

## ارزیابی شاخص سختی مارشال مخلوطهای آسفالت گرم (WMA) حاوی سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی (EAF)

سیدعلی ضیائی\*<sup>۱</sup>، کامبیز بهنیا<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲- دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

\*sa-ziaee@um.ac.ir

ارسال: مرداد ماه ۹۸ پذیرش: مرداد ماه ۹۸

### چکیده

هدف از تکنولوژی جدید آسفالت گرم کاهش دمای لازم برای اختلاط مخلوطهای آسفالتی با بکارگیری افزودنی و اصلاح کننده مناسب و در نتیجه کاهش کند روانی قیر، بدون کاهش خواص مورد انتظار می باشد. در مخلوط های آسفالتی گرم کاهش دمای اختلاط و تراکم نسبت به آسفالت داغ در حدود ۲۰ تا ۵۵°C است. ضمناً بر اساس تحقیقات می توان از سرباره فولادی به همراه سنگدانه های طبیعی در مخلوط های آسفالتی استفاده کرد که از جمله محاسن این کاربرد میتوان از افزایش اصطکاک سطح جاده، افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل های ماندگار و کاهش معایبی همچون عریان شدگی و قیر زدگی نام برد. در این پژوهش از سرباره فولاد کوره قوس الکتریکی (EAF) بعنوان جایگزین بخشی از مصالح سنگی درشت دانه واز ساسویت به عنوان ماده افزودنی در مخلوط آسفالتی گرم استفاده گردید. پس از بررسی خصوصیات مصالح سنگدانه ای سرباره فولاد با استفاده از تجهیزات پراش اشعه ایکس (XRF) و میکروسکوپ الکترونی (SEM)، هشت سری مخلوط آزمایشگاهی که ۰، ۲۵، ۵۰، و ۷۵ درصد بخش درشت دانه (مانده بر روی الک ۴/۷۵ میلی متر) سنگدانه طبیعی آهکی با سنگدانه سرباره فولاد جایگزین شده بود، ساخته شد. و با استفاده از روش طرح اختلاط مارشال، درصد قیر بهینه و سایر پارامترهای مارشال بدست آمد. نتایج این پژوهش نشان داد که استقامت مارشال و شاخص سختی مارشال مخلوطهای آسفالتی گرم حاوی سرباره فولاد کوره قوس الکتریکی نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته و ارتباط معنی داری میان استقامت مارشال، روانی و درصد های مختلف سرباره وجود دارد.

کلمات کلیدی: مخلوط آسفالتی گرم، سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی، ساسویت، استقامت مارشال

### ۱- مقدمه

مخلوط آسفالتی گرم مخلوطی است که در دماهایی کمتر از مخلوطهای آسفالتی داغ (HMA) تهیه می شود. معمولاً گستره دمای اختلاط مخلوطهای آسفالتی گرم بین ۱۰۰ تا ۱۴۰°C می باشد در حالی که دمای اختلاط مخلوطهای آسفالتی داغ بین ۱۵۰ تا ۱۸۰°C می باشد [۱]. بنابراین مخلوطهای آسفالتی گرم (WMA) در سال های اخیر مقبولیت بیشتری یافته است. جدا از

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه تهران و عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد  
<sup>۲</sup> عضو هیئت علمی و دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه تهران

مزایای واضح مخلوط‌های آسفالتی گرم از قبیل کاهش مصرف انرژی و کاهش انتشار آلاینده‌ها، مزایای فراوان دیگر این مخلوط‌ها عبارتند از افزایش تعداد فصول اجرای آسفالت، افزایش فاصله حمل، کاهش فرسایش کارخانه‌ها، کاهش پیر شدگی قیر، کاهش سخت شدگی ناشی از اکسیداسیون قیر و در نتیجه کاهش ترک در روسازی، توانایی باز کردن زودتر مسیر بر روی ترافیک و غیره می‌باشد [۲].

بر اساس تحقیقات می‌توان از درشت دانه سرباره فولاد به همراه سنگدانه‌های طبیعی در مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرد که از جمله محاسن این کاربرد میتوان از افزایش اصطکاک سطح جاده، افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل‌های ماندگار و کاهش معایبی همچون عریان شدگی و قیر زدگی نام برد.

طبق تعریف انجمن سنجش و مصالح ساختمانی امریکا سرباره فولادی ترکیبی غیرفلزی است که دارای سیلیکات کلسیم، فریت‌های کلسیم و اکسیدهای آهن، آلومینیوم، منگنز، کلسیم و منیزیم می‌باشد و بطور همزمان با فولاد تولید می‌شود. سرباره همچنین دارای وزن مخصوص ظاهری بالا و درصد جذب آب متعادلی (کمتر از ۳ درصد) می‌باشد [۷-۳]. عمدتاً دو نوع سرباره فولاد وجود دارد: سرباره حاصل از کوره اکسیژنی (کنورتور) ( $BOF^1$ ) و سرباره حاصل از کوره قوس الکتریک ( $EAF^2$ ) در واقع سرباره کوره قوس الکتریک همانند سرباره کوره اکسیژن است و تفاوت آن در استفاده از الکترودها و انرژی الکتریکی در فرآیند ذوب است. در ایران سرباره کنورتور در ذوب آهن اصفهان و سرباره قوس الکتریک در فولاد مبارکه اصفهان تولید می‌شود.

