

# حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاوی سرباره‌ی کوره‌ی قوس الکتریکی

محمود عامری (استاد)

منصور صادقی آواز\* (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۳ (۳۱-۲)  
دوره‌ی ۲-۳۱، شماره‌ی ۴/۱، ص. ۸۹-۹۶، (پاداشت نفی)

سالیانه مقادیر قابل توجهی سرباره‌ی صنایع فولاد به‌عنوان محصول فرعی در ایران تولید می‌شود، که به دلیل زیادبودن حجم اشغال‌شده توسط این مواد زائد در کشور، مسائل محیط‌زیستی جدی ایجاد شده است. هدف از این پژوهش بررسی امکان استفاده از سرباره‌ی کوره‌ی قوس الکتریکی EAF<sup>۱</sup> در مخلوط آسفالتی جهت کاهش پدیده‌ی عریان‌شدگی در آسفالت است. در این پژوهش، ابتدا مشخصات فیزیکی و شیمیایی سرباره‌ی فولاد مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس با جایگزین کردن ۵۰ و ۱۰۰ درصد مصالح ریزدانه، ۵۰ و ۱۰۰ درصد مصالح درشت‌دانه و همچنین ۵۰ و ۱۰۰ درصد کل سنگ‌دانه‌های مخلوط آسفالتی با سرباره، حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاصل مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سرباره‌ی کوره‌ی قوس الکتریکی به جای درشت‌دانه در مخلوط آسفالتی، ضمن آنکه منجر به افزایش مقاومت و دوام مخلوط آسفالتی در برابر آسیب‌های رطوبتی می‌شود، باعث افزایش استقامت مارشال، ضریب برجهندگی، و مقاومت کشش غیرمستقیم نیز می‌شود.

واژگان کلیدی: سرباره‌ی فولاد، حساسیت رطوبتی، مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی.

ameri@iust.ac.ir  
msadeghiavaz@gmail.com

## ۱. مقدمه

در عصر حاضر، سلامت محیط‌زیست و جلوگیری از تخریب آن در برابر آلاینده‌ها و دگرگونی‌هایی که انسان‌ها برای پیشرفت، توسعه و رفاه بیشتر عملیاتی می‌کنند، به یک چالش جدی برای نهادهای حامی محیط‌زیست در جهان تبدیل شده است. چنانچه ایده‌های جدید در جهت استفاده از مواد زائد در پروژه‌های عمرانی موفق باشد، ضمن آنکه به سلامتی محیط‌زیست کمک می‌کند، می‌تواند سود کلانی را نیز عاید کشورها کند. یکی از این مواد زائد که می‌تواند در راه‌سازی مورد استفاده قرار گیرد، سرباره‌ی فولاد است. با توجه به تولید سالانه‌ی بیش از ۲ میلیون تن سرباره‌ی فولاد در ایران و حجم دپوی وسیع و هزینه‌ی زیاد انبارداری آن، چنانچه بتوان از این محصول در مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرد، نه فقط از لحاظ اقتصادی، بلکه از لحاظ محیط‌زیستی نیز گامی مؤثر در جهت توسعه‌ی پایدار برداشته شده است. اما استفاده از این محصول به‌عنوان سنگ‌دانه، نیازمند انجام آزمایش‌های لازم و تحلیل خواص فیزیکی و شیمیایی آن در جهت هدف و منظور استفاده از این ماده است. در این پژوهش با توجه به اهمیت پدیده‌ی عریان‌شدگی یا آسیب رطوبتی که نه فقط یک خرابی مستقل است، بلکه مقدمه و رویکردی برای ایجاد سایر خرابی‌های زود هنگام نظیر: ترک‌خوردگی، شیارشدگی مسیر چرخ، بیرون‌پریدگی مصالح سنگی، چاله‌ها و ترک‌های پوست سوسماری نیز هست،<sup>[۱]</sup> علاوه بر بررسی ویژگی‌های فیزیکی و

\* نویسنده مستقر

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۶/۱۲، اصلاحیه ۱۳۹۳/۷/۲۲، پذیرش ۱۳۹۳/۸/۱۰.

شیمیایی سرباره و همچنین ارزیابی پایداری و سختی مخلوط آسفالتی، به ارزیابی حساسیت رطوبتی آسفالت حاوی سرباره نیز پرداخته شده است.

## ۲. مروری بر پیشینه‌ی پژوهش

سرباره‌ی فولاد، نوعی سنگ‌دانه‌ی مصنوعی است که از فرایند ذوب فولاد در کارخانجات فولادسازی به‌دست می‌آید.<sup>[۲]</sup> سرباره‌ی کوره‌ی قوس الکتریکی (EAF) و سرباره‌ی کوره‌ی اکسیژنی (BOF)<sup>۳</sup> دو نوع از سرباره‌های فولاد هستند که فرایند تولید آن‌ها متفاوت است.<sup>[۳]</sup> در این پژوهش از سرباره‌ی کوره‌ی قوس الکتریکی به‌عنوان سنگ‌دانه‌های مصنوعی در مخلوط آسفالتی استفاده شده است. بیشترین استفاده‌ی این نوع سرباره در لایه‌های آسفالتی روسازی است.<sup>[۵]</sup> در پژوهشی در سال ۲۰۰۷ از سرباره‌ی فولاد به جای ۲۰، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد مصالح درشت‌دانه در مخلوط آسفالت متخلخل استفاده شده، که منجر به افزایش چسبندگی در مخلوط آسفالتی شده است.<sup>[۶]</sup> همچنین در پژوهش دیگری بر روی مخلوط‌های آسفالتی تولیدشده در کشور ترکیه (۲۰۰۹)، این نتیجه به‌دست آمده است که استفاده از سرباره علاوه بر افزایش مقاومت کشش غیرمستقیم، مقاومت مخلوط در برابر رطوبت را نیز افزایش می‌دهد.<sup>[۷]</sup> در مطالعه‌ی در سال ۲۰۱۱ نیز ترکیبی از مصالح آهکی و مصالح سرباره‌ی EAF تولیدشده در شمال کشور ایتالیا در یک مخلوط آسفالتی

