



ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره فولاد کوره قوس الکتریک (EAF)

سید علی ضیایی^۱، مرتضی جلیلی قاضی زاده^۲، امیر کاووسی^۳، ابوالفضل محمدزاده مقدم^۴

۱- مری، گرایش راه و ترابری، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

۲- عضو هیات ریسه گروه تخصصی ترافیک سازمان نظام مهندسی ساختمان خراسان رضوی، ایران

۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۴- استادیار، گرایش راه و ترابری، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

Morteza.jalili@modares.ac.ir

خلاصه

در این تحقیق از سرباره فولاد کوره قوس الکتریک (EAF) بعنوان جایگزین بخشی از مصالح سنگی در مخلوط آسفالتی استفاده گردید. پس از بررسی خصوصیات مصالح سنگدانه‌ای سرباره فولاد با استفاده از تجهیزات پراش اشعه ایکس (XRF) و میکروسکوپ الکترونی (SEM)، شش سری مخلوط آزمایشگاهی که ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد بخش درشت‌دانه (مانده بر روی الک ۲/۳۶ میلیمتر) سنگدانه طبیعی آهکی با سنگدانه سرباره فولاد جایگزین شده بود، ساخته شد. همچنین نمونه‌ای کاملاً سرباره‌ای جهت مقایسه تهیه گردید. با استفاده از روش طرح اختلاط مارشال، درصد قیر بهینه و سایر پارامترهای مارشال بدست آمد. همچنین آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم در دو حالت خشک و اشباع با استفاده از دستگاه UTM جهت بررسی مقاومت کششی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که مقاومت مارشال، مقاومت کششی غیر مستقیم و نسبت مقاومت کششی (اشباع نسبت به خشک) مخلوط‌های حاوی سرباره فولاد قوس الکتریک نسبت به نمونه شاهد بیشتر می‌باشد. همچنین بررسی پتانسیل انبساطی مخلوط‌ها نیز نشان داد که انبساط نمونه‌های حاوی سرباره فولاد پس از ۷ روز کمتر از ۱٪ است.

کلمات کلیدی: مخلوط آسفالتی، EAF، مقاومت کششی غیر مستقیم، حساسیت رطوبتی

۱. مقدمه

بکارگیری مصالح بازیافتی، دورریختنی و پسماندها در فعالیت‌های عمرانی با توجه به حجم بسیار زیاد استفاده از مصالح سنگی که عمدتاً از کوه‌ها و یا بستر رودخانه‌ها تامین می‌شود، از منظر زیست محیطی و اقتصادی اهمیت فراوانی دارد. به کار بردن پسماندهایی مانند ضایعات شیشه، لاستیک‌های فرسوده، خاکسترهای صنعتی، پسماند معادن ذغال سنگ و سرباره فولاد در لایه‌های روسازی، یکی از این کاربردهاست [۱-۳]. حدود ۳۶ میلیون تن سرباره فولاد در سه کارخانه عمده فولاد سازی کشور (فولاد اهواز، فولاد مبارکه و ذوب آهن اصفهان) دپو شده است و حجم تولید این محصول در کشور سالیانه بیش از ۲/۳ میلیون تن می‌باشد [۲]. علاوه بر اشغال فضای بسیار زیادی از محوطه کارخانه، به دلیل حضور برخی فلزات سنگین درون ترکیبات این محصول، آب‌شستگی سرباره فولاد می‌تواند برای منابع آب زیرزمینی خطرناک باشد [۳]. سرباره فولاد دارای ویژگی‌های فیزیکی بسیار مناسبی از جمله وزن مخصوص و مقاومت سایشی زیاد، شکل گوشه‌دار، مکعبی و شکسته است. ریزدانه این محصول نیز دارای ارزش ماسه‌ای بالایی بوده و از این رو امکان استفاده از آن در لایه‌های روسازی تایید شده است [۴]. عمدتاً دو نوع سرباره فولاد وجود دارد: سرباره حاصل از کوره اکسیژنی (کنورتور) (BOF) و سرباره حاصل از کوره قوس الکتریک (EAF) [۵]. یکی از مسائل مهم در صورت استفاده از مصالح جدید بویژه مصالح بازیافتی در روسازی، صدمات ناشی از رطوبت است که بایستی به طور دقیق مورد بررسی قرار گیرد. صدمات رطوبتی در اثر حضور یا نفوذ رطوبت ایجاد شده که منجر به خرابی‌هایی نظیر ترک خوردگی، تغییر شکل‌های ماندگار و سایر خرابی‌ها می‌گردد و منتج به صرف سالیانه منابع و هزینه‌های زیادی خواهد شد [۶]. نتایج مطالعاتی در سال‌های ۱۹۹۹ و ۱۹۹۸ نشان داد که حساسیت رطوبتی و مقاومت در برابر خستگی با جایگزینی

