

## بررسی و مقایسه خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره‌های کوره قوس الکتریک و کوره اکسیژنی

امیر کاووسی\*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
مرتضی جلیلی قاضی زاده، استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین قوچان  
ابوالفضل محمدزاده مقدم، استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد  
سید علی ضیائی، مربی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

E-mail: kavussia@modares.ac.ir

دریافت: ۹۴/۰۱/۲۹ - پذیرش: ۹۴/۰۵/۲۵

### چکیده

از آنجا که در تحقیقات گذشته در زمینه استفاده از سرباره، مقایسه‌ای بین انواع سرباره تولیدی کارخانه‌های فولاد ایران صورت نگرفته، در این تحقیق، به منظور بررسی و مقایسه خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره فولادی، بخش درشت-دانه مصالح آهکی به ترتیب با ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد سرباره‌های کوره قوس الکتریک (EAF) و کوره اکسیژنی (BOF) جایگزین گردید. پس از بررسی خصوصیات مصالح سنگ‌دانه‌ای آهکی و سرباره‌های فولادی با استفاده از تجهیزات پراش اشعه ایکس (XRF) و میکروسکوپ الکترونی (SEM)، با استفاده از روش طرح اختلاط مارشال، درصد قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف هر دو نوع سرباره تعیین گردید. سپس، خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف سرباره با استفاده از آزمایش‌های ضریب برجهنگی در دماهای مختلف و آزمایش کشش غیرمستقیم در دو حالت خشک و اشباع مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از سرباره می‌تواند منجر به بهبود معنی‌دار خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی گردد. همچنین، حساسیت رطوبتی مخلوط‌های حاوی هر دو نوع سرباره نسبت به نمونه شاهد کمتر بود.

واژه‌های کلیدی: سرباره فولاد، ضریب برجهنگی، مقاومت کششی، چقرمگی، حساسیت رطوبتی

### ۱. مقدمه

بر طبق آمار سال ۱۳۹۳، سالانه بیش از ۲ میلیون تن سرباره فولاد در سه کارخانه عمده فولادسازی کشور (فولاد اهواز، فولاد مبارکه و ذوب آهن اصفهان) تولید می‌شود. 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 (شکرچی زاده و همکاران، ۱۳۸۳). سرباره

با استفاده از مصالح دورریز و بازیافتی می‌توان از مصرف مصالح سنگی مورد نیاز برای احداث راه‌ها از کوه‌ها و یا بستر رودخانه‌ها جلوگیری کرد. سرباره‌های فولادی که به‌عنوان محصولات جانبی صنایع فولاد شمرده می‌شوند، یکی از این مصالح است (مقدم نیری و همکاران، ۱۳۸۶).

ایالتی اورگان، به منظور بررسی استفاده از ۱۰۰ هزار تن تولید سالانه سرباره نوع EAF در این ایالت، در مخلوط آسفالت HMA ارائه گردید. در این تحقیق، ۳۰٪ سرباره فولاد به عنوان جایگزین برای مصالح درشت‌دانه در نظر گرفته شد. بر اساس یافته‌های ۵ ساله تحقیقات میدانی این محققین، مقاومت مخلوط‌های سرباره‌ای در برابر تغییرات آب‌وهوایی به مراتب بهتر از مصالح معمولی به دست آمد. میزان قفل و بست بین دانه‌های سرباره بسیار مطلوب گزارش شد که این مطلب سبب ایجاد پایداری در خصوصیات آسفالت و جلوگیری از بروز پدیده شیارشدگی در سطح آسفالت می‌شود. در این مدت ۵ سال، اثری از عریان‌شدگی در آسفالت سرباره‌ای مشاهده نشد. در مطالعاتی دیگر، امکان‌سنجی استفاده از سرباره فولاد در مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای (SMA) انجام شد (وو و همکاران، ۲۰۰۷؛ شو و همکاران، ۲۰۰۶). در تحقیقات این محققین، از سرباره فولاد از نوع BOF استفاده شد و با مصالح بازالتی مقایسه گردید. نتایج مطالعات میدانی حاکی از عملکرد بسیار مطلوب قطعه‌سازی سرباره‌ای به لحاظ ناهم‌آوری و اصطکاک بود و حضور سرباره منجر به کاهش تنها ۱۱٪ BPN در طول ۲ سال شد و ۶۵٪ بافت سطحی مصالح در این مدت حفظ شده است که نشان‌دهنده عملکرد عالی سرباره در برابر لغزندگی است. در تحقیقی دیگر (آسی و همکاران، ۲۰۰۷) به منظور بررسی تأثیر حضور سرباره فولاد، آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی، مقاومت در برابر شیارشدگی، عمر خستگی و آزمایش مدول خزشی روی نمونه‌های آسفالتی انجام شد. نتایج حاکی از آن بود که مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۲۵٪ سرباره فولاد، مقاومت خستگی، مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول برجهندگی بیشتری نسبت به مخلوط‌های شاهد دارد. نتایج مطالعات نشان داد که حساسیت رطوبتی و مقاومت در برابر خستگی با جایگزینی درشت‌دانه توسط سرباره و استفاده از مصالح و فیلر آهکی بهبود می‌یابد (باگامپاد و همکاران، ۱۹۹۹؛ خان و ال‌عبدالوهاب، ۱۹۹۸). احمدزاده و شنگز (۲۰۰۸)

فولاد دارای ویژگی‌های فیزیکی بسیار مناسبی از جمله مقاومت سایشی زیاد و 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 تأیید شده است (طباطبایی و بخشی، ۱۳۸۳). عمدتاً دو نوع سرباره فولادی در ایران تولید می‌شود: سرباره حاصل از کوره اکسیژنی (کنورتور) (BOF<sup>۱</sup>) و سرباره حاصل از کوره قوس الکتریک (EAF<sup>۲</sup>) (سناری، ۱۳۸۶). برای اولین بار از سرباره فولاد در کانادا و در بزرگراه آنتاریو استفاده شد. ولی بروز مشکلات عملکردی موجب شد که وزارت حمل و نقل کانادا استفاده از سرباره فولاد در روسازی را در سال ۱۹۹۱ کنار بگذارد (سولومون، ۱۹۹۳). اما با انجام فرآوری روی سرباره و از بین بردن اکسیدهای آزاد آن، استفاده از سرباره مجدداً مد نظر محققین قرار گرفت. نتایج تحقیقات بعدی در این خصوص نشان داد که استفاده از سرباره می‌تواند منجر به کاهش برخی خرابی‌های روسازی‌های آسفالتی گردد. از آنجا که در تحقیقات گذشته، در زمینه استفاده از سرباره مقایسه‌ای بین انواع سرباره صورت نگرفته، در تحقیق حاضر از سرباره‌های نوع BOF و EAF که بیشترین استفاده را در مخلوط‌های آسفالتی دارند و از طرفی حجم زیاد آنها که هر ساله در ایران تولید و دپو می‌شود، به منظور جایگزینی بخش درشت‌دانه مصالح سنگی آهکی با درصد‌های مختلف (۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰) استفاده شد. به منظور بررسی و مقایسه خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی، از آزمایش مارشال، ضریب برجهندگی، مقاومت کششی غیرمستقیم و ارزیابی حساسیت رطوبتی استفاده شد.

## ۲. پیشینه تحقیق

در سال‌های اخیر، مطالعاتی در زمینه به‌کارگیری سرباره به عنوان سنگ‌دانه در مخلوط‌های آسفالتی انجام شده است. تحقیق لیز هانت و بویل (۲۰۰۰) برای کمیته حمل و نقل

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

گردید. نتایج بدست آمده از این آزمایش‌ها با استفاده از روش‌های آماری، تحلیل و با یکدیگر مقایسه شد.