به دلیل مزایای فراوان استفاده از تکنولوژی نوین تولید آسفالت گرم و روند رو به رشد استفاده از آن در جهان، بررسی امکان استفاده از آن در کشور و سنجش خواص و پایداری آن به صورت کمی و دقیق لازم به نظر می‌رسد. با توجه به تکنولوژی تولید آسفالت گرم از یک طرف پیر شدگی کمتر قیر و در نتیجه بهبود کار آبی مخلوط به علت دمای پایین رخ می‌دهد و از طرف دیگر جذب قیر کمتر به داخل منافذ مصالح سنگی به علت دمای پایین تر اختلاط که چسبندگی را کاهش می‌دهد اتفاق می‌افتد و همچنین احتمال وقوع آسیب حرارتی در مخلوط‌های گرم به دلیل باقی ماندن رطوبت و عدم خشک شدن کامل سنگدانه‌ها نسبت به آسفالت داغ بیشتر است در سال‌های اخیر استفاده از مصالح بازیافتی و دورریختنی به منظور صرفه‌جویی در هزینه‌ها و حفظ محیط زیست و همچنین افزایش کیفیت و عمر روسازی‌ها در سراسر دنیا مورد توجه قرار گرفته است. سرباره فولادی به عنوان یک محصول فرعی کارخانه‌جات ذوب آهن و فولادسازی، یکی از این مصالح می‌باشد که می‌توان آنرا در لایه‌های روسازی انعطاف پذیر مورد استفاده قرار داد.

در سال ۱۹۹۴ در ایالت اورگان آمریکا مخلوط آسفالتی داغ حاوی ۳۰ 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 بو [۹]. تحقیقات انجام شده توسط US SHRP و دانشگاه Petroleum and Mineral in Saudi Arabia در سال ۱۹۹۸ نشان می‌دهد که دوام (مقاومت در برابر رطوبت) مخلوط‌های آسفالتی داغ که مصالح سنگی درشت‌دانه آن‌ها با سرباره جایگزین شده است نسبت به مخلوط‌های کنترلی که با مصالح معمول ساخته می‌شود بهبود می‌یابد [۱۰]. آسی و همکاران در سال ۲۰۰۷ نشان دادند که مخلوط‌های آسفالتی داغ حاوی ۷۵ درصد سرباره فولاد مقاومت خستگی و مدول برجهندگی بیشتری نسبت به مخلوط‌های شاهد دارد [۱۱]. پاستو و بالدو [۱۲] در سال ۲۰۱۱ در ایتالیا امکان سنجی استفاده از سرباره کوره قوس الکتریک بعنوان جایگزین مصالح سنگی در لایه رویه برای آسفالت داغ را مورد بررسی قرار دادند. برای محاسبه قیر بهینه از روش طرح اختلاط مارشال که روش اصلی و رایج مورد استفاده در ایتالیا و

<sup>1</sup> - Basic Oxygen Furnace Slag

<sup>2</sup> - Electric Arc furnace Slag

دنیاست استفاده نمودند. درصد بهینه قیر با توجه به حداکثر وزن مخصوص و استقامت مارشال و درصد فضای خالی ۴٪ انتخاب شده است. با توجه نتایج، درصد بهینه قیر در مخلوط‌های سرباره‌ای اندکی بیش از مخلوط کنترل بدست آمد (۴/۹-۵/۲۵) و نشان داد که تفاوت قابل ملاحظه‌ای در مصرف قیر وجود ندارد و با افزایش درصد سرباره استقامت مارشال افزایش مقدار روانی مارشال کاهش می‌یابد ضیائی و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۴ اثر نوع سرباره فولادی موجود در کشور به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه‌های مخلوط‌های آسفالتی داغ بر پارامترهای طرح مارشال، میزان قیر بهینه، شاخص سختی مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول برجهندگی مخلوط بررسی نمودند. و نتایج آزمایش‌های مصالح سنگی نشان داد که هر دو نوع سرباره فولادی نوع EAF و BOF، خصوصیات لازم برای استفاده در لایه‌های روسازی را داراست و در بسیاری از پارامترها، مانند سایش لوس آنجلس، شاخص شکل و بافت سطحی و درصد فضای خالی متراکم نشده، وضعیت بهتری از سنگدانه‌های آهکی دارند. در این تحقیق با افزایش درصد سرباره، وزن مخصوص، استقامت مارشال، افزایش یافت اما از سوی دیگر، با افزایش درصد قیر و هزینه‌های حمل‌ناشی از افزایش وزن مخصوص نمونه‌ها، جایگزینی ۱۰۰ درصد مصالح سنگی با سرباره از دیدگاه اقتصادی چندان منطقی به نظر نمی‌رسید.

