

بررسی آزمایشگاهی رفتار فیزیکی و مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با مصالح سنگی سرباره‌ای

منصور فخری، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
امین احمدی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
رضا علی نسب، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان
محمد کریمی گوغری، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Aminaaahmadi@gmail.com

دریافت: 95/10/15- پذیرش: 96/05/17

چکیده

در این تحقیق با هدف امکان سنجی و فرمولاسیون کاربرد سرباره فولاد در مخلوط‌های آسفالتی پس از بررسی خصوصیات مصالح سنگدانه‌ای سرباره فولاد با استفاده از تجهیزات پراش اشعه ایکس و میکروسکوپ الکترونی، هفت سری مخلوط آزمایشگاهی که در هر یک از آنها نسبتی از سنگدانه آهنی با سنگدانه سرباره فولاد جایگزین شده بود ساخته شدند. با استفاده از روش طرح اختلاط مارشال، درصد قیر بهینه و سایر پارامترهای مارشال بدست آمد. همچنین آزمایشات تعیین مقاومت لغزندگی و خواص اصطکاکی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح سرباره‌ای با استفاده از دستگاه پاندول انگلیسی و روش پخش ماسه بر روی نمونه‌های دال شکل انجام شد. نتایج نشان داد که در مخلوط ساخته شده با مصالح سرباره‌ای، پارامترهای استقامت مارشال، وزن مخصوص و مقاومت لغزندگی افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند ولی مصرف قیر و فضای خالی مخلوط به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این در حالی است که در مخلوط‌هایی که در آنها تنها بخشی از مصالح درشت‌دانه آهنی با مصالح سرباره‌ای جایگزین شده است با بهبود قابل قبول در پارامترهای ذکر شده، مصرف قیر و فضای خالی مخلوط نیز در حدود متعارف و مجاز قرار می‌گیرند. در این تحقیق همچنین حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها به روش آشتو T-283 مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاکی از کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های حاوی مصالح سرباره‌ای است. بررسی پتانسیل انبساطی مخلوط‌ها نیز نشان داد که انبساط نمونه‌های حاوی سرباره فولاد پس از 7 روز کمتر از 1٪ است.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی داغ، سرباره فولاد، پراش اشعه ایکس، میکروسکوپ الکترونی، مقاومت لغزندگی

1- مقدمه

منجر شده که این محصولات پتانسیل لازم برای استفاده به عنوان سنگدانه در تولید مخلوط‌های آسفالتی با توان باربری بالا را داشته باشند. یکی از مهمترین مشکلات استفاده از سرباره فولاد به عنوان سنگدانه در کاربردهای عمرانی و به خصوص در لایه‌های روسازی، پتانسیل افزایش حجم این محصول به دلیل هیدراته شدن آهک و منیزیم آزاد موجود در آن است (والیگرنا و همکاران، 2010). از این رو یکی از مراحل فرآوری سرباره، افزایش سرعت هیدراته شدن این ترکیبات با استفاده از هوادهی و

سرباره فولاد یکی از محصولات جانبی کارخانه‌های تولید فولاد است. به ازای تولید هر یک تن فولاد حدود 300 کیلوگرم سرباره تولید و در محوطه کارخانه‌های فولاد سازی دپو می‌شود (شن، 2009). دپو شدن این محصول نه تنها فضای بسیار وسیعی از محوطه کارخانه‌های فولاد و آهن را اشغال کرده، بلکه منابع آب زیرزمینی مجاور را نیز با خطر آلودگی مواجه می‌کند. برخی ویژگی‌های این محصول از جمله وزن مخصوص نسبتاً زیاد، شکل تیز گوشه و عمدتاً مکعبی و سطح زبر،

یا پاشش آب است. استفاده از هر دو بخش ریزدانه و درشت‌دانه سرباره فولاد به عنوان سنگدانه در مخلوط آسفالتی امکان پذیر نیست چرا که منجر به افزایش فضای خالی در مخلوط می‌شود (احمدزاده و سنگوز، 2008). تجربه محققین دیگر حاکی از آن است که استفاده از مصالح ریزدانه سرباره فولاد باعث کاهش توان باربری مخلوط (زیاری و خبیری، 2007).

اولین کاربرد عملی از سرباره فولاد در کانادا و در بزرگراه اونتاریا بود ولی بروز مشکلات عملکردی موجب شد که وزارت حمل و نقل کانادا استفاده از سرباره فولاد در آسفالت را در سال 1991 کنار بگذارد (سلمون، 1993). در سال 1994 در ایالت اورگان آمریکا مخلوط آسفالتی حاوی 30 درصد سرباره فولاد در قطعه‌ای میدانی اجرا شد و به مدت پنج سال مورد بازرسی قرار گرفت. نتایج حاکی از مقاومت بیشتر مخلوط سرباره‌ای در برابر شیارشدگی و مقاومت لغزندگی بیشتر قطعه سرباره‌ای نسبت به قطعه شاهد بود (هانت و گلن، 2000). (اسماعیلی و همکاران، 2005) نیز نشان دادند که استفاده از سرباره کوره بلند در مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند بافت درشت و مقاومت لغزندگی مخلوط آسفالتی را افزایش دهد. (یونگجی و همکاران، 2006) نشان دادند که استفاده از سرباره فولاد در مخلوط‌های آسفالتی SMA، پایداری دینامیکی و مقاومت در برابر ترک‌های حرارتی را افزایش می‌دهد. (آسی و همکاران، 2007) نشان دادند که مخلوط‌های آسفالتی حاوی 75 درصد سرباره فولاد مقاومت خستگی و مدول برجهندگی بیشتری نسبت به مخلوط‌های شاهد دارند. (احمدزاده و سنگوز، 2006) نیز با استفاده از نتایج آزمایش سختی خزشی نشان دادند که استفاده از سرباره فولاد تغییر شکل مخلوط آسفالتی در برابر بار ترافیک را کاهش می‌دهد. بررسی تاثیر استفاده از سرباره فولاد کنورتور در مخلوط‌های متخلخل نیز نشان داده است که مخلوط‌های حاوی مصالح سرباره‌ای قابلیت

