

## بررسی تأثیر پیرشدگی آزمایشگاهی دراز مدت بر رفتار خستگی مخلوطهای آسفالتی حاوی سرباره‌های قوس الکتریک و کوره اکسیژنی

امیر کاوسی (نویسنده مسئول)، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

مرتضی جلیلی قاضی زاده، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

ابوالفضل حسنی، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

E-mail: kavussia@modares.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۳/۰۳/۲۹ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۸/۰۷

### چکیده:

استفاده از تولیدات جانبی و دورریز در صنایع تولید آهن و فولاد (شامل انواع سرباره)، در روسازی راهها جهت جلوگیری از تداوم تأمین حجم زیاد مصالح سنگی مورد نیاز از کوهها یا بستر رودخانه‌ها، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تحقیقات گذشته نشان داده است که سرباره فولاد می‌تواند به عنوان جایگزین مصالح سنگی در روسازی راهها استفاده و سبب بهبود برخی خصوصیات مکانیکی مخلوطهای آسفالتی شود. با این وجود، رفتار و عملکرد دراز مدت این مخلوطها کمتر مورد توجه قرار گرفته و همچنین مقایسه‌ای بین سرباره‌های مختلف، انجام نشده است. بنابراین در این پژوهش دو نوع سرباره کوره قوس الکتریک و کوره اکسیژنی با درصدهای مختلف، جایگزین مصالح سنگی آهنی گردید. به این ترتیب که بخش درشت دانه مصالح آهنی به ترتیب با ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد سرباره‌های نوع کوره قوس الکتریک و کوره اکسیژنی جایگزین گردید. سپس خصوصیات مصالح سنگدانه‌ای آهنی و سرباره‌ای مورد آزمایش قرار گرفت و همچنین درصد قیر بهینه بر اساس روش طرح اختلاط مارشال برای هر سری از نمونه‌ها تعیین شد. با استفاده از روش پیرشدگی دراز مدت مخلوط مطابق استاندارد (AASHTO PP۲) و انجام آزمایش خستگی به روش خمش چهارنقطه‌ای در حالت تنش ثابت، رفتار خستگی مخلوطهای آسفالتی حاوی درصدهای مختلف سرباره در دو حالت پیرشده و پیرنشده، مورد آزمایش و ارزیابی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که در حالت پیرنشده، مخلوطهای آسفالتی حاوی سرباره نوع کوره قوس الکتریک بیشترین عمر خستگی و مخلوطهای با مصالح آهنی کمترین عمر خستگی را دارد. همچنین یافته‌های این پژوهش در حالت پیر شده نشان داد که مخلوطهای حاوی سرباره، حساسیت کمتری نسبت به پیرشدگی در قیاس با مخلوط آهنی دارد.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی، عمر خستگی، سرباره کوره قوس الکتریک، سرباره کوره اکسیژنی، پیرشدگی دراز مدت

## ۱. مقدمه

استفاده از 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 تأمین می‌شود، از منظر زیست محیطی و اقتصادی اهمیت فراوانی دارد. بکار بردن پسماندهایی مانند ضایعات شیشه، لاستیک‌های فرسوده، خاکسترهای صنعتی، پسماند معادن ذغال سنگ و سرباره فولاد در لایه‌های روسازی، یکی از این کاربردهاست [Moghadam et al. 2007]. بر اساس آمار سال ۱۳۸۶، حدود ۳۶ میلیون تن سرباره فولاد در سه کارخانه عمده فولاد سازی کشور (فولاد اهواز، فولاد مبارکه و ذوب آهن اصفهان) دپو بوده و حجم تولید این محصول در کشور سالیانه بیش از ۲/۳ میلیون تن است [Yuzbashi and Farahani, 2007]. 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 نیز خطرناک باشد [Shekarchizadeh, 2004]. سرباره فولاد دارای ویژگی‌های فیزیکی بسیار مناسبی از جمله مقاومت سایشی زیاد، شکل گوشه‌دار، مکعبی و شکسته است. ریزدانه این محصول نیز داری ارزش ماسه‌ای بالایی بوده و از این رو امکان استفاده از آن در لایه‌های روسازی تأیید شده است [Tabatabaei and Bakh-shi, 2004]. با این وجود سرباره فولاد عمدتاً تمایل به انبساط دارد و این مسئله به دلیل وجود اکسیدهای آهن و منیزیم آزاد در سرباره است که می‌تواند در محیط‌های مرطوب هیدراته و منبسط شود. این قابلیت بالقوه انبساطی می‌تواند منجر به ایجاد مشکلاتی در محصولات دارای سرباره فولاد شود [NSA, 2001].

عمدتاً دو نوع سرباره فولاد وجود دارد: ۱- سرباره حاصل از کوره اکسیژنی (کنورتور) (BOF) و ۲- سرباره حاصل از کوره قوس الکتریک [Sattari, 2004] (EAF). در سال‌های اخیر تحقیقاتی در مورد کاربرد این دو نوع سرباره در روسازی راه‌ها انجام شده

است. نتایج این تحقیقات نشان داده که استفاده از سرباره فولادی می‌تواند منجر به افزایش مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل‌های ماندگار [Ahmedzade and Sengoz, 2008, Ameri et al. 2011]، افزایش مقاومت در برابر ترک‌های حرارتی [Yongjie et al. 2006]، افزایش مدول سختی و توان باربری روسازی [Pasetto et al. 2010, 2011, 2012, Xie et al. 2012]، شود. خستگی یکی از مهم‌ترین خرابی‌های روسازی‌های انعطاف پذیر تحت بارگذاری تکراری است. ترک‌خوردگی خستگی در اثر جمع شدن کرنش‌های کوچک غیرقابل برگشت ناشی از بارهای تکراری در طول زمان ایجاد می‌شود

[Kavussi and Modarres, 2010]. ترک‌های خستگی عموماً از پایین لایه آسفالتی شروع شده (جایی که کرنش کششی حداکثر اتفاق می‌افتد) و به تدریج به سمت بالا گسترش یافته و ممکن است سرانجام منجر به شبکه‌ای از ترک‌ها در سطح روسازی شود. رفتار خستگی مخلوط آسفالتی تحت تأثیر عواملی نظیر نوع قیر، نوع مخلوط، درصد فضای خالی، سختی مخلوط و نوع مصالح سنگی تغییر می‌کند [Moreno et al. 2013].

تعیین مقاومت روسازی آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی و خرابی ناشی از تکرار بارگذاری، به منظور طراحی صحیح روسازی، نیازمند شناخت عملکرد دراز مدت روسازی است. روسازی آسفالتی به مرور زمان دچار پیرشدگی می‌شود و عملکرد روسازی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. قیر موجود در مخلوط آسفالتی در اثر پیرشدگی سخت‌تر خواهد شد که این امر موجب افزایش سختی مخلوط می‌شود. سخت‌شدگی در وهله اول ناشی از از دست دادن مواد فرار قیر در حین ساخت و یا اکسیداسیون در زمان بهره‌برداری است [Bell, 1989]. از سوی دیگر، پژوهشگران به این نتیجه رسیده‌اند که پیرشدگی به خصوصیات مصالح سنگی نیز بستگی دارد [Bell and Sosnovske, 1994] که این مطلب با یافته‌های پژوهشی

## بررسی تأثیر پیرشدگی آزمایشگاهی دراز مدت بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی ...

به دو گروه تقسیم شدند، که یک گروه مطابق روش استاندارد AASHTO PP2 تحت پیرشدگی دراز مدت قرار گرفت. سپس آزمایش خستگی در حالت تنش ثابت در سه سطح تنش انجام و با استفاده از روش‌های آماری، تحلیل و با یکدیگر مقایسه گردید.

