

ارزیابی خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی مصالح سرباره

فولاد قوس الکتریک

مقاله پژوهشی

احسان حسن زاده خباز*، گروه مهندسی مکانیک، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Hasanzadeh.Khabaz@gmail.com

دریافت: ۹۹/۰۱/۲۰ - پذیرش: ۹۹/۰۶/۲۰

صفحه ۳۲-۱۹

چکیده

عمده‌ترین سرمایه گذاری ملی در بخش حمل و نقل، ایجاد راه و ساخت روسازیهاست. در حال حاضر، در ایران اکثر روسازی ها، روسازی آسفالتی است. این روسازیها در اثر گذشت زمان، بار ترافیکی و تغییرات جوی دجا ر خرابیهای می‌شوند. یکی از مهمترین انواع خرابی‌های روسازی های انعطاف پذیر، تغییر شکلهای دائم (ماندگار) می باشد که به اسم شیارشدگی شناخته میشوند. در سالهای اخیر استفاده از سرباره ذوب فلز که یکی از مواد زائد و غیر قابل استفاده کارخانجات ذوب فلز می‌باشد، بعنوان جایگزینی برای بخشی یا تمام مصالح سنگی در لایه‌های مختلف روسازی مورد توجه قرار گرفته است. لذا در این تحقیق به بررسی استفاده از درصدهای مختلف سرباره فولاد به صورت درصدی از مصالح سنگی درشت دانه در دانه بندی طرح اختلاط (۰-۲۵-۵۰-۱۰۰) درصد قیر بپینه و سایر پارامترهای مارشال به دست آمد. جهت بررسی خصوصیات قیر خالص آزمایشات درجه نفوذ، نقطه نرمی، خاصیت انگی، ویسکوزیته و درجه اشتعال انجام شد. همچنین آزمایشات مقاومت مارشال و روانی، کشش غیر مستقیم، حساسیت رطوبتی، مدول برجهندگی، خزش دینامیکی و شیار جای چرخ جهت بررسی تأثیر استفاده از سرباره فولاد بر خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی انجام پذیرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که مقاومت مارشال، مقاومت کششی غیر مستقیم و نسبت مقاومت کششی (اشباع نسبت به خشک) مخلوط‌های حاوی سرباره فولاد قوس الکتریک نسبت به نمونه شاهد بیشتر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی گرم، مقاومت شیارافتادگی، مدول برجهندگی، سرباره فولاد، مقاومت کششی

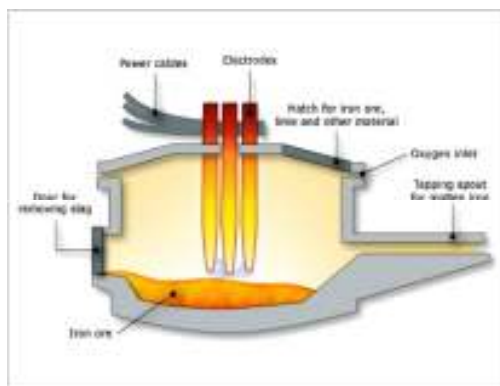
۱-مقدمه

صنعت فولاد و تولید آن در گذشته‌ای دور، یک صنعت پایه برای هر کشوری محسوب می‌گردید و امروزه نیز از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. با این وجود در کنار تولید این محصول ارزشمند محصولات فرعی و جانبی هم تولید می‌گردند که در نهایت به صورت ضایعات، دفع شده و انباشت می‌شوند. سرباره به عنوان محصول جانبی فرایند تولید آهن و فولاد، یکی از انواع مواد زاید به شمار می‌رود. حدود یک قرن از استفاده از سرباره به عنوان مصالح ساختمانی می‌گذرد و به همین دلیل از آن به عنوان شناخته شده ترین جایگزین مصالح سنگی یاد می‌شود. (2007

صنعت فولاد و تولید آن در گذشته‌ای دور، یک صنعت پایه برای هر کشوری محسوب می‌گردید و امروزه نیز از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. با این وجود در کنار تولید این محصول ارزشمند محصولات فرعی و جانبی هم تولید می‌گردند که در نهایت به صورت ضایعات، دفع شده و انباشت می‌شوند. سرباره به عنوان محصول جانبی فرایند تولید آهن و فولاد، یکی از انواع مواد زاید به شمار می‌رود. حدود یک قرن از استفاده از سرباره به عنوان مصالح ساختمانی می‌گذرد و به همین دلیل از آن به عنوان شناخته شده ترین جایگزین مصالح سنگی یاد می‌شود. (2007

