دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران

10th International Congress on Civil Engineering

5 - 7 May 2015 ۱۵-۱۷ اردیبهشت ۱۳۹۴

University of Tabriz دانشگاه تبریز

دانشگاه تبریز

گـــــواهـــی ارائـــــه مقـــاله

بدینوسیله گواهی می شود مقاله با مشخصات زیر در دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران
که در تاریخ ۱۵ لغایت ۱۷ اردیبهشت ۱۳۹۴ در دانشگاه تبریز برگزار گردید
به صورت پوستر ارائه شده است.

حمید فرهاد، مرتضی جلیلی، ابوالفضل محمدزاده مقدم، علی اصغر صادقی

ارزیابی تغییر شکلهای ماندگار مخلوط های آسفالتی حاوی سرباره کوره قوس الکتریک

دکتر ناصر تقی زادیه
دبیر کنگره

ارزیابی تغییر شکل‌های ماندگار مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره کوره‌ی قوس الکتریک

حمید فرهاد ملاشاهی [۱]، مرتضی جلیلی قاضی زاده [۲]، ابوالفضل محمدزاده مقدم [۳]، علی اصغر صادقی [۴]

۱-عضو هیأت علمی گروه مهندسی عمران و معماری، دانشگاه تربت حیدریه، ایران

۲-دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران ومحیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳-عضو هیأت علمی گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

٤-عضو هیأت علمی گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

h.farhad@torbath.ac.ir

خلاصه

در این پژوهش جهت ساخت بتن آسفالتی، سرباره‌ی کوره‌ی قوس الکتریک (EAF) با درصدهای مختلف، جایگزین مصالح سنگی آهکی گردید. بدین ترتیب که بخش درشت دانه‌ی مصالح آهکی به ترتیب با ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد سرباره‌ی نوع EAF جایگزین شد. سپس خصوصیات مصالح سنگدانه‌ای آهکی و سرباره‌ای مورد آزمایش قرار گرفت و همچنین درصد قیر بهینه بر اساس روش طرح اختلاط مارشال برای هر سری از نمونه‌ها تعیین گردید. با استفاده از روش آزمایش ماشین اثر چرخ (ویل تراک)، مقاومت در برابر تغییرشکل‌های ماندگار مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصدهای مختلف سرباره مورد آزمایش و ارزیابی قرارگرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره دارای وزن مخصوص بیشتر، استقامت مارشال بیشتر، نسبت استقامت مارشل بیشتر و همچنین مقاومت در برابر شیار شدگی بیشتری در قیاس با نمونه شاهد بوده بدین ترتیب که مخلوط‌های آسفالتی حاوی درشت دانه کاملاً سرباره نوع EAF بیشترین مقاومت در برابر تغییرشکل ماندگار و مخلوط شاهد نیز کمترین مقاومت را دارد. از این‌رو این پژوهش پیشنهاد می‌نماید که در ساخت روسازی آسفالتی با استفاده از این‌نوع سرباره، درشت دانه-ی مصرفی با حدود ۵۰ تا ۷۵ درصد سرباره جایگزین گردد تا بیشترین تاثیرات مثبت در خصوصیات این مخلوط‌ها به‌وجود آید.

کلمات کلیدی: مخلوط آسفالتی، سرباره‌ی کوره‌ی قوس الکتریک، تغییرشکل های ماندگار، نسبت مارشال

۱. مقدمه

به‌کارگیری 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. استفاده از پسماندهایی نظیر ضایعات شیشه، لاستیک‌های فرسوده، خاکسترهای صنعتی، پسماند معادن ذغال سنگ و سرباره‌ی فولاد در لایه‌های روسازی، یکی از این کاربردهاست [۱]. در حدود ۳۶ میلیون تن سرباره‌ی فولاد در سه کارخانه‌ی عمده‌ی فولاد سازی کشور (فولاد اهواز، فولاد مبارکه و ذوب آهن اصفهان) انباشت 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 محوطه‌ی کارخانه، به‌دلیل حضور برخی فلزات سنگین درون

---

[۱] عضو هیأت عملی گروه مهندسی عمران و معماری، دانشگاه تربت حیدریه
[۲] دانشجوی دکتری، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس تهران
[۳] استادیار گروه عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
[٤] استادیار گروه عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری

ترکیبات این محصول، آب‌شستگی سرباره‌ی فولاد می‌تواند برای منابع آب زیرزمینی خطرناک باشد [۳]. سرباره‌ی فولاد دارای ویژگی‌های فیزیکی بسیار مناسبی از جمله مقاومت سایشی زیاد، شکل گوشه‌دار، مکعبی و شکسته است. ریزدانه‌ی 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 سرباره‌ی فولاد وجود دارد: سرباره‌ی حاصل از کوره‌ی اکسیژنی (کنورتور) (BOF[1])و سرباره‌ی حاصل ازکوره‌ی قوس الکتریک (EAF[2]) [۵].