استفاده و مشاهده شده است که خصوصیات مکانیکی و همچنین مقاومت مخلوط حاوی سرباره در برابر عریان‌شدگی بهبود یافته است.<sup>[۸]</sup> علاوه بر مطالعات ذکر شده، پژوهشگران دیگری نیز با استفاده از سرباره به جای ۳۰٪ درشت‌دانه،<sup>[۹]</sup> و یا با استفاده از BOF در مخلوط SMA<sup>۲</sup>،<sup>[۱۰]</sup> و نیز با استفاده از مصالح ریزدانه با درصد‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی کل مخلوط از سرباره‌ی BOF کارخانه‌ی ذوب آهن اصفهان،<sup>[۱۱]</sup> و همچنین با استفاده از سرباره‌ی فولادی با درصد‌های ۵، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درصد به جای مصالح سیلیسی،<sup>[۱۲]</sup> به مطالعاتی در مورد مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره پرداخته‌اند، اما در مطالعات مذکور ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط انجام نشده است و سرباره یا جایگزین بخش درشت‌دانه شده یا جایگزین بخش ریزدانه، و یا به صورت درصد‌های مختلف از کل مخلوط استفاده شده است؛ در حالی که در این پژوهش سعی شده است تا هم تأثیر ریزدانه و هم درشت‌دانه در خواص مخلوط آسفالتی به خصوص حساسیت آسفالت در برابر آسیب‌های رطوبتی بررسی شود. به عبارت دیگر، وجه تمایز این پژوهش با پژوهش‌های مشابه در این موارد است:

۱. جامعه‌ی آماری استفاده‌شده در این پژوهش کفایت تحلیل آماری یافته‌ها را فراهم کرده است، که در سایر مطالعات اشاره‌شده چنین تحلیل‌های آماری انجام نشده است، به طوری که فقط ۱۲۶ نمونه‌ی مارشال جهت تعیین درصد قیر بهینه ساخته شده و با توجه به اینکه از ۷ نوع ترکیب مصالح معمولی و سرباره‌ی استفاده شده است، ۴۲ نمونه برای آزمایش مقاومت مارشال، ۴۲ نمونه برای آزمایش مدول یا ضریب برجه‌ندگی و ۴۲ نمونه برای آزمایش کشش غیرمستقیم استفاده شده است. این تعداد نمونه، امکان ارزیابی آماری را ایجاد کرده است و در نتیجه با تحلیل آماری نتایج می‌توان با اطمینان بیشتری نحوه‌ی استفاده از سرباره در مخلوط آسفالتی را با محوریت بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط تعیین کرد.
۲. برخلاف سایر پژوهشگران مذکور که فقط به ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی پرداخته‌اند یا فقط به نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم اکتفا کرده‌اند، در این پژوهش علاوه بر نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم، با تحلیل خواص شیمیایی مصالح، آزمایش جوشاندن و آزمایش مدول برجه‌ندگی، حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی شاهد و همچنین حاوی سرباره مورد ارزیابی قرار گرفته است.
۳. وسعت و تعداد آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش جهت تعیین حساسیت مخلوط آسفالتی حاوی سرباره‌ی به مراتب بیشتر و مکمل آزمایش‌های انجام‌شده توسط سایر پژوهشگران است.

### ۳. برنامه‌ی آزمایشگاهی

#### ۱.۳. مصالح سنگی

مصالح سنگی که برای تولید انواع مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شوند، باید مشخصات ویژه‌ی داشته باشند. این ویژگی‌ها عبارت‌اند از: دانه‌بندی، سختی، دوام، تمیزی، شکل دانه‌های سنگی و کیفیت دانه‌ها.<sup>[۱۳]</sup> دانه‌بندی مصالح سنگی بر روی مقاومت باربری آسفالتی و سختی دانه‌های سنگی، مقاومت آن‌ها را در برابر تنش‌های ناشی از بارگذاری تعیین می‌کند. علاوه بر این ویژگی‌ها، مصالح سنگی که در ساختن آسفالت به کار می‌روند، باید در برابر عوامل جوی نیز مقاوم باشند تا در اثر یخبندان و یا تغییرات رطوبت، شکسته و خرد نشوند و علاوه بر این موارد، مصالح سنگی باید

تمیز و عاری از هرگونه مواد مضر باشند. تأثیر درصد شکستگی دانه‌های سنگی نیز در قابلیت باربری آسفالت مؤثر است. بنابراین شکستگی بیشتر سنگ‌دانه‌ها منجر به استقامت بیشتر آسفالت در زیر بار خواهد شد.<sup>[۱۳]</sup>

در این پژوهش از دانه‌بندی شماره‌ی ۴ نشریه‌ی ۲۳۴ و آزمایش‌های لس‌آنجلس و مقاومت فشاری مصالح (استاندارد ملی ۶۶۹) برای ارزیابی سختی و دوام مصالح استفاده شده است. به منظور کسب اطمینان از تمیزی مصالح سنگی قبل از استفاده شسته شده و میزان شکستگی آن‌ها نیز با انجام آزمایش تعیین درصد شکستگی تعیین شده است. این ویژگی‌ها در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

مقاومت سنگ‌دانه‌ها در برابر تغییرات شرایط جوی و آب و هوایی منطقه‌ی که راه از آن می‌گذرد، از طریق آزمایش سلامت سنگ‌دانه ارزیابی می‌شود. در این آزمایش، درصد افت وزنی در برابر سولفات سدیم اندازه‌گیری شده است. این مقدار برای سنگ‌دانه‌های استفاده‌شده در این پژوهش، در جدول ۲ نشان داده شده است. وزن مخصوص مصالح درشت‌دانه و ریزدانه و همچنین سرباره‌ی فولاد نیز براساس ضوابط مندرج در استانداردهای ASTM-C۱۲۷ و ASTM-C۱۲۸ تعیین و در جدول ۳ ارائه شده است.

#### ۲.۳. طرح اختلاط

در این پژوهش از حد وسط دانه‌بندی شماره‌ی ۴ آیین‌نامه‌ی روسازی ایران (نشریه‌ی ۲۳۴) استفاده شده است. به منظور دسترسی به بهترین درصد سرباره‌ی EAF برای استفاده در مخلوط آسفالتی، از ۷ گروه مصالح مطابق جدول ۴ استفاده شده است.

#### ۳.۳. امکان‌سنجی تأثیر مثبت سنگ‌دانه‌های سرباره در حساسیت

##### رطوبتی

برای امکان‌سنجی تأثیر مثبت استفاده از سنگ‌دانه‌های سرباره در حساسیت رطوبتی از تحلیل ترکیبات شیمیایی سنگ‌دانه‌ها و بررسی نتایج آزمایش جوشاندن مخلوط آسفالتی (ASTM۳۶۲۵) استفاده شده است.