بیشتری در جذب سر و صدای تولید شده در اثر تماس لاستیک و سطح روسازی دارند (شن و همکاران، 2009). در تحقیق دیگری توسط پاستو و همکاران، با بررسی مدول سختی و مقاومت خستگی در آزمایش کشش غیر مستقیم، استفاده از سرباره در مخلوط آسفالتی به عنوان راهکاری مناسب به منظور افزایش توان باربری مخلوط‌های آسفالتی معرفی شده است (پاستو و بالدو، 2011). به منظور بررسی مقاومت لغزندگی و بافت سطحی مخلوط‌های آسفالت سرباره‌ای قطعه‌ای آزمایشی به طول 200 متر در جاده‌ای با ترافیک متوسط روزانه 2000 وسیله نقلیه در کرواسی با مخلوطی حاوی 70 درصد مصالح سرباره‌ای ساخته شد. نتیجه این تحقیق نشان داد که مقاومت لغزندگی سطوح آسفالتی سرباره‌ای و آسفالت متداول درست پس از احداث اختلاف چندانی با هم ندارند (سوفیلیک و همکاران، 2010). (عامری و همکاران، 2011) با انجام آزمایش خزش دینامیکی نشان دادند که جایگزین کردن 25 درصد از مصالح طبیعی با مصالح سرباره فولاد کنورتور در مخلوط آسفالتی، مقاومت آن در برابر شیار شدگی تا 60 درصد افزایش پیدا می‌کند. با وجود تحقیقاتی زیادی که در این زمینه انجام شده است، تاکنون تحقیقی که به شکل مدون به بررسی میزان ترکیب بهینه مصالح سرباره‌ای و مصالح آهکی به منظور دستیابی به ترکیبی با مشخصات فنی مطلوب و در عین حال اقتصادی پردازد انجام نشده است.

2- مصالح مصرفی

در این تحقیق از دو نوع مصالح سنگی و یک نوع قیر استفاده شده است. مصالح سنگی شامل سنگدانه آهکی و سنگدانه سرباره فولاد EAF کارخانه فولاد مبارکه است. قیر مصرفی، قیر 70-60 شرکت نفت پاسارگاد می‌باشد. مشخصات اصلی فیزیکی و مکانیکی مصالح سنگی و قیری در جداول 1 و 2 ملاحظه می‌شوند.

جدول 1. مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح سنگی

مشخصه	استاندارد	مصالح آهکی			مصالح سرباره‌ای	
		درشت‌دانه	ریزدانه	فیلر	درشت‌دانه	ریزدانه
وزن مخصوص (g/cm ³)	ASTM C-127	2/70			3/56	
وزن مخصوص (g/cm ³)	ASTM C-128		2/58			3/38
وزن مخصوص (g/cm ³)	ASTM D-854			2/63		3/31
سایش لس آنجلس (%)	ASTM C-131	16/7			29/5	
افت در محلول سولفات سدیم (%)	ASTM C-88	0/1	2/04		0/2	0/5
هم ارز ماسه‌ای (%)	AASHTO T-167		78/8			65/8
شکستگی در دو وجه (%)	ASTM D-5821	70			90	

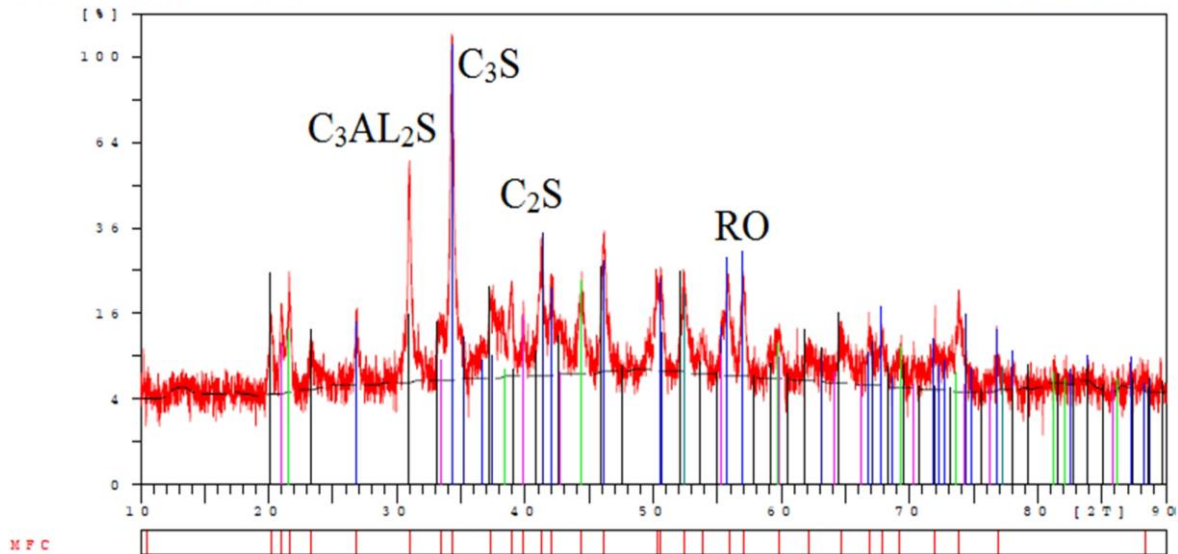
جدول 2. مشخصات فنی قیر 60-70 پالایشگاه اصفهان