1 - Basic Oxygen Furnace Slag
2- Electric Arc Furnace Slag

درشت دانه توسط سرباره و استفاده از مصالح و فیبر آهکی بهبود می‌یابد [۷-۸]. آسی و همکاران نشان دادند که مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۲۵ درصد سرباره فولاد مقاومت خستگی و مدول برجهنگی بیشتری نسبت به مخلوط‌های شاهد دارد [۹]. احمدزاده و همکاران نیز با ارزیابی جایگزینی درشت دانه مخلوط با سرباره نشان دادند که استفاده از سرباره فولاد منجر به بهبود حساسیت رطوبتی می‌شود [۱۰]. در مطالعات دیگری [۱۱] با جایگزینی ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد درشت دانه با سرباره نوع BOF، نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم تمامی مخلوط‌ها از حدود مجاز (۷۰٪) بیشتر بدست آمد. ژو [۱۲] مطالعاتی را در خصوص جایگزینی سرباره نوع BOF، در مخلوط آسفالتی درشت دانه (SMA) انجام داد و به این نتیجه رسید که مخلوط‌های حاوی سرباره عملکرد بهتری نسبت به مخلوط کنترل حاوی مصالح سنگی بازالتی و آهکی در برابر رطوبت دارد. ژو در سال ۲۰۱۲ [۶] با استفاده از آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم و مدول ارتجاعی و همچنین مفهوم انرژی کرنش خزشی تلف شده ((DCSE_p) Dissipated Creep Strain (Energy) ، نشان داد که مخلوط‌های حاوی سرباره نوع BOF، نشان داد که این مخلوط‌ها نسبت به مخلوط حاوی مصالح سنگی بازالتی عملکرد بهتری دارد [۶].

در تحقیق حاضر از سرباره نوع EAF که حجم زیادی از آن هر ساله در ایران تولید و دپو می‌شود، به منظور جایگزینی بخش درشت دانه مصالح سنگی آهکی با درصد‌های مختلف (۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰) استفاده شده، همچنین نمونه‌هایی کاملاً سرباره‌ای تهیه و در مجموع ۱۴۴ نمونه با ابعاد نمونه مارشال ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین خصوصیات مصالح سنگی آهکی و سرباره‌ای با استفاده از آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص، سایش لس آنجلس، تعیین درصد شکستگی، تعیین شاخص ذره 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 و سرباره‌ای آزمایش‌های XRD و XRF انجام شد. جهت مقایسه بافت سطحی مصالح سنگی آهکی و سرباره‌ای از تصاویر SEM^۱ بهره گرفته شد. جهت بررسی تاثیر افزودن سرباره بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی، نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم مورد ارزیابی قرار گرفت، همچنین از روش‌های آماری برای بررسی دقیق‌تر تاثیر سرباره بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها استفاده شد.

۲. روش تحقیق

در این تحقیق به منظور یافتن نسبت بهینه ترکیب مصالح سرباره‌ای و سنگدانه‌های آهکی، بخش درشت دانه مصالح آهکی به ترتیب با ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد سرباره نوع EAF (تهیه شده از فولاد مبارکه اصفهان) جایگزین گردید. همچنین نمونه‌های کاملاً سرباره‌ای تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت. با استفاده از روش طرح اختلاط مارشال بر اساس استاندارد ASTM D-6927 درصد قیر بهینه شد، سپس نمونه‌هایی با ابعاد نمونه‌های مارشال تهیه و مطابق استاندارد AASHTO T283 مورد آزمایش قرار گرفت و با استفاده از روش‌های آماری، تحلیل و با یکدیگر مقایسه شدند.

۳. مصالح

در این تحقیق از یک نوع سنگدانه آهکی و یک نوع سرباره فولادی EAF و از قیر ۷۰-۶۰ به منظور ساخت نمونه‌های آسفالتی استفاده شده است. همچنین در همه مخلوط‌ها از پودر سنگ آهک به عنوان فیبر استفاده گردید. دانه‌بندی مصالح سنگی منطبق بر منحنی دانه‌بندی شماره ۴ آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴ [۱۳]) انتخاب شد (شکل ۱). به منظور امکان قیاس مخلوط‌ها با یکدیگر، مصالح سنگی به گونه‌ای انتخاب شدند که منحنی دانه‌بندی هر سه نوع مخلوط دقیقاً بر یکدیگر منطبق باشد.