##### ۱.۳.۳. خواص شیمیایی

از آنجا که ممکن است مصالح سنگی به صورت تواماً خاصیت اسیدی و بازی داشته باشند، ضرورت دارد که کانی‌شناسی مصالح انجام شود. برای پی‌بردن به میزان اسیدی یا بازی بودن مصالح لازم است که از نسبت اکسیدهای اسیدی به اکسیدهای بازی استفاده شود.<sup>[۱۵]</sup> در این روش نسبت عناصر اسیدی  $SiO_2$  و  $CO_2$  به عناصر بازی  $K_2O$ ،  $Na_2O$ ،  $CaO$ ،  $MgO$ ،  $FeO$ ،  $Fe_2O_3$ ،  $Al_2O_3$  محاسبه می‌شود. چنانچه این نسبت کمتر از ۵۵٪ باشد، به عنوان مصالح بازی و چنانچه بیشتر از ۶۶٪ باشد، واژه‌ی اسیدی به مصالح اطلاق می‌شود.<sup>[۱۶]</sup> ترکیب عناصر شیمیایی سرباره‌ی استفاده‌شده در این پژوهش در جدول ۵ ارائه شده است. نسبت عناصر اسیدی به عناصر بازی برای سرباره‌ی استفاده‌شده برابر ۱۸٪ به دست آمده است، که براساس نسبت یادشده خاصیت بازی دارد، بنابراین سرباره‌های فولاد استفاده‌شده در این پژوهش خاصیت بازی دارند، که در تقابل با قیری با خاصیت اسیدی بالاتر پیوند قوی را تشکیل خواهند داد.<sup>[۱۷]</sup>

##### ۲.۳.۳. آزمایش جوشاندن

در این آزمایش میزان عریان‌شدگی به صورت بصری، پس از جوشاندن دانه‌های سنگی آغشته به قیر به مدت ۱۰ دقیقه طبق ضوابط مندرج در استاندارد ASTM ۳۶۲۵ تعیین شده است. میزان خرابی یا آسیب دیدگی مصالح با مشاهدات

جدول ۱. مقادیر سایش به روش لس آنجلس برای سنگ‌دانه‌های مورد استفاده و مقاومت فشاری مصالح.

نوع مصالح	مصالح رده شده از الک ۱۲ (gr)	مصالح مانده روی الک ۱۲ (gr)	درصد سایش	بیشینه‌ی مقدار مجاز (نشریه‌های ۲۳۴ و ۱۰۱)	مقاومت فشاری مصالح (kg/cm <sup>2</sup> )
آهکی	۱۲۶۴	۳۷۳۶	۲۵٫۲۸	٪۳۰	۴۰۰
سرباره	۱۱۲۷	۳۸۷۳	۲۲٫۵۴		۱۷۰۰

جدول ۲. سلامت سنگ‌دانه‌های مورد استفاده.

نوع سنگ‌دانه	ویژگی	نتایج آزمون	حدود قابل قبول*	روش آزمایش
آهکی	سلامت سنگ‌دانه - درصد افت وزنی در برابر سولفات سدیم	> ٪۱۲	۱۲	طبق استاندارد ملی ۴۴۹
سرباره‌ی فولاد	سلامت سنگ‌دانه - درصد افت وزنی در برابر سولفات سدیم	٪۱۲	۱۲	طبق استاندارد ملی ۴۴۹

\* ASTM-C۰۰۸۸

جدول ۳. نتایج آزمایش تعیین وزن مخصوص مصالح آهکی و سرباره.

نوع مصالح	وزن مخصوص ظاهری (gr/cm <sup>3</sup> )	وزن مخصوص واقعی (gr/cm <sup>3</sup> )
آهکی	درشت‌دانه	۲٫۶۴
	ریزدانه	۲٫۷۲
سرباره	درشت‌دانه	۳٫۶۸
	ریزدانه	۲٫۹۳

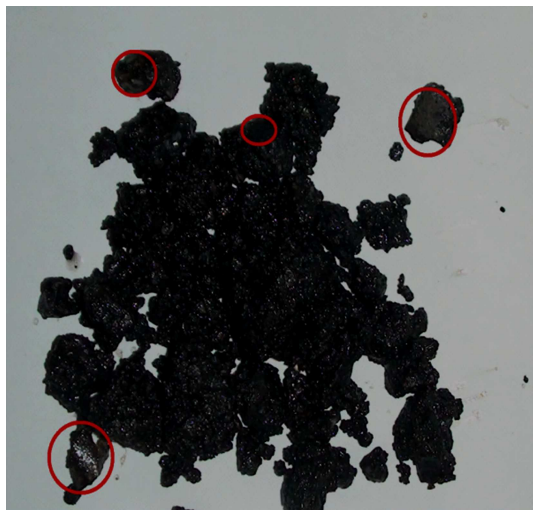
جدول ۴. گروه مصالح مورد استفاده.

شماره‌ی گروه مصالح	ترکیب مصالح
۱	مصالح آهکی
۲	٪۱۰۰ درشت‌دانه، سرباره‌ی
۳	٪۵۰ درشت‌دانه، سرباره‌ی
۴	٪۱۰۰ ریزدانه، سرباره‌ی
۵	٪۵۰ ریزدانه، سرباره‌ی
۶	٪۱۰۰ کل مصالح، سرباره‌ی
۷	٪۵۰ کل مصالح، سرباره‌ی

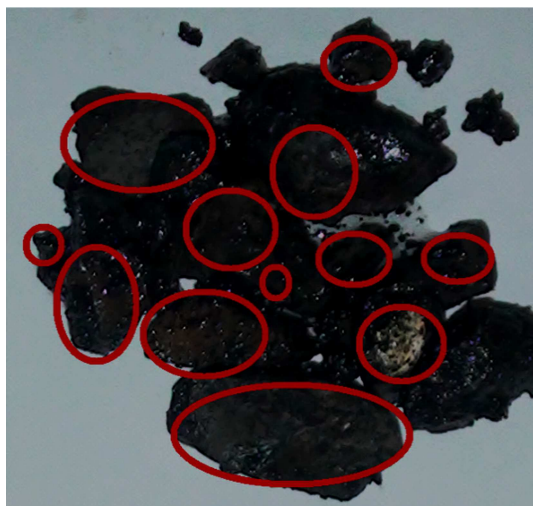
جدول ۵. ترکیب شیمیایی سرباره‌ی مورد استفاده.

ترکیبات	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	CaO	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
درصد	۲٫۱۷	۰٫۵۶	۱۲٫۰۵	۳۱٫۳۲	۳۲٫۴۸	۴٫۰۷	۱۷٫۲۳

چشمی مصالح عریان‌شده تعیین می‌شود. این تذکر لازم است که براساس مطالعات انجام‌شده، این روش آزمایش رابطه‌ی خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و عملکرد میدانی ارائه داده است.<sup>[۱۸]</sup> نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی مصالح سرباره‌ی و آهکی در این پژوهش در شکل ۱ ارائه شده است. در شکل مذکور، نقاط جداشده‌ی قیر از سنگ‌دانه مشخص شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نقاط جداشده‌ی قیر از سنگ‌دانه برای مصالح سنگ‌دانه‌ی آهکی بیشتر از سنگ‌دانه‌های سرباره‌ی است. به عبارت دیگر، چسبندگی بین قیر و سرباره از چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه‌ی آهکی بیشتر است.