نتایج	روش آزمایش		مشخصه قیر
	AASHTO	ASTM	
1/014	T-228	D-70	وزن مخصوص در 25 °C
64	T-49	D-5	درجه نفوذ در 25 °C (×0/1 mm)
47	T-53	D-36	نقطه نرمی، سانتیگراد
688	T-201	D-2170	کندروانی کنماتیک در 120 °C (سانتی استوکس)
109	T-201	D-2170	کندروانی کنماتیک در 160 °C (سانتی استوکس)
>100	T-51	D-113	شکل پذیری (سانتی متر)
232	T-48	D-92	نقطه اشتعال (درجه سانتیگراد)

1-2- آنالیز XRD

در این آزمایش از سرباره عبوری از الک 200 استفاده شد. دستگاه مورد استفاده در این تحقیق ساخت کمپانی فیلیپس و مدل X' Pert MPD است این دستگاه با پراش اشعه ایکس بر روی نمونه و با تغییر زاویه 2θ بین 10 تا 90 درجه، در حالی که ولتاژ دستگاه 40 kV، جریان 30 mA و سرعت چرخش اشعه 1/2 °/min می‌باشد انجام شد. شکل 1 طیف XRD سرباره فولاد را نشان می‌دهد.

ترکیب شیمیایی و فازهای کریستالی معدنی سرباره فولادی به کار رفته در این تحقیق با استفاده از آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD) بدست آمد. در این آزمایش از کاتد مسی برای تابش اشعه ایکس استفاده شده که بر روی نمونه پخش می‌شود. با آنالیز و مقایسه نقاط اوج الگوی پخش این اشعه با کارتهای استاندارد توسط نرم افزار، هر پیک به یک یا چند فاز کریستالی محتمل تخصیص داده می‌شود.



شکل 1. طیف XRD سرباره فولاد

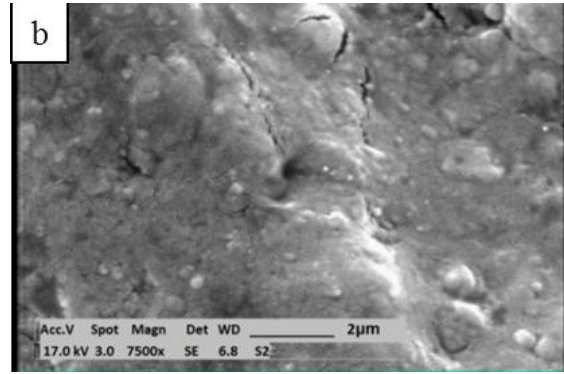
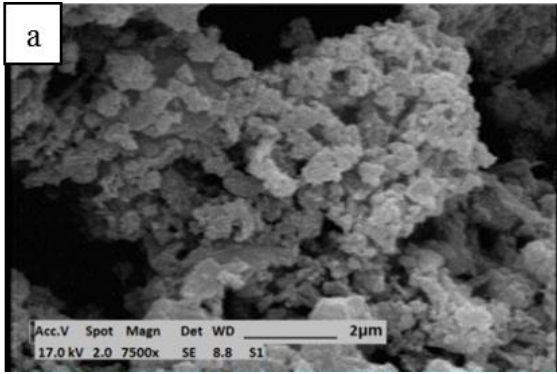
زیر پیک‌ها نشان می‌دهد که حدود یک سوم این ترکیبات آمورف هستند.

همان‌گونه که طیف XRD نمونه نشان می‌دهد، مهمترین فازها و ترکیبات تشکیل‌دهنده سرباره فولاد مبارکه به ترتیب عبارتند از: کربنات کلسیم (کلسیت)، هیدروگارنت، کلسیم هیدروکسید (پرتلندیت)، منیزیم هیدروکسید (بروسیت)، کوارتز، مگنتیت و آهن. این طور به نظر می‌رسد که حضور اکسید آلومینیوم به همراه دیگر عناصر فلزی در ترکیبات سرباره دلیل اصلی مقاومت زیاد مصالح سرباره‌ای در برابر سایش است.

2-2- مورفولوژی سطح سنگدانه‌ها

به منظور بررسی سطح، سایز حفرات و ساختار کریستالی سنگدانه‌های سرباره فولاد و مقایسه آنها با سنگدانه‌های آهنی، از میکروسکوپ الکترونی SEM استفاده شد. در این نوع میکروسکوپ، الکترون به سطح نمونه تابیده شده و منعکس می‌گردند و توسط آشکارسازها جمع‌آوری شده و تبدیل به فوتون نوری می‌گردند تا تصویر مرئی ایجاد شود. از آنجایی که مصالح سنگی رسانای الکتریسیته نیستند در این آزمایش با یک نوار بسیار نازک طلا پوشیده شدند.

تحلیل نتایج با استفاده از نرم افزار X-PERT انجام و فازهای کریستالی و معدنی موجود در سرباره فولاد عبوری از الک 200 مورد شناسایی قرار گرفتند. محورهای قائم و افقی طیف به ترتیب بیانگر شدت نسبی پیک و زاویه 2θ هستند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود الگوی طیف XRD سرباره فولاد کاملاً پیچیده و به همراه تعداد زیادی نقطه پیک است. نقاط زیاد برهم افتادگی پیک‌ها حکایت از حضور تعداد زیاد ترکیبات معدنی درون سرباره فولاد EAF دارد. ساختار کریستالی مواد علاوه بر ترکیبات شیمیایی به فرآیند سرد شدن سرباره نیز وابسته است به گونه‌ای که هر چه میزان سرعت خنک شدن کمتر باشد، ساختار ماده کریستالی تر خواهد بود (دشتی و همکاران، 1387). در مورد سرباره فولاد EAF ذرات به دلیل فرآیند آهسته و تدریجی خنک‌شدن مذاب EAF در 20 ساعت اول تخلیه از پاتیل مذاب، فرصت کافی برای تشکیل بلورهای کریستالی را داشته‌اند. با این وجود پس از این زمان با پاشش آب، سرباره به دمای محیط می‌رسد و از این رو بخشی از ترکیبات بی‌شکل می‌شوند، بالا بودن خط پس زمینه (خط‌چین افقی) بیانگر آن است که بخشی از ترکیبات به صورت آمورف و بی‌شکل هستند که در این آنالیز امکان شناسایی آنها نبوده است. اندازه‌گیری سطح