### ۳-۱. مصالح

در این تحقیق، از یک نوع سنگ‌دانه آهکی (معدن حوض ماهی اصفهان) و دو نوع سرباره فولادی EAF (فولاد مبارکه اصفهان) و BOF (ذوب آهن اصفهان) و از قیر ۷۰-۶۰ به منظور ساخت نمونه‌های آسفالتی استفاده شد. همچنین، در همه‌ی مخلوط‌ها از پودر سنگ آهک به عنوان فیلر استفاده گردید. دانه‌بندی مصالح سنگی منطبق بر منحنی دانه‌بندی شماره ۴ آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) (آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، ۱۳۹۰) انتخاب شد. 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.

### ۳-۲. تعیین خصوصیات مصالح سنگی آهکی و

#### سرباره‌ای

سنگ‌دانه‌ها بیش از ۹۰٪ وزنی مخلوط آسفالتی را تشکیل می‌دهند. از این رو مشخصات سنگ‌دانه‌ها تأثیر مستقیم و به‌سزایی 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. همچنین، به منظور تعیین عناصر و ترکیبات شیمیایی مصالح سنگی آهکی و سرباره‌ای، آزمایش XRF<sup>۱</sup> انجام شد. جهت مقایسه بافت سطحی مصالح سنگی آهکی و سرباره‌ای، از تصاویر SEM<sup>۲</sup> بهره گرفته شد. جدول ۱ نتایج آزمایش وزن مخصوص، درصد شکستگی و سایش لس آنجلس را نشان می‌دهد.

با ارزیابی جایگزینی درشت‌دانه مخلوط با سرباره نشان دادند که استفاده از سرباره فولاد منجر به بهبود حساسیت رطوبتی می‌شود. در مطالعات شن و همکاران (۲۰۰۹)، با جایگزینی صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد درشت‌دانه با سرباره نوع BOF نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم تمامی مخلوط‌ها از حدود مجاز (۷۰٪) بیشتر به‌دست آمد. در تحقیق پاستو و بالدو (۲۰۱۱)، با بررسی مدول سختی و مقاومت خستگی در آزمایش کشش غیرمستقیم، استفاده از سرباره در مخلوط آسفالتی به عنوان راهکاری کارا به منظور افزایش توان باربری مخلوط‌های آسفالتی معرفی شده است. عامری و همکاران (۲۰۱۱) با انجام آزمایش خزش دینامیک نشان دادند که با جایگزین کردن ۲۵٪ از مصالح طبیعی با مصالح سرباره فولاد کنورتور در مخلوط آسفالتی، مقاومت آن در برابر شیارشدگی تا ۶۰٪ افزایش پیدا می‌کند. در تحقیق شی و همکاران (۲۰۱۲)، با استفاده از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول ارتجاعی، نشان داده شد که مخلوط‌های حاوی سرباره نوع BOF، نسبت به مخلوط حاوی مصالح سنگی بازالتی، عملکرد بهتری دارد. همچنین، مقاومت در برابر صدمات ناشی از رطوبت مخلوط را افزایش داده شده است (شی و همکاران، ۲۰۱۲).

### ۳. مواد و روش‌ها

در این پژوهش، به منظور بررسی خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره، بخش درشت‌دانه مصالح آهکی به ترتیب با ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد سرباره‌های نوع EAF و BOF جایگزین گردید. با استفاده از روش طرح اختلاط مارشال، بر اساس استاندارد ASTM D-6927، درصد قیر بهینه و سایر پارامترهای مربوط به این آزمایش تعیین شد. سپس، ۸۱ نمونه با ابعاد نمونه‌های آزمایش مارشال در درصد قیر بهینه، تهیه و آزمایش‌های مدول برجهنگی، مقاومت کششی غیرمستقیم (در دو حالت اشباع و خشک) با استفاده از دستگاه UTM انجام

1- X-Ray Fluorescence

2- Scanning Electron Microscope

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی آهکی و سرباره‌ای

سرباره کوره اکسیژنی (BOF)		سرباره کوره قوس الکتریک (EAF)		مصالح آهکی			استاندارد	مشخصه
ریزدانه	درشت دانه	ریزدانه	درشت دانه	ریزدانه	درشت دانه	درشت دانه		
	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> )
	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

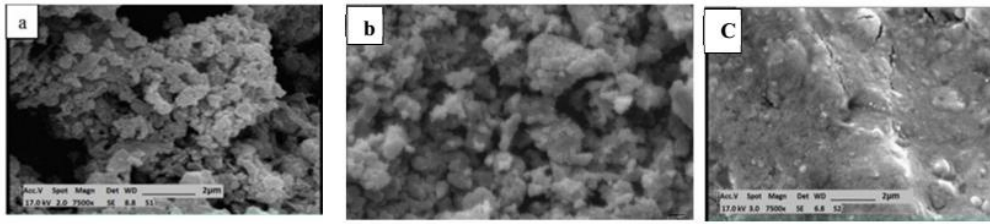
نمونه‌ها (تعیین درصد عناصر) ابتدا نمونه‌سازی با پودر کردن نمونه مصالح به نحوی انجام می‌شود که از الک نمره ۲۰۰ عبور کند. پس از آن نمونه به صورت صفحه‌ای شکل در محفظه دستگاه قرار گرفته و با تابش اشعه X طی فرایند خاصی به نمونه‌ها، تغییرات انجام شده به عنوان XRF ثبت می‌شود. نتیجه تحلیل برای عناصر اصلی به 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.

### ۳-۲-۱. آنالیز XRF

روش XRF یا طیف‌سنجی فلورسانس اشعه X، روشی کمی و کیفی برای تعیین عناصر تشکیل دهنده سنگ‌های معدنی، فلزها، آلیاژها و مانند آن می‌باشد. اساس کار این روش بدین صورت است که هر گاه الکترون‌های دارای انرژی کافی به ماده برخورد کنند، پرتو X با طیف پیوسته-ای 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

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	مصالح آهکی
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
۲/۳۱	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

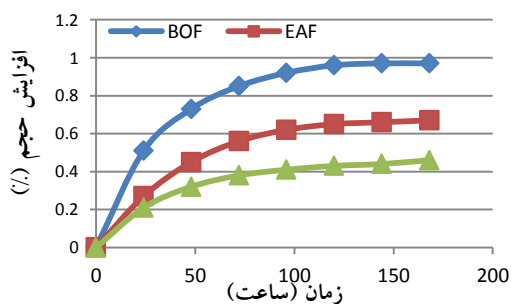


شکل ۱. تصاویر گرفته شده با دستگاه SEM (a) EAF، (b) BOF، (c) سنگدانه آهکی

دارای دانه‌های زبرتر و خشن‌تر از سنگدانه‌های آهکی باشد و در نتیجه پیوستگی بهتری با قیر داشته باشد. همان‌گونه که تصاویر میکروسکوپ الکترونی و همچنین بازرسی چشمی از سطح سنگدانه‌ها نشان می‌دهد، سنگدانه‌های آهکی دارای مقدار بسیار کمی تخلخل، آن هم در قطر بسیار کوچک (نزدیک به یک میکرون) است. در حالی که سرباره‌های فولادی 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.

### ۳-۳. 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 سلسیوس 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 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

همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، مهمترین فزاها و ترکیبات تشکیل‌دهنده مصالح سنگی آهکی، همانطور که از نامش پیداست، اکسید کلسیم است و در مورد سرباره‌های فولاد مبارکه و ذوب آهن (که تشابه زیادی به هم دارند) عبارتند از: اکسید کلسیم (کلسیت)، اکسید آهن، کوارتز، مگنتیت و اکسید آلومینیوم. حضور اکسید آهن و آلومینیوم به همراه دیگر عناصر فلزی در ترکیبات سرباره دلیل اصلی مقاومت زیاد مصالح سرباره‌ای در برابر سایش است. نسبت  $CaO / SiO_2$  نشانه‌ای از خصوصیت بازی مصالح سنگی است و تضمینی برای چسبندگی مناسب مصالح سنگی با قیر که در هر سه نوع مصالح این نسبت بالاست.