ب) سنگ‌دانه‌های سرباره‌ی.



الف) سنگ‌دانه‌های آهکی؛

شکل ۱. میزان عریان‌شدگی سنگ‌دانه‌ها در آزمایش جوشاندن.

و در دمای معین بارگذاری می‌شود. بیشینه‌ی بار متناظر با شکست نمونه ثبت و برای محاسبه‌ی مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه استفاده می‌شود. دستگاه آزمایش ITS در شکل ۲ نشان داده شده است.

در این آزمایش، برای رسیدن به درصد فضای خالی بین ۶ تا ۸ درصد و یا هر فضای خالی دیگری که پس از تراکم از مخلوط آسفالتی در اجرا انتظار می‌رود، باید تعداد ضربات چکش و یا تعداد چرخش دستگاه متراکم‌کننده‌ی ژیراتوری برای متراکم‌کردن مخلوط تنظیم شود.<sup>[۲۳]</sup> در این پژوهش برای رسیدن به این درصد فضای خالی از دستگاه تراکم ژیراتوری استفاده شده است. علت استفاده از دستگاه تراکم ژیراتوری عمدتاً به منظور شبیه‌سازی شرایط کارگاهی بوده است.<sup>[۷]</sup> در این آزمایش برای هر یک از مخلوط‌های ارائه‌شده در جدول ۴، شش نمونه با فضای خالی ۶٫۵٪ ساخته شده است. این نمونه‌ها به ۲ گروه تقسیم شده‌اند. گروه اول، شامل ۳ نمونه‌ی شاهد و گروه دوم، شامل نمونه‌هایی است که بین ۵۵ تا ۸۰ درصد اشباع شده و سپس تحت یک چرخه‌ی یخبندان - ذوب یخ قرار گرفته‌اند. در این چرخه نمونه‌ها به مدت ۱۶ ساعت در دمای  $-18^{\circ}\text{C}$  و ۲۴ ساعت در دمای  $60^{\circ}\text{C}$  گذاشته شده‌اند. همه‌ی نمونه‌ها تحت آزمایش کشش غیرمستقیم قرار گرفته و در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  با نرخ  $51\text{ mm/min}$  بارگذاری و شکسته شده‌اند و با استفاده از رابطه‌ی ۱، مقاومت کششی غیرمستقیم آن‌ها محاسبه شده است.<sup>[۲۴]</sup>

$$S_t = \frac{2000p}{\pi t d} \quad (1)$$

که در آن،  $d$  قطر نمونه (بر حسب میلی‌متر)،  $p$  مقدار بار اعمال شده (بر حسب نیوتن)،  $t$  ضخامت (ارتفاع نمونه بر حسب میلی‌متر) و  $S_t$  مقاومت کششی غیرمستقیم (بر حسب کیلوپاسکال) است.



شکل ۲. دستگاه آزمون کشش غیرمستقیم.

با توجه به نتایج آزمایش جوشاندن مصالح و همچنین بررسی خواص شیمیایی آن‌ها استنباط شده است که استفاده از سنگ‌دانه‌ی سرباره‌ی EAF منجر به کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی می‌شود، زیرا چسبندگی بین قیر و سرباره افزایش یافته است. به منظور کسب اطمینان بیشتر از این فرضیه، برنامه‌ی آزمایشگاهی جامعی بر روی مخلوط آسفالتی انجام شده است، که در ادامه تشریح شده است.

#### ۴.۳. آزمایش‌ها

برنامه‌ی آزمایشگاهی به ۳ بخش مجزا تقسیم شده است. در بخش اول با آزمایش مارشال مقادیر قیر بهینه به دست آمده است. در این مرحله به منظور تعیین درصد قیر بهینه برای هر گروه از مصالح (گروه‌های ۱ تا ۷)، به ازاء درصد قیر ۴، ۴٫۵، ۵، ۵٫۵، ۶ و ۶٫۵، سه نمونه (در مجموع ۱۲۶ نمونه) به روش مارشال طبق استاندارد ASTM D1559 ساخته شده و براساس معیارهای مندرج در همین استاندارد قیر بهینه به دست آمده است. نتایج تعیین درصد قیر بهینه برای گروه‌های هفت‌گانه‌ی مصالح سنگی در جدول ۶ ارائه شده است.

در بخش دوم برای هر یک از مخلوط‌های هفت‌گانه‌ی مندرج در جدول ۴، سه نمونه با قیر بهینه تهیه و مقاومت مارشال و روانی آن‌ها به دست آمده است. در بخش سوم نیز برای هر یک از مخلوط‌های هفت‌گانه، ۶ نمونه اضافه با درصد قیر بهینه در دستگاه ژیراتوری<sup>۴</sup> متراکم و آزمایش کشش غیرمستقیم و مدول برجهندگی در دو وضعیت خشک و عمل‌آوری شده (یا ترا) انجام شده است.

#### ۱.۴.۳. آزمایش مارشال

برای انجام این آزمایش، مصالح سنگی در دمای  $165^{\circ}\text{C}$  در گرم‌خانه نگهداری و سپس با درصد قیر بهینه که دمای آن حدود  $135^{\circ}\text{C}$  بود، مخلوط و طبق استاندارد ASTM 1559 متراکم و تهیه شده است.<sup>[۱۹]</sup>

#### ۲.۴.۳. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

در این پژوهش آزمایش کشش غیرمستقیم طبق ضوابط مندرج در استاندارد AASHTO T 283<sup>۵</sup> که به آزمایش «لاتمن اصلاح‌شده» معروف است، انجام شده است. این روش انجام آزمایش توسط کندهال ارائه شده است، که بعدها توسط مؤسسه‌ی تحقیقاتی آشتو در سال ۱۹۸۵ تأیید شده است.<sup>[۲۰]</sup> این آزمایش ترکیبی از آزمایش لاتمن و روت - تائیکلیف است.<sup>[۲۱]</sup> مطالعات انجام‌شده توسط کیگوندو و رابرت<sup>۵</sup> نشان می‌دهد که این روش آزمایش دقیق‌ترین روش آزمایشی است که در حال حاضر برای پیش‌بینی آسیب رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی در دسترس است.<sup>[۲۲]</sup> در این آزمایش نمونه‌ی استوانه‌ی شکل به صورت قطری با نرخ تغییرشکل

جدول ۶. نتایج درصد قیر بهینه برای گروه مصالح سنگی مورد استفاده.