شکل 2. مورفولوژی سطح سنگدانه‌ها (a: سنگدانه سرباره‌ای، b: سنگدانه آهکی)

دانه‌بندی سنگدانه‌های مخلوط منطبق بر دانه‌بندی شماره 4 نشریه 234 با اندازه اسمی حداکثر 12/5 میلیمتر است. مقدار قیر بهینه هر یک از سری مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از روش طرح اختلاط مارشال (روش استاندارد ASTM D-6927) بدست آمدند. جدول 3 نتایج آزمایش‌های طرح اختلاط را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش نسبت مصالح سرباره‌ای در ترکیب مصالح سنگی، استقامت مارشال و وزن مخصوص نمونه‌های آسفالتی افزایش یافته است. البته با افزودن تا حداکثر 40 درصد سرباره به مخلوط آسفالتی، افزایش استقامت مارشال چندان چشم‌گیر نبوده ولی با جایگزین کردن مقادیر بیشتر (حداقل 60 درصد مصالح آهکی با مصالح سرباره‌ای) به دلیل درگیری و قفل و بست موثر سنگدانه‌ها، این پارامتر به شکل چشمگیری افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که با جایگزین شدن کل بخش درشت‌دانه مصالح سنگی آهکی با مصالح سرباره‌ای استقامت مارشال و وزن مخصوص مخلوط آسفالتی به ترتیب 41 و 15 درصد افزایش پیدا کرده است. همچنین در مخلوطی که کل مصالح سنگی (درشت‌دانه و ریزدانه) از سرباره فولاد بود این دو پارامتر به ترتیب 50 و 22 درصد افزایش پیدا کرده‌اند. با این وجود، با افزایش نسبت حضور مصالح سرباره‌ای در مخلوط‌های آسفالتی فضای خالی مخلوط نیز افزایش پیدا می‌کند دلیل این مطلب سطح متخلخل‌تر سنگدانه سرباره‌ایست چرا که بخشی از قیر جذب خلل و فرج سنگدانه‌های سرباره‌ای می‌شود و

در این آزمایش از سنگدانه با اندازه 4/75 میلیمتر استفاده شد. شکل 2 سطح مصالح سنگی را با بزرگنمایی 7500 برابر نشان می‌دهد. بر اساس این تصاویر سرباره فولاد دارای سطح و بافت زبر و درشت‌تر در مقایسه با سنگدانه‌های آهکی است. به خصوص در مورد تخلخل سطحی، این تفاوت باعث شده سطح مصالح سرباره‌ای دارای دانه‌های زبر و خشن‌تر از سنگدانه‌های آهکی باشد. همان‌گونه که تصاویر میکروسکوپ الکترونی و همچنین بازرسی چشمی از سطح سنگدانه‌ها نشان می‌دهد سنگدانه‌های آهکی دارای تخلخل بسیار کم آن هم در قطر بسیار کوچک (نزدیک به یک میکرون) است در حالی که سرباره فولاد دارای بافتی درشت به همراه سطحی بسیار متخلخل است و حفراتی به قطر 1 میکرون تا 1 میلیمتر در سطح آن به وفور مشاهده می‌شود.

3- طرح اختلاط

در این تحقیق به منظور دستیابی به ترکیب بهینه مصالح سرباره فولاد و مصالح سنگ آهکی، هفت سری مخلوط آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف سرباره ساخته شدند که عبارتند از دو سری مخلوط شاهد (مخلوط تهیه شده از مصالح سنگی کاملاً آهکی و مخلوط تهیه شده از مصالح کاملاً سرباره‌ای) و پنج سری مخلوط که در هر یک به ترتیب 20، 40، 60، 80 و 100 درصد از مصالح درشت‌دانه طبیعی با مصالح سرباره‌ای جایگزین شده است.

روانی به اندازه‌ای نبود که منجر به سخت شدگی مخلوط شود به طوری که میزان روانی در مخلوط‌های آسفالتی کاملاً سرباره‌ای نیز در محدوده مجاز آیین‌نامه قرار داشت.

4- حساسیت رطوبتی نمونه‌های آسفالتی

در این پژوهش حساسیت رطوبتی نمونه‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف مصالح آهکی و سنگ سرباره به روش استاندارد AASHTO T-283 ارزیابی شد. بر اساس آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه 234) نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های اشباع به نمونه‌های خشک بایستی بزرگتر از 80 درصد باشد. شکل 3 نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها در شرایط اشباع به شرایط خشک را برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی ترکیبات مختلف مصالح آهکی و سنگ سرباره‌ای نشان می‌دهد.

فضای خالی مخلوط را کمتر پر می‌کند. همانگونه که ملاحظه می‌شود در مخلوط با صددرصد درشت‌دانه سرباره‌ای (در درصد قیر بهینه)، مقدار این پارامتر از حد مجاز آیین‌نامه (5 درصد) بیشتر شده است. آیین‌نامه طرح روسازی ایران (نشریه 234) بر اساس اندازه اسمی سنگدانه‌ها، مقادیری را برای حداقل فضای مصالح سنگی در مخلوط آسفالتی تعیین کرده است. تأمین این فضا در بسیاری از موارد بسیار محدودکننده بوده و در اغلب موارد قابل تأمین نمی‌باشد (والتر و برین، 2005).