حسامی و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۵ از سرباره‌های فولادی کوره قوس الکتریکی مجتمع فولاد اهواز هم به عنوان ریزدانه و هم به عنوان درشت دانه در مخلوط‌های آسفالت داغ و به عنوان درشت دانه در آسفالت گرم استفاده کردند و نشان دادند که استفاده از سرباره‌های فولادی به عنوان درشت دانه در افزایش مقدار TSR مخلوط‌های آسفالتی گرم مشارکت می‌نماید تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که استفاده از سرباره در روسازی‌های آسفالتی نقش مثبتی در عملکرد این روسازی‌ها داشته و کاهش مشکلات زیست محیطی را نیز به همراه خواهد داشت. اما از آنجا که در تحقیقات گذشته در زمینه تاثیر استفاده از درصد‌های مختلف سرباره در استقامت مارشال و روانی مخلوط‌های آسفالتی گرم و مقایسه آن با مخلوط آسفالت داغ بررسی کاملی صورت نگرفته لذا در تحقیق حاضر از سرباره‌های نوع EAF که بیشترین استفاده را در مخلوط‌های آسفالتی دارد و از طرفی حجم زیاد آن هر ساله در ایران تولید و دپو می‌شود، به منظور جایگزینی بخش درشت دانه مصالح سنگی آهکی با درصد‌های مختلف (۰، ۲۵، ۵۰ و ۷۵) استفاده شده و مخلوط‌های آزمایشگاهی که ۰ (مخلوط داغ) و ۳ درصد قیر آن با ماده افزودنی ساسوبیت جایگزین شده بود، تهیه شد. و در مجموع ۱۲۰ نمونه با ابعاد نمونه مارشال ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین خصوصیات مصالح سنگی آهکی با استفاده از آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص، تعیین درصد شکستگی، سایش لس آنجلس و تعیین درصد فضای خالی مصالح سنگی ریزدانه متراکم نشده، مورد ارزیابی قرار گرفت و به منظور تعیین عناصر و ترکیبات شیمیایی مصالح سنگی آهکی آزمایش‌های XRD و XRF انجام شد. برای مقایسه بافت سطحی مصالح سنگی آهکی از تصاویر SEM<sup>۱</sup> بهره گرفته شد. جهت بررسی تاثیر افزودن سرباره بر خصوصیات مخلوط آسفالتی گرم و داغ، استقامت مارشال، روانی، وزن مخصوص، درصد فضای خالی مصالح سنگی و مقاومت در برابر تغییر شکل‌های ماندگار مورد ارزیابی واقع شد، همچنین به منظور مقایسه در صد‌های مختلف سرباره از روش‌های آماری استفاده شد و با استفاده از نتایج آن، درصد مناسب جایگزینی هر یک در مخلوط آسفالتی پیشنهاد گردید.

## ۲- روش تحقیق

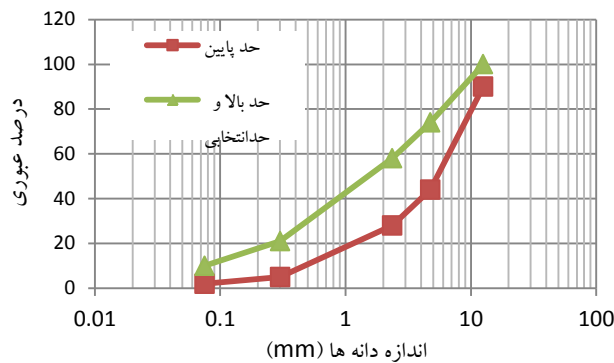
در این تحقیق به منظور یافتن نسبت بهینه ترکیب مصالح سرباره‌ای و سنگدانه‌های آهکی، ارزیابی استقامت مارشال و روانی مخلوط‌های آسفالتی گرم و مقایسه آن با آسفالت داغ بخش درشت دانه مصالح آهکی به ترتیب با ۰، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد سرباره نوع EAF جایگزین گردید و مخلوط‌های آزمایشگاهی که ۰ (مخلوط داغ) و ۳ درصد قیر آن با ماده افزودنی ساسوبیت جایگزین شده بود، تهیه شد و با استفاده از روش طرح اختلاط مارشال بر اساس استاندارد ASTM D-6927 درصد قیر بهینه

<sup>1</sup> - Scanning Electron Microscope

و سایر مشخصات فیزیکی و مکانیکی مخلوطها به دست آمده و با استفاده از روشهای آماری، تحلیل و با یکدیگر مقایسه شدند

### ۳- مصالح مورد استفاده

در این تحقیق از یک نوع سنگدانه آهکی و یک نوع سرباره فولادی EAF و از قیر ۷۰-۶۰ و ماده افزودنی آلی ساسوبیت به منظور ساخت نمونههای آسفالتی استفاده شده است. همچنین در کلیه مخلوطها از پودر سنگ آهک به عنوان فیلر استفاده گردید. دانه بندی مصالح سنگی منطبق بر حد بالای منحنی دانه بندی شماره ۴ آیین نامه روسازی آسفالتی راههای ایران (نشریه ۲۳۴ [۱۵]) انتخاب شد (شکل ۱). و به دلیل امکان قیاس مخلوطها با یکدیگر، مصالح سنگی به گونه ای انتخاب شدند که منحنی دانه بندی هر دو نوع مخلوط با درصد های مختلف افزودنی دقیقاً بر یکدیگر وحد بالای دانه بندی شماره ۴ منطبق باشند. جدول ۱ مشخصات قیر مصرفی را نشان می دهد.