شماره‌ی نمونه	درصد قیر بهینه
۱	(۱۰۰٪ کل مصالح، آهکی باشد) ۵٫۱۰
۲	(۱۰۰٪ درشت‌دانه، سرباره‌یی باشد) ۵٫۴۰
۳	(۵۰٪ درشت‌دانه، سرباره‌یی باشد) ۵٫۳۰
۴	(۱۰۰٪ ریزدانه، سرباره‌یی باشد) ۵٫۵۰
۵	(۵۰٪ ریزدانه، سرباره‌یی باشد) ۵٫۳۷
۶	(۱۰۰٪ کل مصالح، سرباره‌یی باشد) ۵٫۶۵
۷	(۵۰٪ کل مصالح، سرباره‌یی باشد) ۵٫۴۵

## ۳.۴.۳. آزمایش مدول برجهندگی

پارامترهای مختلفی بر روی ضریب برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی تأثیر دارند، که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از: اندازه‌ی اسمی بزرگ‌ترین دانه‌های سنگی، ضخامت و قطر نمونه، شکل منحنی و همچنین مدت زمان بارگذاری. [۲۵] پژوهش‌های انجام‌شده نشان داده است که اندازه‌ی درشت‌ترین دانه‌ی مصالح سنگی موجود در نمونه‌ی آزمایش، بیشتر از سایر پارامترهای یادشده بر نتایج آزمایش ضریب برجهندگی تأثیرگذار است. [۲۵] در این پژوهش با ثابت نگه‌داشتن پارامترهای یادشده، تأثیر جایگزین کردن سرباره‌ی فولاد با مصالح سنگی آهکی در مخلوط آسفالتی مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور از روش استاندارد ASTM D۴۱۲۳ برای تعیین ضریب برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی موردنظر استفاده شده است. نمایی از دستگاه UTM که برای انجام آزمایش‌های لازم استفاده شده است، در شکل ۳ نشان داده شده است. تعداد نمونه‌ها و شرایط انجام آزمایش مشابه آزمایش کشش غیرمستقیم، که پیش‌تر به آن اشاره شده است می‌باشد، به عبارت دیگر برای هر یک از گروه‌های هفت‌گانه‌ی مندرج در جدول ۴، شش نمونه ساخته شده است: ۳ نمونه‌ی شاهد و ۳ نمونه تحت شرایط اشباع و چرخه‌ی یخبندان و ذوب یخ قرار گرفته است. سپس آزمایش ضریب برجهندگی به روش کشش غیرمستقیم و با اعمال بار تکراری به صورت نیمه‌سینوسی و با سیکل بارگذاری ۰/۱ ثانیه و مدت زمان ۲/۹ ثانیه استراحت در دمای ۲۵°C انجام شده است. همچنین بار اعمال‌شده برابر ۵۷۰ نیوتن بوده و دمای انجام آزمایش با استفاده از محفظه‌ی هوا ثابت نگه داشته شده است. این تذکر لازم است که در محاسبه‌ی ضریب برجهندگی، که با نرم‌افزار موجود در دستگاه UTM انجام می‌شود، از روابط ۲ و ۳ که در استاندارد ASTM D۴۱۲۳ به آن اشاره شده استفاده شده است:

$$M_R = \frac{P(\nu + 0.2734)}{tH} \quad (2)$$

$$\nu = 0.359 \frac{H}{V} - 0.27 \quad (3)$$

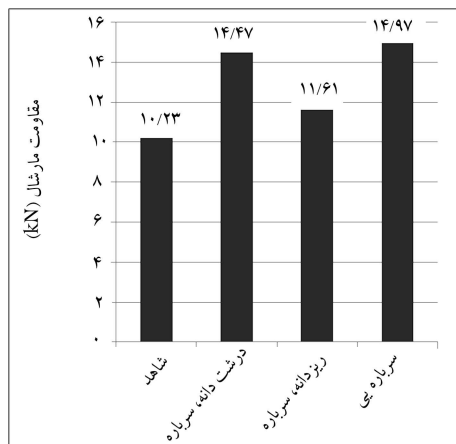
که در آن‌ها،  $M_R$  ضریب برجهندگی (مگاپاسکال)،  $P$  بار تکراری (نیوتن)،  $\nu$  نسبت بواسون،  $t$  ضخامت نمونه (میلی‌متر)،  $H$  تغییرشکل افقی برگشت‌پذیر (میلی‌متر)، و  $V$  تغییرشکل قائم برگشت‌پذیر (میلی‌متر) است. تغییرشکل افقی نمونه توسط تجهیزات اندازه‌گیری تغییرات خطی (LVDT) که به صورت افقی روی نمونه تنظیم شده است، اندازه‌گیری می‌شود.

## ۴. تحلیل نتایج و یافته‌ها

## ۴.۱. نتایج مقاومت مارشال

نتایج مقاومت مارشال برای نمونه‌های آزمایشی ساخته‌شده با مصالح سنگی مختلف و درصد قیر بهینه در شکل ۴ ارائه شده است. نتایج ارائه‌شده در این شکل نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌های آزمایش‌شده، استقامت مارشالی بیشتر از مقدار کمینه‌ی مشخص‌شده در آیین‌نامه‌ی روسازی آسفالتی راه‌های ایران (۸۰۰ کیلوگرم) دارند. ضمن آنکه استقامت مارشال کلیه‌ی نمونه‌های حاوی سرباره‌ی فولادی از نمونه‌ی شاهد نیز بیشتر است، به طوری که استقامت مارشال نمونه‌های ساخته‌شده با ۱۰۰٪ مصالح سنگی سرباره‌ی در حدود ۴۶٪ بیشتر از نمونه‌ی شاهد است (۱۴/۹۷ کیلونیوتن در مقابل ۱۰/۲۳ کیلونیوتن). همان‌طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، وجود سرباره باعث افزایش استقامت مارشال در مخلوط‌های آسفالتی شده است، لیکن سهم مصالح سنگی درشت‌دانه‌ی سرباره‌ی در افزایش استقامت مارشال بیشتر از مصالح سنگی ریزدانه‌ی سرباره‌ی است. استنباط می‌شود که افزایش استقامت مارشال نمونه‌های حاوی سرباره‌ی فولاد نسبت به نمونه‌های شاهد به دلیل سختی و مقاومت فشاری بیشتر سنگ‌دانه‌های سرباره‌ی فولادی باشد (جدول ۱). با جایگزین کردن مقادیر مصالح سنگی درشت‌دانه و ریزدانه‌ی نمونه‌های آسفالتی با مصالح سرباره‌ی فولاد ملاحظه شده است که درصد قیر بهینه در مخلوط نیز افزایش یافته است. روند افزایش درصد قیر بهینه با توجه به میزان و درصد وزنی مصالح سنگی سرباره‌ی فولادی اضافه‌شده به مخلوط در جدول ۷ نشان داده شده است. مطابق جدول مذکور، روند افزایش قیر بهینه با ضریب همبستگی خوبی (۰/۹۸۱) متناسب با درصد افزایش سنگ‌دانه‌های سرباره‌ی است. افزایش درصد قیر بهینه در مخلوط‌های آسفالتی منجر به افزایش انعطاف‌پذیری آسفالت در زیر بار و همچنین دوام بیشتر آسفالت در مناطق سردسیر می‌شود. [۲۶]