۱.۳ تعیین خصوصیات مصالح سنگی آهکی و سرباره‌ای

سنگدانه‌ها بیش از ۹۰ درصد وزنی مخلوط آسفالتی را تشکیل می‌دهد از این رو مشخصات سنگدانه‌ها تاثیر مستقیم و به سزایی بر عملکرد روسازی‌های آسفالتی دارد. جهت تعیین خصوصیات مصالح سنگی آهکی و سرباره‌ای از آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص (ASTM C 127، ASTM C 128)، سایش لس آنجلس (ASTM C 131)، تعیین درصد شکستگی (ASTM D 5821)، 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 سرباره‌ای آزمایش XRF انجام شد. جهت مقایسه بافت سطحی مصالح سنگی آهکی و سرباره‌ای از تصاویر SEM بهره گرفته شد. جدول ۱ نتایج این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات مصالح سنگی آهکی و سرباره‌ای

EAF		مصالح آهکی			استاندارد	مشخصه
فیلر	ریزدانه	درشت‌دانه	فیلر	ریزدانه		
		۳/۰۵۵			ASTM C-127	وزن مخصوص (g/cm ³)
	۲/۹۴۷			۲/۵۸۲	ASTM C-128	وزن مخصوص (g/cm ³)
---			۲/۷۶۸		ASTM D-854	وزن مخصوص (g/cm ³)
		۱۳/۴		۲۰/۴	ASTM C-131	سایش لس آنجلس (%)
		۹۸		۸۰	ASTM D-5821	شکستگی در دو وجه (%)
	۱۲/۷			۱۰/۸	ASTM-D3398	شاخص شکل و بافت سطحی مصالح سنگی
	۵۲			۴۵	AASHTO: T304-96	تعیین درصد فضای خالی مصالح سنگی ریزدانه متراکم نشده

۱.۱.۳ آنالیز XRF

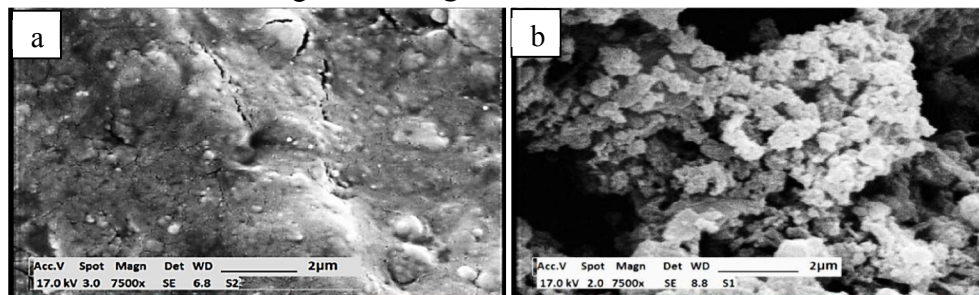
روش XRF یا طیف سنجی فلورسانس اشعه X، روشی کمی و کیفی برای تجزیه عنصری عناصر مجهول در سنگ‌های معدنی فلزها، آلیاژها و مانند آن می‌باشد. اساس کار دستگاه بدین صورت است که هرگاه الکترون‌های دارای انرژی کافی به ماده برخورد کند، پرتو X با طیف پیوسته‌ای از انرژی و طول موج‌ها تولید می‌شود. پرتو X می‌تواند حاصل بمباران ماده مورد سنجش (توسط جریان پرتو X اولیه که خودش حاصل بمباران الکترونی است) باشد. پرتو X ثانویه را فلورسانس می‌نامند. در این روش برای تشخیص و اندازه‌گیری میزان تمرکز عناصر موجود در نمونه‌ها (تعیین درصد عناصر) ابتدا نمونه سازی با پودر کردن نمونه مصالح به نحوی انجام می‌شود 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 می‌شود. نتیجه تحلیل برای عناصر اصلی به صورت اکسید و بر حسب درصد و برای عناصر فرعی به صورت عنصری گزارش می‌شود. نتایج تحلیل XRF در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، مهمترین فازها و ترکیبات تشکیل دهنده سرباره فولاد مبارکه به ترتیب عبارتند از: کربنات کلسیم (کلسیت)، اکسید آهن، کوارتز، مگنتیت و اکسید آلومینیم. حضور اکسید آهن و آلومینیم به همراه دیگر عناصر فلزی در ترکیبات سرباره دلیل اصلی مقاومت زیاد مصالح سرباره‌ای در برابر سایش است.

جدول ۲- نتایج تحلیل XRF مصالح سنگی

درصد افت وزنی در اثر حرارت	درصد سولفات‌ها بر حسب SO ₃	درصد اکسید											مصالح آهکی			
		V	MnO	Na ₂ O	Sr	P ₂ O ₅	TiO ₂	K ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃		SiO ₂		
L.O.I																
۴۱/۵۹	۰/۳۹	---	---	---	۰/۰۲۴	۰/۰۵۶	---	۰/۱۷۵	۵/۷۰۱	۴۵/۷۸۶	۰/۳۷۶	۰/۶۷	۵/۵۶۵			
۱/۱۱	۰/۴۷۷	۰/۶۸۷	۲/۳۲۳	۰/۳۳۷	۰/۰۳۴	۱/۵۰۲	۲/۱۱۱	۰/۲۴۸	۵/۰۱۳	۳۸/۸۶۷	۲۵/۷۵۱	۴/۰۷۳	۱۷/۴۶۷			EAF

۲.۱.۳ مورفولوژی سطح سنگدانه‌ها

به منظور بررسی سطح، سایز حفرات و ساختار کریستالی سنگدانه‌های سرباره فولاد و مقایسه آن‌ها با سنگدانه‌های آهکی، از میکروسکوپ الکترونی SEM استفاده شد. تصاویر گرفته شده با این روش، در شکل ۱ برای مصالح آهکی و سرباره نوع EAF نشان داده شده است.