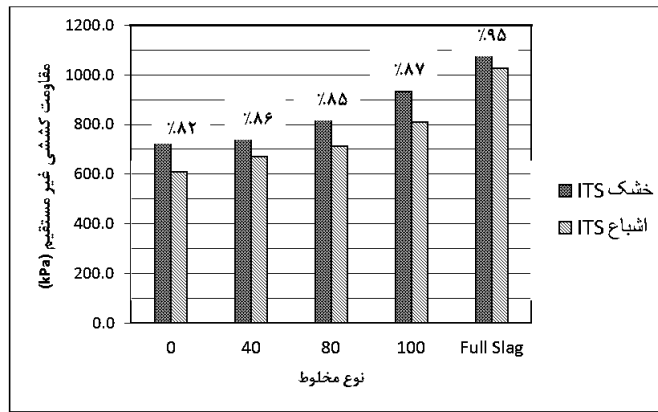
مقدار فضای خالی مصالح سنگی در مخلوط‌های سری 1 و 2 (در این مخلوط‌ها به ترتیب 0 و 20٪ از درشت‌دانه با مصالح سرباره‌ای جایگزین شده است) از حداقل مجاز آیین‌نامه کمتر بود. در مخلوط‌هایی که در آنها حداقل 40 درصد درشت‌دانه آهکی با مصالح سرباره‌ای جایگزین شده است مقدار فضای خالی مصالح سنگی از حداقل مجاز آیین‌نامه بیشتر شد. همچنین از دیگر تاثیرات استفاده از مصالح سرباره‌ای در مخلوط‌های آسفالتی می‌توان به کاهش روانی مخلوط‌ها اشاره کرد اما کاهش

جدول 2. نتایج آزمون مارشال نمونه‌های آسفالتی در درصد قیر بهینه

Full Slag	100S	20L-80S	40L- 60S	60L- 40S	80L- 20S**	100L*	پارامتر
6/5	5/95	5/8	5/5	5/4	5/25	5/15	قیر بهینه (%)
1420	1335	1260	1230	1030	985	945	استقامت مارشال (kg)
2950	2764	2692	2620	2550	2495	2411	وزن مخصوص (kg/m ³)
5/8	5/3	5/0	4/8	4/35	3/8	3/70	فضای خالی مخلوط (%)
19/35	17/55	14/95	14/58	14/32	13/3	13/0	فضای خالی مصالح سنگی (VMA) (%)
3/8	3/95	3/9	3/9	4/1	4/6	4/6	روانی (mm)
70	69/8	65/3	67	70/5	70	71	فضای خالی پر شده با قیر (%)
4/66	4/5	4/4	4/14	4/23	4/2	4/2	قیر موثر (%)

*Limestone

**Steel Slag



شکل 2. نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی نمونه‌های آسفالتی به روش آشتو T-283

در ضمن دارای ابعادی مناسب جهت تعیین خصوصیات اصطکاکی سطح باشد. از این رو نمونه‌های دال شکل به ابعاد $4 \times 30 \times 40$ سانتیمتر تهیه شدند. نمونه‌ها با استفاده از غلتک دستی تا رسیدن به وزن مخصوص در درصد قیر بهینه متراکم شدند. در این تحقیق نیز به منظور بهتر نشان دادن نقش بافت ریز سنگدانه‌های سرباره‌ای بر مقاومت لغزندگی سطوح دال‌های آسفالتی، به کمک پارچه آغشته به بنزین و برس سیمی، قیر از بافت ریز سنگدانه‌ها زدوده شد. برای جبران احتمال ناهمگنی توزیع سنگدانه‌ها در سطح، آزمایش بر روی هر نمونه در سه امتداد طولی، دو امتداد عرضی و دو امتداد مورب انجام شد و مقدار میانگین این 7 امتداد به عنوان عدد آونگی سطح نمونه ثبت شد. در این تحقیق پشت دال که در تماس با کف قالب است نیز مورد توجه قرار گرفت چرا که این روی از دال به دلیل تماس با کف قالب بافت درشت خود را به طور کلی از دست داده ولی با این وجود بافت ریز آن قابل لمس بود و در کل بافتی یکنواخت‌تر ارائه می‌کرد. از این رو به منظور بررسی اثر بافت درشت بر نتایج آزمایش آونگ انگلیسی مقاومت لغزشی پشت دال نیز به همان ترتیب اندازه‌گیری شده و با یکدیگر مقایسه شدند. جدول 4 نتایج آزمایش پاندول را بر رو و پشت دال ارائه می‌کنند. همچنین نتیجه آزمایش بافت درشت سطح مخلوط‌ها نیز در این جدول مشاهده می‌شود.

همانگونه که ملاحظه می‌شود مقاومت لغزندگی

شکل 3 نشان می‌دهد که با افزایش میزان سرباره در مخلوط آسفالتی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی اندکی کاهش می‌یابد. به گونه‌ای که نسبت TSR از 82 درصد برای مخلوط کاملاً آهکی به 87 درصد در مخلوط آسفالتی با مصالح درشت‌دانه سرباره‌ای می‌رسد. در مخلوط آسفالتی کاملاً سرباره‌ای این نسبت 94 درصد است. اصولاً مخلوط‌های شاهد با مصالح آهکی مشکل عریان‌شدگی ندارند. علت افزایش مقاومت در برابر عریان‌شدگی مخلوط‌های سرباره‌ای را می‌توان در درصد قیر بهینه بیشتر نمونه‌های حاوی سرباره و بافت متخلخل سنگدانه‌های سرباره‌ای اشاره کرد.

5- بررسی آزمایشگاهی-میدانی اصطکاک نمونه‌های آسفالتی

بررسی اصطکاک مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف مصالح سرباره‌ای با استفاده از پاندول انگلیسی منطبق با استاندارد ASTM E-303 و روش پخش ماسه مطابق با استاندارد ASTM E-965 انجام شد. انتخاب ابعاد و نوع قالب نمونه‌های اصطکاکی با رعایت چند محدودیت صورت گرفت، از جمله این که نمونه‌ی اصطکاکی دارای تراکمی مناسب، منطبق با نمونه بهینه مارشال با درصد قیر بهینه باشد، سطحی مناسب از نظر توزیع همگن سنگدانه‌ها مانند شرایط میدانی داشته باشد و

عبور ترافیک، مقادیر عمق متوسط بافت درشت کاهش یابد.