کنترل نتیجه‌ی عملیات اجرایی آسفالت در کارگاه براساس بیشینه‌ی وزن مخصوص آزمایشگاهی مخلوط آسفالتی اجراشده در محل انجام شده است. در شرایط مساوی (انرژی تراکم یکسان، درصد قیر، درصد تخلخل، درصد فضای خالی مصالح سنگی و درصد قیر جذب‌شده و...)، مخلوط آسفالتی که بیشینه‌ی وزن مخصوص بیشتری دارد، دوام و مقاومت باربری بیشتری نسبت به مخلوط‌های آسفالتی با بیشینه‌ی وزن مخصوص کمتری خواهد داشت. با توجه به اینکه مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره، چگالی واقعی و درصد شکستگی بیشتری نسبت به نمونه‌های شاهد دارند



شکل ۴. نتایج مقاومت مارشال برای نمونه‌های با مصالح مختلف و قیر بهینه.

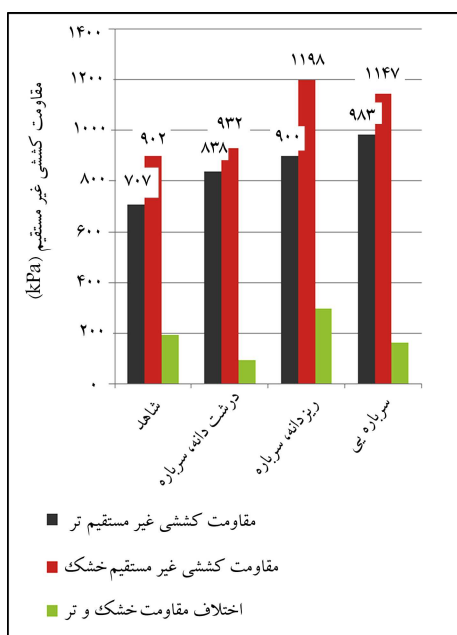


شکل ۳. دستگاه UTM (آزمایش مدول برجهندگی).

جدول ۷. رگرسیون خطی قیر بهینه و درصد وزنی سرباره‌ی استفاده‌شده در نمونه‌های آسفالتی.

شماره‌ی نمونه	درصد وزنی سرباره استفاده‌شده (X)	درصد قیر بهینه (Y)	XY	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>
شاهد (آهکی)	۰	۵,۱۰	۰	۰	۲۶,۰۱
۱۰۰٪ درشت‌دانه، سرباره‌یی	۴۵	۵,۴۰	۲۵۳,۸۰	۲۰۰۹	۲۹,۱۶
۵۰٪ درشت‌دانه، سرباره‌یی	۲۵	۵,۳۰	۱۳۲,۵۰	۶۲۵	۲۸,۰۹
۱۰۰٪ ریزدانه، سرباره‌یی	۶۱,۶	۵,۵۰	۳۳۸,۸۰	۳۷۹۴,۵۶	۳۰,۲۵
۵۰٪ ریزدانه، سرباره‌یی	۳۲,۹	۵,۳۷	۱۷۶,۶۷	۱۰۸۲,۴۱	۲۸,۸۴
کلاً سرباره‌یی	۱۰۰	۵,۶۵	۵۶۵,۰۰	۱۰۰۰۰	۳۱,۹۲
۵۰٪ کل مصالح، سرباره‌یی	۵۴,۴	۵,۴۵	۲۹۶,۴۸	۲۹۵۹,۳۶	۲۹,۷۰
جمع			۱۷۶۳,۲۵	۲۰۶۷۰,۳	۲۰۳,۹۷

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2][n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}} = ۰,۹۸۱$$

$$y_{x-} = ۵,۱۵۳ + ۰,۰۰۰۵x$$


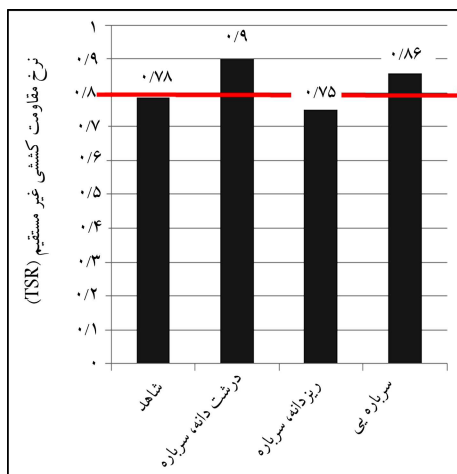
شکل ۵)، بنابراین انتظار می‌رود که دوام و مقاومت بیشتری در مناطق گرمسیری و همچنین تحمل بار خزشی بیشتری داشته باشند. [۲۷]

#### ۲.۴. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم

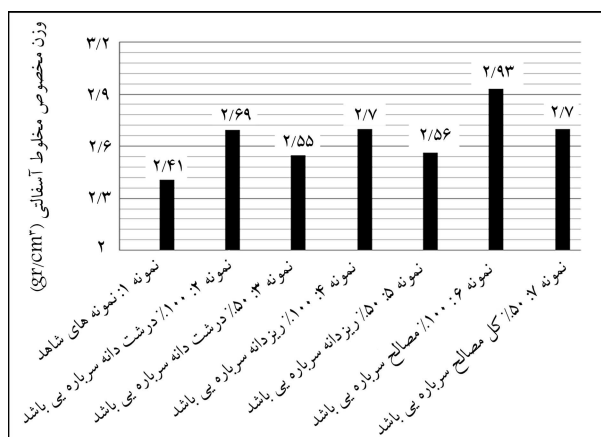
در شکل ۶، نتایج مقاومت کشش غیرمستقیم برای نمونه‌های خشک و تر نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، مقاومت کشش غیرمستقیم برای نمونه‌های تر از نمونه‌های خشک کمتر است. به عبارت دیگر، نمونه‌های تر، که تحت شرایط اشباع و سپس یک چرخه‌ی انجماد و ذوب یخ قرار گرفته‌اند، با افت مقاومت کشش غیرمستقیم مواجه شده‌اند. لیکن میزان این افت برای نمونه‌های مختلف با توجه به نحوه‌ی ترکیب مصالح (جدول ۴) متفاوت است. شکل ۶ نشان می‌دهد که کمترین کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم مربوط به حالت جایگزین کردن مصالح درشت‌دانه‌ی آهکی با مصالح درشت‌دانه‌ی سرباره‌ی فولاد و بیشترین کاهش مقاومت مربوط به حالت جایگزینی مصالح ریزدانه‌ی آهکی با مصالح ریزدانه‌ی سرباره‌ی فولاد است.