سه شکل سرد می‌کنند و بر حسب نحوه سرد کردن به سه شکل در می‌آید: سرباره سرد شده با هوا، خرد و غربال شده در مصارف زیر بکار می‌رود: بلوک‌های ستونی توخالی، زیرسازی جاده، ماسه شیشه‌ای جهت ساختن سرامیک، زه‌کشی فاضلاب، آسفالت بیندر و غیره. سرباره دانه دانه شده با آب، جهت موارد زیر بکار برده می‌شود: سیمان، عایق‌کاری، زیرسازی جاده، مصالح بتون، بلوک‌های ساختمانی خاکریزی راه آهن و سایر خاکریزی‌ها و غیره. (توسلی، ۱۳۷۶). موارد کاربرد سرباره سبک به قرار زیر است: مصالح ساختمانی بتنی، مصالح ضد حریق، فرش کف‌ها، محصولات ساختمانی بصورت قطعات پیش‌ساخته بتونی از جمله تیرو ستون و غیره، آجر، کاشی‌های عایق صدا دیوارهای تیغه‌ای. شکل ۱ تهیه فولادباروش قوس الکتریکی رانشان می‌دهد.

موجود در فلز بوجود می‌آید و در اثر این فعل انفعالات، ناخالصی‌هایی که نباید در چدن وجود داشته باشد، از آهن خام جدا می‌شود. مواد اصلی تشکیل دهنده سرباره عبارت است از CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO که جمعاً ۹۰ درصد سرباره را تشکیل می‌دهند. ۱۰ درصد بقیه عبارتند از FeO , MnO , MnS , CaS و غیره. این اکسیدها به صورت مخلوط یا محلول ساده با یکدیگر نبوده، بلکه در درجات بالاتر از نقطه ذوب آنها (۱۶۰۰) درجه سانتیگراد و بالاتر (به صورت محلول ساده در می‌آید و در حالی که هنوز به صورت مایع هستند خواصی از خود بروز می‌دهند که نشان می‌دهد محلول ساده‌ای نبوده بلکه ترکیبی از مواد معدنی مختلف است. این چهار اکسید در این حالت، اقل از ۲۲ ماده معدنی مختلف که هریک ترکیب شیمیایی و فیزیکی معنی داری دارند تشکیل گردیده و فقط ۷ ماده از این ۲۲ ماده در حد ترکیب سرباره کوره بلند قراردارد. سرباره را به



شکل ۱. مراحل تولید سرباره کوره قوس الکتریکی (Shah, ۲۰۰۳)

اثرات زیست محیطی استفاده از سرباره

توجه با این نکته مهم است که برای تهیه مواد اولیه در راه سازی، سیمان، بتن، آسفالت و ... با تخریب منابع طبیعی، مثل بستر رودخانه ها و کوه ها و ... این عمل انجام می شود و از طرفی سرباره های تولید شده در صنعت فولاد خود نوعی مواد زائد و آلاینده محیط زیست می باشند و چه بهتر که مواد آلاینده محیط زیست را تبدیل به مواد قابل مصرف نموده (بازیافت) و همچنین از تخریب منابع طبیعی که در قرون متمادی به وجود آمده اند و تخریب آنها غیر قابل جبران است، استفاده نمود. علاوه بر ملاحظات زیست محیطی، رویکردهای اقتصادی و مشخصات فنی بالای مصالح تهیه شده از سرباره ها نیز از دلایل اقبال بیشتر به استفاده از این مواد و در نتیجه تبدیل تهدیدهای زیست محیطی ناشی از آنها به یک فرصت مناسب می باشد (NCAT, ۲۰۰۵)

۲- پیشینه تحقیق

برای اولین بار استفاده از سرباره ۷۰۰ سال قبل از میلاد مسیح در بریتانیا ثبت شده است. تاریخچه سرباره را می توان به قدمت فرآیند ذوب که در آن سرباره تولید می شود نشان داد (۱۹۹۸). اولین استفاده مدرن از سرباره در راه سازی در سال ۱۸۱۳ در انگلستان می باشد و پس از آن استفاده از سرباره به سرعت در قاره آمریکا گسترش یافت. برنامه گسترده تر در فعالیت های مختلف از اواسط قرن ۱۹ با کشف خواص هیدرولیکی نهان ریزدانه سرباره آغاز شده و سرباره های بدست آمده در اروپا و آمریکا در ساخت راه مورد استفاده قرار گرفت. در دوره جنگ جهانی اول تولید فولاد و در نتیجه تولید سرباره افزایش یافت. با توجه به افزایش تولید، نیاز به مدیریت مواد زائد نیز پدید آمده و در جاده های نظامی نیز سرباره مورد استفاده قرار گرفت و به حل مشکل کمک کرد (۱۹۹۸). اولین تجربه کاربرد سرباره به عنوان مصالح سنگی در مخلوط آسفالت از سال ۱۹۶۹ زمانی که بخشی از جاده در تورنتو ساخته شده بود ثبت شده است. مخلوط آسفالت مورد مطالعه نشان دهنده خواص بسیار خوبی از نظر ظرفیت باربری، مقاومت در برابر اثرات خارجی و دوام بود. در چند سال اخیر تحقیقات وسیعی در