### ۳-۲-۲. مورفولوژی سطح سنگدانه‌ها

به منظور بررسی سطح، اندازه 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 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 ۴/۷۵ میلی‌متر استفاده شد. بر اساس این تصاویر، سرباره‌های فولاد دارای سطح و بافت زبرتر و درشت‌تری در مقایسه با سنگدانه‌های آهکی است. بخصوص در مورد تخلخل سطحی، این تفاوت باعث شده سطح مصالح سرباره‌ای

همان گونه که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، به دلیل حضور مقدار بسیار اندک آهک آزاد باقی‌مانده در سرباره فولاد، نرخ افزایش حجم مخلوط‌های سرباره‌ای، و بخصوص مخلوط 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 ۱٪ است، پتانسیل افزایش حجم سرباره فولاد قابل ملاحظه نیست. لذا نمی‌تواند منجر به ایجاد خرابی در مخلوط آسفالتی شود.

### ۳-۴. 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 سلسیوس، با ۷۵ ضربه مارشال به هر دو طرف نمونه‌های ۱۰۲ میلی‌متری

به منظور در نظر گرفتن شرایط ترافیکی سنگین، در دمای ۱۳۵ درجه متراکم گردید. در این آزمایش، در مجموع ۱۷۰ نمونه با درصد‌های مختلف (۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد درشت‌دانه) 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 B و E و برای نمونه‌های حاوی مصالح آهکی از حرف L استفاده شده است. همچنین، درصد جایگزینی سرباره بجای درشت‌دانه مخلوط پس از خط تیره نشان داده 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 آزمایش مارشال اندازه‌گیری گردید که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. خلاصه نتایج مارشال در درصد بهینه قیر

نسبت استقامت مارشال به روانی	VFA	VMA	درصد قیر مؤثر (Pbe)	درصد قیر جذب شده (Pba)	درصد فضای خالی	وزن مخصوص تئوریک حداکثر (Gmm)	وزن مخصوص جذب آب توده‌ای (Gmb)	درصد 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

درشت‌دانه کاملاً سرباره‌ای نوع BOF می‌باشد. همان‌گونه که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود، با افزایش نسبت مصالح سرباره‌ای در ترکیب مصالح سنگی، استقامت مارشال

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

کشور و جلوگیری از بروز خرابی شیار افتادگی جای چرخ مفید خواهد بود.

### ۳-۵. آزمایش‌ها

#### ۳-۵-۱. آزمایش مدول برجهندگی

ضریب برجهندگی مخلوط آسفالتی یکی از مهمترین پارامترهای طراحی به روش تئوری لایه‌ایست. اکثر مصالح مورد استفاده در لایه‌های روسازی الاستیک کامل نبوده و بعد از هر سیکل بارگذاری، مقداری تغییرشکل ماندگار خواهد داشت (کاووسی و مدرس، ۲۰۱۰). با این وجود، اگر مقدار بار در قیاس با مقاومت مصالح کم باشد و به دفعات تکرار شود، تغییرشکل‌ها تقریباً برگشت‌پذیر بوده و با بار وارده متناسب خواهد بود. تحت این شرایط، مصالح روسازی را می‌توان به عنوان مصالح الاستیک در نظر گرفت (Huang, ۲۰۰۴).

برای انجام آزمایش مدول برجهندگی، به ازای هر ترکیبی از مصالح سنگی و سرباره‌ای (۹ ترکیب)، حداقل سه نمونه در دو وضعیت (با تغییر ۹۰ درجه‌ای نمونه) و سه دما (۵، ۲۰ و ۴۰ درجه سلسیوس) مطابق روش استاندارد ASTM D 4123، مورد آزمایش قرار گرفت. در این آزمایش، نمونه تحت بار نیمه سینوسی با فرکانس ۱ Hz و زمان استراحت ۰/۹ ثانیه بارگذاری گردید. با استفاده از رابطه (۱) می‌توان ضریب برجهندگی (MPa) را به دست آورد:

$$M_r = \frac{P(\mu + 0.27)}{t\delta_h} \quad (1)$$

در این رابطه، P حداکثر بار دینامیک (N)،  $\mu$  ضریب پواسون (۰/۳۵)، t ضخامت نمونه (mm) و  $\delta_h$  مجموع تغییرشکل‌های برگشت‌پذیر افقی (mm) است.

#### ۳-۵-۲. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

جهت تعیین رفتار کششی مخلوط آسفالتی که می‌تواند به مقاومت روسازی در برابر ترک خوردگی مرتبط شود، از آزمایش کشش غیرمستقیم استفاده می‌شود (Anagnos and Kennedy, ۱۹۷۲). در این آزمایش، نمونه‌ی استوانه‌ای به-

نمونه‌های آسفالتی افزایش یافته است. البته با افزودن تا حداکثر ۲۵٪ سرباره به مخلوط آسفالتی، افزایش استقامت مارشال چندان چشم‌گیر نبود. ولی با جایگزین کردن مقادیر بیشتر (حداقل ۵۰٪ 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 درشت-دانه مصالح سنگی آهکی با مصالح سرباره‌ای نوع BOF، استقامت مارشال مخلوط آسفالتی بیش از ۴۰٪ افزایش پیدا کرده است. استقامت مخلوط آسفالتی به دو عامل اصطکاک داخلی و چسبندگی بستگی دارد (مقدم نیری و همکاران، ۱۳۸۶). 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 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 (توسلی، ۱۳۷۲). مفهوم دیگری که بعضی از مواقع برای ارزیابی مخلوط‌های آسفالتی به کار می‌رود، شاخص سختی مارشال می‌باشد که عبارت است از نسبت استقامت مارشال به روانی آن که مقداری تجربی برای سختی مخلوط آسفالتی می‌باشد. مقادیر بیشتر شاخص سختی مارشال نشان‌دهنده مخلوط سخت‌تر بوده و حاکی از آن است که احتمالاً مخلوط دارای مقاومت بیشتری در برابر تغییرشکل دائم می‌باشد. 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 ترافیک سنگین جاده‌های

برای بررسی عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالتی نیز استفاده نمود. زیرا با استفاده از این مفهوم می‌توان وضعیت تنش و کرنش را توسط یک پارامتر تا لحظه شروع ترک خوردگی در نظرگرفت (Li و همکاران، ۲۰۱۲). در شکل ۳، نمونه‌ای از منحنی تنش-کرنش که از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم روی مخلوط آسفالتی به دست آمده، نشان داده شده است.

دانشیه انرژی شکست ( $FE_{IDT}$ ) حاصل مجموع دانشیه انرژی کرنش الاستیک ( $EE_{IDT}$ ) و دانشیه انرژی خزشی تلف شده کل ( $DE_{IDT}$ ) است. مفهوم دانشیه انرژی کرنش خزشی تلف شده ( $DE_{IDT}$ ) اولین بار توسط دو محقق ارائه گردید (Roque و همکاران، ۲۰۰۲؛ Birgisson و همکاران، ۲۰۰۷). همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است،  $FE_{IDT}$  سطح زیر منحنی تنش-کرنش تا لحظه گسیختگی است. در حالی که  $EE_{IDT}$  مساحت قسمتی از زیر منحنی تنش-کرنش است که توسط کرنش در لحظه گسیختگی ( $\epsilon_f$ )، ضریب برجهنگی ( $M_f$ ) و مقاومت کششی غیرمستقیم ( $\sigma_{IDT}$ ) شکل می‌گیرد. در واقع،  $DE_{IDT}$  تفاوت بین  $FE_{IDT}$  و  $EE_{IDT}$  است (Li و همکاران، ۲۰۱۲). محاسبه  $DE_{IDT}$  وابسته به نتایج ضریب برجهنگی و مقاومت کششی غیرمستقیم خواهد بود که از رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$DCSE_{IDT} = FE - EE \quad (4)$$

در تحقیقی (Li و همکاران، ۲۰۱۲) نشان داده شد که  $DE_{IDT}$  با عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی همبستگی بسیار زیادی دارد. بدین ترتیب که به ازای سطح کرنشی مشخص، مخلوطی که  $DE_{IDT}$  بزرگتری دارد، عملکرد خستگی بهتری نیز خواهد داشت. همچنین، این محققین بیان داشتند که  $DE_{IDT}$  یکی از خواص مهندسی منحصر بفرد مخلوط است که با مقاومت شکست مخلوط در ارتباط است.