به منظور ارزیابی و مقایسه مقاومت لغزندگی سطوح آسفالتی حاوی مصالح سرباره‌ای در شرایط میدانی، آزمایش آونگ انگلیسی بر سطح جاده‌ای در استان اصفهان که در طول مسیر خود دارای هر دو نوع روسازی با سنگدانه طبیعی آهکی و سنگدانه سرباره‌ای بود انجام شد. این جاده در مسیر زرین شهر به سفیددشت در استان اصفهان واقع شده که میانگین بارش سالیانه آن حدود 250 میلیمتر است. این مسیر دوخطه، با شیب حداکثر 10 درصد و با سرعت طرح 80 کیلومتر بر ساعت طراحی و اجرا شده است. روکش آسفالتی متداول با استفاده از مصالح سنگ آهکی و روکش آسفالتی سرباره‌ای با استفاده از مصالح سنگ سرباره EAF کارخانه فولاد مبارکه اجرا گردید. در هر دو مخلوط حداکثر اندازه اسمی مصالح سنگی 19 میلیمتر، درصد قیر بهینه حدود 4/5 درصد و قیر به کار رفته، قیر 70-60 پالایشگاه اصفهان است. عمده ترافیک این مسیر، ترافیک خودروهای سنگین باری و مسافری بوده چرا که این مسیر یکی از خطوط اصلی مواصلاتی استان خوزستان به مرکز کشور است. به لحاظ ظاهری سطح آسفالتی سرباره‌ای دارای رنگی تیره‌تر بوده و لذا رنگ سفید خط‌کشی بر روی آن نمایان‌تر است در هر دو سطح هیچ‌گونه خرابی قابل توجه سازه‌ای در سطح روسازی با گذشت 17 ماه مشاهده نشد. این آزمایش در سه نقطه از هر قطعه آسفالتی (ابتدا، وسط و انتها قطعه) انجام شد و میانگین نتایج پس از اصلاح با پارامتر دما به عنوان عدد پاندول سطح ثبت شد. نتایج آزمایش آونگ انگلیسی در جدول 5 ملاحظه می‌شود.

مخلوط‌های آسفالتی با جایگزین شدن سرباره فولاد با مصالح آهکی روندی صعودی دارد، به طوریکه با جایگزین شدن کل بخش مصالح درشت‌دانه با مصالح سرباره‌ای در مخلوط آسفالتی در شرایط مرطوب مقاومت اصطکاکی حدود 30 درصد افزایش پیدا می‌کند. این امر ناشی از اثر بافت ریز زیر سنگدانه‌های سرباره‌ای بر مقاومت لغزندگی سطح مخلوط است. مقایسه نتایج آزمایش آونگ بر رو و پشت دال نشان می‌دهد که حذف بافت درشت در مخلوط آسفالتی باعث افت شدید در نتایج آزمایش پاندول می‌شود.

نتایج جدول 4 نشان می‌دهد که با وجود دانه‌بندی یکسان در همه مخلوط‌ها، بافت درشت مخلوط‌های آسفالتی نیز با افزایش نسبت سرباره فولاد EAF در مخلوط افزایش یافته است. دلیل این افزایش در بافت درشت مخلوط‌های سرباره‌ای را در شکل شکسته و گوشه‌دارتر درشت‌دانه‌های سرباره فولاد نسبت به درشت‌دانه‌های مصالح آهکی می‌توان جستجو کرد. شکل گوشه‌دار و شکسته مصالح سرباره‌ای در ترکیب با یکدیگر در مخلوط آسفالتی منجر به سطحی ناهموارتر نسبت به سطوح با مصالح آهکی می‌شود. از دیگر عوامل تاثیرگذار بر این افزایش می‌توان به درصد فضای خالی مخلوط‌ها اشاره کرد. همان‌گونه که در نتایج مارشال اشاره شد، فضای خالی مخلوط‌ها از 3/7 درصد در مخلوط کاملاً آهکی تا 5/4 درصد در مخلوط کاملاً سرباره‌ای تغییر کرده است. عمق متوسط بافت درشت مخلوط‌های سری 5، 6 و 7 بیشتر از 1 میلیمتر است. از این رو این سطوح، جزء سطوح زیر طبقه‌بندی می‌شوند (کوکالیس و همکاران، 1998). البته این رده‌بندی، بر اساس نتایج مقادیر آزمایشگاهی، شرایط سطوح آسفالتی پیش از بارگذاری ترافیک را نشان می‌دهد که ممکن است با گذشت زمان و

جدول 3. نتایج آزمایش‌های اصطکاکی مخلوط‌های آسفالتی

عمق متوسط بافت درشت (mm)	متوسط عدد آونگ اصلاح شده زیر دال	متوسط عدد آونگ اصلاح شده روی دال	نمونه
0/82	57	63	سری 1 (0٪ سرباره)
0/88	61	72	سری 3 (40٪ سرباره)
0/99	65	76	سری 5 (80٪ سرباره)
1/1	72	82	سری 6 (100٪ سرباره)
1/28	72	84	سری 7 (کاملاً سرباره - ای)