زمینه به کارگیری سرباره به عنوان سنگدانه در بتن آسفالتی انجام شده است. امکان سنجی استفاده از سرباره فولاد در مخلوط های آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای (SMA²) یکی از این تحقیقات انجام شده در کشور چین است (Shaopeng et al, ۲۰۱۰). ابتدا خواص مکانیکی - فیزیکی و شیمیایی سرباره فولاد با استفاده از آزمایش های MIP³, XRD⁴, SEM⁵ بررسی شده و نتایج تحقیق استفاده از سرباره فولاد به عنوان منبعی مناسب، مقرون به صرفه و کارا را به عنوان سنگدانه در بتن آسفالتی را نشان می دهد. در مطالعه ای که جهت بررسی خصوصیات مخلوط های آسفالتی گرم حاوی سرباره کنورتور در آزمایشگاه قیر و آسفالت دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شد. دو نوع سنگدانه (سرباره کنورتور کارخانه ذوب آهن اصفهان و سنگدانه آهنی از مصالح شکسته کوهی معدن سربندان) و قیر ۷۰/۶۰ پالایشگاه تهران انتخاب شده و پس از تعیین درصد قیر بهینه، نمونه ها با دستگاه ژیراتوری ساخته شدند و با دستگاه UTM¹ مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش درصد سرباره کنورتور در مخلوط های آسفالتی، وزن مخصوص - استقامت مارشال و مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط متراکم شده زیاد می شود (Babagoli et al, 2020).

آزمایش دیگری در سال ۲۰۱۲ در کشور مالزی با استفاده از قیر با درجه نفوذ ۱۰۰/۸۰ و سرباره فولاد از پوراتا دردمای ۲۵ و ۴۰ درجه سانتیگراد براساس روش آزمون ۴۱۲۳-۸۲ انجام شد (Xicheng QI and Matthew W. Witczak, ۲۰۱۲). در این مقاله نمونه های بتن آسفالتی را تحت آزمایش مدول انعطاف پذیر - تست خزش و تست شیارشدگی قرار دادند که نتایج بسیار بهتری نسبت به نمونه آسفالتی با سنگدانه های معمولی داشت و حجم بسیار زیاد تری از ترافیک در طول زمان را جواب می داد. بطور کلی نتایج حاصل از تحقیق افزایش مقاومت شیارشدگی و مقدار قیر بهینه بیشتر و تغییر شکل کمتر و چسبندگی بیشتر مخلوط های آسفالتی حاوی سرباره نسبت به مخلوط آسفالتی با مصالح سنگی را نشان می داد. کاووسی و همکاران نشان دادند که مخلوط های آسفالتی حاوی ۲۵ درصد سرباره فولاد مقاومت خستگی و مدول برجهندگی بیشتری نسبت به مخلوط های شاهد دارد. (Brown, Kandhal and

خصوصیات عملکردی مخلوط می گردد. (Behiry, ۲۰۱۳). در تحقیق دیگری که توسط احمدزاده انجام شد، تاثیر استفاده از سرباره به عنوان بخش درشت دانه مورد بررسی قرار گرفت. ۴ درصد مختلف قیر با دو نوع مختلف جهت ساخت نمونه‌های مارشال و تعیین درصد قیر بهینه مورد استفاده قرار گرفت. خصوصیات مکانیکی مخلوط اعم از مقاومت مارشال، کشش غیرمستقیم، سختی خزشی مورد ارزیابی قرار گرفت. حساسیت الکتریکی نمونه‌ها نیز مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد استفاده از سرباره در بخش درشت دانه مخلوط سبب بهبود خصوصیات عملکردی مخلوط گردیده است. (Ahmedzade and Sengoz, 2009). در تحقیق دیگری که توسط خلیلی و همکاران انجام شد کاربرد درصد‌های مختلف سرباره ۰ و ۵۰ و ۷۵ و ۱۰۰ درصد (بر عملکرد مخلوط مورد ارزیابی قرار گرفت). طرح اختلاط مخلوط براساس مارشال انجام شد. نتایج نشان داد اضافه نمودن سرباره سبب افزایش چگالی و مقاومت مخلوط و کاهش روانی نمونه‌ها گردیده است. نتایج نشان داد استفاده از سرباره جایگزین مناسبی برای مخلوط می باشد. (Zumrawi, M. M. 2016)

۳-روش تحقیق

روش انجام تحقیق شامل انتخاب مصالح، ساخت نمونه‌های آسفالت با درصد‌های مختلف سرباره و در نهایت انجام آزمایش‌های مارشال، مدول برجهنگی، کشش غیرمستقیم و تغییر شکل‌های دائمی بر روی نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی سرباره بود.