اولین کاربرد عملی از سرباره‌ی فولاد در کانادا و در بزرگراه اونتاریا بود ولی بروز مشکلات عملکردی موجب شد که وزارت حمل و نقل کانادا استفاده از سرباره‌ی فولاد در روسازی‌های آسفالتی را در سال ۱۹۹۱ کنار بگذارد [۶]. محققان چینی نشان دادند که استفاده از سرباره‌ی فولاد در مخلوط‌های آسفالتی SMA، پایداری دینامیکی و مقاومت در برابر ترک‌های حرارتی را افزایش می‌دهد [۷]. آسی و همکاران نشان دادند که مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۲۵ درصد سرباره‌ی فولاد، مقاومت خستگی و مدول برجهندگی بیشتری نسبت به مخلوط‌های شاهد دارد [۸]. احمدزاده و همکاران نیز با استفاده از نتایج آزمایش سختی خزشی نشان دادند که استفاده از سرباره‌ی فولاد تغییر شکل مخلوط آسفالتی در برابر بار ترافیک را کاهش می‌دهد [۹]. 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 به‌عنوان راهکاری کارا به‌منظور افزایش توان باربری مخلوط‌های آسفالتی معرفی شده است [۱۰]. عامری و همکاران در سال ۲۰۱۱ با انجام آزمایش خزش دینامیکی نشان دادند که جایگزین کردن ۲۵ درصد از مصالح طبیعی با مصالح سرباره‌ی فولاد کنورتور در مخلوط آسفالتی، مقاومت آن در برابر شیار شدگی تا ۶۰ درصد افزایش پیدا می‌کند [۱۱]. کاووسی و جلیلی در سال ۲۰۱۴ نشان دادند که استفاده از سرباره‌ی قوس الکتریک سبب بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک خستگی می‌شود [۱۲]. سایر تحقیقات گذشته در خصوص تأثیر استفاده از سرباره بر خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی نیز نتایج مشابهی را ارائه داده‌اند [۱۳].

در تحقیق حاضر از سرباره‌ی نوع EAF که در تحقیقات گذشته در کشور کمتر مورد ارزیابی قرارگرفته و از طرفی حجم زیاد آن هر ساله در ایران تولید و دپو می‌شود، به‌منظور جایگزینی بخش درشت دانه‌ی مصالح سنگی آهکی با درصدهای مختلف (۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰) استفاده شده است. 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 ریزدانه‌ی متراکم نشده مورد ارزیابی قرارگرفت و به‌منظور تعیین عناصر و ترکیبات شیمیایی مصالح سنگی آهکی و سرباره‌ای آزمایش XRF انجام شد. جهت مقایسه‌ی بافت سطحی مصالح سنگی آهکی و سرباره‌ای از تصاویر SEM[3] بهره گرفته شد. جهت بررسی تاثیر افزودن سرباره بر مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های ماندگار، ازآزمایش ماشین اثر چرخ[4] استفاده شد.

۲. روش تحقیق

در این تحقیق به‌منظور بررسی تغییرشکل ماندگار مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره بخش درشت دانه‌ی مصالح آهکی به‌ترتیب با ۲۵، ۵۰ ۷۵ و ۱۰۰ درصد سرباره‌ی نوع EAF جایگزین گردید. با استفاده از روش طرح اختلاط مارشل براساس استاندارد ASTM D-6927 درصد قیر بهینه و سایر مشخصات فیزیکی و مکانیکی مخلوط‌ها به‌دست آمد، سپس ۱۵ دال با ابعاد (۵*۳۰*۳۰ سانتی‌متر) جهت آزمایش ارزیابی تغییرشکل ماندگار تهیه شد در ادامه نتایج به‌دست آمده با استفاده از روش‌های آماری، تحلیل و با یکدیگر مقایسه شد.