صورت خوابیده بین فک‌های بارگذاری دستگاه بارگذاری فشاری قرار می‌گیرد (این بارگذاری فشاری سبب ایجاد تنش نسبتاً یکنواختی در صفحه قائم خواهد شد که معمولاً گسیختگی هم در امتداد همین صفحه اتفاق می‌افتد (اکسوی و همکاران، ۲۰۰۵)). سپس، نمونه تحت بار قرار گرفته و بار با نرخ تغییرشکل ثابت  $50 \text{ mm/min}$  به نمونه اعمال می‌گردد و بارگذاری تا زمان گسیختگی نمونه ادامه می‌یابد. جهت انجام آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم از دستگاه UTM-14P استفاده گردید تا بتوان تغییرات تنش و کرنش را در هر لحظه و همچنین در لحظه گسیختگی ثبت نمود. این آزمایش در دمای  $20^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس انجام گرفت و جهت تعیین مقاومت کششی نمونه‌ها از رابطه (۲) استفاده شد:

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

که در آن  $D$  قطر نمونه ( $m$ )،  $t$  ضخامت نمونه ( $m$ )،  $P$  حداکثر بار ( $kN$ ) و  $S_t$  مقاومت کششی ( $kPa$ ) می‌باشد. با توجه به این‌که آزمایش تعیین مقاومت کششی غیرمستقیم با استفاده از دستگاه UTM-14P انجام شد، بنابراین امکان ثبت تنش و کرنش در هر لحظه فراهم بود. لذا، امکان ترسیم منحنی تنش و کرنش و محاسبه چقرمگی<sup>۱</sup> نمونه‌ها وجود داشت.

طبق تعریف، سطح زیر نمودار تنش-کرنش تا لحظه گسیختگی (حداکثر تنش کششی) معرف چقرمگی مخلوط است که نشان دهنده انرژی لازم جهت گسیختگی نمونه می‌باشد و از رابطه (۳) به دست می‌آید:

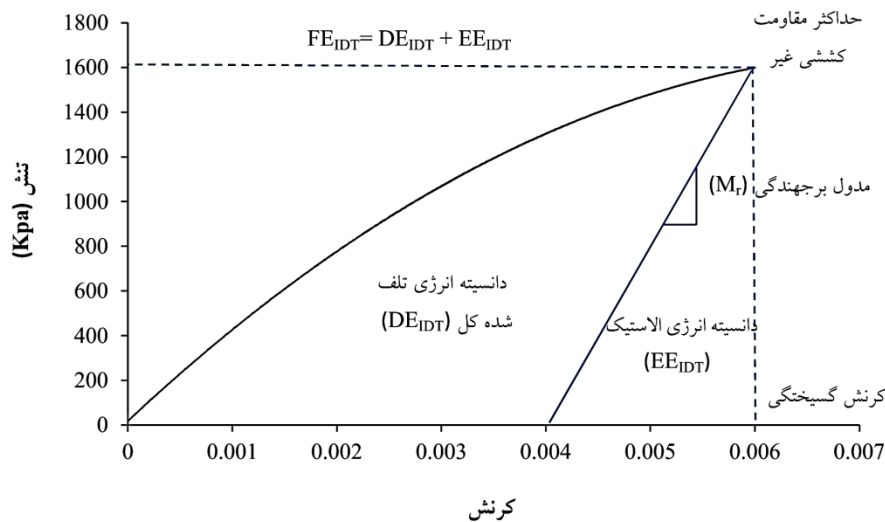
$$FE = \int_0^{\epsilon_f} s(\epsilon) d\epsilon \quad (3)$$

که در آن  $FE$  انرژی تا لحظه شکست (چقرمگی) ( $Kpa$ )،  $\epsilon_f$  کرنش در لحظه گسیختگی و  $S$  مساحت زیر منحنی است. به این سطح، دانشیه انرژی شکست<sup>۱</sup> نیز می‌گویند. دانشیه انرژی شکست که به‌عنوان سطح زیر منحنی تنش-کرنش تا نقطه حداکثر منحنی تعریف می‌شود، انرژی پتانسیل لازم برای ایجاد ترک است. از این مفهوم می‌توان

3- Elastic Strain Energy Density  
4- Dissipated Creep Strain Energy

1- Toughness  
2- Fracture Energy Density





شکل ۳. نمونه‌ای از منحنی تنش-کرنش در آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

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 غیرمستقیم بعد از قرارگیری تحت شرایط و غرقاب شدن مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای انجام این آزمایش، دو سری نمونه‌ی استوانه‌ای متراکم شده تهیه شد، به نحوی که میانگین فضای خالی آنها تقریباً با هم برابر باشد. یک سری از نمونه‌ها داخل کیسه‌های پلاستیکی قرار گرفته و کاملاً ایزوله شده و ۲ ساعت در حمام آب با دمای  $25^{\circ}\text{C}$  قرار گرفت. سپس آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم 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 گرفتند و در نهایت آزمایش کشش غیرمستقیم در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  انجام شد. به منظور بررسی حساسیت در برابر رطوبت مخلوط‌های آسفالتی، از شاخص نسبت مقاومت کششی (TSR)، مطابق رابطه (۵) استفاده شده، که از تقسیم مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت اشباع به حالت خشک به دست می‌آید:

### ۳-۵-۳. آزمایش ارزیابی حساسیت رطوبتی

از اواسط دهه ۱۹۵۰ میلادی، رطوبت به عنوان عاملی که تأثیر مخرب بر روسازی‌های آسفالتی دارد شناخته شد (شاه، ۲۰۰۳). یکی از مهمترین مشکلات روسازی‌های انعطاف‌پذیر، عریان‌شدگی می‌باشد که به از بین رفتن چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی در مخلوط آسفالتی، به دلیل وجود رطوبت، اتلاق می‌شود (لاوین، ۲۰۰۳؛ اکسوی و همکاران، ۲۰۰۵). دو عامل باعث بروز عریان‌شدگی در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود: از بین رفتن چسبندگی میان قیر و مصالح سنگی و 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 غوطه‌ور استاتیک، آزمایش غوطه‌ور دینامیک، آزمایش استاندارد لاتمن، آزمایش غرقاب کردن مکانیکی، آزمایش استاندارد تراکم-غوطه‌وری، آزمایش اصلاح شده لاتمن، آزمایش شیارشدگی چرخ هامبورگ، آزمایش نسبت مارشال، آزمایش تشدید شرایط محیطی و آزمایش سختی کششی نمونه‌های پیر شده‌ی اشباع (مهرآرا و خدایی، ۲۰۱۳؛ ویلیامز و بریکاه، ۲۰۰۵). شیوه‌ای که بیشتر مورد استفاده قرار گرفته و برای

همچنین جدول ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزودن هر دو نوع سرباره منجر به افزایش ضریب برجهندگی در دماهای ۲۰ و ۴۰ درجه سلسیوس، نسبت به نمونه شاهد (نمونه حاوی مصالح آهکی) شده است. اما در دمای ۵ درجه سلسیوس، فقط نمونه‌های حاوی سرباره نوع EAF، ضریب برجهندگی بیشتری داشته و ضریب برجهندگی مخلوط‌های حاوی سرباره BOF تقریباً مشابه نمونه کنترل بود. افزایش ضریب برجهندگی می‌تواند به دلیل شکستگی بیشتر سرباره و در نتیجه قفل و بست بیشتر مصالح سنگی باشد.