۳-۱- مصالح سنگی و قیر

در این پژوهش آزمایشگاهی، از مصالح سنگی کوهی به عنوان سنگدانه استفاده شده است و قیر ۶۰-۷۰ مصرفی جهت ساخت نمونه‌ها از پالایشگاه اصفهان به عنوان یکی از پر مصرف‌ترین قیرهای رایج در کشور انتخاب شده است. همچنین فیلر مورد استفاده از جنس پودر سنگ، از معدن مربوط به مصالح سنگی تهیه شده است. با توجه به اینکه عمده مصرف مصالح سنگی در روسازیهای آسفالتی از سنگدانه‌های آهکی می باشد (بالغ بر ۸۵ درصد) و با توجه

(Zhang, ۲۰۰۱) احمدزاده و همکاران نیز با ارزیابی جایگزینی درشت دانه مخلوط با سرباره نشان دادند که استفاده از سرباره فولاد منجر به بهبود حساسیت رطوبتی می‌شود (Asi et al, 2007). در مطالعات دیگری (Ahmedzade and Sengoz, ۲۰۰۸) با جایگزینی ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد درشت دانه با سرباره نوع BOF^۷ نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم تمامی مخلوطها از حدود مجاز ۷۰٪ بیشتر بدست آمد. شن و همکاران (Shen et al, 2009) مطالعاتی را در خصوص جایگزینی سرباره نوع BOF، در مخلوط آسفالتی درشت دانه SMA انجام داد و به این نتیجه رسید که مخلوطهای حاوی سرباره عملکرد بهتری نسبت به مخلوط کنترل حاوی مصالح سنگی بازالتی و آهکی در برابر رطوبت دارد. ژی (2012) (Yongjie et al) با استفاده از آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم و مدول ارتجاعی و همچنین مفهوم انرژی کرنش خزشی تلف شده (DCSE^۸)، نشان داد که مخلوطهای حاوی سرباره نوع BOF، نشان داد که این مخلوطها نسبت به مخلوط حاوی مصالح سنگی بازالتی عملکرد بهتری دارد. در تحقیق دیگری که توسط ون و همکاران انجام شد کاربرد سرباره مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق درصد‌های مختلف (۰٪، ۲۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪) به مخلوط اضافه گردید. طرح اختلاط برای مخلوطهای آسفالتی براساس طرح اختلاط سوپریپو انجام شد. خصوصیات عملکردی مخلوط از جمله مدول دینامیکی، خزش دینامیکی، خصوصیات شکست مخلوط و خصوصیات شیارشدگی مخلوط توسط دستگاه ویل تراک هامبورگ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد اضافه نمودن سرباره سبب افزایش مقاومت در برابر ترکهای حرارتی، مقاومت شیارشدگی، مدول دینامیکی می گردد. (Wen et al, 20۱۴). در تحقیق دیگری که توسط احمد حسین انجام شد، خصوصیات عملکردی مخلوط حاوی سرباره و سنگدانه آهکی جهت کاربرد در روسازی راههای مصر مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین در این تحقیق یک آنالیز تئوری جهت تخمین مقاومت برای فاکتورهای شکست از جمله تغییرشکل دائمی، تنش های عمودی و شعاعی و کرنش‌های شعاعی زیراساس زیر بارگذاری سنگین کامیون مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد جایگزین کردن سرباره با مصالح آهکی سبب بهبود

گردید. در این تحقیق سرباره به صورت درصدی از مصالح سنگی درشت دانه در دانه بندی طرح اختلاط (۰-۲۵-۵۰-۱۰۰ درصد سرباره فولاد جایگزین مصالح سنگی درشت-دانه) جایگزین گردید. خصوصیات مصالح و سنگی و قیر در جداول ۱ و ۲ آورده شده است. ضمناً ترکیبات شیمیایی سرباره در جدول ۳ و برخی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سرباره در جدول ۴ نشان داده شده است.

به لزوم نزدیکی محل کارخانه آسفالت و معدن مصالح سنگی مصرفی به کارخانه ذوب آهن اصفهان و هماهنگی‌های به عمل آمده با کارخانه آسفالت ایران کوه متعلق به شرکت اصفهان بتن راه (در شعاع ۴۰-۵۰ کیلومتری کارخانه ذوب آهن)، مصالح سنگی از شرکت تهیه و توزیع مواد معدنی ایران واحد سنگ آهک پیربکران استفاده شد. سرباره فولاد ذوب آهن اصفهان نیز از کارخانه ذوب آهن اصفهان تهیه

جدول ۱. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده

استاندارد آزمایش		حدوده مجاز طبق نشریه 234		نتایج آزمایش	شرح
ASTM	AASHTO	روپه	استر		
-	T96	30	40	22/3	حداکثر سایز به روش لوس انجلس (درصد)
-	-	25	30	9	حداکثر سایز به روش با روش 85812 (درصد)
D5821	-	90	80	94	حداقل درصد شکستگی Chart Area 4 (به الگ شماره 4)
-	T85	2/5	2/5	2/2	حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت دانه)
-	T84	2/5	2/8	2/4	حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)