### ۳. مصالح

در پژوهش حاضر از یک نوع سنگدانه آهکی و دو نوع سرباره فولادی EAF (تولید فولاد مبارکه اصفهان) و BOF (تولید ذوب‌آهن اصفهان) و از قیر ۶۰-۷۰ به منظور ساخت نمونه‌های آسفالتی استفاده شده است. همچنین در تمامی مخلوط‌ها از پودر سنگ آهک به عنوان فیلر استفاده گردید. دانه‌بندی مصالح سنگی منطبق بر منحنی دانه‌بندی شماره ۴ (با حداکثر اندازه اسمی ۱۲/۵ میلیمتر) آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران [Iran High-way Asphalt Paving Code, No. 234, 2011] انتخاب شد. به منظور امکان قیاس مخلوط‌ها با یکدیگر، مصالح سنگی به گونه‌ای انتخاب شد که منحنی دانه‌بندی هر سه نوع مخلوط دقیقاً بر یکدیگر منطبق باشد.

### ۳-۱ تعیین خصوصیات مصالح سنگی آهکی و سرباره‌ای

سنگدانه‌ها بیش از ۹۰ درصد وزنی مخلوط آسفالتی را تشکیل می‌دهد از این رو مشخصات سنگدانه‌ها تأثیر مستقیم و بسزایی بر عملکرد روسازی‌های آسفالتی دارد. جهت تعیین خصوصیات مصالح سنگی آهکی و سرباره‌ای از آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص، سایش لس آنجلس، تعیین درصد شکستگی، تعیین شاخص شکل و بافت مصالح سنگی و تعیین درصد فضای خالی مصالح سنگی ریزدانه متراکم نشده، استفاده گردید. جدول ۱ نتایج این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. همچنین به منظور تعیین عناصر و ترکیبات شیمیایی مصالح سنگی آهکی و سرباره‌ای آزمایش XRF انجام شد که نتایج در ادامه ارائه شده است.

دیگر در سال ۲۰۰۸ مطابقت دارد. در تحقیق مذکور این نتیجه به دست آمد که مخلوط آسفالتی حاوی ۱۰۰٪ سرباره در قیاس با مخلوطی که ۵۰٪ آن با گرانیات جایگزین شده است، حساسیت کمتری نسبت به پیرشدگی دارد [Hamzah and Teoh, 2008]. فرضیه دیگری که در این زمینه مطرح شده است بیان می‌کند که با افزایش چسبندگی میان قیر و مصالح سنگی، پیرشدگی کاهش می‌یابد [Bell and Sosnovske, 1994]. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پیرشدگی مخلوط آسفالتی تابع خصوصیات قیر، مصالح سنگی و چسبندگی قیر و مصالح است. بنابراین ارزیابی پیرشدگی قیر، به تنهایی نمی‌تواند پیش بینی دقیقی از عملکرد دراز مدت مخلوط آسفالتی ارائه دهد.

بنابراین از آنجا که در تحقیقات گذشته در زمینه استفاده از سرباره، مطالعه‌ای جامع در خصوص بررسی رفتار خستگی این مخلوط‌ها و عملکرد دراز مدت آن‌ها انجام نشده، همچنین مقایسه‌ای بین انواع سرباره صورت نگرفته است. در این پژوهش از سرباره‌های نوع BOF و EAF که بیشترین استفاده را در مخلوط‌های آسفالتی دارد و از طرفی حجم زیاد آن هر ساله در ایران تولید و دپو می‌شود، با هدف بررسی رفتار خستگی در دو حالت پیر شده و پیر نشده، استفاده شده است.

### ۲. روش تحقیق

در این تحقیق به منظور بررسی رفتار خستگی مخلوط‌های حاوی سرباره، بخش درشت دانه مصالح سنگی آهکی، به ترتیب با ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد سرباره نوع EAF و BOF جایگزین گردید. با استفاده از روش طرح اختلاط مارشال بر اساس استاندارد ASTM D-6927 درصد قیر بهینه و سایر مشخصات فیزیکی و مکانیکی مخلوط‌ها به دست آمد، سپس ۱۶۲ تیرچه جهت آزمایش خستگی به روش تیرچه خمشی تهیه شد. نمونه‌ها

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی آهکی و سرباره‌ای

سرباره کوره اکسیژنی (BOF)			سرباره کوره قوس الکتریک (EAF)			مصالح آهکی			استاندارد	مشخصه
درشت دانه	ریزدانه	فیلر	درشت دانه	ریزدانه	فیلر	درشت دانه	ریزدانه	فیلر		
۲/۷۷۸			۳/۰۵۵			۲/۶۵۶			ASTM C-127	وزن مخصوص (g/cm <sup>3</sup> )
۲/۶۸۳			۲/۹۴۷			۲/۵۸۲			ASTM C-128	وزن مخصوص (g/cm <sup>3</sup> )
---			---			۲/۷۶۸			ASTM D-854	وزن مخصوص (g/cm <sup>3</sup> )
۲/۴۸	۲/۰۹		۱/۲	۱/۸۵		۱/۹	۱/۶			درصد جذب آب
	۱۹/۶			۱۳/۴			۲۰/۴	ASTM C-131		سایش لس آنجلس (%)
	۹۸			۹۸			۸۰	ASTM D-5821		شکستگی در دو وجه (%)
۱۸/۵۵			۱۲/۷			۱۰/۸		ASTM-D3398		شاخص شکل و بافت سطحی مصالح سنگی
	۵۰		۵۲			۴۵		AASHTO: T304-96		تعیین درصد فضای خالی مصالح سنگی ریزدانه متراکم نشده

۳-۱-۱ آنالیز XRF

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 مصالح آهکی و سرباره‌های مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۲ ارائه شده است.

همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، مهم‌ترین فازها و ترکیبات تشکیل‌دهنده مصالح سنگی آهکی، همان طور که از نامش پیداست، اکسید کلسیم است و در مورد سرباره‌های فولاد مبارکه و ذوب آهن (که تشابه زیادی بهم دارد) عبارتند از: اکسید کلسیم (کلسیت)، اکسید آهن، کوارتز، مگنتیت و اکسید

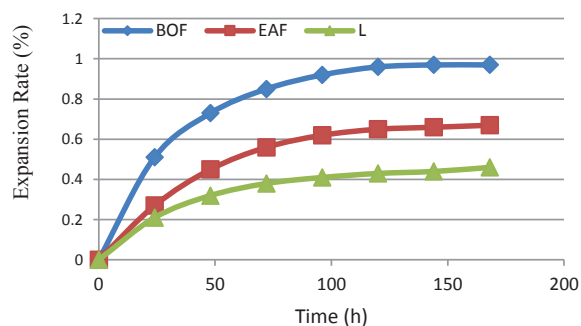
روش XRF یا طیف‌سنجی فلورسانس اشعه X، روشی کمی و کیفی برای تعیین عناصر تشکیل‌دهنده در سنگ‌های معدنی، فلزها، آلیاژها و مانند آن است. اساس کار این روش به این صورت است که هرگاه الکترون‌های دارای انرژی کافی به ماده برخورد کند، پرتو X با طیف پیوسته‌ای از انرژی و طول موج‌ها تولید می‌شود. پرتو X می‌تواند حاصل 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

جدول ۲. نتایج تحلیل XRF مصالح سنگی

درصد افت وزنی در اثر حرارت L.O.I	درصد سولفات‌ها بر حسب SO <sub>3</sub>	درصد اکسید											مصالح آهکی	
		V	MnO	Na <sub>2</sub> O	Sr	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		SiO <sub>2</sub>
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	۲/۳۳۳	۰/۳۳۷	۰/۰۳۴	۱/۵۰۲	۲/۱۱۱	۰/۲۴۸	۵/۰۱۳	۳۸/۸۶۷	۲۵/۷۵۱	۴/۰۷۳	۱۷/۴۶۷	EAF
۲/۳۱	۰/۷۴۹	۰/۶۵۸	۳/۰۳۵	۰/۲۹۵	۰/۰۳۸	۱/۶۹	۲/۴۳۹	۰/۲۹۴	۴/۶۷	۴۵/۱۶۹	۱۵/۵۷۵	۴/۵۹۸	۱۸/۴۶۵	BOF

### 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 تهیه و به مدت یک هفته درون حمام آب ۶۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد، این دما به افزایش سرعت هیدراتاسیون آهک و منیزیم آزاد کمک می‌کند. در این فاصله حجم نمونه‌ها در بازه‌های زمانی ۲۴ ساعته اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری حجم نمونه‌ها، از اختلاف وزن نمونه‌های اشباع با سطح خشک در خارج و داخل آب، استفاده شد. همچنین افزایش حجم آن‌ها با مقایسه حجم اندازه‌گیری شده نمونه‌ها با اندازه‌گیری قبلی، به دست آمد. شکل ۲ تغییرات حجم سه نمونه شامل نمونه با مصالح کاملاً آهکی، نمونه با مصالح کاملاً سرباره‌ای نوع EAF و نمونه با مصالح کاملاً سرباره‌ای نوع BOF را نسبت به زمان نشان می‌دهد.