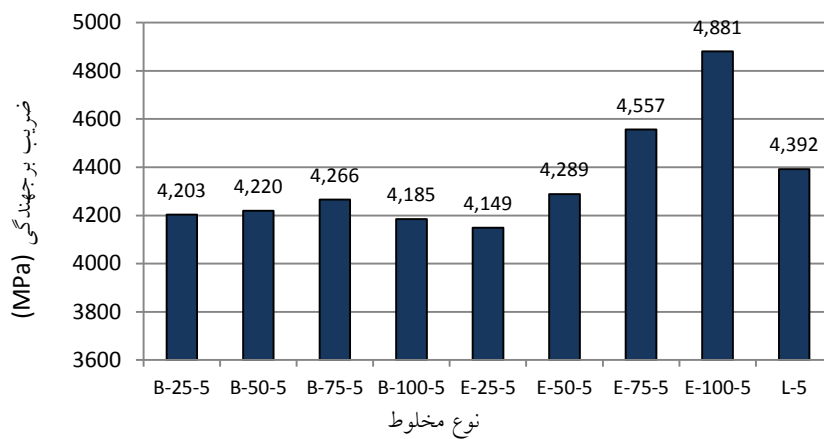
$$TSR = \frac{ITS_{sat}}{ITS_{dry}} \quad (5)$$

که  $ITS_{sat}$  مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت اشباع (Kpa) و  $ITS_{dry}$  مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک (Kpa) است.

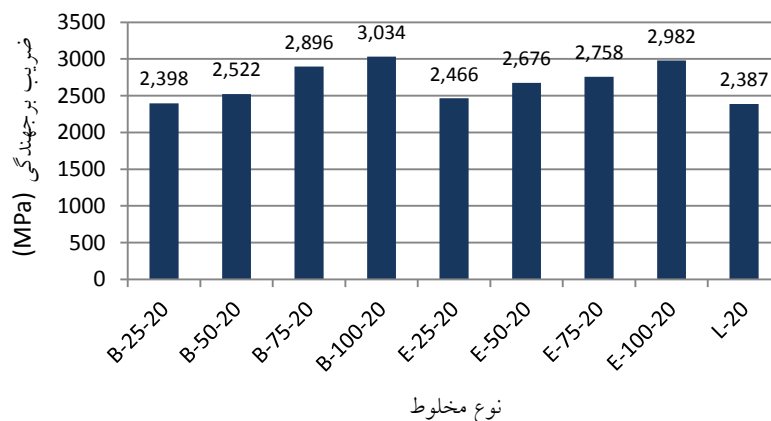
## ۴. نتایج و بحث

### ۴-۱. آزمایش ضریب برجهندگی

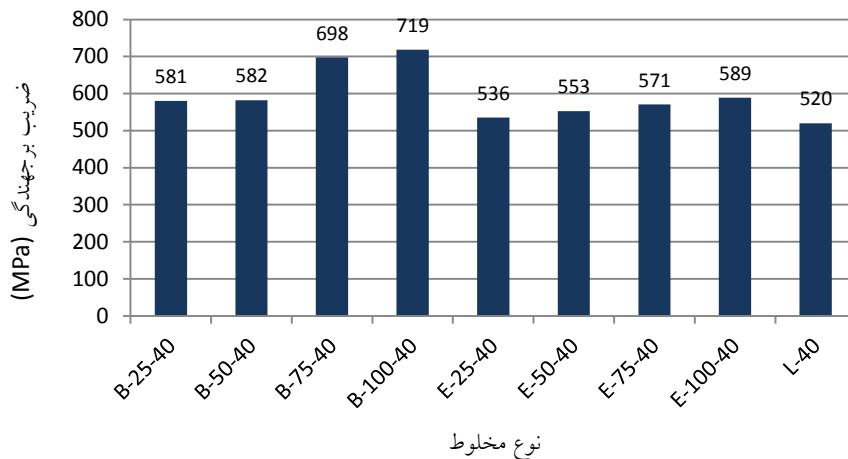
نتایج آزمایش تعیین ضریب برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف سرباره‌های نوع EAF و BOF به ازای دماهای مختلف در شکل‌های ۴ تا ۶ و



شکل ۴. میانگین ضریب برجهندگی نمونه‌ها در دمای ۵°C. عدد بعد از نام نمونه، مربوط به دمای آزمایش است.



شکل ۵. میانگین ضریب برجهندگی نمونه‌ها در دمای ۲۰°C. عدد بعد از نام نمونه، مربوط به دمای آزمایش است.



شکل ۶. میانگین ضریب برجهنگی نمونه‌ها در دمای ۴۰ °C. عدد بعد از نام نمونه، مربوط به دمای آزمایش است.

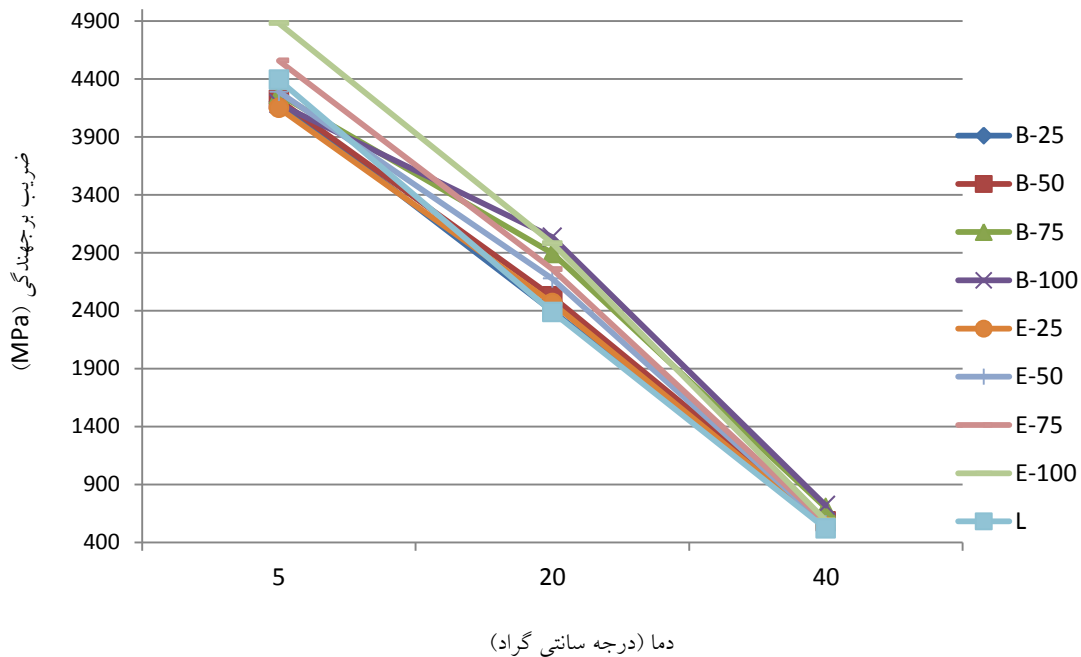
جدول ۴. میانگین ضریب برجهنگی نمونه‌ها در دماهای مختلف

میانگین ضریب برجهنگی (kPa)										
L	E-100	E-75	E-50	E-25	B-100	B-75	B-50	B-25	نوع مخلوط	
									دما (°C)	
۴۳۹۲	۴۸۸۱	۴۵۵۷	۴۲۸۹	۴۱۴۹	۴۱۸۵	۴۲۶۶	۴۲۲۰	۴۲۰۳	۵	
۲۳۸۷	۲۹۸۲	۲۷۵۸	۲۶۷۶	۲۴۶۶	۳۰۳۴	۲۸۹۶	۲۵۲۲	۲۳۹۸	۲۰	
۵۲۰	۵۸۹	۵۷۱	۵۵۳	۵۳۶	۷۱۹	۶۹۸	۵۸۲	۵۸۱	۴۰	