جدول ۲. مشخصات فیزیکی قیر

نوع آزمایش	استاندارد	نتیجه آزمایش
نقطه نرمی	ASTM D36	17 درجه سانتیگراد
درجه نفوذ در دمای 25 درجه	ASTM D5	67 دسی میلیمتر
درجه اشتعال	ASTM D92	304 درجه سانتیگراد
شکل پذیری در دمای 25	ASTM D113	بیش از 100 سانتیمتر
چگالی	ASTM D70	1/045 gr/cm ³
افت حرارتی	ASTM D6	0/05 درصد
قابلیت حل	ASTM D4	99/5 درصد

جدول ۳. آنالیز شیمیایی سرباره فولادی

عنصر	توانیات
Cao	40-52
Sio2	10-19
Feo	10-40
	(70-80% FeO ₂ , 20-30% Fe ₂ O ₃)
Mno	5 - 8
Mgo	5 - 10
Al2o3	1 - 3
P2o5	0/5 - 1
S	< 0/1
Metallic Fe	0/5 - 10

جدول ۴: آنالیز فیزیکی و مکانیکی سرباره فولادی

مقدار	خاصیت
3/2-3/6	وزن مخصوص
1600-1920	جرم واحد وزن (kg/m ³)
بیش از 3٪	جذب آب
20-25	سایش لوس آنجلس (درصد)
40-50 درجه	زاویه اصطکاک داخلی
<12	افت لومی سولفات سدیم
6-7	سختی
بالاتر از 300	نسبت طاقالت کالیفرنیا (CBR) برای دانه های بالاتر از 19 میلیمتر

نمونه کاملاً سرباره با حروف EF مشخص شده است. مصالح سنگی در دمای ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد در حدود ۱۲ ساعت در یک گرمخانه گرم شدند و با قیر در دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد مخلوط شدند. و در داخل قالب‌های از قبل گرم شده تا دمای اختلاط ریخته شدند. تراکم این مخلوط توسط چکش مارشال انجام گرفته است. تراکم برای ترافیک سنگین ۷۵ ضربه برای هر طرف استفاده شده است. درصد فضای خالی مخلوط متراکم، درصد فضای خالی مصالح سنگی، درصد فضای خالی مصالح سنگی پر شده با قیر با توجه به استاندارد انیستیتو آسفالت محاسبه گردید که منحنی‌های آن در جدول زیر نشان داده شده است.

طراحی مخلوط بتن آسفالتی: برای طراحی مخلوط بتن آسفالتی از استاندارد مارشال استفاده شده است. نمونه‌های آسفالتی با ۶ مقدار قیر مختلف ۳، ۳/۵، ۴/۵، ۵/۵ و ۵/۵ با سه نمونه از هر کدام آماده شدند. در این آزمایش نمونه‌های مختلف با درصد‌های مختلف (۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ درصد درشت دانه و نمونه کاملاً سرباره‌ای) سرباره نوع EAF^۹ ساخته و همچنین نمونه‌های با مصالح سنگی آهکی، با درصد‌های مختلف قیر تهیه گردید. برای نامگذاری نمونه‌های حاوی سرباره از حرف E و برای نمونه‌های کنترل از حرف L استفاده شده است. همچنین درصد جایگزینی سرباره بجای درشت دانه مخلوط پس از خط تیره نشان داده شده و

جدول ۵: خصوصیات وزنی حجمی نمونه‌های مختلف

نوع نمونه	درصد قیر	انقباض مارشال (KN)	روانی (0.25 mm)	وزن مخصوص ترمای (Gmb)	درصد جذب آب	وزن مخصوص توریگ حداکثر (Gmm)	درصد فضای خالی	درصد قیر جذب شده (Pba)	درصد قیر موزن (Pbe)	VMA	VFA	نسبت غلظت قیر موثر
E-25	۲/۷	۱۱/۷	A	۲/۳۳	۰/۳۲	۲/۵۳	۴	۰/۳۸	۲/۳۳	۱۵/۲	۷۰	۰/۹۲
E-50	۲/۹	۱۳/۱	A/T	۲/۲۹	۰/۱۳	۲/۲	۴	۰/۵۸	۲/۳۱	۱۶/۴	۷۴	۰/۸۷
E-75	۵	۱۳/۷	A/1	۲/۵۲	۰/۲۵	۲/۲۲	۴	۰/۸۲	۲/۲۰	۱۴/۱	۷۵	۰/۹۵
E-100	۵/۲	۱۴	A	۲/۵۷	۰/۲۶	۲/۲۷	۴	۰/۹۹	۲/۱۸	۱۷	۷۵	۰/۸۳
EF	۵/۷	۱۵/۸	A	۲/۵۹	۰/۳۸	۲/۷۰	۴	۱/۱۱	۲/۵۷	۱۸/۲	۷۲	۰/۷۷
L	۲/۶	۱۰/۸	A/T	۲/۳۷	۰/۵۳	۲/۲۷	۴	۰/۲۶	۲/۳۳	۱۲/۶	۷۰	۰/۹۲

