صرفاً حاوی درشت‌دانه سرباره فولاد بودند حساسیت رطوبتی بیشتری از مخلوط‌های کنترلی از خود نشان دادند. در نقطه مقابل افزودن تراشه آسفالتی حساسیت

of the Transportation Research Board", (2179): pp.93–101, <http://dx.doi.org/10.3141/2179-11>.

-Fakhri M., Hosseini S. A., (2017), "Laboratory evaluation of rutting and moisture damage resistance of glass fiber modified warm mix asphalt incorporating high RAP proportion". *Construction and Building Materials* 134626-640, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.168>.

-Ferreira V. J., Vilaplana A. S-D-G, García-Armingol T, Aranda-Usón A, Lausín-González C, López-Sabirón A M, Ferreira G (2016), "Evaluation of the steel slag incorporation as coarse aggregate for road construction: technical requirements and environmental impact assessment". *Journal of Cleaner Production* 130175–186, <http://dx.doi.org/2015.08.094>.

-Johnson E., Watson M., Olson, R., Moon K. H., Turos M, Marasteanu M (2013), "Recycled asphalt pavement: Study of high-RAP asphalt mixtures on minnesota county roads". Minnesota Department of Transportation, Final Report 152013.

-Kavussi A, Qazizadeh M. J., (2014), "Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging". *Construction and Building Materials* 721, pp.58–166, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.052>.

-Kazmee H., Tutumluer E., Beshears S., (2016), "Using accelerated pavement testing to evaluate reclaimed asphalt pavement materials for pavement unbound granular layers. *J. Mater. Civ. Eng.* 04016205, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001729](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001729).

-Kusam A., Malladi, H., Tayebali, A. A., Khosla N. P., (2016), "Laboratory evaluation of workability and moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing recycled asphalt pavements". *J. Mater. Civ.*

Construction and Building Materials pp.49611–617.

-ASTM D5106-15, "Standard Specification for Steel Slag Aggregates for Bituminous Paving Mixtures".

-ASTM D-6927-07, "Standard test method for Marshall Stability and flow of bituminous mixtures".

-Barandica J. M., Fernández-Sánchez G, Berzosa Á, Delgado J A, Acosta F J (2013), "Applying life cycle thinking to reduce greenhouse gas emissions from road projects". *Journal of Cleaner Production*, pp.5779-91.

-Blankendaal T., Schuur P., Voordijk H. (2014), "Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: a scenario approach". *Journal of cleaner production* pp.6627-36.

-Buss A., Williams R. C., Schram S. (2016), "Evaluation of moisture susceptibility tests for warm mix asphalts. *Construction and Building Materials* 102", pp. pp.358-366. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.010>.

-Carvajal Munoz J. S., Kaseer F., Arambula E., Epps Martin A. (2015), "Use of the Resilient Modulus Test to Characterize Asphalt Mixtures with Recycled Materials and Recycling Agents". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(2506): pp.45-53, <http://dx.doi.org/10.3141/2506-05>.

-Chen J-S., Wei, S-H, (2016), "Engineering properties and performance of asphalt mixtures incorporating steel slag". *Construction and Building Materials* 128148–153, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.027>.

-Copeland A., D'Angelo J., Dongre R., Belagutti S., Sholar G., (2010), "Field evaluation of high reclaimed asphalt pavement-warm-mix asphalt project in Florida: case study. *Transportation Research Record: Journal*