شکل ۱- حدود دانه بندی شماره ۴ و دانه بندی انتخابی

جدول ۱- مشخصات فنی قیر مصرفی

حدود آیین نامه ۲۳۴		روش آزمایش		مشخصه قیر	
حداکثر	حداقل	نتایج	AASHTO		ASTM
۷۰	۶۰	۶۲	T-49	D-5	درجه نفوذ در ۲۵°C (x 0/1 mm)
۵۶	۴۹	۴۹	T-53	D-36	نقطه نرمی (درجه سانتی گراد)
۱۰۰۰	۲۰۰	۳۶۳	T-201	D-2170	کندروانی کینماتیک در ۱۳۵°C (سانتی استوکس)
۱۰۰۰		۱۳۰	T-201	D-2170	کندروانی کینماتیک در ۱۶۰°C (سانتی استوکس)
-----	۱۰۰	۱۰۰>	T-51	D-113	شکل پذیری (سانتی متر)
-----	۲۳۲	۳۲۶	T-48	D-92	نقطه اشتعال (درجه سانتی گراد)
-----	-----	۱/۰۱۴	T-228	D-70	وزن مخصوص در ۲۵°C

### ۳-۱- تعیین خصوصیات مصالح سنگی آهکی و سرباره ای

سنگدانه ها بیش از ۹۰ درصد وزنی مخلوط آسفالتی را تشکیل می دهد از این رو مشخصات سنگدانه ها تاثیر مستقیم و به سزایی بر عملکرد روسازی های آسفالتی دارد. جهت تعیین خصوصیات مصالح سنگی آهکی و سرباره ای از آزمایش های سایش لس آنجلس، تعیین درصد شکستگی، تعیین وزن مخصوص (ASTM C-127، ASTM C-128)، تعیین شاخص شکل و بافت مصالح سنگی (ASTM-D3398) و تعیین درصد فضای خالی مصالح سنگی ریزدانه متراکم نشده (AASHTO: T304-96 (2002))، استفاده گردید. همچنین به منظور تعیین عناصر و ترکیبات شیمیایی مصالح سنگی آهکی و سرباره ای آزمایش های

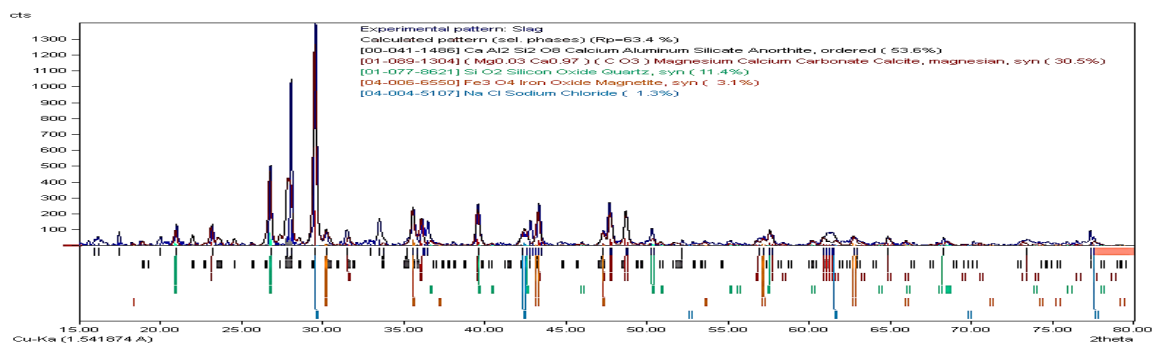
XRF و XRD انجام شد. جهت مقایسه بافت سطحی مصالح سنگی آهکی و سرباره‌ای از تصاویر SEM بهره گرفته شد. جدول ۲ زیر نتایج آزمایش وزن مخصوص، درصد شکستگی و سایش لوس آنجلس و ۰۰۰ را برای مصالح سنگی نشان می‌دهد.

جدول ۲- مشخصات مصالح سنگی آهکی و سرباره‌ای

سرباره کوره آهن گدازی (EAF)		مصالح آهکی			استاندارد	مشخصه
فیلر	ریزدانه	درشت دانه	فیلر	ریزدانه		
		۳/۴۱			ASTM C-127	وزن مخصوص ( $\text{g/cm}^3$ )
	۲/۹۴			۲/۵۳	ASTM C-128	وزن مخصوص ( $\text{g/cm}^3$ )
۲/۹۳			۲/۷۲		ASTM D-854	وزن مخصوص ( $\text{g/cm}^3$ )
		۱۴/۷			ASTM C-131	سایش لس آنجلس (%)
		۹۸			ASTM D-5821	شکستگی در دو وجه (%)
				۴۲/۶	ASTM C-1252	تعیین درصد فضای خالی مصالح سنگی ریزدانه متراکم نشده (%)
NP	NP		NP	NP	ASTM D-4318	دامنه خمیری
				۰/۴	ASTM C-142	میزان کلوخه رسی و ذرات خردشونده در سنگدانه‌ها (%)
		۸			ASTM D-4791	میزان تطویل سنگدانه (%)
		۱۵			ASTM D-4791	میزان تورق سنگدانه (%)