۴- روش کار آزمایش

۴-۱- آزمایش کشش غیرمستقیم

ترک‌ها در مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود. همچنین می‌توان از این آزمایش برای ارزیابی عمر خستگی نیز استفاده کرد.

در این آزمایش یک نمونه استوانه‌ای به صورت قطری بارگذاری می‌شود. آزمایش کشش غیرمستقیم برای تعیین مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی و پیش‌بینی ظهور

۴-۲-مدول برجهدگی

با فشار حدود ۱۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع مورد بارگذاری فرار می‌گیرند. فرکانس بارگذاری برای هر نمونه ۱هرتز و دمای آزمایش ۵۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. در مجموع نمونه‌ها تحت ۸۰۰ سیکل بارگذاری قرار گرفتند و پس از آن ماکزیمم عمق شیار به وجود آمده در هر نمونه اندازه‌گیری و میانگین سه نمونه به عنوان عمق شیار هر مخلوط به دست آمد.

۵- تحلیل نتایج آزمایشات

۵-۱- نتایج آزمایش مارشال

نتایج آزمایش مارشال برای هر ۶ سری مخلوط نشان می‌دهد که بیشترین و کمترین درصد قیر بهینه به ترتیب مربوط به مخلوط حاوی مصالح اهکی و مخلوط کاملاً سرباره ای می‌باشد. همانگونه که در جدول (۱-۴) 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 اهکی با مصالح سرباره ای) به دلیل درگیری و قفل و بست موثر سنگدانه‌ها، این پارامتر به شکل چشمگیری افزایش می‌یابد به گونه‌ای که با جایگزین شدن کل مصالح سنگی اهکی با مصالح سرباره‌ای، استقامت مارشال مخلوط آسفالتی حدود ۴۵ درصد افزایش پیدا کرده است. استقامت مخلوط آسفالتی به دو عامل اصطکاک داخلی و چسبندگی بستگی دارد. 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.

برای تعیین مدول برجهدگی از استاندارد -۱۳-۲۸۹۱-AS ۱۹۹۵ استفاده شد. ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در محفظه دستگاه در دمای ۲۵ قرار داده شد. شکل بارگذاری نیمه سینوسی، مدت اعمال بار ۰/۱ ثانیه، زمان استراحت ۰/۹ ثانیه و ضریب پواسون ۰/۳۵ فرض گردید. در این آزمایش به ازای هر مخلوط، ۳ نمونه آسفالتی تهیه و روی هر نمونه ۵ پالس تکرار شد و میانگین نتایج به وسیله دستگاه نمایش داده شد.

۴-۳- آزمایش حساسیت رطوبتی

این آزمایش براساس استاندارد AASHTO-T283 انجام می‌گیرد. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها بر طبق این استاندارد در شرایط اشباع و غیر اشباع باید بیش از ۰/۷۵ باشد. برای اشباع شدن، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب ۶۰ درجه قرار گرفتند.

۴-۴- خزش دینامیکی

جهت بررسی شیارشدگی نمونه‌ها از آزمایش خزش دینامیکی استفاده شد. آزمایش خزش دینامیکی یکی از معیارهای مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکلهای دائم می‌باشد. آزمایش با استفاده از دستگاه UTM-5P در دمای ثابت ۵۰ درجه سانتیگراد و تحت تنش ثابت ۴۵۰ کیلو پاسکال که به صورت شبه سینوسی اعمال شد، انجام گرفت. در این آزمایش یک تنش ثابت در دمای ثابت با مدت بارگذاری ۰/۱ ثانیه و زمان استراحت ۰/۹ ثانیه، توسط یک صفحه صلب به صورت عمودی به نمونه وارد می‌شود. نتایج آزمایش بر حسب عدد روانی برداشت شد که معیاری برای نشان دادن مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکلهای دائمی می‌باشد یعنی هر قدر عدد روانی بزرگتر باشد، مقاومت نمونه در برابر تغییر شکلهای دائم بیشتر است.