- Palankar N., Ravi Shankar, A., Mithun, B. (2015), "Investigations on Alkali-Activated Slag/Fly Ash Concrete with steel slag coarse aggregate for pavement structures". *International Journal of Pavement Engineering* pp.1–13, <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2015.1095902>.
- Park P, El-Tawil S, Park, S-Y, Naaman A. E., (2015), "Cracking resistance of fiber reinforced asphalt concrete at– 20° C". *Construction and Building Materials*, pp.8147-57.
- Pasetto M., Baldo, N. (2011), "Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag. *Construction and Building Materials* 25(8): pp.3458–3468, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.037>.
- Pasetto M., Baldo N. (2012), "Performance comparative analysis of stone mastic asphalts with electric arc furnace steel slag: a laboratory evaluation. *Mater". Struct.* 45(3): 411-424, <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-011-9773-2>. Patel J P, 2008, Broader use of steel slag aggregates in concrete. Cleveland state university.
- Raposeiras A., Vargas-Cerón A, Movilla-Quesada D, Castro-Fresno D (2016), "Effect of copper slag addition on mechanical behavior of asphalt mixes containing reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials* 119268–276, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.081>.
- Rogers, W., (2011), "Influence of warm mix additives upon high RAP asphalt mixes", Clemson University.
- Sasol, wax, (2016), <http://www.sasolwax.com>, (Accessed Jan 12, 2016).(Shafabakhsh G, Ani O J, "Experimental investigation of effect of Nano TiO₂/SiO₂ modified bitumen on the rutting and fatigue performance of asphalt mixtures containing steel slag aggregates". *Construction and Building Materials* 98692-702.
- Eng.04016276,[http://dx.doi.org/10/ASCE\)MT.1943-5533.0001825](http://dx.doi.org/10/ASCE)MT.1943-5533.0001825).
- Liapis, I., Likoydis, S. (2012), "Use of electric arc furnace slag in thin skid-resistant surfacing". *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 48, pp.907–918.
- Lu. D. X., Saleh, M. (2016), "Laboratory evaluation of warm mix asphalt incorporating high RAP proportion by using evotherm and sylvaroad additives". *Construction and Building Materials* 114, pp.580–587.
- Masoudi S., Abtahi, S. M., Goli A., (2017), "Evaluation of electric arc furnace steel slag coarse aggregate in warm mix asphalt subjected to long-term aging. *Construction and Building Materials*", 135260-266, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.177>.
- Mensching D J, Daniel J S, Bennert T, Medeiros Jr M S, Elwardany M D, Mogawer W, Hajj E Y, Alavi M Z (2014), "Low-temperature properties of plant-produced RAP mixtures in the Northeast". *Road Materials and Pavement Design* 15(sup1): pp.1-27.
- Mladenović A, Turk J., Kovač J., Mauko A., Cotič Z. (2015), "Environmental evaluation of two scenarios for the selection of materials for asphalt wearing courses". *Journal of Cleaner Production* 87 pp.683–691, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.013>
- NCHRP, (2001), "Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave mix design method: technician's manual, Report 452. National Cooperative Highway Research Program, Washington, DC.
- Nejad, F. M, Azarhoosh, A., Hamedi G. H., Roshani, H., (2014), "Rutting performance prediction of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavements". *Road Materials and Pavement Design* 15(1): pp.207–219, <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2013.868820>.

design, evaluation, and materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content". Transportation Research Board.

-Xie J, Chen Z, Pang L, Wu S., (2014), "Implementation of modified pull-off test by UTM to investigate bonding characteristics of bitumen and basic oxygen furnace slag (BOF)", *Construction and Building Materials* pp.5761–5768, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.083>.

-Xie J., Wu, S., Lin J., Cai J., Chen Z., Wei, W. (2012), "Recycling of basic oxygen furnace slag in asphalt mixture: material characterization & moisture damage investigation. *Construction and Building Materials* pp.36467–3474, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.023>.

-Stimilli A, Virgili A, Giuliani F, Canestrari F (2016), "Mix design validation through performance-related analysis of in plant asphalt mixtures containing high RAP content. *International Journal of Pavement Research and Technology*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.07.002>.

-Tarbox, S., Daniel, J., (2012). "Effects of Long-Term Oven Aging on Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(2294): pp.1-15, <http://dx.doi.org/10.3141/2294-01>.

-Turk J, Mladenović A., Knez F, Bras V., Šajna A., Čopar A., Slanc K., (2014), "Tar-containing reclaimed asphalt—Environmental and cost assessments for two treatment scenarios. *Journal of Cleaner Production*, pp.81201-81210.

-West R C., Rada G. R., Willis J. R., Marasteanu M. O., (2013), "Improved mix