### ۳-۲- آنالیز XRF و XRD

پراش اشعه X (X-Ray Diffraction) یک روش غیر تخریبی با چندین کاربرد است که اطلاعات جامعی درباره‌ی ترکیبات شیمیایی و ساختار کریستالی مواد طبیعی و صنعتی ارائه می‌دهد. هر ساختار کریستالی طرح (pattern) اشعه X منحصر به فرد خود را داراست که ممکن است به عنوان اثر انگشت (finger print) برای تعیین هویت آن (identification) استفاده شود. در این آزمایش، هدف اصلی تعیین زاویه‌های مربوط به هر پیک و سپس مشخص کردن فاصله صفحه‌های اتمی (مقدار d) می‌باشد. با در دست داشتن ارقام مربوط به d که با دست کم سه رقم پس از اعشار ارائه می‌شود، می‌توان با مراجعه به جدول-های مربوط، ماده مجهول را شناسایی کرد. نتایج آزمایش XRD در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳- نتیجه آزمایش XRD برای سرباره EAF

تحلیل نتایج با استفاده از نرم افزار X-PERT انجام و فازهای کریستالی و معدنی موجود در مصالح مورد شناسایی قرار گرفت. محورهای قائم و افقی طیف به ترتیب بیانگر شدت نسبی پیک و زاویه  $2\theta$  هستند. الگوی طیف XRD هر دو نوع

سرباره فولادی کاملاً پیچیده و به همراه تعداد زیادی نقاط پیک است. نقاط زیاد برهم افتادگی ۱ پیکها حکایت از حضور تعداد زیاد ترکیبات معدنی درون سرباره فولاد دارد. [۱۶].

روش XRF یا طیفسنجی فلورسانس اشعه X، روشی کمی و کیفی برای تجزیه عنصری عناصر مجهول در سنگهای معدنی فلزها، آلیاژها و مانند آن می باشد. اساس کار دستگاه بدین صورت است که هرگاه الکترونهای دارای انرژی کافی به ماده برخورد کند، پرتو X با طیف پیوسته‌ای از انرژی و طول موجها تولید می شود. پرتو X می تواند حاصل بمباران ماده مورد سنجش (توسط جریان پرتو X اولیه که خودش حاصل بمباران الکترونی است) باشد. پرتو X ثانویه را فلورسانس می نامند. در این روش برای تشخیص و اندازه گیری میزان تمرکز عناصر موجود در نمونه‌ها (تعیین درصد عناصر) ابتدا نمونه سازی با پودر کردن نمونه مصالح به نحوی انجام می شود که از الک نمره ۲۰۰ عبور کند. پس از آن نمونه به صورت صفحه‌ای شکل در محفظه دستگاه قرار گرفته و با تابش اشعه X در طی فرآیند خاصی به نمونه‌ها، تغییرات انجام شده به عنوان XRF ثبت می شود. نتیجه تحلیل برای عناصر اصلی به صورت اکسید و بر حسب درصد و برای عناصر فرعی به صورت عنصری گزارش می شود. نتایج تحلیل XRF در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- نتایج تحلیل XRF مصالح سنگی آهنی و سرباره EAF

درصد افت وزنی در اثر حرارت	درصد اکسید											مصالح آهنی
	L.O.I	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	
۳۹.۰۱	۱.۵۶	۰.۲۳	۸.۸۶	۰.۴۷	۰.۰۸	۳۶.۴۹	۱.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۳	۰.۰۹	۱۲.۱۱	EAF
۱۰.۵۷	۵.۵۲	۰.۸۲	۵.۶۹	۰.۶۹	۰.۴۷	۲۷.۸۵	۲۵.۱۳	۰.۲۷	۰.۳۹	۰.۷۱	۲۱.۲۳	

همان گونه که نتایج نشان می دهد، مهمترین فازها و ترکیبات تشکیل دهنده سرباره فولاد مبارکه به ترتیب عبارتند از: اکسید کلسیم (کلسیت)، اکسید آهن، کوارتز، مگنتیت و اکسید آلومینیم. حضور اکسید آهن و آلومینوم به همراه دیگر عناصر فلزی در ترکیبات سرباره دلیل اصلی مقاومت زیاد مصالح سرباره‌ای در برابر سایش است.

#### ۴- آزمایش مارشال

نمونه‌های آزمایش مارشال بر اساس استاندارد ASTM D-6926 ساخته شد. بدین منظور ابتدا با استفاده از منحنی دما-ویسکوزیته قیر، دمای اختلاط و تراکم تعیین گردید. برای آسفالت داغ و گرم به ترتیب نمونه‌ها پس از اختلاط در دمای ۱۶۰ و ۱۴۰ درجه سانتیگراد، با ۷۵ ضربه مارشال به هر دو طرف نمونه‌های ۴ اینچی به منظور در نظر گرفتن شرایط ترافیکی سنگین، در دمای ۱۴۰ و ۱۲۰ درجه متراکم گردید. در این آزمایش در مجموع ۱۲۰ نمونه با درصدهای مختلف (۰، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد درشت دانه) سرباره نوع EAF که ۰ (مخلوط داغ) و ۳ درصد قیر آن با ماده افزودنی ساسوبیت جایگزین شده بود، در حد بالای دانه بندی شماره ۴ آیین نامه روسازی آسفالتی راهای ایران تهیه شد. پس از ساخت، وزن مخصوص واقعی نمونه‌های متراکم اندازه گیری شد. استقامت و روانی نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D-6927 با استفاده از دستگاه

<sup>1</sup> - Overlap

بارگذاری مارشال اندازه گیری گردید. نتایج آزمایش مارشال در جدول ۶ ارائه شده است. در این جدول عدد اول بعد از E نشان دهنده درصد سرباره و عدد دوم نشان دهنده درصد ساسویت (۰ درصد ساسویت نشان دهنده آسفالت داغ ۳ درصد ساسویت نشان دهنده آسفالت گرم می باشد).