۴-۵- شیار جای چرخ

این آزمایش توسط دستگاه شیار جای چرخ موجود در آزمایشگاه قیر و آسفالت دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شد. برای هر نوع مخلوط سه نمونه مارشال در دستگاه قرار می‌گیرد و توسط دو چرخ که حول مرکزشان دوران می‌کنند

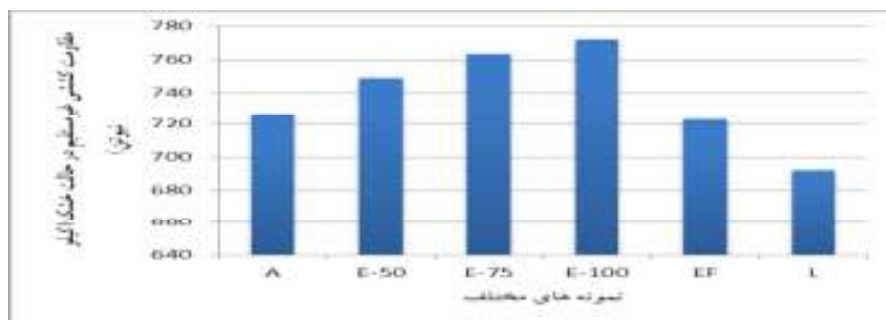
جدول ۶. نتایج آزمایش مارشال

نوع نمونه	درصد قیر بهینه	اسفالت مارشال (KN)	روانی ۰.۲۵ (mm)	وزن مخصوص توده ای (Gmb)	درصد جذب آب	وزن مخصوص تورینگ حداکثر (Gmm)	درصد فضای خالی	درصد قیر جذب شده (Pba)	درصد قیر موزن (Pbe)	VMA	VFA	نسبت غلظت قیر موزن
E-25	۴/۷	۱۱/۷	۸	۲/۳۳	۰/۳۶	۲/۵۳	۴	۰/۳۸	۴/۳۴	۱۵/۲	۷۰	۰/۹۲
E-50	۴/۹	۱۳/۱	۸/۲	۲/۴۹	۰/۱۳	۲/۶	۴	۰/۵۸	۴/۳۱	۱۶/۴	۷۴	۰/۸۷
E-75	۵	۱۳/۷	۸/۱	۲/۵۴	۰/۲۵	۲/۲۴	۴	۰/۸۴	۴/۲۰	۱۶/۱	۷۵	۰/۹۵
E-100	۵/۲	۱۴	۸	۲/۵۷	۰/۲۶	۲/۶۷	۴	۰/۹۹	۴/۱۸	۱۷	۷۵	۰/۸۳
EF	۵/۷	۱۵/۸	۸	۲/۵۹	۰/۳۸	۲/۷۰	۴	۱/۱۱	۴/۵۷	۱۸/۲	۷۲	۰/۷۷
L	۴/۶	۱۰/۸	۸/۳	۲/۳۷	۰/۵۳	۲/۳۷	۴	۰/۲۶	۴/۳۴	۱۴/۶	۷۰	۰/۹۲

۵-۲- نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم

جایگزینی کل بخش درشت دانه با مصالح سرباره بالاترین میزان مقاومت کششی غیر مستقیم را دارا می باشد. بطوریکه سبب افزایش ۱۳ درصدی در مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها گردیده است. افزایش مقاومت مخلوطهای آسفالتی در برابر تنش های کششی وارد شده بر آن بر اثر بار ترافیک، در نهایت باعث افزایش عمر روسازی خواهد شد.

پس از ساخت نمونه‌ها با قیر بهینه، آزمایش کشش غیر مستقیم بر روی آنها انجام پذیرفت. نتایج در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به نتایج، افزایش درصد سرباره به عنوان بخشی از قسمت درشت دانه باعث بهبود عملکرد مخلوطهای آسفالتی شده است. به طوریکه با جایگزینی ۲۵ درصد از مصالح درشت دانه با مصالح سرباره، مقاومت کششی از ۶۹۰ به ۷۲۸ کیلونیوتن افزایش یافت. همچنین



شکل ۲. مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها در حالت خشک

۵-۳- حساسیت رطوبتی

آسفالتی می‌شود: از بین رفتن چسبندگی میان قیر و مصالح سنگی، نرم شدن و نهایتاً از بین رفتن پیوستگی ذرات قیر. تا کنون آزمایشهای مختلفی برای اندازه گیری پتانسیل ایجاد خرابی در روسازیه‌ها بر اثر وجود رطوبت ابداع شده است. که عبارتند از: آزمایش استاندارد اب جوشان، آزمایش غوطه ور استاتیک، آزمایش غوطه ور دینامیک، آزمایش استاندارد

از اواسط دهه ۵۰ میلادی رطوبت به عنوان عاملی که تأثیر مخرب بر روسازیهای آسفالتی دارد، شناخته شد. یکی از مهمترین مشکلات روسازی های انعطاف پذیر، عریان شدگی می باشد که به از بین رفتن چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی در مخلوط آسفالتی به دلیل وجود رطوبت اتلاق می‌شود. دو عامل باعث بروز عریان شدگی در مخلوطهای