شکل ۲. تغییرات حجمی نمونه‌های مختلف در طول زمان

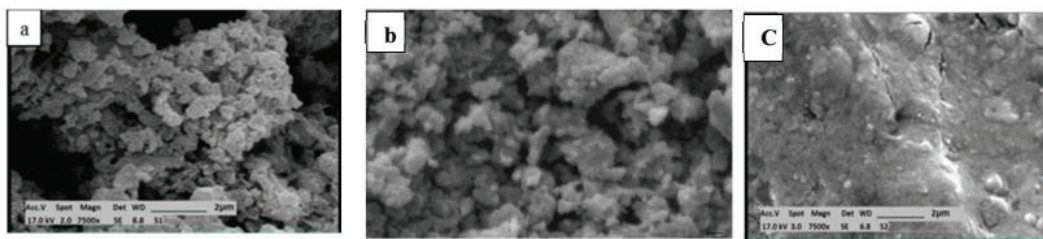
همان گونه‌که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، احتمالاً به دلیل حضور مقداری آهک و منیزیم آزاد باقی مانده در سرباره فولاد، نرخ افزایش حجم مخلوط‌های سرباره‌ای و بخصوص مخلوط

آلومینیم. حضور اکسید آهن و آلومینیوم به همراه دیگر عناصر فلزی در ترکیبات سرباره دلیل اصلی مقاومت زیاد مصالح سرباره‌ای در برابر سایش است. نسبت  $SiO_2/CaO$  نشانه‌ای از خصوصیت بازی مصالح سنگی است و تضمینی برای چسبندگی مناسب مصالح سنگی با قیر، بدین ترتیب که با کاهش این نسبت چسبندگی بهتر صورت می‌گیرد که در هر سه نوع مصالح این نسبت بالاست.

### ۲-۱-۳ بررسی بافت سطحی 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. در این نوع میکروسکوپ، الکترون به سطح نمونه تابیده شده و سپس منعکس می‌گردد و توسط شناساگرها<sup>۳</sup> جمع‌آوری و تبدیل به فوتون نوری می‌گردد تا تصویر مرئی ایجاد شود. به عبارت دیگر این نوع میکروسکوپ فقط از ساختار سطحی تصویر می‌دهد. تصاویر گرفته شده با این روش، در شکل ۱ برای مصالح سنگی آهکی، سرباره نوع EAF و سرباره نوع BOF نشان داده شده است.

در این آزمایش از سنگدانه‌هایی با اندازه اسمی ۷۵/۴ میلی‌متر استفاده شد. بر اساس این تصاویر سرباره‌های فولاد دارای سطح و بافت زبرتر و درشت‌تر در مقایسه با سنگدانه‌های آهکی است. که منجر به پیوستگی بهتری با قیر شده است.



شکل ۱. مقایسه بافت سطحی سنگدانه‌ها با استفاده از تصاویر گرفته شده با میکروسکوپ الکترونی (a: EAF; b: BOF; c: سنگدانه آهکی)

داده شده است. پس از ساخت، وزن مخصوص واقعی نمونه‌های مترکم شده، اندازه گیری شد. استقامت و روانی نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D-6927 با استفاده از دستگاه آزمایش مارشال اندازه گیری گردید که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.

نتایج آزمایش مارشال برای هر ۹ سری مخلوط نشان می‌دهد که بیشترین و کمترین درصد قیر بهینه به ترتیب مربوط به مخلوط حاوی مصالح آهکی و مخلوط با درشت‌دانه کاملاً سرباره‌ای نوع BOF است. 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 مؤثر سنگدانه‌ها، این پارامتر به شکل چشمگیری افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که با جایگزین شدن کل بخش درشت‌دانه مصالح سنگی آهکی با مصالح سرباره‌ای نوع BOF، استقامت مارشال مخلوط آسفالتی بیش از ۴۰ درصد افزایش پیدا کرده است. استقامت مخلوط آسفالتی به دو عامل اصطکاک داخلی و چسبندگی بستگی دارد [Moghadam Nayyeri et al. 2007]. اصطکاک بین دانه‌های

سرباره‌ای نوع BOF 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 بنابراین نمی‌تواند منجر به ایجاد خرابی در مخلوط آسفالتی شود.

#### ۴. طرح اختلاط

نمونه‌های آزمایش مارشال بر اساس استاندارد ASTM D-6926 ساخته شد. به این منظور ابتدا با استفاده از منحنی دما-کندروانی 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 ۱۰۲ میلیمتری به منظور در نظر گرفتن شرایط ترافیکی سنگین، در دمای ۱۳۵ درجه مترکم گردید. در این آزمایش در مجموع ۱۷۰ نمونه با درصد‌های مختلف (۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ درصد درشت دانه) سرباره‌های نوع EAF و BOF ساخته و همچنین نمونه‌ای با مصالح سنگی آهکی با درصد‌های مختلف قیر تهیه گردید. برای نامگذاری نمونه‌های حاوی سرباره‌های نوع EAF و BOF به ترتیب از حروف E و B و برای نمونه‌های حاوی مصالح آهکی از حرف L استفاده شده است. همچنین درصد جایگزینی سرباره بجای درشت دانه مخلوط پس از خط تیره نشان

جدول ۳. خلاصه نتایج طرح اختلاط مارشال

نسبت استقامت مارشال به روانی	VFA	VMA	درصد قیر موثر (Pbe)	درصد جذب شده (Pba)	درصد فضای خالی	وزن مخصوص تئوریک حداکثر (Gmm)	درصد جذب آب	وزن مخصوص توده‌ای (Gmb)	روانی (25) (mm)	استقامت مارشال (kN)	درصد قیر بهینه	نوع نمونه
۶/۴۰	۷۵	۱۵/۱	۴/۲۹	۰/۶۴	۴	۲/۴۷	۰/۲۶	۲/۳۹	۹	۱۴/۴	۴/۹	B-25
۶/۳۰	۷۶	۱۵	۳/۹۷	۱/۱۹	۴	۲/۵۰	۰/۲۷	۲/۴۱	۹/۲	۱۴/۵	۵/۱	B-50
۶/۳۱	۷۴	۱۶/۸	۳/۷۲	۱/۵۶	۴	۲/۵۵	۰/۴۲	۲/۴۵	۹/۷	۱۵/۳	۵/۲	B-75
۷/۵۶	۷۶	۱۶/۷	۳/۶۵	۱/۹۶	۴	۲/۵۷	۰/۲۶	۲/۴۷	۸/۲	۱۵/۵	۵/۵	B-100
۵/۸۵	۷۰	۱۵/۲	۴/۳۴	۰/۳۸	۴	۲/۵۳	۰/۳۶	۲/۴۳	۸	۱۱/۷	۴/۷	E-25
۶/۳۹	۷۴	۱۶/۴	۴/۳۱	۰/۵۸	۴	۲/۶	۰/۱۳	۲/۴۹	۸/۲	۱۳/۱	۴/۹	E-50
۶/۷۷	۷۵	۱۶/۱	۴/۲۰	۰/۸۴	۴	۲/۶۴	۰/۲۵	۲/۵۴	۸/۱	۱۳/۷	۵	E-75
۷/۰	۷۵	۱۷	۴/۱۸	۰/۹۹	۴	۲/۶۷	۰/۲۶	۲/۵۷	۸	۱۴	۵/۲	E-100
۵/۲	۷۰	۱۴/۶	۴/۳۴	۰/۲۶	۴	۲/۴۷	۰/۵۳	۲/۳۷	۸/۳	۱۰/۸	۴/۶	L