۳. مصالح

در این تحقیق از یک نوع سنگدانه‌ی آهکی و یک نوع سرباره‌ی فولادی EAF و از قیر ۷۰-۶۰ به‌منظور ساخت نمونه‌های آسفالتی استفاده شده است. همچنین در همه‌ی مخلوط‌ها از پودر سنگ آهک به‌عنوان فیلر استفاده گردید. دانه‌بندی مصالح سنگی مطابق بر منحنی دانه‌بندی شماره ۴ آیین‌نامه‌ی روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه‌ی ۳۳۴- ویرایش اول [۱۴]) انتخاب شد. به‌منظور امکان قیاس مخلوط‌ها با یکدیگر، مصالح سنگی به‌گونه‌ای انتخاب شدند که منحنی دانه‌بندی هر سه نوع مخلوط دقیقاً بر یکدیگر منطبق باشد.

1 - Basic Oxygen Furnace Slag
2- Electric Arc Furnace Slag
3- Scanning Electron Microscope
4 - Wheel Tracking Device

۱,۳ تعیین خصوصیات مصالح سنگی آهکی و سرباره‌ای

سنگدانه‌ها بیش از ۹۰ درصد وزنی مخلوط آسفالتی را تشکیل می‌دهد از این‌رو مشخصات سنگدانه‌ها تاثیر مستقیم و به‌سزایی 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 شده ((AASHTO: T304-96 (20024)، استفاده گردید. همچنین به‌منظور تعیین عناصر و ترکیبات شیمیایی مصالح سنگی آهکی و سرباره‌ای آزمایش XRF انجام شد. جهت مقایسه‌ی 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

مشخصه	استاندارد	مصالح آهکی			EAF		
		درشت‌دانه	ریزدانه	فیلر	درشت‌دانه	ریزدانه	فیلر
وزن مخصوص (g/cm^3)	ASTM C-127	۲/۶۵۶			۳/۰۵۵		
وزن مخصوص (g/cm^3)	ASTM C-128		۲/۵۸۲			۲/۹۴۷	
وزن مخصوص (g/cm^3)	ASTM D-854			۲/۷۶۸			---
سایش لس آنجلس (٪)	ASTM C-131	۲۰/۴			۱۳/۴		
شکستگی در دو وجه (٪)	ASTM D-5821	۸۰			۹۸		
شاخص شکل و بافت سطحی مصالح سنگی	ASTM-D3398		۱۰/۸			۱۲/۷	
تعیین درصد فضای خالی مصالح سنگی ریزدانه متراکم نشده	AASHTO: T304-96		۴۵			۵۲	

۱,۱,۳ آنالیز XRF

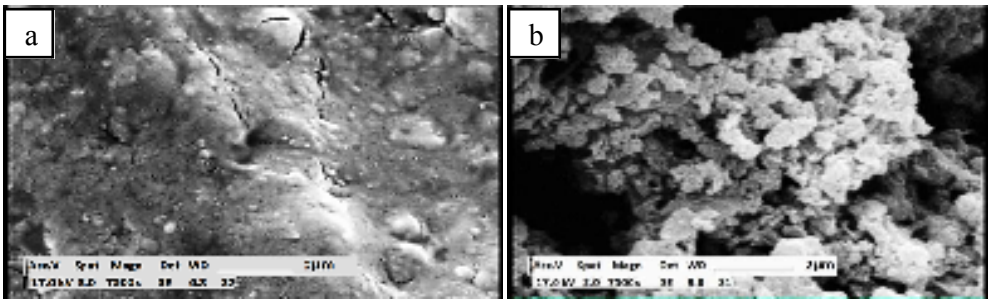
روش XRF یا طیف سنجی فلورسانس اشعه‌ی X، روشی کمی و کیفی برای تجزیه‌ی عنصری عناصر مجهول در سنگ‌های معدنی فلزها، آلیاژها و مانند آن می‌باشد. اساس کار دستگاه بدین صورت است که هرگاه الکترون‌های دارای انرژی کافی به ماده برخورد کند، پرتو X با طیف پیوسته‌ای از انرژی و طول موج‌ها تولید می‌شود. پرتو X می‌تواند حاصل بمباران ماده‌ی 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 نمونه‌ی مصالح به‌نحوی انجام می‌شود که از الک نمره ۲۰۰ عبور کند. پس از آن نمونه به‌صورت صفحه‌ای شکل در محفظه‌ی دستگاه قرارگرفته و با تابش اشعه‌ی X در طی فرآیند خاصی به نمونه‌ها، تغییرات انجام شده به عنوان XRF ثبت می‌شود. نتیجه‌ی تحلیل برای عناصر اصلی به‌صورت اکسید و برحسب درصد و برای عناصر فرعی به‌صورت عنصری گزارش می‌شود. نتایج تحلیل XRF در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، مهمترین فازها و ترکیبات تشکیل‌دهنده‌ی سرباره‌ی فولاد مبارکه به‌ترتیب عبارتند از: کربنات کلسیم (کلسیت)، اکسید آهن، کوارتز، مگنتیت و اکسید آلومینیم.حضور اکسید آهن و آلومینیوم به‌همراه دیگر عناصر فلزی در ترکیبات سرباره دلیل اصلی مقاومت زیاد مصالح سرباره‌ای در برابر سایش است.