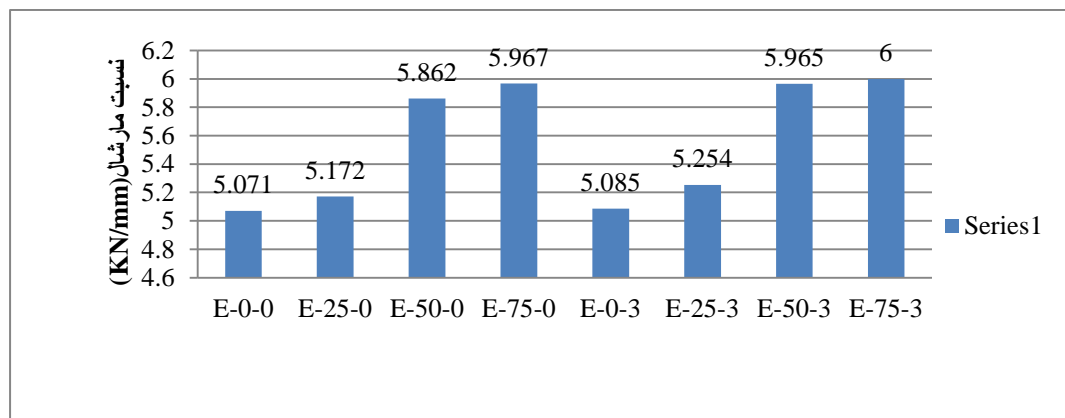
جدول ۶- خلاصه نتایج مارشال در درصد بهینه قیر

نسبت مارشال (KN/mm)	VMA	درصد فضای خالی	وزن مخصوص توریك حداكثر (Gmm)	وزن مخصوص توده- ای (Gmb)	روانی (mm)	استقامت مارشال (KN)	درصد قیر بهینه	نوع آسفالت	نوع نمونه
۵.۰۷۱	۱۵/۲	۴	۲/۵۱۳	۲/۴۱۹	۲/۸	۱۴/۲	۴/۹	داغ	E-0-0
۵.۱۷۲	۱۵/۲	۴	۲/۵۳۷	۲/۴۳	۲/۹	۱۵	۵/۱۵	داغ	E-25-0
۵.۸۶۲	۱۵/۶	۴	۲/۵۶۴	۲/۴۹۴	۲/۹	۱۷	۵/۴	داغ	E-50-0
۵.۹۶۷	۱۶	۴	۲/۶۰۷	۲/۵۳	۳	۱۷/۹	۵/۶	داغ	E-75-0
۵.۰۸۵	۱۴/۸	۴	۲/۵۳۰	۲/۴۱	۲.۹۵	۱۵	۴/۸۵	گرم	E-0-3
۵.۲۵۴	۱۵/۵	۴	۲/۵۳۶	۲/۴۴	۲.۹۵	۱۵/۵	۵/۱	گرم	E-25-3
۵.۹۶۵	۱۶	۴	۲/۵۸۷	۲/۴۹۵	۲.۸۵	۱۷	۵/۴	گرم	E-50-3
۶.۰۰	۱۶/۹	۴	۲/۶۴۱	۲/۵۵	۳	۱۸	۵/۷۵	گرم	E-75-3

نتایج آزمایش مارشال برای هر ۸ سری مخلوط نشان می دهد که بیشترین و کمترین درصد قیر بهینه به ترتیب مربوط به مخلوط حاوی مصالح آهکی با ۷۵ درصد سرباره در قسمت درشت دانه و مخلوط حاوی مصالح آهکی بدون سرباره می باشد همان گونه که در جدول ۶ ملاحظه می شود با افزایش نسبت مصالح سرباره ای در ترکیب مصالح سنگی، درصد قیر بهینه و استقامت مارشال نمونه ها افزایش یافته است. البته با افزودن تا حداکثر ۲۵ درصد سرباره به مخلوط آسفالتی، افزایش استقامت مارشال، چندان چشم گیر نبوده ولی با جایگزین کردن مقادیر بیشتر به دلیل درگیری و قفل و بست موثر سنگدانه ها، این پارامتر به شکل چشمگیری در هر دو نوع نمونه آسفالت داغ و گرم افزایش می یابد به گونه ای که با جایگزین شدن ۷۵ درصد بخش درشت دانه مصالح سنگی آهکی با مصالح سرباره ای نوع EAF، استقامت مارشال مخلوط آسفالتی حدود ۲۰ درصد در آسفالت گرم (از ۱۵ به ۱۸ کیلونیوتن) افزایش پیدا کرده است. چرا که در حقیقت استقامت مخلوط آسفالتی به دو عامل اصطکاک داخلی و چسبندگی بستگی دارد [۱۷].

مقدار درصد قیر بهینه در کلیه نمونه های مربوط به آسفالت گرم (۳ درصد ساسویت) نسبت به آسفالت داغ کمتر بوده به عبارت دیگر در آسفالت گرم نسبت به آسفالت داغ، درصد قیر بهینه کاهش و استقامت مارشال نمونه های آسفالتی افزایش یافته است. البته کاهش درصد قیر با افزودن چندان چشمگیر نمی باشد.