## بررسی تأثیر پیرشدگی آزمایشگاهی دراز مدت بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی ...

شد. آزمایش خستگی در حالت تنش ثابت با فرکانس بارگذاری ۱۰ هرتز در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. شکل موج بارگذاری سینوسی انتخاب شد زیرا در شکل بارگذاری نیمه سینوسی نحوه تغییر شکل ورودی با تغییر شکل واقعی نمونه مطابقت ندارد [Mamlouk et al. 2012]. سه سطح تنش ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ کیلوپاسکال برای نمونه‌ها در حالت پیرنشده و سه سطح تنش ۱۱۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۴۰۰ برای نمونه‌های پیر شده انتخاب شد. در هر سطح تنش، آزمایش بر روی سه نمونه تکرار و میانگین آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. وزن مخصوص تیرچه‌ها قبل از انجام آزمایش به منظور اطمینان از مطابقت درصد فضای خالی نمونه‌های مختلف بر اساس استاندارد و همچنین تقسیم نمونه‌ها به دو گروه برای پیرکردن آن‌ها، تعیین گردید. جهت پیر کردن نمونه‌ها از روش استاندارد AASHTO PP2 استفاده شد. بر طبق این روش، تیرچه‌های متراکم شده در گرمخانه در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲۰ ساعت به منظور شبیه سازی پیرشدگی دراز مدت مخلوط آسفالتی قرار داده شد. تمامی نمونه‌ها به مدت ۶ ساعت در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد در داخل کابین آزمایش قبل از انجام آزمایش خستگی، قرارداده شد.

### ۶. نتایج آزمایش خستگی

در این مقاله، جهت بررسی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی، از دو روش که یکی براساس سختی و دیگری براساس انرژی است به شرح ذیل استفاده شده است:

الف- روش Rowe and Bouldin: در این روش با ترسیم نسبت سختی در برابر تعداد سیکل‌های بارگذاری، عمر خستگی را می‌توان با ازای تعداد سیکلی که حداکثر مقدار نسبت سختی را نتیجه می‌دهد تعیین نمود [Rowe and Bouldin, 2000].

ب- روش RDEC: این روش که برای روش‌های مختلف آزمایش خستگی و انواع مختلف بارگذاری معتبر است به شرح

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 افزایش 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 [Tavassoli, 1993]. مفهوم دیگری که بعضی از مواقع برای ارزیابی مخلوط‌های آسفالتی بکار می‌رود، شاخص سختی مارشال است که عبارت است از نسبت استقامت مارشال به روانی آن که مقداری تجربی برای سختی مخلوط آسفالتی است. مقادیر بالاتر شاخص سختی مارشال نشان دهنده مخلوط سخت‌تر بوده و حاکی از آن است که احتمالاً مخلوط دارای مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل دائم است. همان گونه که ملاحظه می‌شود، پتانسیل پایداری نمونه‌های حاوی سرباره ذوب آهن بیشتر از سرباره فولاد مبارکه بوده و با افزایش درصد جایگزینی سرباره، این ویژگی شدت می‌یابد. این نتیجه گویای این حقیقت است که استفاده از سرباره ذوب آهن با توجه به شبیه سازی شرایط ترافیکی سنگین جاده‌های کشور و جلوگیری از بروز خرابی شیار افتادگی جای چرخ مفید خواهد بود.

### ۵. آزمایش خستگی

روش‌های مختلفی به منظور ارزیابی خستگی مخلوط‌های آسفالتی ارائه شده است که در این تحقیق از روش آزمایش تیرچه خمشی جهت ارزیابی رفتار خستگی استفاده شده است. برای انجام این آزمایش تعداد ۴۵ دال آسفالتی تهیه و با استفاده از آره مخصوص برش آسفالت به ابعاد  $380 \times 63 \times 50$  میلیمتر برش داده

معنی دار است، اما افزایش سختی در مورد مخلوط‌های حاوی سرباره BOF در تمامی نمونه‌ها معنی دار است. این افزایش در مورد نمونه B-100 حدود ۵۰٪ است. افزایش سختی اولیه نمونه‌ها به دلیل شکستگی بیشتر و شاخص شکل و بافت سطحی بیشتر مصالح سرباره‌ای در قیاس با نمونه شاهد است. شکل ۴ سختی اولیه نمونه‌ها را در حالت پیرشده نشان می‌دهد. همچنین شکل ۵ نسبت سختی اولیه در حالت پیرشده به پیر نشده را ارائه می‌کند. همان طور که در این اشکال ملاحظه می‌شود، تغییرات سختی اولیه نمونه‌های پیر شده (حاوی درصد‌های مختلف سرباره) ناچیز است و از منظر آماری، معنی دار نیست. نسبت سختی اولیه نمونه‌های پیرشده به نمونه‌های پیر نشده نشان می‌دهد که بیشترین نسبت، مربوط به نمونه شاهد و نمونه E-25 است. هر چقدر این نسبت بیشتر باشد نشان دهنده سخت شدگی بیشتر نمونه در اثر پیر شدگی است. به بیان دیگر بیشترین حساسیت نسبت به پیر شدگی متعلق به نمونه شاهد (نمونه حاوی مصالح آهکی) و نمونه E-25 است و با افزایش درصد سرباره این نسبت کاهش یافته است.

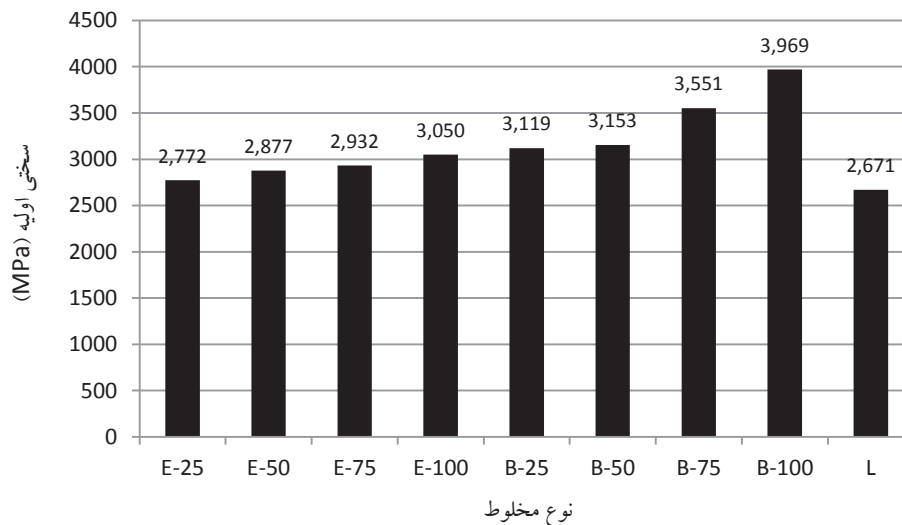
زاویه اختلاف فاز بین نیرو و تغییر شکل، معیاری از طبیعت ویسکوز یا الاستیک مواد است. شکل ۶ مقادیر میانگین زاویه

ذیل است: [Shen, 2000 and 2007, Ghuzlan and Carpen-ter, 2000, 2006, and Daniel, 2004

رویکرد جدیدی بر اساس روش‌های انرژی تلف شده مطرح گردید که بطور مستقیم به بررسی میزان انرژی تلف شده در ارتباط با ایجاد خرابی در حین بارگذاری می‌پردازد. در این روش معیاری به نام  $PV^0$  مطرح گردید که عبارت است از درصد تقریباً ثابتی از انرژی ورودی به نمونه در هر سیکل که بطور مستقیم صرف ایجاد خرابی (ایجاد ترک و گسترش آن) می‌شود [Shen and Carpenter, 2005]. هر چه مقدار PV کمتر باشد به این معنی است که ترک با سرعت کمتری در حال پیشروی است که نتیجه‌ی آن افزایش عمر خستگی است (عمر خستگی ارتباط مستقیمی با سرعت گسترش ترک‌ها در حین بارگذاری سیکلی دارد). در این پژوهش نیز از رابطه‌ی پیشنهادی این محققین (رابطه ۱) در محاسبه‌ی PV استفاده شد.