نتایج نرخ مقاومت کشش غیرمستقیم که نسبت مقاومت کشش غیرمستقیم در حالت تر به مقاومت کشش غیرمستقیم همان نمونه در حالت خشک نمونه‌ها را توصیف می‌کند، در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مذکور

شکل ۶. نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم تر، خشک و اختلاف مقاومت تر و خشک.



شکل ۷. نرخ مقاومت کشش غیرمستقیم برای نمونه‌های با مصالح مختلف.



شکل ۵. نمودار مربوط به وزن مخصوص (Gmb) نمونه‌ها.

سختی بیشتر و همچنین درصد شکستگی بیشتر مصالح سرباره‌ی فولاد نسبت به سنگ‌دانه‌های آهکی (جدول ۱) باشد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، با اعمال چرخه‌ی اشباع و چرخه‌ی ذوب و انجماد بر روی نمونه‌های آسفالتی، ضریب برجهندگی کاهش یافته و یا به عبارتی، نمونه‌ها نرم‌تر شده‌اند؛ به طوری که بیشینه‌ی میزان کاهش ضریب برجهندگی مربوط به حالتی است که از ریزدانه‌ی سرباره استفاده شده است و کمترین کاهش ضریب برجهندگی مربوط به حالتی است که سنگ‌دانه‌ی درشت‌دانه‌ی آهکی با سنگ‌دانه‌ی درشت‌دانه‌ی سرباره‌ی جایگزین شده‌اند. این تغییرات در شکل ۹ نشان داده شده است. به این ترتیب رطوبت بیشترین تأثیر را در ضریب برجهندگی نمونه‌های حاوی ریزدانه‌ی سرباره‌ی و کمترین تأثیر را در ضریب برجهندگی نمونه‌های حاوی درشت‌دانه‌ی سرباره‌ی داشته است.

به‌طور کلی سرباره‌ی فولاد، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چگالی واقعی بیشتری نسبت به مصالح سنگی طبیعی دارند و به همین دلیل در برابر تغییر شکل‌های دائمی مقاوم‌تر هستند و استفاده از آن‌ها برای روسازی‌هایی که در مناطق گرمسیر ساخته می‌شوند، مقرون به صرفه است. [۲۷]

## ۵. نتیجه‌گیری

هدف اصلی از انجام این پژوهش ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره‌ی کوره‌ی قوس الکتریکی EAF و مقایسه‌ی آن با بتن آسفالتی بوده است. سرباره‌ی کوره‌ی قوس الکتریکی مقاومت مخلوط آسفالتی را در برابر پدیده‌ی عریان‌شدگی افزایش می‌دهد، به نحوی که جایگزین‌کردن بخش درشت‌دانه‌ی مصالح آهکی با مصالح درشت‌دانه‌ی سرباره‌ی فولادی، تأثیر بیشتری در افزایش مقاومت عریان‌شدگی نسبت به جایگزین‌کردن بخش ریزدانه با مصالح سرباره‌ی فولادی داشته است. علاوه بر این موارد، این یافته‌های نتایج حاصل از این پژوهش است:

-- نتایج تحلیل خواص شیمیایی سنگ‌دانه‌های سرباره‌ی نشان داده است که این سنگ‌دانه‌ها خاصیت بازی دارند و در تقابل با قیر که خاصیت اسیدی دارد، پیوند قوی‌تری با قیر تشکیل خواهند داد.

-- نتایج آزمایش جوشاندن حاکی از آن است که مقاومت پیوند قیر با سنگ‌دانه‌ی سرباره‌ی از پیوند قیر با سنگ‌دانه‌ی طبیعی در آب و هوای مرطوب بیشتر است.

-- نتایج آزمایش مارشال نشان داده است که درصد قیر بهینه‌ی متناسب با میزان سرباره‌ی به‌کار برده‌شده در تولید آسفالت است (ضریب همبستگی قیر و درصد سرباره برابر با ۰/۹۸۱ است).

-- استفاده از سنگ‌دانه‌ی سرباره‌ی EAF منجر به افزایش وزن مخصوص واقعی مخلوط آسفالتی می‌شود.

-- نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم نشان داده است که استفاده از سرباره‌ی فولادی قوس الکتریکی باعث افزایش مقاومت کششی مخلوط آسفالتی می‌شود.

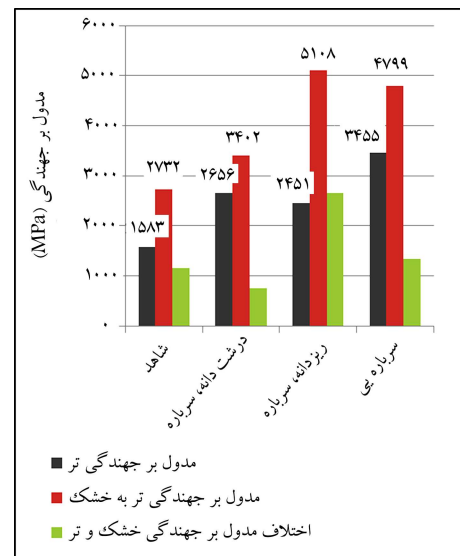
-- نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم همچنین نشان داده است که حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی سرباره‌ی فولادی نسبت به مخلوط آسفالتی شاهد افزایش یافته و سهم درشت‌دانه در این افزایش بیشتر بوده است.

-- نتایج آزمایش ضریب برجهندگی نشان داده است که ضریب برجهندگی مخلوط آسفالتی حاوی سرباره‌ی فولاد نسبت به مخلوط آسفالتی شاهد افزایش یافته و سهم ریزدانه در افزایش ضریب برجهندگی مخلوط بیشتر است.