جدول ۲-نتایج تحلیل XRF مصالح سنگی

	درصد اکسید												درصد سولفات‌ها برحسب	درصد افت وزنی در اثر حرارت
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	TiO_2	P_2O_5	Sr	Na_2O	MnO	V	SO_3	L.O.I
صالح آهکی	۵/۵۶۵	۰/۶۷	۰/۳۷۶	۴۵/۷۸۶	۵/۷۰۱	۰/۱۷۵	---	۰/۰۵۶	۰/۰۲۴	---	---	---	۰/۳۹	۴۱/۵۹
EAF	۱۷/۴۶۷	۴/۰۷۳	۱۵/۷۵۱	۳۸/۸۶۷	۵/۰۱۳	۰/۲۴۸	۲/۱۱۱	۱/۵۰۲	۰/۰۳۴	۰/۳۳۷	۲/۳۲۳	۰/۶۸۷	۰/۴۷۷	۱/۱۱

۲,۱,۳ مورفولوژی سطح سنگدانه‌ها

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

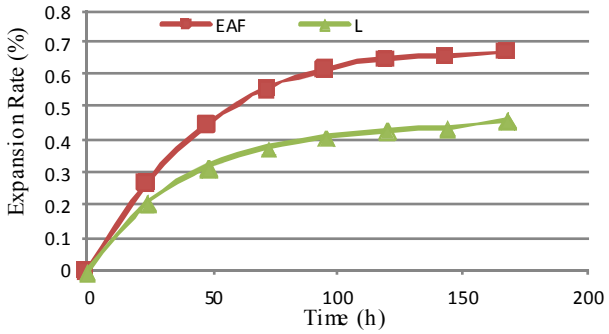


شکل ۱- تصاویر گرفته شده با دستگاه SEM (b: EAF، a: سنگدانه‌ی آهکی)

براساس این تصاویر سرباره‌ی فولاد دارای سطح و بافت زبر و درشت‌تر در مقایسه با سنگدانه‌های آهکی است. به‌خصوص در مورد تخلخل سطحی، این تفاوت باعث شده سطح مصالح سرباره‌ای دارای دانه‌های زبر و خشن‌تر از سنگدانه‌های آهکی باشد و در نتیجه 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 سرباره‌ی فولاد دارای بافتی درشت به‌همراه سطحی بسیار متخلخل است و حفراتی به قطر ۱ میکرون تا ۱ میلیمتر در سطح آن به‌وفور مشاهده می‌شود.

۳,۱,۳ بررسی پتانسیل افزایش حجم نمونه‌های آسفالتی

به‌منظور تعیین پتانسیل افزایش حجم نمونه‌های آسفالتی حاوی سرباره، سه نمونه‌ی آسفالتی با درصدهای مختلف سرباره‌ی فولاد و با درصد قیر بهینه ساخته شد و به‌مدت 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. همان‌گونه‌که ملاحظه می‌شود به‌دلیل حضور مقدار بسیار اندک اکسیدهای آزاد باقی مانده در سرباره‌ی 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 سرباره‌ی 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 براساس 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 ضربه‌ی چکش تراکم مارشال به هر دو طرف نمونه‌های ۴ اینچی به‌مظور در نظر گرفتن شرایط ترافیکی سنگین، در دمای ۱۳۵ درجه متراکم گردید. در این آزمایش در مجموع ۹۰ نمونه با درصدهای مختلف (۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ درصد درشت دانه و نمونه‌ی کاملاً سرباره‌ای) سرباره‌ی نوع EAF ساخته و همچنین نمونه‌هایی با مصالح سنگی آهکی، با درصدهای مختلف قیر تهیه گردید. برای نامگذاری نمونه‌های کنترل از حرف L استفاده شده است. همچنین درصد جایگزینی سرباره به‌جای درشت دانه‌ی مخلوط پس از خط تیره نشان داده شده است. پس از ساخت، وزن مخصوص واقعی نمونه‌های متراکم شده اندازه‌گیری شد. استقامت و روانی نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM D-6927 با استفاده از دستگاه بارگذاری مارشال اندازه گیری گردید. نتایج آزمایش مارشال در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- خلاصه نتایج مارشال در درصد قیر بهینه