$$PV = \frac{1 - (1 + \frac{100}{Nf_{50}})^k}{100} \quad (1)$$

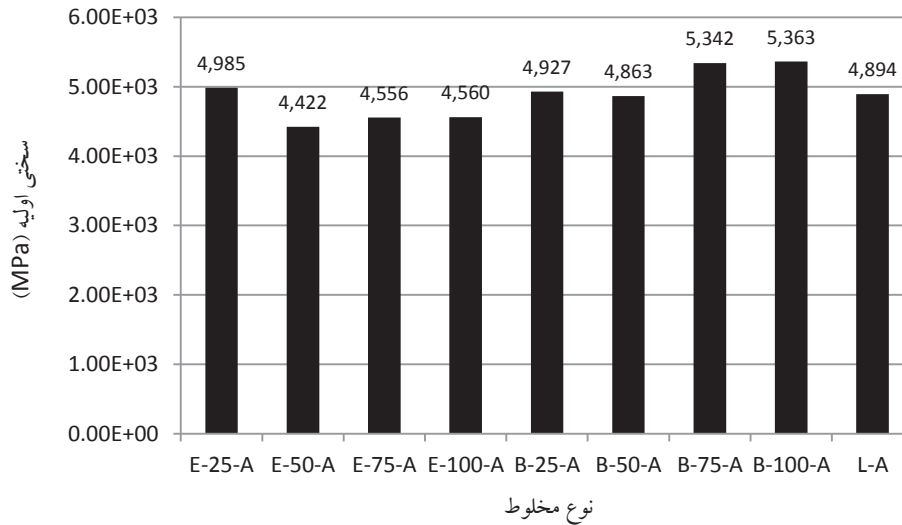
در شکل ۳ میانگین سختی اولیه نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف سرباره نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزودن سرباره نوع EAF، سختی اولیه نسبت به نمونه شاهد تغییر چندانی نشان نمی‌دهد و فقط برای نمونه E-100



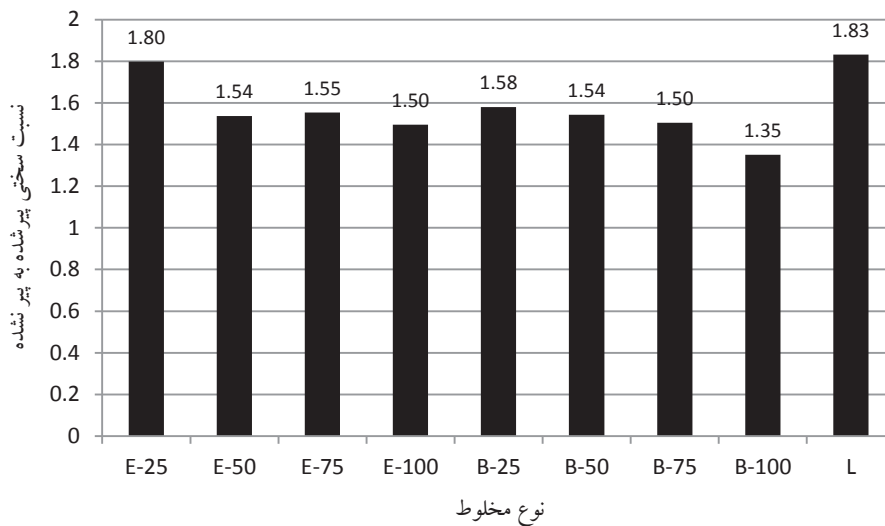
شکل ۳. میانگین سختی اولیه نمونه‌های پیر نشده



بررسی تأثیر پیرشدگی آزمایشگاهی دراز مدت بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی ...



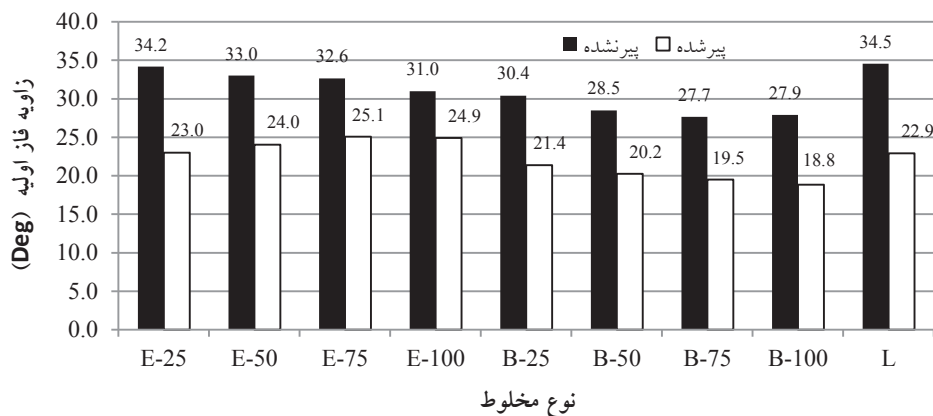
شکل ۴. میانگین سختی اولیه نمونه‌های پیر نشده



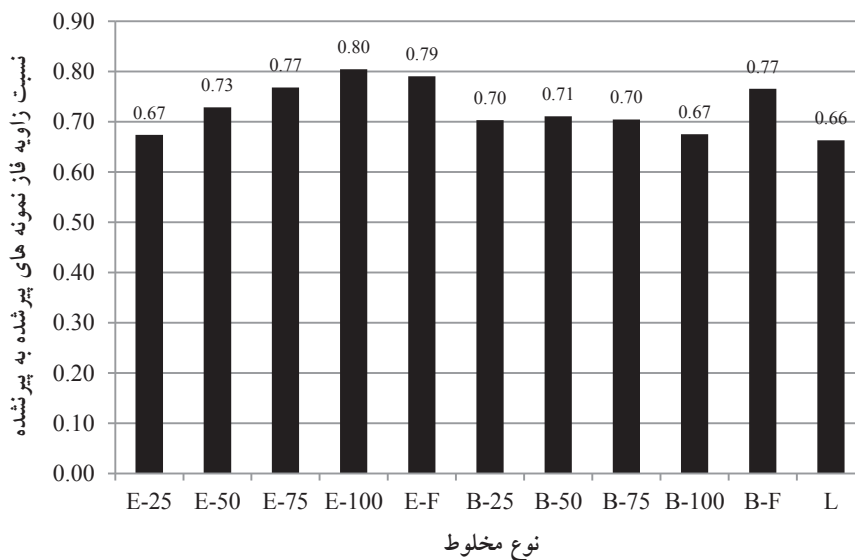
شکل ۵. نسبت سختی اولیه نمونه‌های پیر شده به پیر نشده

به رفتار الاستیک‌تری نسبت به نمونه‌های شاهد می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که زاویه فاز نمونه‌ها در حالت پیر شده نسبت به حالت پیر نشده، کاهش قابل ملاحظه‌ای یافته است (هرچند تغییرات زاویه فاز نمونه‌های مختلف چندان زیاد نیست). مقادیر زاویه اختلاف فاز کمتر در مخلوط‌های پیر شده، نشان دهنده رفتار الاستیک‌تر نسبت به مخلوط‌های پیر نشده است. دلیل این رفتار را می‌توان در اکسایش مولکول‌های قیر و نیز تصعید مواد فرار موجود در قیر بررسی کرد. با توجه به نتایج به دست آمده،

اختلاف فاز بین مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر متفاوت سرباره را در شرایط پیر شده و پیر نشده نشان می‌دهد. به طور متوسط مخلوط‌های حاوی هر دو نوع سرباره در قیاس با مخلوط شاهد در حالت پیر نشده، زاویه اختلاف فاز کمتری دارد. به این مفهوم که افزودن سرباره باعث افزایش خاصیت الاستیک مخلوط آسفالتی می‌شود. کاهش زاویه اختلاف فاز مخلوط‌های حاوی سرباره را می‌توان به قفل و بست بهتر سنگدانه‌ها و همچنین افزایش چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی مرتبط دانست که منتج



شکل ۶. مقادیر زاویه اختلاف فاز نمونه‌های مختلف در دو حالت پیر شده و پیر نشده



شکل ۷. نسبت زاویه فاز نمونه‌های پیر شده به پیر نشده

نتایج به دست آمده از زاویه فاز نمونه‌ها با نتایج سختی خمشی اولیه نمونه‌ها نیز مطابقت دارد. به نحوی که می‌توان نتیجه گرفت استفاده از سرباره می‌تواند منجر به کاهش حساسیت در برابر پیرشدگی مخلوط‌های آسفالتی گردد.