مفهوم دیگری که بعضی از مواقع برای ارزیابی مخلوط های آسفالتی بکار می رود، شاخص سختی مارشال می باشد که عبارت است از نسبت استقامت مارشال به روانی آن که مقداری تجربی برای سختی مخلوط آسفالتی می باشد. مقادیر بالاتر شاخص سختی مارشال نشان دهنده مخلوط سخت تر بوده و حاکی از آن است که احتمالاً مخلوط دارای مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل دائم می باشد. در شکل ۴ مقایسه بین استقامت مارشال نمونه های حاوی درصد های مختلف سرباره برای دو نوع آسفالت داغ (نمونه شاهد) و گرم ارائه شده است. همان گونه که ملاحظه می شود؛ پتانسیل پایداری نمونه های آسفالت گرم بیشتر از آسفالت داغ بوده و با افزایش درصد جایگزینی سرباره؛ این ویژگی شدت می یابد. این نتیجه گویای این حقیقت است که استفاده از سرباره EAF فولاد مبارکه با توجه به ترافیک سنگین جاده های کشور و جلوگیری از بروز خرابی شیار افتادگی جای چرخ مفید خواهد بود.



شکل ۴- مقایسه‌ی نسبت استقامت مارشال به تغییر شکل نسبی (نسبت مارشال) نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف سرباره

## ۵- تحلیل نتایج

با استفاده از نتایج آزمایش مارشال و به منظور بررسی تاثیر حضور سرباره بر برخی خصوصیات مخلوط آسفالتی بدست آمده از آزمایش مارشال از جمله وزن مخصوص، استقامت مارشال، روانی، درصد فضای خالی، درصد فضای پر شده با قیر (VFA)، درصد فضای خالی مصالح سنگی (VMA) و مقاومت در برابر تغییر شکل‌های دائمی، تحلیل‌های آماری بر روی این داده‌ها انجام شد. هدف از انجام تحلیل‌های آماری، بررسی این موضوع است که تغییر در پارامترهای آزمایش مارشال ناشی از خطاهای آزمایشگاهی است و یا به دلیل حضور سرباره است. بدین منظور تحلیل آماری ANOVA و T test در سطح اطمینان ۹۵٪ بر روی پارامترهای آزمایش مارشال با استفاده از نرم افزار SPSS انجام گردید. به این ترتیب که از T test برای مقایسه دو نوع آسفالت و از ANOVA برای سنجش تاثیر تغییر درصد‌های مختلف سرباره بر پارامترهای آزمایش مارشال استفاده گردید.

درصد قیر بهینه‌ی نمونه‌های آسفالتی حاوی سرباره EAF به طور معناداری بیشتر از نمونه های شاهد وبدون سرباره نتیجه شد. این اختلاف می‌تواند ناشی از تخلخل سطحی زیاد سنگدانه‌های EAF نسبت به مصالح آهکی باشد و در نتیجه جذب قیر بیشتر آنها در شرایط دانه بندی مشابه و یکسان آن دو تلقی گردد و نیز اختلاف معناداری بین درصد قیر بهینه‌ی نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف سرباره جایگزین مشاهده گردید که بدون شک در ارتباط با اختلاف تخلخل سطحی عنوان شده است. این نتایج لزوم نیاز به یک برنامه ریزی صحیح اقتصادی با توجه به ارتباط معنادار به وجود آمده بین میزان درصد جایگزینی سرباره و مصرف قیر را نشان می‌دهد. و اختلاف معناداری در کاهش درصد قیر بهینه آسفالت گرم نسبت به آسفالت داغ مشاهده نگردید. استقامت مارشال نمونه‌های آسفالتی با افزایش درصد سرباره به طور معناداری افزایش پیدا نمود. اختلاف معناداری بین فضای خالی مصالح سنگی (VMA) نمونه‌های آسفالت گرم و داغ با سرباره یکسان، نتیجه نشد. دلیل این امر می‌تواند ناشی از این مطلب باشد که فضای خالی مصالح سنگی وابسته به دانه بندی و درصد شکستگی سنگدانه است و با توجه به مشابهت دانه بندی و درصد شکستگی یکسان سنگدانه‌ها، این نتیجه بدیهی بنظر می‌رسد. ولی بر حسب مقادیر مختلف سرباره جایگزین اختلاف معنادار بوضوح خود را نشان داد. بطوری که نمونه‌های حاوی ۷۵ درصد سرباره‌ی جایگزین دارای بیشترین VMA و نمونه‌های شاهد دارای کمترین VMA می‌باشد که می‌تواند ناشی از بیشتر بودن درصد شکستگی سنگدانه‌های حاوی مصالح سرباره‌ای باشد شایان ذکر است اختلاف معناداری بین وزن مخصوص نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف سرباره‌ی جایگزین مشاهده نگردید.