نوع نمونه	درصد قیر بهینه	استقامت مارشال (KN)	روانی (0.25 mm)	وزن مخصوص توده‌ای (Gmb)	درصد جذب آب	وزن مخصوص تئوریک حداکثر (Gmm)	درصد فضای خالی	درصد قیر جذب شده (Pba)	درصد قیرموثر (Pbe)	VMA	VFA	نسبت استقامت مارشال به روانی
E-25	۴/۷	۱۱/۷	۸	۲/۴۳	۰/۳۶	۲/۵۳	۴	۰/۳۸	۴/۳۴	۱۵/۲	۷۰	۵/۸۵
E-50	۴/۹	۱۳/۱	۸/۲	۲/۴۹	۰/۱۳	۲/۶	۴	۰/۵۸	۴/۳۱	۱۶/۴	۷۴	۶/۳۹
E-75	۵	۱۳/۷	۸/۱	۲/۵۴	۰/۲۵	۲/۶۴	۴	۰/۸۴	۴/۲۰	۱۶/۸	۷۵	۶/۷۷
E-100	۵/۲	۱۴	۸	۲/۵۷	۰/۲۶	۲/۶۷	۴	۰/۹۹	۴/۱۸	۱۷	۷۵	۷/۰
L	۴/۶	۱۰/۸	۸/۳	۲/۳۷	۰/۵۳	۲/۴۷	۴	۰/۲۶	۴/۳۴	۱۴/۶	۷۰	۵/۲

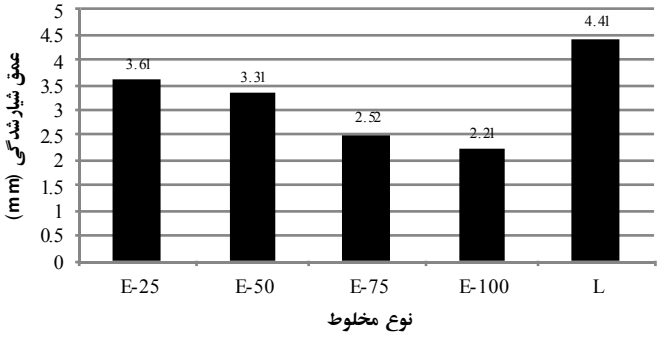
نتایج آزمایش مارشال برای هر ۶ سری مخلوط نشان می‌دهد که بیشترین و کمترین درصد قیر بهینه به‌ترتیب مربوط به مخلوط حاوی مصالح آهکی و مخلوط با درشت دانه‌ی کاملاً سرباره‌ای می‌باشد. همان‌گونه که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود با افزایش نسبت مصالح سرباره‌ای در ترکیب مصالح سنگی، استقامت مارشال نمونه‌های آسفالتی افزایش 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) به‌دلیل درگیری و قفل و بست موثر سنگدانه‌ها، این پارامتر به‌شکل چشمگیری افزایش می‌یابد به‌گونه‌ای‌که با جایگزین شدن کل مصالح سنگی آهکی با مصالح سرباره‌ای، استقامت مارشال مخلوط آسفلتی حدود ۴۵ درصد افزایش پیدا کرده است. استقامت مخلوط آسفالتی به دو عامل اصطکاک داخلی و چسبندگی بستگی دارد [۱۵]. اصطکاک بین دانه‌های مصالح سنگی در درجه‌ی اول بستگی به زبری سطح دانه‌ها و قفل و بست و جنس آن‌ها و در درجه‌ی دوم بستگی به دانه‌بندی 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 [۱۶].