جدول ۴ میانگین عمرخستگی نمونه‌ها را در سطوح مختلف تنش در دو حالت پیر شده و پیر نشده نشان می‌دهد. همان طور که از نتایج آزمایش خستگی مشاهده می‌شود، در حالت پیر نشده با افزایش درصد هر دو نوع سرباره، عمر خستگی افزایش می‌یابد. حداکثر عمر خستگی مربوط به نمونه E-100 است که این

به نظر می‌رسد که این رفتار با شدت کمتری برای مخلوط‌های حاوی سرباره برقرار است و می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد سرباره، تأثیر پیرشدگی در تغییر رفتار الاستیک نمونه‌ها در شرایط پیرشدگی کمرنگ‌تر می‌شود. در شکل ۷ نسبت زاویه فاز نمونه‌ها در شرایط پیر شده به پیر نشده نشان داده شده است. کمترین نسبت مربوط به نمونه شاهد و بیشترین نسبت مربوط به نمونه‌های حاوی درصد‌های زیاد سرباره نوع EAF می‌باشد به نحوی که این نسبت برای مخلوط E-100 بیش از ۲۰٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. همان طور که ملاحظه می‌شود

بررسی تأثیر پیرشدگی آزمایشگاهی دراز مدت بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی ...

شد. جدول ۵ مقادیر (PV) نمونه‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف سرباره را به ازای سطوح تنش مختلف، در شرایط پیرشده و پیر نشده نشان می‌دهد.

بررسی مقادیر PV نشان می‌دهد که برای تمامی نمونه‌ها با افزایش میزان تنش یا به عبارت دیگر با افزایش میزان تغییر شکل‌های خمشی، ثابت خرابی (PV) افزایش می‌یابد. به این مفهوم که گسترش ریز ترک‌ها با سرعت بیشتری صورت می‌گیرد. شدت افزایش ثابت خرابی بسته به نوع مخلوط و شرایط پیرشدگی متغیر است. به عبارت دیگر، ثابت خرابی وابستگی شدیدی به میزان تغییر شکل‌های خمشی دارد. نتایج نشان می‌دهد که در حالت پیر نشده، نمونه‌های حاوی سرباره EAF و BOF دارای مقدار (PV) کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد در تمام سطوح تنش است. بنابراین می‌توان چنین استنباط کرد که مخلوط‌های حاوی سرباره در برابر گسترش ریز ترک‌ها مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. بیشترین مقدار (PV) مربوط به نمونه‌های شاهد بوده و نمونه‌ی E-100 کمترین مقدار (PV) را به خود اختصاص داده است. با افزایش میزان سرباره روند نزولی در میزان ثابت خرابی حاصل می‌شود. نتایج ثابت خرابی نمونه‌های حاوی

افزایش عمر خستگی می‌تواند ناشی از افزایش سختی و همچنین ممکن است به دلیل چسبندگی بهتر مصالح سرباره‌ای با قیر باشد که منجر به تقویت چسبندگی در محل تماس قیر و مصالح سنگی و در نتیجه جلوگیری از تغییر شکل و گسترش ترک خوردگی خواهد شد. در حالت پیر شده، وضعیت متفاوت است و افزودن سرباره تأثیر چندانی در افزایش عمر خستگی ندارد که این مطلب با نتایج به دست آمده از سختی اولیه نمونه‌ها مطابقت دارد، زیرا در حالت تنش ثابت، با افزایش سختی اولیه نمونه‌ها، عمر خستگی افزایش می‌یابد، بنابراین با افزایش سختی نمونه شاهد و نمونه‌های با درصد کمتر سرباره، عمر خستگی این نمونه‌ها نیز افزایش یافته است. این یافته‌ها می‌تواند در جهت تایید فرضیه مطرح شده [Bell and Sosnovske, 1994]، یعنی با افزایش چسبندگی قیر و مصالح سنگی، پیرشدگی کاهش می‌یابد، باشد.

همان طور که ذکر شد می‌توان از مفهوم نسبت تغییرات انرژی تلف شده (RDEC) جهت توجیه عمر خستگی نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف سرباره استفاده نمود. به همین جهت با استفاده از روش انرژی، نسبت تغییر انرژی تلف شده (RDEC) هر نمونه برای تمام سیکل‌ها محاسبه گردید و ثابت خرابی PV محاسبه

جدول ۴. میانگین عمر خستگی نمونه‌های پیر شده و پیر نشده بر اساس روش Rowe and Bouldin

نوع مخلوط	پیر نشده				پیر شده	
	سطح تنش (KPa)					
	۱۰۰۰	۱۲۰۰	۱۴۰۰	۸۰۰	۱۰۰۰	۱۲۰۰
<b>E-25</b>	۲۷۰۴۳	۹۰۶۱۷	۷۸۹۲۶۰	۴۷۳۴۰	۴۲۷۱۳۳	۱۴۱۷۴۹۷
<b>E-50</b>	۲۷۵۱۷	۱۲۴۸۵۷	۱۰۹۹۲۱۷	۵۳۰۲۷	۱۵۷۸۳۸	۱۳۲۵۳۶۳
<b>E-75</b>	۳۱۷۹۳	۱۲۹۷۰۷	۱۶۰۶۰۶۳	۶۱۰۱۳	۳۵۰۳۹۰	۱۴۹۰۹۸۷
<b>E-100</b>	۶۹۸۴۷	۳۳۲۵۷۷	۳۳۴۹۹۶۷	۵۳۳۷۳	۴۰۳۴۴۷	۱۷۷۷۲۰۰
<b>B-25</b>	۱۶۳۰۰	۸۲۰۱۳	۸۰۴۹۳۰	۲۲۶۸۳	۲۷۲۸۰۰	۱۳۹۵۶۷۷
<b>B-50</b>	۲۰۸۹۷	۱۰۰۸۰۷	۱۱۵۸۳۰۰	۲۷۰۲۷	۲۷۲۲۹۷	۱۳۴۴۵۰۳
<b>B-75</b>	۳۱۸۸۳	۱۲۸۲۷۷	۱۲۰۹۱۷۷	۳۸۹۸۳	۳۸۴۸۱۷	۱۵۵۰۸۳۳
<b>B-100</b>	۴۵۱۲۰	۱۵۸۸۳۰	۱۵۰۸۶۶۷	۴۹۶۶۰	۴۵۳۹۹۰	۱۵۸۵۵۱۳
<b>L</b>	۱۵۲۶۰	۶۹۹۰۳	۶۸۸۱۲۷	۲۱۹۴۷	۲۶۶۵۳۰	۱۳۹۰۵۶۳

جدول ۵. مقادیر PV برای نمونه‌های پیر شده و پیر نشده

پیر شده		پیر نشده		نوع مخلوط		
سطح تنش (kPa)						
۱۰۰۰	۱۲۰۰	۱۴۰۰	۸۰۰	۱۰۰۰	۱۲۰۰	
8.05E-08	4.28E-07	7.35E-06	1.03E-07	2.06E-06	1.2E-05	<b>E-25</b>
7.68E-08	1.48E-06	5.21E-06	8.48E-08	1.34E-06	1.02E-05	<b>E-50</b>
1.11E-07	5.84E-07	6.33E-06	3.75E-08	1.59E-06	6.98E-06	<b>E-75</b>
5.63E-08	4.95E-07	6.56E-06	1.38E-08	4.3E-07	3.68E-06	<b>E-100</b>
6.38E-08	9.39E-07	1.26E-05	1.07E-07	2.66E-06	1.8E-05	<b>B-25</b>
7.37E-08	1.05E-06	1.25E-05	6E-08	1.8E-06	1.46E-05	<b>B-50</b>
5.84E-08	7.55E-07	8.58E-06	6.72E-08	1.45E-06	1.21E-05	<b>B-75</b>
8.05E-08	4.71E-07	7.65E-06	4.85E-08	7.2E-07	9.27E-06	<b>B-100</b>
1.45E-07	8.98E-07	2E-05	8.88E-08	3.06E-06	1.52E-05	<b>L</b>

سطح تنش ۸۰۰ کیلوپاسکال به ازای افزودن ۵۰٪ و یا بیشتر برای سرباره BOF، مشاهده شد و در دو سطح تنش دیگر به ازای افزودن ۷۵٪ و یا بیشتر سرباره، تفاوت معنی دار است. نتایج تحلیل‌های آماری بر روی نمونه‌های پیر شده نشان داد که تفاوت معنی داری در عمر خستگی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی شاهد وجود ندارد.