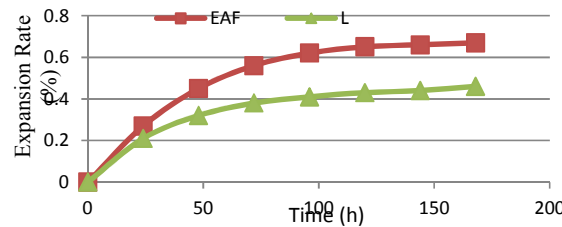


شکل ۱- تصاویر گرفته شده با دستگاه SEM (a: سنگدانه آهکی، b: EAF)

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 و نتیجتاً پیوستگی بهتری با قیر داشته باشد. سنگدانه‌های آهکی دارای مقدار بسیار کمی تخلخل 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 ۱ میکرون تا ۱ میلی‌متر در سطح آن به وفور مشاهده می‌شود.

۲.۳ 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 ۶۰ درجه سانتیگراد قرار گرفت، این دما به افزایش سرعت هیدراتاسیون آهک آزاد کمک می‌کند. در این فاصله حجم نمونه‌ها در بازه‌های زمانی ۲۴ ساعته اندازه‌گیری شد. شکل ۲ تغییرات حجم دو نمونه شامل نمونه با مصالح کاملاً آهکی و نمونه با مصالح کاملاً سرباره‌ای نوع EAF را نسبت به زمان نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود به دلیل حضور مقدار بسیار اندک اکسیدهای آزاد باقی مانده در سرباره فولاد، نرخ افزایش حجم مخلوط‌های سرباره‌ای بیشتر از نمونه‌های آسفالتی معمولی حاوی مصالح آهکی است. با این وجود از آنجایی که این افزایش حجم پس از یک هفته کمتر از یک درصد است پتانسیل افزایش حجم سرباره فولاد قابل ملاحظه نیست لذا نمی‌تواند منجر به ایجاد خرابی در مخلوط آسفالتی شود.



شکل ۲- تغییرات حجمی نمونه‌های مختلف

۴. طرح اختلاط

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. نمونه‌ها پس از اختلاط در دمای ۱۴۵ درجه سانتیگراد، با ۷۵ ضربه مارشال به هر دو طرف نمونه‌های ۴ اینچی به منظور در نظر گرفتن شرایط ترافیکی سنگین، در دمای ۱۳۵ درجه متراکم گردید. در این آزمایش در مجموع ۱۰۸ نمونه با درصد‌های مختلف (۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ درصد درشت دانه و نمونه کاملاً سرباره‌ای) سرباره نوع EAF ساخته و همچنین نمونه‌ای با مصالح سنگی آهکی، با درصد‌های مختلف قیر تهیه گردید. برای نامگذاری نمونه‌های حاوی سرباره از حرف E و برای نمونه‌های کنترل از حرف L استفاده شده است. همچنین درصد جایگزینی سرباره بجای درشت دانه مخلوط پس از خط تیره نشان داده شده و نمونه کاملاً سرباره با حروف EF مشخص شده است. پس از ساخت، وزن مخصوص واقعی نمونه‌های متراکم شده اندازه‌گیری شد. استقامت و روانی نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D-6927 با استفاده از دستگاه بارگذاری مارشال اندازه‌گیری گردید. نتایج آزمایش مارشال در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- خلاصه نتایج مارشال در درصد قیر بهینه