۵. آزمایش تغییر شکل ماندگار، نتایج و تحلیل

برای ارزیابی شیارشدگی نمونه‌ها از آزمایش ماشین اثر چرخ[1] استفاده شد. این آزمایش برای تعیین مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های ماندگار در دمای بحرانی و تحت بارگذاری شبیه به آنچه که در جاده‌ها به سطح روسازی وارد می‌شود، به کار می‌رود. پارامترهای انجام آزمایش در این دستگاه مطابق با پیش نویس استاندارد BS 598:Part110:1996 می‌باشد. قبل از شروع آزمایش لازم است تا نمونه به مدت ۴ تا ۱۶ ساعت در دمای ۱± ۴۵

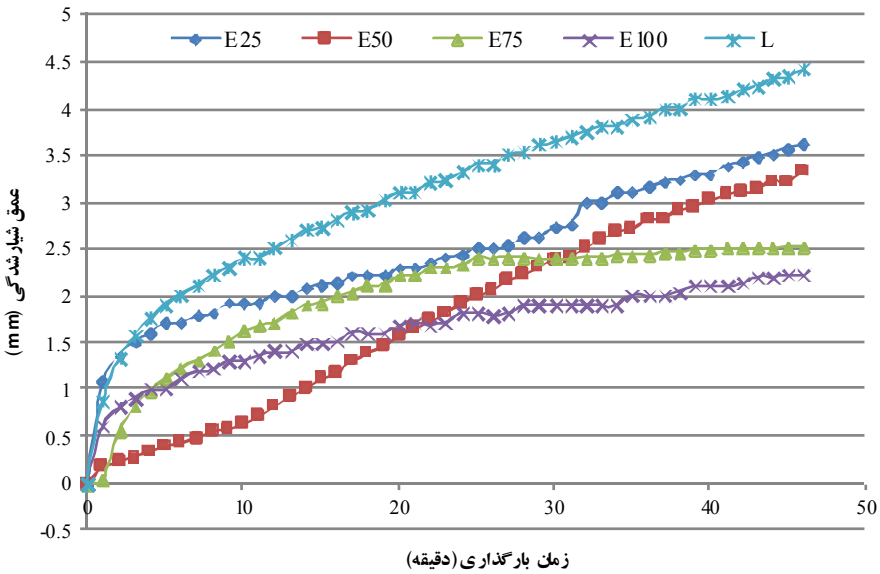
[1] - Wheel Tracker

درجه سانتی‌گراد نگهداری شود. طبق استاندارد BS بار وارد به نمونه از طریق چرخ دستگاه باید ۵۲۰N باشد. برای ساخت نمونه‌ها، باتوجه به حجم قالبی که دال در آن ساخته می‌شود (قالبی با ابعاد۵۰× ۳۰۵× ۳۰۵ میلیمتر) و همچنین وزن مخصوص نمونه‌ی آسفالتی (G_{mb}) که در آزمایش مارشال محاسبه گردیده است، وزن مصالح مورد نیاز برای ساخت دال آسفالتی محاسبه گردید. سپس با توجه به درصد قیر بهینه و مصالح سنگی، وزن قیر و دانه-بندی مصالح سنگی جهت آماده سازی نمونه تعیین گردید. جهت اختلاط نمونه‌ها از میکسر مخصوص آسفالت بهره گرفته شد و مصالح داغ که به مدت حداقل ۲ ساعت در اون ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شده بودند، در مدت زمان دو دقیقه با یکدیگر مخلوط شده تا قیر کلیه‌ی مصالح سنگی را در برگیرد. پس از ایجاد مخلوطی همگن مصالح آسفالتی به داخل قالب دال منتقل گردید. در مرحله‌ی بعد با استفاده از غلتک فولادی دستی به وزن ۳۰ کیلوگرم مصالح متراکم گردید. در حین عمل تراکم باید توجه داشت که جهت غلتک زدن با جهت عبور ترافیک و جهت حرکت چرخ دستگاه یکسان باشد تا امکان شبیه سازی شرایط واقعی روسازی فراهم گردد. پس از متراکم کردن مصالح، نمونه‌ها به‌مدت یک ساعت در داخل قالب باقی ماند تا به دمای آزمایشگاه برسد سپس قالب را باز نموده و اجازه داده شد تا نمونه‌ها کاملاً سرد گردد. جهت انجام آزمایش قبل از شروع بارگزاری چرخ، دال‌های هر آزمایش به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۱± ۴۵ درجه سانتی‌گراد در کابین دستگاه اثر چرخ قرار گرفت. تعداد ۱۵ دال برای انجام این آزمایش ساخته شد که نتایج میانگین شیارشدگی حداکثر نمونه‌های مختلف در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل۳-مقادیر میانگین شیارشدگی حداکثر نمونه‌های مختلف