به منظور ارائه مدل‌های خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف سرباره‌های BOF و EAF، از یک سری تحلیل رگرسیونی جهت تعیین ضرایب مدل استفاده شد. با بکارگیری معادلات رگرسیونی به کمک نرم افزار آماری SPSS، مدل‌هایی جهت پیش بینی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره، ارائه گردید. جهت توسعه این مدل‌ها از عمر خستگی به دست آمده از روش Rowe and Boulidin استفاده شده است. مدل‌های پیش بینی عمر خستگی در جدول ۷ ارائه شده است.

همان طور که در جدول ۷ ملاحظه می‌شود، ضریب همبستگی بسیار خوبی برای مدل‌های برازش داده شده به داده‌های عمر خستگی، به دست آمده است هرچند در مورد نمونه‌های پیر شده، به دلیل پراکندگی و نامنظمی بیشتر نتایج عمر خستگی، این ضریب مقداری کمتر می‌باشد. مقایسه ضرایب این مدل‌ها

مقادیر مختلف سرباره در شرایط پیرشدگی دراز مدت تسریع یافته آزمایشگاهی، نشان‌دهنده روند مشابهی با حالت پیر نشده است.

## ۶-۱ تحلیل آماری نتایج آزمایش خستگی و مدلسازی

با استفاده از نتایج آزمایش خستگی و به منظور بررسی تأثیر حضور سرباره بر رفتار خستگی مخلوط آسفالتی، تحلیل‌های آماری بر روی این داده‌ها انجام شد. هدف از انجام تحلیل‌های آماری، بررسی این موضوع است که تغییر در پارامترهای آزمایش خستگی ناشی از خطاهای آزمایشگاهی است و یا به دلیل حضور سرباره است. به این منظور تحلیل آماری ANOVA در سطح اطمینان ۹۵٪ بر روی نتایج آزمایش خستگی با استفاده از نرم افزار SPSS انجام شد. به این ترتیب که از این آزمون برای سنجش تأثیر تغییر درصد‌های مختلف سرباره بر پارامترهای آزمایش خستگی استفاده گردید. نتایج تحلیل‌های آماری (جدول ۶) بر روی عمر خستگی نمونه‌های پیر نشده نشان داد که در تمامی سطوح تنش، تفاوت در مقادیر عمر خستگی نسبت به نمونه شاهد برای نمونه‌های حاوی ۵۰٪ و یا بیشتر برای سرباره نوع EAF، معنی دار است. به عبارت دیگر تفاوت در مقادیر عمر خستگی ناشی از افزودن سرباره EAF است. اما در مورد سرباره BOF، تفاوت معنی دار در

بررسی تأثیر پیرشدگی آزمایشگاهی دراز مدت بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی ...

جدول ۶. خلاصه نتایج تحلیل‌های آماری

نمونه‌های پیر شده			نمونه‌های پیر نشده		
توضیحات	P-value	سطح تنش (kPa)	توضیحات	P-value	سطح تنش (kPa)
در تمام حالات	۰/۳۰۶۴۸۲	۱۴۰۰	به ازای افزودن ۵۰٪ سرباره و بیشتر	۰/۰۰۰۴۹۳	۱۲۰۰
در تمام حالات	۰/۲۴۶۷۲۷	۱۲۰۰	به ازای افزودن ۵۰٪ سرباره و بیشتر	۰/۰۲۰۲۳۵	۱۰۰۰
در تمام حالات	۰/۹۴۴۳۰۵	۱۱۰۰	به ازای افزودن ۵۰٪ سرباره و بیشتر	۰/۰۰۰۰۰	۸۰۰
در تمام حالات	۰/۱۰۰۲۴۵	۱۴۰۰	به ازای افزودن ۷۵٪ سرباره و بیشتر	۰/۰۱۱۴۳۷	۱۲۰۰
در تمام حالات	۰/۱۴۴۹۹۸	۱۲۰۰	به ازای افزودن ۷۵٪ سرباره و بیشتر	۰/۰۰۰۳۷۷	۱۰۰۰
در تمام حالات	۰/۹۰۰۷۴	۱۱۰۰	به ازای افزودن ۵۰٪ سرباره و بیشتر	۰/۰۱۹۷۹۳	۸۰۰

جدول ۷. مدل‌های خستگی برای مخلوط‌های حاوی سرباره در دو حالت پیرشده و پیرنشده

P-Value	R <sup>2</sup>	$a\left(\frac{1}{\sigma}\right)^c$	نوع مخلوط
۰/۰۰۰	۰/۹۲۴	$4.969E32(\sigma)^{-9.291}p^{0.24}$	پیرنشده) EAF مخلوط‌های حاوی سرباره
۰/۰۰۰	۰/۸۹۷	$3.511E48(\sigma)^{-14.016}p^{0.112}$	پیرشده) EAF مخلوط‌های حاوی سرباره
۰/۰۰۰	۰/۶۹۷	$7.786E32(\sigma)^{-9.349}p^{0.163}$	پیرنشده) BOF مخلوط‌های حاوی سرباره
۰/۰۰۰	۰/۹۵۸	$2.345E54(\sigma)^{-15.192}p^{0.106}$	پیرشده) BOF مخلوط‌های حاوی سرباره

P: درصد سرباره

افزایش نسبت مصالح سرباره‌ای در ترکیب مصالح سنگی، استقامت مارشال نمونه‌های آسفالتی افزایش یافت. به گونه‌ای که با جایگزین شدن کل بخش درشت‌دانه مصالح سنگی آهکی با مصالح سرباره‌ای نوع BOF، استقامت مارشال مخلوط آسفالتی بیش از ۴۰ درصد افزایش پیدا کرده است.

- نتایج آزمایش خستگی نشان داد که مخلوط‌های حاوی سرباره در حالت پیر نشده، عمر خستگی بیشتری نسبت به مخلوط شاهد دارد. بیشترین عمر خستگی مربوط به نمونه E-100 بود. یکی از دلایل افزایش عمر خستگی می‌تواند شکستگی و زاویه دار بودن مصالح سرباره‌ای باشد که باعث بهبود قفل و بست بهتر مصالح و فراهم کردن زاویه اصطکاک داخلی بیشتر که می‌تواند باعث کاهش نرخ گسترش ترک و در نتیجه افزایش عمر خستگی شود.

- عمر خستگی نمونه‌ها در حالت پیر شده تغییر چندانی نشان

در دو حالت پیرشده و پیرنشده، نشان می‌دهد که ضریب توانی سطح تنش در مدل‌های مربوط به هر دو نوع سرباره، بسیار مشابه به دست آمده است و نشان می‌دهد که روند کاهش عمر خستگی با افزایش سطح تنش برای هر دو نوع سرباره تقریباً یکسان خواهد بود. همچنین مقایسه این ضرایب در حالت پیرشده نتایج مشابهی را به دست می‌دهد.