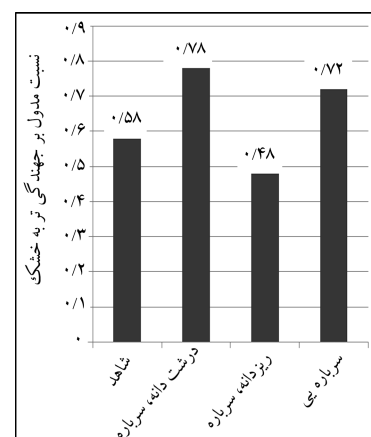
سرباره‌ی فولادی و کمترین آن مربوط به نمونه‌های با مصالح درشت‌دانه سرباره‌ی فولادی است. این نتایج مؤید آن است که با جایگزین‌کردن بخش درشت‌دانه با مصالح سرباره‌ی فولادی می‌توان مناسب‌ترین مقاومت آسفالت را در برابر پدیده‌ی عریان‌شدگی به دست آورد؛ در حالی که استفاده از فقط مصالح ریزدانه‌ی سرباره‌ی فولادی نه تنها مقاومت در برابر پدیده‌ی عریان‌شدگی را افزایش نمی‌دهد، بلکه در مقایسه با سنگ‌دانه‌های آهکی احتمالاً باعث کاهش مقاومت در برابر پدیده‌ی عریان‌شدگی هم خواهد شد.

## ۳.۴. نتایج آزمایش ضریب برجهندگی

نتایج آزمایش ضریب برجهندگی برای نمونه‌های خشک و نمونه‌هایی که تحت چرخه‌ی اشباع و چرخه‌ی ذوب و انجماد قرار گرفته‌اند، در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، استفاده از سنگ‌دانه‌های سرباره‌ی فولاد در مخلوط آسفالتی به جای سنگ‌دانه‌های آهکی به مقدار قابل توجهی ضریب برجهندگی مخلوط آسفالتی را افزایش داده است. علت این پدیده می‌تواند



شکل ۸. نتایج مدول برجهندگی تر و خشک و اختلاف مدول تر و خشک.



شکل ۹. نسبت مدول برجهندگی تر به خشک برای نمونه‌های با مصالح سرباره‌ی و آهکی.



پانوشتها

1. electric arc furnace
2. basic oxygen furnace
3. stone mastic Asphalt
4. Gyrotory
5. Kiggunndu and Robert
6. linear variable differential transformer

منابع (References)

1. Abdi, A. and Kavosi, A. "Evaluation of stripping of aggregate in hot mix Asphalt", *2nd Conference on Asphalt and Asphalt Mixes*, Tehran (2004) (in persian).
2. Liz Hunt, P.E. and Boyle, G.E. "Steel slag in hot mix Asphalt concrete", Oregon Department of Transportation, Final Report ([www.ntl.bts.gov/sec508/slag-final](http://www.ntl.bts.gov/sec508/slag-final)) (2004).
3. Kalyoncu Rustu, S. "Iron and Steel Slag", Available: <http://www.minerals.gov/minerals/pubs/commpditv/iron-Steel-Slag/7930300.pdf> (2000).
4. "Feasibility study of using steel slag in Asphalt pavement", Sepahan Riva Tahghigh, Isfahan (2011) (in persian).
5. "Iron and steelmaking slag in Europe and the environmental legislations", NSA Slag Conference, Tempa (2010).
6. Shen, D.H., Wu, C.M. and Du, J.C. "Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous Asphalt mixture", *Journal of Construction and Building Materials*, **23**(1), pp. 453-461 (2009).
7. Ahmedzade, P. and Sengoz, B. "Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix Asphalt concrete", *Journal of Hazardous Materials*, **165**(1-3), pp. 300-305 (2009).
8. Pasetto, M. and Baldo, N. "Mix design and performance analysis of Asphalt concretes with electric arc furnace slag", *Journal of Construction and Building Materials*, **25**(8), pp. 3458-3468 (2011) (in press).
9. Lizn Hunt, P.E. and Glenn, E. "Steel slag in hot mix Asphalt concrete", Final Report of State Research Project#511, Oregon Department of Transportation (2000).
10. Xue., Y., Wu., S., Hou, H. and Zha, J. "Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in Asphalt mixtures", *Journal of Hazardous Materials*, **138**(2), pp. 261-268 (2006).
11. Ziari, H. and Khabiri, M.M. "Preventive maintenance of flexible pavement and mechanical properties of steel slag Asphalt", *Journal of Environment Engineering and Landscape Management*, **15**(3), pp. 188-192 (2002).
12. Tabatabaei, N. and Bakhshi, P., "Evaluation of using steel slag on stone mastic Asphalt", *2nd Conference on Asphalt and Asphalt Mixes*, Tehran (2004) (in persian).
13. "Iran pavement manual-234", Ministry of Roads & Urban Development, Transportation Research Institute (2011) (in persian).
14. Rezaei, M., *Practical of Road and Pavement*, Adine Publication (1998) (in Persian).
15. Stuart, K.D. "Moisture damage in Asphalt mixtures- a state of the art report", U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 119 p. (1990).
16. Riahi, M. "Evaluation of Influences of hydrated lime on mechanical properties of hot mix Asphalt", A Thesis for the Degree of Master of Science in Computer Engineering, University of Tehran (2008) (in Persian).
17. Hoa, P. and Liu, H.Y. "Effect of bitumen acid number on moisture susceptibility of Asphalt mixtures", *Journal of Testing and Evaluation (JTE)*, **34**(4), (2006).
18. Pinto, I., Kim, Y.R. and Ban, H. "Moisture sensitivity of hot mix Asphalt (HMA) mixtures in Nebraska-phase II", University of Nebraska- Lincoln (2009).
19. Ziari, H. and Tabatabaai, A. "Bitumen & Asphalt testing application guidance", Iran University of Science and Technology (2006) (in Persian).
20. AASHTO, *Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage*, Test Method T283-85, part 2: Methods of Sampling and Testing, Washington D.C. (1986).
21. Austroads Asphalt Test "Stripping potential of Asphalt-tensile strength ratio", Austroads National Asphalt Research Co-ordination Group, Australian Asphalt Pavement Association (2003).
22. Shukla, S.K. and Yin, J.H. "Function and installation of paving geosynthetics", Department of Civil Engineering, Institute of Technology, Banaras Hindue University, Varanasi, India (2002).
23. Boyes, A.J. "Reducing moisture damage in Asphalt mixes using recycled waste additives", California Polytechnic State University (2011).
24. Kandhal, P.S. "Moisture subceptibility of HMA Mixes; Identification of problem and recommended solutions", NCAT Report NO.92-1 (1992).
25. Jahromi, S.G. and Khodaii, A. "Investigation of variables affecting resilient modulus in Asphalt mixes", *Proc. GeoHunan Int. Conf.*, pp. 56-64 (2009).
26. The Asphalt Institute, *Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot Mix Types*, (MS-2), 6th Ed. (1993).
27. Mallick, R.B. and EL-Korchi, T., *Moisture Sensitivity of Hot Mix Asphalt (HMA) Mixtures in Nebraska-Phase II*, Taylor & Francis Group, Boca Raton, New York (2009).