۹۵٪ روی پارامترهای آزمایش (با استفاده از نرم‌افزار SPSS) انجام گردید. از روش تحلیل ANOVA برای مقایسه دو یا چند جامعه (یعنی تأثیر یک متغیر مستقل بر یک متغیر وابسته) استفاده می‌شود. نتایج زمانی معنی‌دار خواهد بود که مقدار P value کمتر از ۰/۰۵ باشد. نتایج این تحلیل‌ها نشان داد که در دمای ۲۰ درجه سلسیوس، تفاوت میان مقادیر ضریب برجهنگی نمونه‌های حاوی ۵۰٪ یا بیشتر سرباره‌های نوع EAF و BOF با نمونه شاهد، معنی‌دار می‌باشد. بدین مفهوم که تفاوت در مقادیر ضریب برجهنگی ناشی از افزودن سرباره است. نتایج نشان داد که در دمای ۵ درجه سلسیوس، تنها ضریب ارتجاعی نمونه‌ی E-100 تفاوت معنی‌دار با نمونه شاهد دارد و در سایر نمونه‌ها تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. نتایج تحلیل‌های آماری در دمای ۴۰ درجه سلسیوس نیز نشان داد که هیچ‌گونه تفاوت معنی‌داری در نتایج ضرایب برجهنگی نمونه‌های حاوی سرباره با نمونه شاهد وجود ندارد.

تغییرات دمایی تأثیر به‌سزایی بر ضریب برجهنگی مخلوط‌های آسفالتی دارد. در مورد نمونه‌های آزمایش شده در این تحقیق، با افزایش دمای آزمایش از ۵ به ۴۰ درجه سلسیوس، ضریب برجهنگی نمونه‌ها تا ۸۰٪ کاهش یافته است. در شکل ۷ نمودار این تغییرات نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، تغییرات ضریب برجهنگی نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف سرباره تقریباً یکسان است. این مطلب نشان دهنده آن است که افزودن هر دو نوع سرباره به مخلوط آسفالتی تأثیری بر رفتار مخلوط در دماهای مختلف نداشته و تغییرات آن مشابه مخلوط‌های معمول است.

به منظور بررسی نتایج آزمایشگاهی، از تحلیل‌های آماری استفاده گردید. هدف از انجام تحلیل‌های آماری، بررسی این موضوع است که تغییر در پارامترهای آزمایش‌ها ناشی از خطاهای آزمایشگاهی است و یا به دلیل حضور سرباره. بدین منظور تحلیل‌های آماری ANOVA در سطح اطمینان



شکل ۷. تغییرات ضریب بر جهندگی نمونه‌ها به ازای دماهای مختلف

#### ۴-۲. آزمایش کشش غیرمستقیم

و دانسیته انرژی کرنش خزشی تلف شده کل نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف سرباره در جدول ۵ ارائه شده است.

نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم شامل: حداکثر مقاومت کششی، سطح زیر نمودار تنش-کرنش تا لحظه گسیختگی

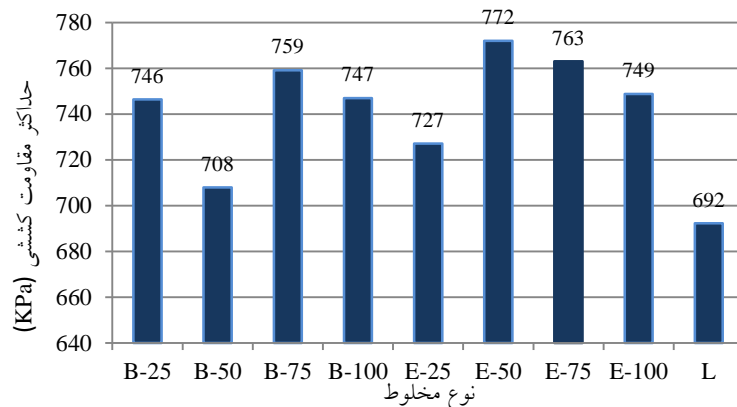
جدول ۵. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

نوع مخلوط	B-25	B-50	B-75	B-100	E-25	E-50	E-75	E-100	L
حداکثر تنش کششی (kPa)	۷۷۶	۷۴۱	۸۲۴	۷۹۱	۶۵۳	۸۸۵	۷۵۶	۷۰۶	۶۲۰
میانگین (kPa)	۷۴۶	۷۰۸	۷۵۹	۷۴۷	۷۲۷	۷۷۲	۷۶۳	۷۴۹	۶۹۲
سطح زیر منحنی تا لحظه گسیختگی (kPa)	۴۳۹	۴۶۵	۴۰۸	۴۵۶	۴۱۳	۴۷۰	۵۰۹	۵۸۹	۴۱۹
میانگین (kPa)	۴۲۸	۴۴۴	۴۳۲	۴۵۵	۴۴۹	۴۶۴	۵۱۷	۵۴۷	۴۲۷
دانسیته انرژی الاستیک (kPa)	۱۰۴	۱۱۷	۸۴	۶۲	۹۷	۹۹	۱۱۱	۱۱۸	۱۳۷
میانگین (kPa)	۹۴	۱۰۵	۸۷	۹۳	۱۰۵	۱۳۵	۱۱۲	۱۱۰	۱۲۰
دانسیته انرژی کرنش خزشی تلف شده کل (DE <sub>IDT</sub> ) (kPa)	۳۳۴	۳۴۸	۳۲۳	۲۹۴	۳۱۵	۳۷۲	۳۹۸	۴۷۱	۳۱۲
میانگین (kPa)	۳۰۹	۳۵۳	۳۶۶	۳۲۰	۳۶۸	۳۹۱	۳۸۳	۳۶۷	۳۰۸
میانگین (kPa)	۳۲۱	۳۴۰	۳۴۵	۳۲۹	۳۴۴	۳۹۶	۴۰۵	۴۳۷	۳۱۸

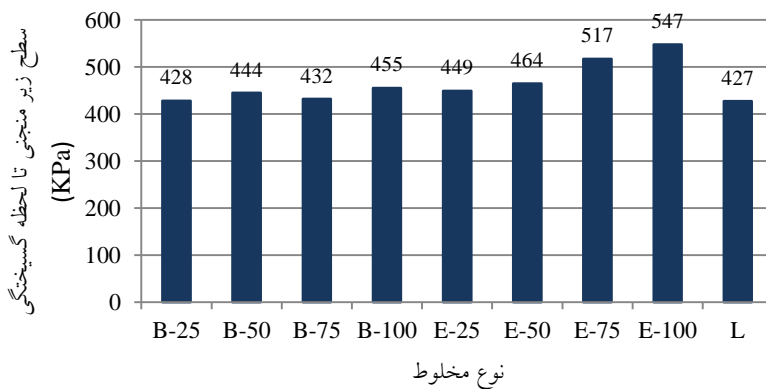
افزایش یافته است. این مطلب می‌تواند ناشی از پیوند قوی‌تر قیر و مصالح سرباره‌ای نوع EAF باشد. همچنین انرژی شکست نمونه‌های حاوی سرباره نوع EAF بیشتر از نمونه شاهد و نمونه‌های حاوی سرباره BOF است که نشان دهنده نیروی لازم بیشتر برای ایجاد خرابی در این نوع مخلوط‌هاست. مقدار انرژی شکست نمونه‌های حاوی سرباره BOF تقریباً مشابه نمونه شاهد به دست آمد.

همچنین، شکل‌های ۸ تا ۱۱ مقادیر میانگین نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهند.