## ۷. نتیجه گیری

با بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق بر روی مخلوط‌های آهکی و سرباره‌ای به طور خلاصه می‌توان نتایج را به ترتیب ذیل جمع‌بندی کرد:

- نتایج آزمایش مارشال نشان داد که بیشترین و کمترین درصد قیر بهینه به ترتیب مربوط به مخلوط حاوی مصالح آهکی و مخلوط با درشت‌دانه کاملاً سرباره‌ای نوع BOF است. با

## ۹. مراجع

- توسلی، حمید (۱۳۷۲) "طرح و کنترل بتن آسفالتی گرم"، چاپ اول، انتشارات قلم.

- ستاری، محسن (۱۳۸۳) "فعالیت مجتمع فولاد مبارکه به منظور فرآوری و کاربرد سرباره"، اولین سمینار فرآوری و کاربردهای سرباره قوس الکتریک، پژوهشکده فولاد دانشگاه صنعتی اصفهان، ص. ۱۹-۲۴.

- شکرچی زاده، محمد، منتظر، شبنم، عالی زاده، روح الله و چینی، مهدی (۱۳۸۳) "ارزیابی آزمایشگاهی مشخصات روبراهای فولادی برای استفاده به عنوان سنگدانه در ساخت روسازی آسفالتی"، دومین همایش قیر و آسفالت ایران، تهران، ص. ۶۹۴-۶۸۲.

- طباطبایی، نادر و بخشی طوسی، پیام (۱۳۸۳) "بررسی کاربرد سرباره فولاد در مخلوط های آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای"، دومین همایش قیر و آسفالت ایران، ۴-۲ آذر، ص. ۳۰۲-۳۱۱.

- معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور (۱۳۹۰) "نشریه شماره ۲۳۴، آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران"، ویرایش اول.

-مقدم، محمدرضا (۱۳۸۶) "تاثیر کاربرد ماسه روان بر خواص مخلوط های آسفالتی روسازی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی، مشهد

-مقدم نیری، محمدرضا، جلیلی قاضی زاده، مرتضی و محمدرضا مقدم، ابوالفضل (۱۳۸۶) "کاربرد سرباره فولاد در پروژه های راه سازی"، اولین سمینار فرآوری و کاربردهای سرباره قوس الکتریک، پژوهشکده فولاد دانشگاه صنعتی اصفهان، ص. ۱۲۷-۱۳۴.

نمی دهد که این امر به دلیل سخت شدگی بیشتر نمونه های است که درصد کمتری سرباره دارد. سختی بیشتر این نمونه ها منجر به افزایش عمر خستگی در حالت تنش ثابت می شود. این یافته در جهت تایید فرضیه ای است که بیان می دارد "چسبندگی بهتر بین قیر و مصالح سنگی، می تواند منجر به کاهش حساسیت در برابر پیر شدگی گردد".

- تحلیل های آماری بر روی نتایج آزمایش خستگی نشان داد که در حالت پیر نشده در تمامی سطوح تنش، تفاوت در مقادیر عمر خستگی نسبت به نمونه شاهد برای نمونه های حاوی ۵۰٪ و یا بیشتر برای سرباره نوع EAF، معنی دار است به بیان دیگر تفاوت در مقادیر عمر خستگی ناشی از افزودن سرباره EAF است اما در مورد سرباره BOF، تفاوت معنی دار در سطح تنش ۸۰۰ کیلوپاسکال به ازای افزودن ۵۰٪ و یا بیشتر برای سرباره BOF، مشاهده شد و در دو سطح تنش دیگر به ازای افزودن ۷۵٪ و یا بیشتر سرباره، تفاوت معنی دار است. نتایج تحلیل های آماری بر روی نمونه های پیر شده نشان داد که تفاوت معنی داری در عمر خستگی نمونه ها نسبت به نمونه شاهد وجود ندارد.

- مدل های ارائه شده جهت پیش بینی عمر خستگی مخلوط های آسفالتی حاوی درصد های مختلف سرباره نشان داد که در مورد نمونه های پیر نشده به ازای درصد های مختلف هر دو نوع سرباره، ضریب همبستگی بسیار بالایی وجود دارد ولی در مورد نمونه های پیر شده، این ضریب اندکی کمتر به دست آمد.

## ۸. پی نوشت ها

- 1- Basic Oxygen Furnace Slag
- 2- Electric Arc Furnace Slag
- 3- Detectors
- 4 - Ratio of Dissipated Energy Change
- 5 - Plateau Value

gineering and Technology, 22.

-Kavussi, A. and Modarres, A. (2010) "Laboratory fatigue models for recycled mixes with bitumen emulsion and cement". Construction and Building Materials; 24: pp.1920-7.

-Mamlouk, M., Souliman M. and Zeiada, W. (2012) "Optimum testing conditions to measure hma fatigue and healing using flexural bending test", TRB Annual Meeting.

-Moreno, F. and Rubio, M. C. (2013) "Effect of aggregate nature on the fatigue-cracking behavior of asphalt mixes" Materials and Design 47; pp.61-67.

-NSA (2001) "Steel slag, a premier construction aggregate.

-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.

-Pasetto, M., Baldo, N. (2010) "Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags", J. Hazardous Materials; 181: pp.938-48.

-Pasetto, M., Baldo, N. (2012) "Fatigue behavior characterization of bituminous mixtures made with reclaimed asphalt pavement and steel slag", SIIV - 5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures, Procedia - Social and Behavioral Sciences; 53, pp.297 - 306.

-Rowe, G. M. and Bouldin, M. G. (2000) "Improved techniques to evaluate the fatigue resistance of asphaltic mixtures, Proceedings of 2nd Euroasphalt and Eurobitume Congress, Barcelona, Spain.

-Shen, S. H., Airey, G. D., Carpenter, S. H. and Huang, H. (2006) "A dissipated energy approach to fatigue evaluation". Road Mater Pavement; 7(1): pp.47-69.

-Shen S. and Carpenter, S. H. (2007) "Development of an asphalt fatigue model based on energy principles". Journal of the Association of the Asphalt Paving Technologists (AAPT), Vol.76, pp. 525-573.

-Xie, J., Wu, S., Lin, J., Cai, J., Chen, Z. and Wei, W.

- یوزباشی‌زاده، حسین، فراهانی، محمد، (۱۳۸۶) "انواع سرباره و بررسی خواص و کاربرد آنها"، اولین سمینار فرآوری و کاربردهای سرباره قوس الکتریک، پژوهشکده فولاد دانشگاه صنعتی اصفهان، ص. ۹-۱.

-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.

-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.

-Bell, C. A. (1989) "Summary report on ageing of asphalt aggregate systems. project a-003a (Performance related testing and measurement of asphalt-aggregate interactions and mixtures)", Strategic Highway Research Program, National Research Centre, Washington, USA.

-Bell, C. A. and Sosnovske, D. (1994) "Ageing: binder validation", Strategic Highway Research Program, National Research Centre, Washington, USA.

-Daniel J. S., Bisirri, W. and Kim Y. R. (2004) "Fatigue evaluation of asphalt mixtures using dissipated energy and viscoelastic continuum damage approaches" J. Assoc. Asphalt Paving Tech., 73, pp.557-83.

-Ghuzlan, K. A. and Carpenter, S. H. (2000) "Energy-derived, damage-based failure criterion for fatigue testing". Transport Res Rec, 1723, pp.141-149.

-Ghuzlan, K. A. and Carpenter, S. H. L. (2006) "Fatigue damage analysis in asphalt concrete mixtures using the dissipated energy approach". Canadian Journal of Civil Engineering, 33(7), pp.890-901.

-Hamzah, M. O. and Teoh, C. Y. (2008) "Effects of temperature on resilient modulus of dense asphalt mixtures incorporating steel slag subjected to short term oven ageing", World Academy of Science, En-

امیر کاووسی، مرتضی جلیلی قاضی زاده، ابوالفضل حسنی

(2012) "Recycling of basic oxygen furnace slag in asphalt mixture: material characterization and moisture damage investigation", *Construction and Building Materials*, 36, pp 467–474.

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.