نسبت فیلر به قیر موثر	VFA	VMA	درصد قیر موثر (Pbe)	درصد قیر جذب شده (Pba)	درصد فضای خالی	وزن مخصوص تئوریک حداکثر (Gmm)	درصد جذب آب	وزن مخصوص توده‌ای (Gmb)	روانی (γ_{25}) (mm)	استقامت مارشال (KN)	درصد قیر بهینه	نوع نمونه
۰/۹۲	۷۰	۱۵/۲	۴/۳۴	۰/۳۸	۴	۲/۵۳	۰/۳۶	۲/۴۳	۸	۱۱/۷	۴/۷	E-25
۰/۸۷	۷۴	۱۶/۴	۴/۳۱	۰/۵۸	۴	۲/۶	۰/۱۳	۲/۴۹	۸/۲	۱۳/۱	۴/۹	E-50
۰/۹۵	۷۵	۱۶/۱	۴/۲۰	۰/۸۴	۴	۲/۶۴	۰/۲۵	۲/۵۴	۸/۱	۱۳/۷	۵	E-75
۰/۸۳	۷۵	۱۷	۴/۱۸	۰/۹۹	۴	۲/۶۷	۰/۲۶	۲/۵۷	۸	۱۴	۵/۲	E-100
۰/۷۷	۷۲	۱۸/۲	۴/۵۷	۱/۱۱	۴	۲/۷۰	۰/۳۸	۲/۵۹	۸	۱۵/۸	۵/۷	EF
۰/۹۲	۷۰	۱۴/۶	۴/۳۴	۰/۲۶	۴	۲/۴۷	۰/۵۳	۲/۳۷	۸/۳	۱۰/۸	۴/۶	L

نتایج آزمایش مارشال برای هر ۶ سری مخلوط نشان می‌دهد که بیشترین و کمترین درصد قیر بهینه به ترتیب مربوط به مخلوط حاوی مصالح آهکی و مخلوط کاملاً سرباره‌ای می‌باشد. همان‌گونه که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود با افزایش نسبت مصالح سرباره‌ای در ترکیب مصالح سنگی، استقامت مارشال نمونه‌های آسفالتی افزایش یافته است. البته با افزودن تا حداکثر ۲۵ درصد سرباره به مخلوط آسفالتی، افزایش استقامت مارشال، چندان چشم‌گیر نبوده ولی با جایگزین کردن مقادیر بیشتر (حداقل ۵۰ 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 مصالح سنگی آهکی با مصالح سرباره‌ای، استقامت مارشال مخلوط آسفالتی حدود ۴۵ درصد افزایش پیدا کرده است. استقامت مخلوط آسفالتی به دو عامل اصطکاک داخلی و چسبندگی بستگی دارد [۱۴]. اصطکاک بین دانه‌های مصالح سنگی در درجه اول بستگی به زبری سطح دانه‌ها و قفل و بست و جنس آن‌ها و در درجه دوم بستگی به دانه بندی و حداکثر قطر دانه‌ها دارد. مقدار قیر مصرفی نیز بر اصطکاک بین دانه‌های سنگی اثر می‌گذارد به این ترتیب که با اضافه شدن مقدار قیر، ضخامت قیر در محل اتصال دانه‌ها افزایش یافته و موجب کم شدن اصطکاک می‌گردد. زبری سطح دانه‌ها موجب می‌شود که استقامت مخلوط آسفالتی با افزایش مقدار قیر، کمتر کاهش یابد. بنابراین هر چه سطح دانه‌ها زبرتر باشد، تقلیل استقامت آسفالت با افزایش مقدار قیر به مقدار قابل ملاحظه‌ای کمتر خواهد بود [۱۵].