همانطور که ملاحظه می شود شیارشدگی نمونه های حاوی سرباره بسیار کمتر از نمونه‌ی شاهد می‌باشد بدین ترتیب که با افزایش درصد سرباره کوره‌ی قوس الکتریک، عمق شیارشدگی‌ها کاهش می یابد که برای نمونه‌ی با درشت‌دانه کاملاً سرباره مقدار شیارشدگی نسبت به نمونه شاهد تا حدود ۵۰٪ کاهش می‌یابد. نحوه تغییرات شیارشدگی برحسب زمان در مورد نمونه‌های مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل٤-منحنی تغییرات شیارشدگی نمونه‌های مختلف بر حسب زمان

همانطور که شکل ۴ نشان می‌دهد کمترین تغییرات شیب منحنی تغییرات شیارشدگی نمونه‌های مختلف مربوط به نمونه‌های با درصد بیشتر سرباره بوده و کمترین مقدار مربوط به نمونه شاهد می‌باشد. مقاومت بیشتر در برابر شیارشدگی نمونه‌های حاوی سرباره به دلیل شکستگی بیشتر و شاخص شکل و بافت سطحی بیشتر مصالح سرباره‌ای در قیاس با نمونه شاهد است که منجر به قفل و بست بهتر سنگدانه‌ها و در نتیجه کاهش عمق شیار شدگی شده است.

با استفاده از نتایج آزمایش و به منظور بررسی تأثیر حضور سرباره بر مقاومت در برابر تغییر شکل‌های ماندگار 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 در سطح اطمینان ۹۵٪ بر روی نتایج بدست آمده با استفاده از نرم افزار SPSS 16.0 انجام گردید. از این آزمون برای سنجش تأثیر تغییر درصدهای مختلف سرباره بر پارامترهای آزمایش استفاده گردید. نتایج تحلیل-های آماری (جدول ۴) نشان داد که مقاومت در بابر تغییرشکل‌های ماندگار نمونه‌های حاوی سرباره بطور معنی داری بیشتر از نمونه شاهد است.

جدول ٤- نتایج تحلیل آماری مقادیر شیارشدگی نمونه‌های مختلف

F crit	P-value	F	MS	df	SS
۳,۴۷۸۰۵	۰,۰۰۰	۱۵۷,۹۰۰۲	۲,۳۱۰۶۰۷	۴	۹,۲۴۲۴۲۷

۶. نتیجه گیری

با بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه بطور خلاصه می‌توان نتایج را به‌ترتیب 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 خلی متراکم نشده، بهتر از سنگدانه‌های آهکی است.
- نتایج آزمایش مارشال نشان داد که بیشترین و کمترین درصد قیر بهینه به‌ترتیب مربوط به مخلوط حاوی مصالح آهکی و مخلوط با درشت دانه‌ی کاملاً سرباره‌ای می‌باشد. با افزایش نسبت مصالح سرباره‌ای در ترکیب مصالح سنگی، استقامت مارشال نمونه‌های آسفالتی افزایش می‌یابد.
- شاخص سختی مارشال نمونه‌های حاوی سرباره بیشتر از نمونه‌ی شاهد بوده و با افزایش درصد جایگزینی سرباره؛ این ویژگی شدت می‌یابد. این نتیجه گویای این حقیقت است که استفاده از سرباره با توجه به ترافیک سنگین جاده‌های کشور و جلوگیری از بروز خرابی شیار افتادگی مسیر چرخ مفید خواهد بود.
- نتایج آزمایش ماشین "اثر چرخ" نشان داد که با افزودن سرباره به مخلوط آسفالتی، عمق شیارشدگی کاهش می‌یابد که این مطلب با نتایج بدست آمده از آزمایش مارشال مطابقت دارد. افزایش مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل‌های ماندگار ناشی از شکستگی و زبری بیشتر سطح مصالح سرباره‌ای و در نتیجه قفل و بست بهتر مصالح نسبت به نمونه‌ی شاهد می‌باشد که منجر به کاهش عمق شیارشدگی شده است.
- نتایج تحلیل‌های آماری بیان می‌کند که عمق شیارشدگی نمونه‌های آسفالتی حاوی سرباره به‌طور معناداری کمتر از نمونه‌ی شاهد می‌باشد. بدین معنی که افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل‌های ماندگار ناشی از خطاهای آزمایشگاهی نبوده و نتیجه‌ی جایگزینی مصالح سنگی آهکی با مصالح سرباره‌ای است.
- این پژوهش پیشنهاد می‌نماید که در ساخت روسازی آسفالتی با استفاده از این نوع سرباره درشت دانه‌ی مصرفی با حدود ۵۰ تا ۷۵ درصد سرباره جایگزین گردد تا بیشترین تاثیرات مثبت در خصوصیات این مخلوط‌ها به‌وجود آید.