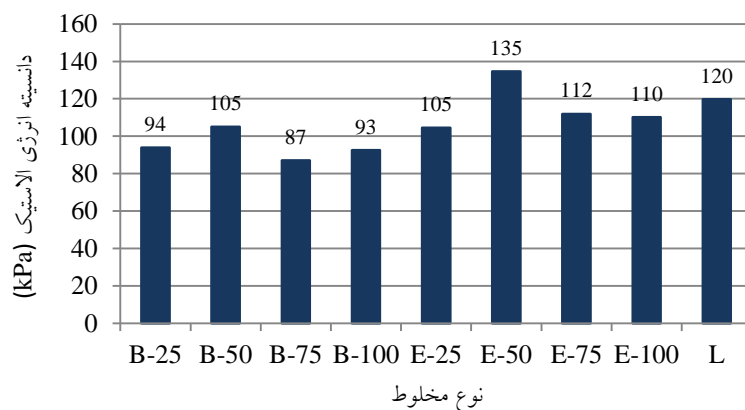
همانطور که نتایج این آزمایش نشان می‌دهد، سطح زیر منحنی تنش- کرنش تا لحظه گسیختگی و دانسیته انرژی تلف شده کل نمونه‌های حاوی سرباره نوع EAF بیشتر از نمونه شاهد است و با افزایش درصد سرباره این مقادیر



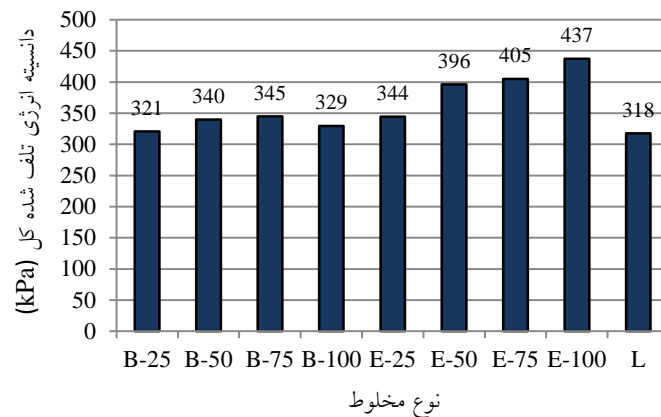
شکل ۸. حداکثر مقاومت کششی نمونه‌ها در آزمایش کشش غیرمستقیم



شکل ۹. سطح زیر منحنی تنش- کرنش نمونه‌های مختلف در آزمایش کشش غیرمستقیم



شکل ۱۰. دانسیته انرژی الاستیک نمونه‌های مختلف در آزمایش کشش غیرمستقیم



شکل ۱۱. دانشیه انرژی تلف شده کل در آزمایش کشش غیرمستقیم

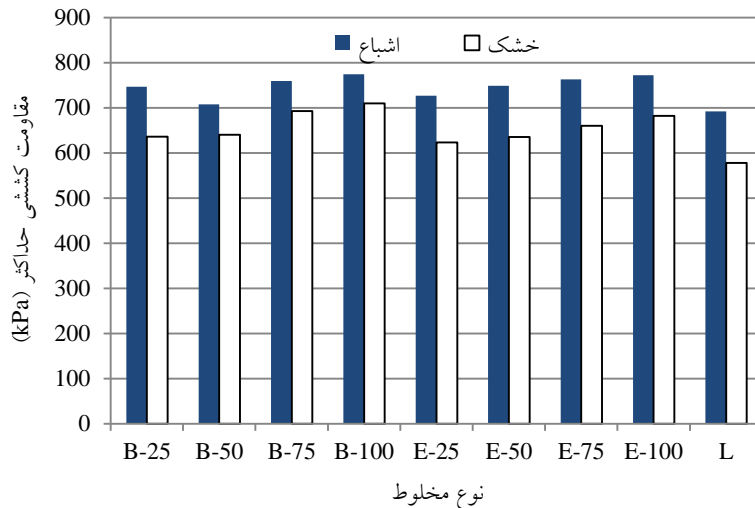
در مورد نمونه‌های حاوی سرباره BOF تفاوت معنی‌داری با نمونه شاهد مشاهده نشد.

#### ۴-۳. ارزیابی حساسیت رطوبتی

نتایج آزمایش تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت اشباع به حالت خشک تمام نمونه‌ها، حداقل نسبت توصیه شده (۸۰٪) در اکثر مراجع (لاتمن، ۱۹۸۲؛ رابرتز و همکاران، ۱۹۹۶) را تأمین می‌نماید. با افزودن هر دو نوع سرباره، مقدار TSR افزایش یافته که بیشترین مقدار مربوط به نمونه B-100 بود. افزایش مقدار TSR به مفهوم نیاز به کار و انرژی بیشتر توسط آب برای از بین بردن پیوند قیر و مصالح و در نتیجه خرابی مخلوط است. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مصالح سرباره‌ای می‌تواند منجر به کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی گردد. همچنین، مقایسه این دو سرباره نشان می‌دهد که به‌کارگیری سرباره نوع BOF تأثیر بیشتری بر کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی دارد و در محل‌هایی که در معرض رطوبت فروان قرار دارند، بیشتر توصیه می‌شود. این یافته‌ها با سایر تحقیقات نظیر احمدزاده و شنگز (۲۰۰۸)، لیز هانت و بویل (۲۰۰۰)، خان و ال- عبدالوهاب (۱۹۹۸)، باگامپاد و همکاران (۱۹۹۹) و شی و همکاران (۲۰۱۲) مطابقت دارد.

خرابی خستگی، ناشی از تکرار اعمال کرنش‌های کششی است. بنابراین، با بهبود خواص کششی مخلوط می‌توان مقاومت کششی آن را بهبود بخشید. مخلوط‌های دارای مقاومت کششی بیشتر، مقاومت بیشتری در برابر ترک خوردگی در قیاس با مخلوط‌های با مقاومت کششی کمتر، خواهند داشت. لذا، نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم نشان می‌دهد که با افزودن سرباره نوع EAF، انرژی شکست در لحظه گسیختگی و کل انرژی شکست به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد افزودن مخلوط‌های حاوی سرباره نوع EAF سبب افزایش آستانه تحمل مخلوط قبل از ترک خوردگی می‌شود و به بیان دیگر نیروی بیشتری برای ترک خوردگی آن لازم است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که عمر خستگی این مخلوط‌ها نیز در قیاس با نمونه شاهد و نمونه‌های حاوی سرباره نوع BOF بیشتر خواهد بود.

نتایج تحلیل‌های آماری نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین مقادیر حداکثر مقاومت کششی نمونه‌های حاوی سرباره و نمونه شاهد وجود ندارد. نتایج همچنین نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین مقادیر چقرمگی (سطح زیر منحنی تنش-کرنش تا لحظه گسیختگی) نمونه‌های حاوی سرباره نوع BOF و نمونه شاهد وجود ندارد. هر چند در مورد نمونه‌های حاوی ۵۰٪ یا بیشتر سرباره نوع EAF تفاوت معنی‌دار مشاهده شد. تحلیل‌های آماری روی مقادیر  $DE_{IDT}$  نیز نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین نمونه‌های حاوی ۵۰٪ یا بیشتر سرباره نوع EAF و نمونه شاهد وجود دارد.