۵. ارزیابی حساسیت رطوبتی

از اواسط دهه ۵۰ میلادی رطوبت به عنوان عاملی که تأثیر مخرب بر روسازی‌های آسفالتی دارد، شناخته شد [۱۶]. یکی از مهمترین مشکلات روسازی‌های انعطاف پذیر، عریان شدگی می‌باشد که به از بین رفتن چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی در مخلوط آسفالتی به دلیل وجود رطوبت اتلاف می‌شود [۱۷ و ۱۸]. دو عامل باعث بروز عریان شدگی در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود: از بین رفتن چسبندگی میان قیر و مصالح سنگی، نرم شدن و نهایتاً از بین رفتن پیوستگی ذرات قیر. تا کنون آزمایش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری پتانسیل ایجاد خرابی در روسازی‌ها بر اثر وجود رطوبت ابداع شده است. که عبارتند از: آزمایش استاندارد آب جوشان، آزمایش غوطه ور استاتیک، آزمایش غوطه ور دینامیک، آزمایش استاندارد لاتمن، آزمایش غرقاب کردن مکانیکی، آزمایش استاندارد تراکم- غوطه وری، آزمایش، آزمایش اصلاح شده لاتمن، آزمایش شیارشدگی چرخ هامبورگ، آزمایش نسبت مارشال، آزمایش تشدید شرایط محیطی، آزمایش سختی کششی نمونه‌های پیر شده‌ی اشباع [۲۰-۱۹]. شیوه‌ای که بیشتر مورد استفاده قرار گرفته و برای ارزیابی حساسیت نمونه‌های آسفالتی در برابر رطوبت در تحقیقات SHRP نیز مشخص شده است، روش AASHTO-T283 می‌باشد. در این روش که براساس غرقاب کردن نمونه‌هاست، تغییرات مقاومت کششی غیر مستقیم بعد از قرارگیری تحت شرایط و غرقاب شدن مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای انجام این آزمایش دو سری نمونه استوانه‌ای مترآکم شده تهیه شد، به نحوی که میانگین فضای خالی آن‌ها تقریباً با هم برابر باشد (۶٪ تا ۸٪ برای مخلوط‌های با دانه بندی پیوسته). یک سری از نمونه‌ها داخل کیسه‌های پلاستیکی قرار گرفته و کاملاً ایزوله شده و ۲ ساعت در حمام آب با دمای 25°C قرار گرفت. سپس آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم بر روی آن‌ها انجام شد. دومین مجموعه از نمونه‌ها برای مدتی زیر آب و تحت خلأ نسبی قرار داده شد، به نحوی که درصد آب جذب شده به نمونه‌ها به ۵۵ تا ۸۰ درصد حجم فضای خالی نمونه‌ها برسد. سپس نمونه‌ها در یک چرخه ذوب و یخبندان قرار گرفت و در نهایت آزمایش کشش غیرمستقیم در دمای 25°C انجام شد. در آزمایش کشش غیر مستقیم، نمونه بصورت خوابیده بین فک‌های بارگذاری دستگاه بارگذاری فشاری قرار می‌گیرد. سپس نمونه تحت بار قرار گرفته و بار با نرخ تغییر شکل ثابت 5.0 mm/min به نمونه اعمال می‌گردد و بارگذاری تا زمان گسیختگی نمونه ادامه می‌یابد. جهت انجام آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم از دستگاه UTM-14P استفاده گردید تا بتوان تغییرات تنش و کرنش را در هر لحظه و همچنین در لحظه گسیختگی ثبت نمود. مقاومت کششی هر یک از نمونه‌ها با توجه به حداکثر بار اعمال شده و ابعاد نمونه محاسبه گشته و در نهایت شاخص نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم (TSR') به دست می‌آید. شاخص ۸۰٪ برای نمونه‌ها به عنوان شاخصی مطلوب پذیرفته شده است [۲۱].

مقاومت کششی نمونه‌ها از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$S_t = \frac{2P}{\pi.t.D} \quad (1)$$

که در آن:

D: قطر نمونه (m)

t: ضخامت نمونه (m)

P: حداکثر بار (KN)

S_t : مقاومت کششی (KPa) می‌باشد. حساسیت در برابر رطوبت مخلوط‌های آسفالتی به وسیله شاخص نسبت مقاومت کششی (TSR)، مطابق رابطه ۲ از تقسیم مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت اشباع به حالت خشک تعریف می‌شود.

$$TSR = \frac{ITS_{sat}}{ITS_{dry}} \quad (2)$$

۱.۱.۵ ارائه و تحلیل نتایج آزمایش

نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم در جدول ۴ ارائه شده است. همانطور که نتایج این آزمایش نشان می‌دهد با افزایش درصد سرباره، مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها افزایش یافته است بدین ترتیب که مقاومت کششی مخلوط E-100 حدود ۱۵٪ از مخلوط شاهد بیشتر است که این امر می‌تواند به دلیل شکستگی بیشتر مصالح سرباره‌ای و پیوند قوی‌تر قیر با مصالح سرباره‌ای باشد. نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت اشباع به حالت خشک نمونه‌ها نشان می‌دهد که تمام نمونه‌ها حداقل نسبت توصیه شده (۸۰٪) در اکثر استانداردها را تامین می‌نماید. بیشترین مقدار TSR مربوط به نمونه تماماً سرباره‌ایست که ناشی از پیوند قوی‌تر مصالح سرباره‌ای با قیر و همچنین درصد بیشتر قیر در مخلوط است.

جدول ۴- میانگین نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم

نوع مخلوط	مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت خشک (KPa) (ITS_{dry})	مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت اشباع (KPa) (ITS_{sat})	TSR
E-25	۷۲۷	۶۲۳	۰/۸۵
E-50	۷۴۹	۶۳۵	۰/۸۵
E-75	۷۶۳	۶۶۰	۰/۸۶
E-100	۷۷۲	۶۸۲	۰/۸۸
EF	۷۲۳	۶۶۱	۰/۹۱
L	۶۹۲	۵۷۸	۰/۸۳

با توجه به این که در این تحقیق از دستگاه UTM جهت انجام آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها استفاده شد، امکان محاسبه سطح زیر منحنی تنش- کرنش میسر گردید. طبق تعریف، سطح زیر نمودار تنش- کرنش تا لحظه گسیختگی (حداکثر تنش کششی) معرف چقرمگی^۱ مخلوط است که نشان دهنده انرژی لازم جهت گسیختگی نمونه است و از رابطه ۳ بدست می‌آید:

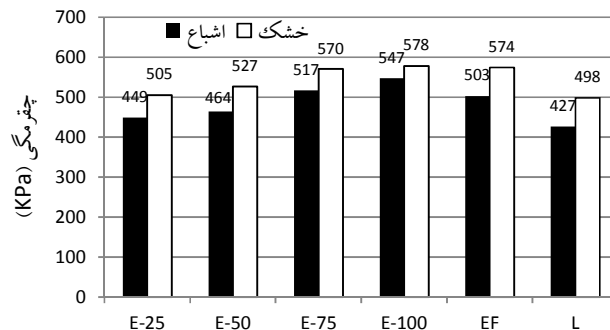
$$FE = \int_0^{\epsilon_f} s(\epsilon) d\epsilon \quad (3)$$

که در آن:

FE: انرژی تا لحظه شکست (چقرمگی)

ϵ_f : کرنش در لحظه گسیختگی

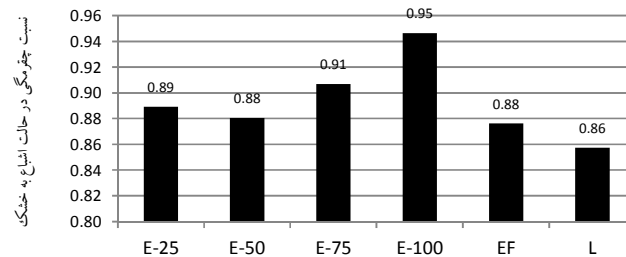
شکل ۳ چقرمگی نمونه‌ها در دو حالت خشک و اشباع را نشان می‌دهد.



شکل ۳- چقرمگی نمونه‌ها در دو حالت خشک و اشباع

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، چقرمگی مخلوط‌های آسفالتی در هر دو حالت خشک و اشباع با افزایش درصد سرباره افزایش یافته است که این میزان برای نمونه‌ای که ۱۰۰ درشت دانه آن با سرباره EAF جایگزین شده است نسبت به نمونه شاهد در حالت خشک و اشباع به

ترتیب حدود ۰.۱۴٪ و ۰.۲۲٪ افزایش یافته است. افزایش مقدار چقرمگی به مفهوم انرژی بیشتر جهت گسیختگی است. در حالت اشباع این مقدار می‌تواند معرف کار و انرژی بیشتر توسط آب برای از بین بردن پیوند قیر و مصالح و در نتیجه خرابی مخلوط باشد [۶]. همچنین می‌توان از نسبت چقرمگی در دو حالت اشباع و خشک برای معرفی شاخصی جهت تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی استفاده نمود. در شکل ۴ مقدار این شاخص برای نمونه‌های مختلف ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود نتایج بدست آمده از این شاخص مطابقت خوبی با نتایج شاخص TSR دارد.



شکل ۴- نسبت چقرمگی نمونه‌ها در حالت اشباع به خشک

با استفاده از نتایج آزمایش و به منظور بررسی تاثیر حضور سرباره بر مقاومت کششی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها، تحلیل‌های آماری بر روی این داده‌ها انجام شد. هدف از انجام تحلیل‌های آماری، بررسی این موضوع است که تغییر در نتایج آزمایش 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 نتایج بدست آمده با استفاده از نرم افزار SPSS انجام گردید. از این آزمون‌ها برای سنجش تاثیر تغییر درصدهای مختلف سرباره بر پارامترهای آزمایش استفاده گردید. نتایج تحلیل‌های آماری نشان داد که مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های حاوی سرباره در هر دو حالت اشباع و خشک بطور معنی داری بیشتر از نمونه شاهد است. همچنین افزایش چقرمگی در حالت خشک و اشباع برای نمونه حاوی ۲۵٪ سرباره معنی دار نبوده ولی برای درصدهای بیشتر معنی دار می‌باشد که نشان دهنده تاثیر سرباره بر چقرمگی خواهد بود.

۶. نتیجه‌گیری

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

- نتایج آزمایش‌های مصالح سنگی نشان می‌دهد که سرباره‌های فولادی، 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، بهتر از سنگدانه‌های آهکی 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 ۱٪ است. از این رو استفاده از این مصالح در مخلوط آسفالتی خطر افزایش حجم مخرب در اثر جذب رطوبت را ندارد.
- نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم و تحلیل‌های آماری نشان می‌دهد که مقاومت کششی نمونه‌های حاوی سرباره در هر دو حالت خشک و اشباع بطور معنی داری بیشتر از نمونه شاهد است. که این امر می‌تواند ناشی از شکستگی بیشتر مصالح سرباره‌ای و ایجاد قفل و بست بهتر مصالح و قیر و همچنین چسبندگی بیشتر قیر با مصالح سرباره‌ای باشد. نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌ها، حداقل مقدار TSR پیشنهادی اکثر استانداردها (۸۰٪) را تامین می‌نمایند. با افزایش درصد سرباره این نسبت نیز افزایش یافته است.
- نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم و تحلیل‌های آماری نشان می‌دهد که چقرمگی نمونه‌های حاوی سرباره در هر دو حالت خشک و اشباع بطور معنی داری بیشتر از نمونه شاهد است. که نشان دهنده تحمل انرژی بیشتر قبل از گسیختگی است.