۷. مراجع

۱. مقلم نیری، م.، جلیلی قاضی زاده م. و محمدزاده مقدم، ا. (۱۳۸٦)، "کاربرد سرباره‌ی فولاد در پروژه‌های راهسازی"،اولین سمینار فرآوری و کاربردهای سرباره‌ی قوس الکتریک، پژوهشکده‌ی فولاد دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳٤-۱۲۷.

۲. یوزبلشی‌زاده، ح.، فراهانی، م. (۱۳۸٦)،"انواع سرباره و بررسی خواص و کاربرد آن‌ها"، اولین سمینار فرآوری و کاربردهای سرباره‌ی قوس الکتریک، پژوهشکده‌ی فولاد دانشگاه صنعتی اصفهان، ۹-۱.

۳. شکرچی‌زاده، م.، عالی‌زاده، ر.، چینی، م، حسینی، م. و قدس، پ. (۱۳۸۳)، " ارزیابی آزمایشگاهی مشخصات رویاره‌های فولادی برای استفاده به‌عنوان سنگدانه در ساخت روسازی آسفالتی"، دومین همایش قیر و آسفالت ایران، تهران، ٦۹٤-٦۸۲.

٤. طباطبایی، ن. و بخشی طوسی، پ. (۱۳۸۳)، " بررسی کاربرد سرباره‌ی فولاد در مخلوط‌های آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه‌ای"، دومین همایش قیر و آسفالت ایران، ۲-٤ آذر، ۳۱۱-۳۰۲.

۵. ستاری، م. (۱۳۸۳)،"فعالیت مجتمع فولاد مبارکه به‌منظور فرآوری و کاربرد سرباره"،اولین سمینار فرآوری و کاربردهای سرباره‌ی قوس الکتریک، پژوهشکده‌ی فولاد دانشگاه صنعتی اصفهان، ۲٤-۱۹.

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

7. Yongjie, X, Shaopeng, W., Haobo, H. and Jin, Z. (2006), " Experimental Investigation of Basic Oxygen FurnaceSlag Used as Aggregate in Asphalt Mixture", Journal of Hazardous Materials,**138**, pp 261–268.

8. Asi, I.M., Qasrawi, H.Y. and Shalabi, F.I. (2007) " Use of Steel Slag Aggregate in Asphalt ConcreteMixes", Canadian Journal of Civil Engineering, **34**, pp 902–911.

9. Ahmedzade, P. and Sengoz, B. (2008), "Evaluation of Steel Slag Coarse Aggregate in Hot Mix Asphalt Concrete", Journal of Hazardous Materials, **165**, 300-305.

10. Pasetto, M. and Baldo, N. (2011), " Mix Design and Performance Analysis of Asphalt Concretes with Electric Arc Furnace Slag", Construction and Building Materials,**25**, pp 3458–3468.

11. 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, Liverpool, UK.

12. Kavussi, A., Jalili Qazizadeh, M., "Fatigue Characterization of Asphalt Mixes Containing Electric Arc Furnace (EAF) Steel Slag subjected to long term aging", Construction and Building Materials 72 (2014) 158–166.

13. 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.

۱۴. " نشریه‌ی شماره ۲۳۴، آیین نامه‌ی روسازی آسفالتی راه‌های ایران"، معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، ویرایش اول، ۱۳۹۰.

15. "Principles of construction of hot-mix asphalt pavements", Manual series NO.22 (MS-22), The asphalt Institute, 1983

۱۶. احمد، توسلی، طرح و کنترل بتن آسفالتی گرم، چاپ اول، انتشارات قلم، ۱۳۷۲.