جدول 4. نتایج آزمایش آونگ انگلیسی در شرایط میدانی بر روی مخلوط سرباره‌ای و آهکی

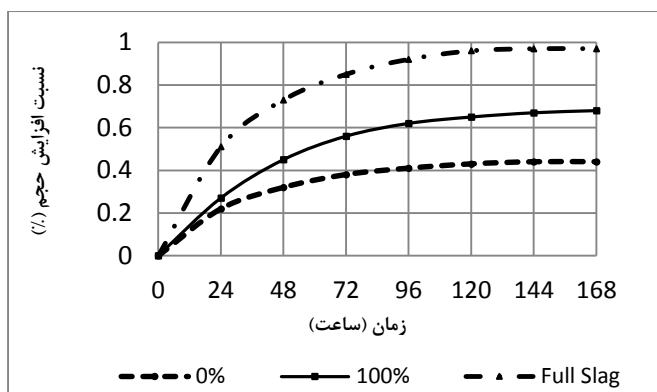
عدد آونگی اصلاح شده با فاکتور دما	عدد آونگ	دما (° C)	عمر (ماه)	نوع روسازی
55	53	27	17 ماه	روسازی سرباره‌ای
43	41	27	17 ماه	روسازی آهکی

کاربرد مصالح سرباره‌ای به عنوان جایگزین بخشی از مصالح درشت‌دانه آهکی را مد نظر قرار داد.

6- بررسی پتانسیل افزایش حجم نمونه‌های آسفالتی

به منظور تعیین پتانسیل افزایش حجم نمونه‌های آسفالتی حاوی سرباره، سه نمونه آسفالتی با درصد‌های مختلف سرباره فولاد و با درصد قیر بهینه ساخته شد و به مدت یک هفته درون حمام آب 60 درجه سانتیگراد قرار گرفتند، این دما به افزایش سرعت هیدراتاسیون آهک آزاد کمک می‌کند. در این فاصله حجم نمونه‌ها در بازه‌های زمانی 24 ساعته اندازه‌گیری شدند. شکل 4 تغییرات حجم سه نمونه شامل نمونه با مصالح کاملاً آهکی (0٪)، نمونه با مصالح درشت‌دانه سرباره‌ای و ریزدانه آهکی (100٪) و نمونه با مصالح کاملاً سرباره‌ای (Full Slag) را نسبت به زمان نشان می‌دهد.

همانطور که ملاحظه می‌شود در شرایط میدانی نیز مخلوط آسفالتی سرباره‌ای مقاومت لغزندگی بیشتری نسبت به مخلوط آسفالتی ساخته شده با سنگدانه‌های آهکی به نمایش گذاشته است. نتایج تست میدانی نشان می‌دهد که مخلوط آسفالتی سرباره‌ای نسبت به مخلوط آسفالتی آهکی در شرایط یکسان ترافیکی و آب و هوایی، مقاومت لغزندگی بالاتری (28 درصد) ارائه می‌کند. (نشریه 27 Road Note آزمایشگاه تحقیقات و ترابری انگلیس، 1969) مقادیر حداقل BPN را برای سه گروه از جاده‌ها در شرایط خیس تعیین کرده است. حداقل مقدار عدد پاندول پیشنهاد شده توسط این نشریه برای جاده‌ای با ترافیک روزانه کمتر از 2000 خودرو و شیب‌های طولی ملایم 45 است. بر این اساس در این جاده مخلوط آسفالتی آهکی حداقل مقاومت لغزندگی این آیین‌نامه را تامین نمی‌کند. از این رو بازنگری در منابع مصالح سنگی به کار رفته در مخلوط‌های آسفالتی طبیعی آهکی این استان ضروری به نظر می‌رسد که در این راستا می‌توان



شکل 3. تغییرات حجمی نمونه‌های با مصالح کاملاً آهکی، درشت‌دانه سرباره‌ای و نمونه با مصالح کاملاً سرباره‌ای

مارشال به میزان قابل توجهی بهبود می‌یابد. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم نشان داد که مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با مصالح آهکی مقاومت مناسبی در برابر آسیب‌های رطوبتی دارند با این وجود افزودن مصالح سرباره‌ای به مخلوط، منجر به بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی می‌شود. علت این افزایش احتمالاً درصد قیر بهینه بیشتر نمونه‌های حاوی سرباره و بافت متخلخل سنگدانه‌های سرباره‌ای است. با افزایش نسبت سرباره فولاد در مخلوط آسفالتی مقاومت لغزندگی افزایش پیدا می‌کند. دلیل این امر بافت ریز زبرتر سطح سنگدانه‌های سرباره‌ای، شکستگی، زاویه‌دارتر بودن و مقاومت سایشی بالاتر سنگدانه‌های سرباره‌ای نسبت به سنگدانه‌های آهکی و فضای خالی بیشتر این نمونه‌های آسفالتی است.

فرآوری مصالح سرباره‌ای به خوبی انجام شده و آهک و منیزیم آزاد موجود در آن هیدراته شده است چرا که افزایش حجم نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با مصالح کاملاً سرباره‌ای کمتر از 1٪ است. از این رو استفاده از این مصالح در مخلوط آسفالتی خطر افزایش حجم مخرب در اثر جذب رطوبت را ندارد.

با افزایش درصد سرباره، وزن مخصوص، استقامت مارشال، مقاومت در برابر رطوبت و مقاومت لغزندگی سطح افزایش می‌یابد اما از سوی دیگر، با افزایش درصد قیر و هزینه‌های حمل ناشی از افزایش وزن مخصوص نمونه‌ها، جایگزینی 100 درصد درشت‌دانه با سرباره از

همان گونه که ملاحظه می‌شود به دلیل حضور مقدار بسیار اندک آهک آزاد باقی مانده در سرباره فولاد، نرخ افزایش حجم مخلوط‌های سرباره‌ای و به‌خصوص مخلوط کاملاً سرباره‌ای بیشتر از نمونه‌های آسفالتی معمولی حاوی مصالح آهکی است. با این وجود از آنجایی که این افزایش حجم پس از یک هفته حتی در مخلوط کاملاً سرباره‌ای کمتر از یک درصد است پتانسیل افزایش حجم سرباره فولاد قابل ملاحظه نیست لذا نمی‌تواند منجر به ایجاد خرابی در مخلوط آسفالتی شود.