۷. مراجع

۱. مقدم نیری، م.، جلیلی قاضی زاده، م. و محمدزاده مقدم، ا. (۱۳۸۶)، "کاربرد سرباره فولاد در پروژه‌های راهسازی"، اولین سمینار فرآوری و کاربردهای سرباره قوس الکتریک، پژوهشکده فولاد دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۴-۱۲۷.
۲. یوزباشی‌زاده، ح.، فراهانی، م. (۱۳۸۶)، "انواع سرباره و بررسی خواص و کاربرد آن‌ها"، اولین سمینار فرآوری و کاربردهای سرباره قوس الکتریک، پژوهشکده فولاد دانشگاه صنعتی اصفهان، ۹-۱.



۳. شکرچی زاده، م.، عالی زاده، ر.، چینی، م.، حسینی، م. و قدس، پ. (۱۳۸۳)، "ارزیابی آزمایشگاهی مشخصات روباره‌های فولادی برای استفاده به عنوان سنگدانه در ساخت روسازی آسفالتی"، دومین همایش قیر و آسفالت ایران، تهران، ۶۹۴-۶۸۲.
۴. طباطبایی، ن. و بخشی طوسی، پ. (۱۳۸۳)، "بررسی کاربرد سرباره فولاد در مخلوط های آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه‌ای"، دومین همایش قیر و آسفالت ایران، ۲-۴ آذر، ۳۰۲-۳۱۱.
۵. ستاری، م. (۱۳۸۳)، "فعالیت مجتمع فولاد مبارکه به منظور فرآوری و کاربرد سرباره"، اولین سمینار فرآوری و کاربردهای سرباره قوس الکتریک، پژوهشکده فولاد دانشگاه صنعتی اصفهان، ۲۴-۱۹.
6. Xie, J., Wu, S., Lin, J., Cai, J., Chen, Z. and Wei W. (2012), "Recycling of Basic Oxygen Furnace Slag in Asphalt Mixture: Material Characterization & Moisture Damage Investigation", *Construction and Building materials*, **36**, pp 467-474.
7. Bagampadde, U., Wahhab, H., Aiban, S. (1999), "Optimization of steel slag aggregates for bituminous mixes in Saudi Arabia", *J Mater Civil Eng*, **11**(1), pp30-5.
8. Khan, M.I., Wahhab, H. (1998), "Improving slurry seal performance in Eastern Saudi Arabia using steel slag", *Construction and Building materials*, **12**, pp 195-202.
9. 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.
10. Ahmedzade, P. and Sengoz, B. (2008), "Evaluation of Steel Slag Coarse Aggregate in Hot Mix Asphalt Concrete", *Journal of Hazardous Materials*, **165**, pp 300-305.
11. 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), pp 453-61.
12. Yongjie, X., Shaopeng, W., Haobo, H. and Jin, Z. (2006), "Experimental Investigation of Basic Oxygen Furnace Slag Used as Aggregate in Asphalt Mixture", *Journal of Hazardous Materials*, **138**, pp 261-268.
۱۳. "نشریه شماره ۲۳۴، آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران"، معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، ویرایش اول، ۱۳۹۰.
14. "Principles of construction of hot-mix asphalt pavements", Manual series NO.22 (MS-22), The asphalt Institute, 1983
۱۵. حمد، توسلی، طرح و کنترل بتن آسفالتی گرم، چاپ اول، انتشارات قلم، ۱۳۷۲.
16. Shah, B.D. (2003), "Evaluation of Moisture Damage within Asphalt Concrete Mixes", a Thesis for master of science, Texas A& M University.
17. Lavin, P. (2003), "Asphalt Pavements, A practical Guide to Design, Production and Maintenance for Engineers And Architects", Spon Press.
18. Aksoy, A., Samlioglu, K., Tayfur, S., Ozen, H. (2005), "Effect of Various Additives on Moisture Damage Sensitivity of Asphalt Mixtures", *Construction and Building Materials*, **19**, pp 11-18.
19. Mehrara, A. and Khodaii, A. (2013), "A review of state of the art on stripping phenomenon in asphalt concrete", *Construction and Building Materials*, **38**, pp 423-442.
20. "Evaluation of Hot Mix Asphalt Moisture Sensitivity Using The Nottingham Asphalt Test Equipment", Final report, Center for Transportation and Research and Education, IOWA State University, 2005.
21. Hunter, R.N. (2000), "Asphalts in road construction", Thomas Telford.