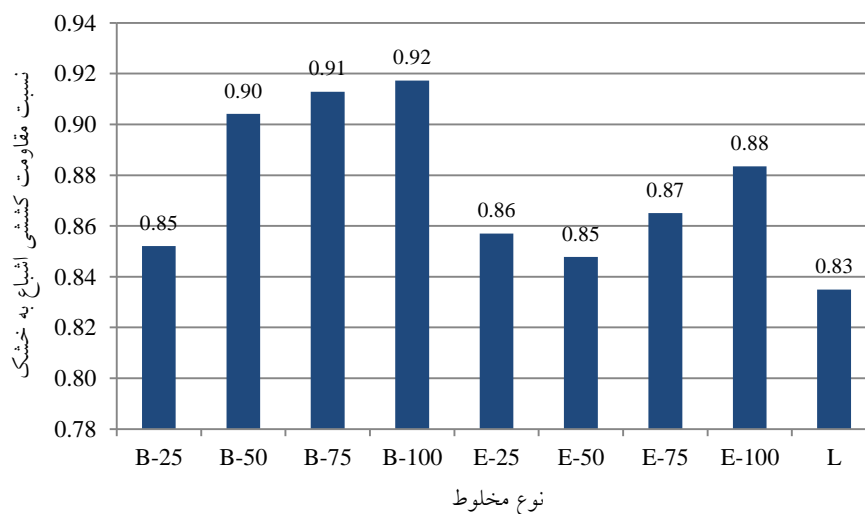
شکل ۱۲. حداکثر مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های خشک و اشباع حاوی درصد‌های مختلف سرباره

## ۵. نتیجه‌گیری

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

با بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق به طور خلاصه می‌توان نتایج را به صورت زیر جمع‌بندی کرد:

- نتایج آزمایش‌های مصالح سنگی نشان می‌دهد که هر دو نوع سرباره فولادی EAF و BOF خصوصیات لازم برای استفاده در لایه‌های روسازی را دارند و در بسیاری از پارامترها، مانند سایش لس آنجلس، شاخص شکل، بافت سطحی و درصد فضای خالی متراکم نشده، بهتر از سنگ‌دانه‌های آهکی می‌باشند.



شکل ۱۳. نسبت حداکثر مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های اشباع به خشک حاوی درصد‌های مختلف سرباره

- نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم نشان داد که حداکثر مقاومت کششی، چقرمگی و دانسیته انرژی تلف شده کل مخلوط‌های حاوی سرباره نوع EAF بیشتر از نمونه شاهد بود.
- با افزایش درصد سرباره، ضریب برجهندگی نمونه‌ها به دلیل قفل و بست بهتر سنگ‌دانه‌ها، افزایش یافت.
- با افزودن هر دو نوع سرباره، مقدار TSR افزایش یافته که بیشترین مقدار مربوط به نمونه B-100 بود. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مصالح سرباره‌ای می‌تواند منجر به کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی دارد و در محل‌هایی که در معرض رطوبت فراوان قرار دارند، بیشتر توصیه می‌شود.
- جایگزینی حدود ۵۰٪ مصالح سنگی درشت‌دانه با سرباره، سبب بهبود خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی شده و در عین حال تأثیر کمی بر افزایش مصرف قیر خواهد داشت.

## ۶. مراجع

- توسلی، ح. ۱۳۷۲. "طرح و کنترل بتن آسفالتی گرم". چاپ اول، انتشارات قلم ستاری، م. ۱۳۸۶. "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.
- شکرچی‌زاده، م.، عالی‌زاده، 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، ص ۶۸۲-۶۹۴.
- طباطبایی، ن. و بخشی طوسی، پ. ۱۳۸۳. "بررسی کاربرد سرباره فولاد در مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای". دومین همایش قیر و آسفالت ایران، ۲-۴ آذر، ص ۳۱۱-۳۰۲.
- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور. ۱۳۹۰. "آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران". نشریه شماره ۲۳۴، ویرایش اول.
- مقدم نیری، م. ر.، 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، ص ۱۳۴-۱۲۷.
- Ahmedzade, P. and Sengoz, B. 2008. "Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete". J. Hazard. Mater. 165: 300-305.
- Aksoy, A., Samlioglu, K., Tayfur, S. and Ozen, H. 2005. "Effect of various additives on moisture damage sensitivity of asphalt mixtures". Constr. Build. Mater. 19: 11-18.
- 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". 10<sup>th</sup> International Conference LJMU, Britannia Adelphi Hotel, February 16-17, Liverpool, UK.
- Anagnos, J.N. Kennedy, T.W. 1972. "Practical Method of Conducting The Indirect Tensile Test". Center of Highway Research, University of Texas at Austin, Research Report 98-10, Austin, Texas.
- Asi, I. M., Qasrawi, H. Y. and Shalabi, F. I. 2007. "Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes". Can. J. Civil Eng. 34: 902-911.
- Bagampadde, U., Wahhab, H. and Aiban, S. 1999. "Optimization of steel slag aggregates for bituminous mixes in Saudi Arabia". J. Mater. Civil Eng. 11(1): 30-35.
- Birgisson, B., Montepara, A., Romeo, E., Roque, R., Roncella, R., and Tebaldi, G. 2007. "Determination of Fundamental Tensile Failure Limits of Mixtures". Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists; 76:303-44.
- Huang, Y.H. 2004. "Pavement Analysis and Design". Prentice Hall, New Jersey.
- Kavussi A., and Modarres A. 2010. "Laboratory fatigue models for recycled mixes with bitumen emulsion and cement". Construction and Building Materials 24; 1920-1927.
- Khan, M. I. and Al-Abdul Wahhab, H. I. 1998. "Improving slurry seal performance in Eastern Saudi Arabia using steel slag". Constr. Build. Mater. 12: 195-201.



- Kobayashi, M., Hokari, K. and Kubo, K. 1997. "Effects of Aggregate Shapes on Characteristics of Asphalt Mixture". *Mechanical Tests for Bituminous Materials*, Taylor & Francis Ltd., pp. 461-468.
- Lavin, P. 2003. "Asphalt Pavements: A Practical Guide to Design, Production and Maintenance for Engineers and Architects". CRC Press, London.
- Li, Q., Lee, H., and Kim, T.W. 2012. "A simple fatigue performance model of asphalt mixtures based on fracture energy" *Construction and Building Materials*, Volume 27, Issue 1, Pages 605-611.
- Liz Hunt, P. E. and Boyle, G. E. 2000. "Steel Slag in Hot Mix Asphalt Concrete". State Research Project #511-Oregon Department of Transportation, Salem, Oregon, USA.
- Lottman, R. P. 1982. "Predicting Moisture-Induced Damage to Asphaltic Concrete". NCHRP Report No. 246, Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC.
- Marks, V. J., Monroe, R. W. and Adam, J. F. 1990. "Effects of Crushed Particles in Asphalt Mixtures", *Transport. Res. Rec.*, 1259, Transport. Res. Board, pp. 91-106.
- Mehrara, A. and Khodaii, A. 2013. "A review of state of the art on stripping phenomenon in asphalt concrete", *Constr. Build. Mater.* 38: 423-442.
- Pasetto, M. and Baldo, N. 2011. "Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag". *Constr. Build. Mater.* 25: 3458-3468.
- Roberts, F., Kandhal, P., Brown, E., Lee, D. and Kennedy, T. 1996. "Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction". 2<sup>nd</sup> Edition, NAPA Education Foundation, Lanham, Maryland.
- Roque, R., Birgisson, B., Sangpetngam, B., and Zhang, Z.W. 2002. "Hot mix asphalt fracture mechanics: a fundamental crack growth law for asphalt mixtures". *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*;71:816-27.
- Shah, B. D. 2003. "Evaluation of Moisture Damage within Asphalt Concrete Mixes". MSc. Thesis, Texas A & M University, USA.
- Shen, D. H., Wu, C. M. and Du, J. C. 2009. "Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture". *Constr. Build. Mater.* 23(1): 453-461.
- Solomon, C. 1993. "Slag-Iron and Steel". U.S. Bureau of Mines, U.S. Army Corps of Engineers.
- The Asphalt Institute. 1983. "Principles of Construction of Hot-Mix Asphalt Pavements". Manual Series No. 22, Lexington, Ky.
- Williams, R. C. and T. M. Breakah. 2005. "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, USA.
- Wu, S. P., Xue, Y. J. and Chen, Y. C. 2007. "Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures". *Build. Environ.* 42: 2580-2585
- Xie, J., Wu, S. P., Lin, J., Cai, J., Chen, Z. W. and Wei, W. 2012. "Recycling of basic oxygen furnace slag in asphalt mixture: Material characterization & moisture damage investigation". *Constr. Build. Mater.* 36: 467-474.
- Xue, Y. J., Wu, S. P., Hou, H. and Zha, J. 2006. "Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture". *J. Hazard. Mater.* 138: 261-268.