7- نتیجه‌گیری

با بررسی نتایج آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه و صحرا به طور خلاصه می‌توان نتایج را به ترتیب ذیل جمع‌بندی کرد.

نتایج آزمایشات مارشال نشان داد که با جایگزینی بخش درشت‌دانه مصالح آهکی با مصالح سرباره‌ای می‌توان به مخلوطی با توان باربری بالاتر در برابر تغییر شکل دست یافت و برخی مشکلات متداول در طرح اختلاط مخلوط‌های با مصالح آهکی همچون عدم تامین حداقل فضای خالی مصالح سنگی در مخلوط آسفالتی را رفع کرد. همچنین بایستی توجه نمود که جایگزین کردن کل بخش درشت‌دانه با مصالح سرباره‌ای، منجر به تجاوز فضای خالی مخلوط از حد مجاز می‌شود ولی با جایگزین شدن 80 درصد از مصالح درشت‌دانه آهکی با مصالح سرباره‌ای با افزایش 15 درصدی در میزان قیر بهینه، پارامترهای

Research Journal, No. 2, pp. 199–206.

-Kokkalis A.G, and Panagouli O.K, (1998), "Fractal evaluation of pavement skid resistance variations. I: surface wetting" *Chaos, Solutions & Fractals*, 9(11), pp.1875–1890.

-Liz Hunt P.E, Glenn E, (2000), "Steel Slag in Hot Mix Asphalt Concrete", State Research Project No. 511, Oregon Department of Transportation.

-Pasetto M, Baldo N, (2011), "Mix Design and Performance Analysis of Asphalt Concretes with Electric Arc Furnace Slag", *Construction and Building Materials* No. 25, pp. 3458–3468.

-Proctor D.M, Fehling K.A, Shay E.C, (2000), "Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags", *Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags. Environmental Science & Technology*, 34(8), pp.1576–1582.

-Road Note 27, (1969), "Instructions for Using The Portable Skid Resistance Tester", Transport and Road Research Laboratory TRRL HMSO.

-Shen D.H, Wu C.M, Du J.C, (2009), "Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture", *Construction and Building Materials* 23(1) 453–461.

-Sofilic T, Rastovcan-Mioc A, Cosic M, (2010), "EAF Steel Slag Application Possibilities in Croatian Asphalt Mixture Production", *Chemical Engineering Transactions*, No. 19 pp. 109–117.

-Solomon C (1993), "Slag-Iron and Steel", U.S. Bureau of Mines, U.S. Army Corps of Engineers.

-Waligora J, Bulteel D, Degrugilliers P (2010), "Chemical and mineralogical characterizations of LD converter steel slags: A multi-analytical techniques approach", *Materials Characterization*, No. 61, pp. 39–48.

-Walter P.H, Brian J.C (2000), "VMA as a Design Parameter in Hot-Mix Asphalt" Mid-Continent Transportation Symposium 2000, Iowa State University, May 15-16, 2000, pp. 24–29.

-Yongjie X, Shaopeng W, Haobo H, Jin Z (2006), "Experimental Investigation of Basic Oxygen Furnace Slag Used as Aggregate in Asphalt Mixture", *Journal of Hazardous Materials* No. 138, pp. 261–268.

-Ziari H, Khabiri M (2007), "Preventive Maintenance of Flexible Pavement and Mechanical Properties of Steel Slag Asphalt", *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, Vol. XV, No. 3, pp. 188b–192b.

دیدگاه اقتصادی چندان منطقی به نظر نمی‌رسد. بنابراین بایستی درصدی بعنوان درصد بهینه تعیین گردد که لازمه آن تحقیقی جامع در خصوص تاثیر سرباره بر خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی و همچنین در نظر گرفتن مسائل اقتصادی است.

بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی سنگدانه‌های سرباره‌ای نشان می‌دهد که این مصالح بافت ریز بسیار بیشتری نسبت به سنگدانه‌های طبیعی دارد. این حفرات در سطح سنگدانه‌های سرباره‌ای هم فضای مناسبی را برای قفل و بست بین قیر و سنگدانه فراهم می‌کنند، هم سطح جانبی سنگدانه و به تبع سطح تماس با قیر را افزایش می‌دهند.

8- پی‌نوشت‌ها

- 1- Electric Arc Furnace
- 2- X-Ray Diffraction
- 3- Scanning Electric Microscope

9- مراجع

-دشتی، ح.، صفی‌خانی، الف.، رفیعی ب، (1387) "بررسی نتایج آزمایشگاهی به کارگیری سرباره در خاکریزی، زیر اساس و مخلوط‌های آسفالتی" چهاردهمین کنفرانس دانشجویان مهندسی عمران سراسر کشور، دانشگاه سمنان.

-Ahmedzade P, Sengoz B (2008), "Evaluation of Steel Slag Coarse Aggregate in Hot Mix Asphalt Concrete", *Journal of Hazardous Materials*, No. 165, pp. 300–305.

-Ameri, M. Ahadi, M.R. Zaree, Z. and Jahanian, H.P. (2011), "A laboratory study on the mechanical properties of hot mix asphalt using basic oxygen furnace steel slag", 10th International Conference LJMU, Britannia Adelphi Hotel, February 16–17, 2011, Liverpool, UK.

-Asi I.M, Qasrawi H.Y, Shalabi F.I. (2007), "Use of Steel Slag Aggregate in Asphalt Concrete Mixes", *Canadian Journal of Civil Engineering*, No. 34, pp. 902–911.

-Esmaili Kalalagh A, Marandi S.M, Safapour P (2005), "Technical Effects of Air Cooled Blast Furnace Slag on Asphalt Mixtures", *Transportation*