## ۶- نتیجه‌گیری

با بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه می‌توان نتایج را به ترتیب ذیل جمع‌بندی کرد:



- نتایج آزمایش‌های مصالح سنگی نشان می‌دهد که سرباره فولادی EAF، خصوصیات لازم برای استفاده در لایه‌های روسازی را داراست و در بسیاری از پارامترها، مانند درصد شکستگی، سایش لوس آنجلس، شاخص شکل و بافت سطحی و درصد فضای خالی متراکم نشده، بهتر از سنگدانه‌های آهکی است.
- نتایج تحلیل‌های آماری آزمایش مارشال بیان می‌کند که درصد قیر بهینه‌ی نمونه‌های آسفالتی حاوی سرباره EAF به طور معناداری بیشتر از نمونه‌های شاهد و بدون سرباره نتیجه شد. این اختلاف می‌تواند ناشی از تخلخل سطحی زیاد سنگدانه‌های EAF نسبت به مصالح آهکی باشد و در نتیجه جذب قیر بیشتر آن‌ها در شرایط دانه بندی مشابه و یکسان آن دو تلقی گردد و نیز اختلاف معناداری بین درصد قیر بهینه‌ی نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف سرباره جایگزین مشاهده گردید که بدون شک در ارتباط با اختلاف تخلخل سطحی عنوان شده است.
- شاخص سختی مارشال نشان داد که پتانسیل پایداری نمونه‌های آسفالت گرم بیشتر از آسفالت داغ بوده و با افزایش درصد جایگزینی سرباره؛ این ویژگی شدت می‌یابد. این نتیجه گویای این حقیقت است که استفاده از سرباره EAF با توجه به ترافیک سنگین جاده‌های کشور و جلوگیری از بروز خرابی شیار افتادگی جای چرخ مفید خواهد بود.
- در شرایط برابر از لحاظ درصد سرباره نمونه‌های آسفالت گرم دارای استقامت مارشال و شاخص سختی مارشال بیشتر و همچنین درصد قیر بهینه کمتری نسبت به نمونه‌های آسفالت داغ می‌باشند.
- با افزایش درصد سرباره، وزن مخصوص، استقامت مارشال، افزایش می‌یابد اما از سوی دیگر، با افزایش درصد قیر و هزینه‌های حمل‌ناشی از افزایش وزن مخصوص نمونه‌ها، جایگزینی ۱۰۰ درصد مصالح سنگی با سرباره از 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 گرم و داغ و همچنین در نظر گرفتن مسائل اقتصادی است، بنابراین در این تحقیق بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده، درصد بهینه استفاده از سرباره EAF حدود ۵۰ تا ۷۵٪ درشت دانه توصیه می‌شود.

## ۷- مراجع

1. "Warm Mix Asphalt – A State of the Art Review", Advisory Note #17, Australian Asphalt Pavement Association, 2001 Available at Website <http://aapa.asn.au/content/aapa/download/7>. NSA Steel Slag, a Premier Construction Aggregate, (2001).
2. Hurley, G., and Prowell, B., 2006, "Evaluation of Potential Process for use in Warm Mix Asphalt", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist, Volume 75, pp 41–90
3. "Steel Slag a Premier Construction Aggregate", NSA, 2001
4. "Literature Review of Recycling of By-Products in Road Construction in Europe" Sustainable and Advanced Material for Road Infrastructure, Competitive and Sustainable Growth Program, 2004
5. Rosenqvist T., 1988, "Principles of Extractive Metallurgy", McGraw-Hill,
۶. حشمتی انارکی، س.، ۱۳۸۳، "سرباره کوره بلند" ماهنامه فولاد، ۱۱۴
۷. طباطبایی، ن.، اسماعیلی کلاغ، ا.، ۱۳۸۲، "ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده از سرباره کلوخه ای"، ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران اصفهان، صفحات ۲۸۹ تا ۲۹۶
9. Liz Hunt, P.E., Glenn, E. (2000), "Steel Slag in Hot Mix Asphalt Concrete", State Research Project #511, Oregon Department of Transportation.
10. Bagamapadde, U., Wahhab, Aiban, SA., 1998, "Optimization of Steel Slag Aggregate for Bituminous Mixes in Saudi Arab" Journal of Materials in Civil Engineering mater civil Engineering, 5-30
11. Asi, I.M., Qasrawi, H.Y. and Shalabi, F.I. (2007) "Use of Steel Slag Aggregate in Asphalt Concrete Mixes", Canadian Journal of Civil Engineering, 34, pp 902–911.

12. Pasetto, M., Baldo, N., 2011, "Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag", *Construction and Building Materials* 25, 3458–3468
13. Ziaee, S.A., Kavussi, A., et al, Winter 2014, " Evaluation of Long Term Ageing of Asphalt Mixtures Containing EAF and BOF Steel Slags", *IJTE*, Vol.2, No.3, 245-265
14. Hesami, S., Ameri, M., Goli, H., Akbari, A., 2015, " Laboratory investigation of moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates", *Int. J. Pavement Eng.* 16 , 745–759
۱۵. " نشریه شماره ۲۳۴، آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران"، معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، ویرایش اول، ۱۳۹۰.
۱۶. دشتی، ح.، صفی‌خانی، ا. و رفیعی، ب.، (۱۳۸۷) " بررسی نتایج آزمایشگاهی به کارگیری سرباره در خاکریزی، زیر اساس و مخلوط های آسفالتی " چهارمین کنفرانس دانشجویی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ۱۷ تا ۱۹ اردیبهشت
17. "Evaluation of Hot Mix Asphalt Moisture Sensitivity Using The Nottingham Asphalt Test Equipment", Final report, Center for Transportaion and Research and Education, IOWA State University, 2005