زیر اب و تحت خلأ نسبی قرار داده شد، به نحویکه درصد اب جذب شده به نمونه‌ها به ۵۵ تا ۸۰ درصد حجم فضای خالی نمونه‌ها برسد. سپس نمونه‌ها در یک چرخه ذوب و یخبندان قرار گرفت و در نهایت آزمایش کشش غیرمستقیم در دمای ۲۵ سانتی گراد انجام شد. در آزمایش کشش غیر مستقیم، نمونه بصورت خوابیده بین فک های بارگذاری دستگاه بارگذاری فشاری قرار میگیرد. سپس نمونه تحت بار قرار گرفته و بار با نرخ تغییر شکل ثابت ۵۰ میلی متر/ ثانیه به نمونه اعمال میگردد و بارگذاری تا زمان گسیختگی نمونه ادامه می یابد. جهت انجام آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم از دستگاه UTM-14P استفاده گردید تا بتوان تغییرات تنش و کرنش را در هر لحظه و همچنین در لحظه گسیختگی ثبت نمود. مقاومت کششی هر یک از نمونه‌ها با توجه به حداکثر بار اعمال شده و ابعاد نمونه محاسبه گشته و در نهایت شاخص نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم (TSR^{11}) به دست می‌آید. شاخص ۸۰٪ برای نمونه‌ها به عنوان شاخصی مطلوب پذیرفته شده است.

لاتمن، آزمایش غرقاب کردن مکانیکی، آزمایش استاندارد تراکم غوطه وری، آزمایش، آزمایش اصلاح شده لاتمن، آزمایش شیارشدگی چرخ هامبورگ، آزمایش نسبت مارشال، آزمایش تشدید شرایط محیطی، آزمایش سختی کششی نمونه‌های پیرشدهی اشباع شیوهای که بیشتر مورد استفاده قرار گرفته و برای ارزیابی حساسیت نمونه‌های اسفالتی در برابر رطوبت در تحقیقات $SHRP^{10}$ نیز مشخص شده است، روش AASHTO-T283 می‌باشد. در این روش که براساس غرقاب کردن نمونه‌هاست، تغییرات مقاومت کششی غیر مستقیم بعد از قرارگیری تحت شرایط و غرقاب شدن مورد بررسی قرار میگیرد. برای انجام این آزمایش دو سری نمونه استوانه‌های متراکم شده تهیه شد، به نحویکه میانگین فضای خالی آنها تقریباً با هم برابر باشد (۶٪ تا ۸٪ برای مخلوط‌های با دانه‌بندی پیوسته). یک سری از نمونه‌ها داخل کیسه‌های پلاستیکی قرار گرفته و کاملاً ایزوله شده و ۲ ساعت در حمام اب با دمای ۲۵ درجه سانتی گراد قرار گرفت. سپس آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم بر روی آنها انجام شد. دومین مجموعه از نمونه‌ها برای مدتی مقاومت کششی نمونه‌ها از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

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

D: قطر نمونه (m) t: ضخامت نمونه (m) P: حداکثر بار (KN)

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

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

پیوند قویتر قیر با مصالح سربارهای باشد. نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت اشباع به حالت خشک نمونه‌ها نشان میدهد که تمام نمونه‌ها حداقل نسبت توصیه شده (۸۰٪) در اکثر استانداردها را تامین مینماید. بیشترین مقدار TSR مربوط به نمونه تماماً سرباره ایست که ناشی از پیوند

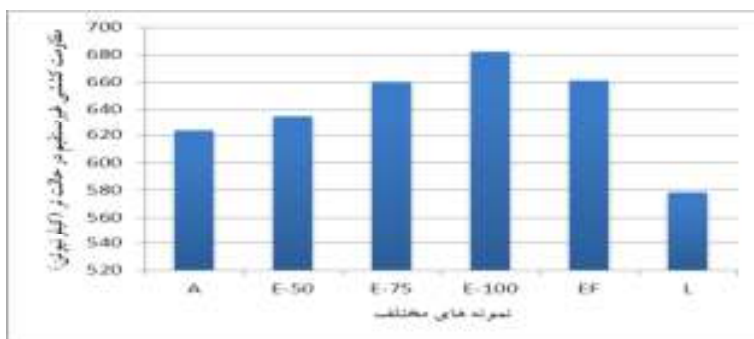
نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم در شکل های ۲ الی ۴ ارائه شده است. همانطور که نتایج این آزمایش نشان میدهد با افزایش درصد سرباره، مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها افزایش یافته است بدین ترتیب که مقاومت کششی مخلوط ۱۰۰- E۱۵٪ از مخلوط شاهد بیشتر است که این امر میتواند به دلیل شکستگی بیشتر مصالح سربارهای و

قویتر مصالح سرباره‌های با قیر و همچنین درصد بیشتر قیر در مخلوط است.

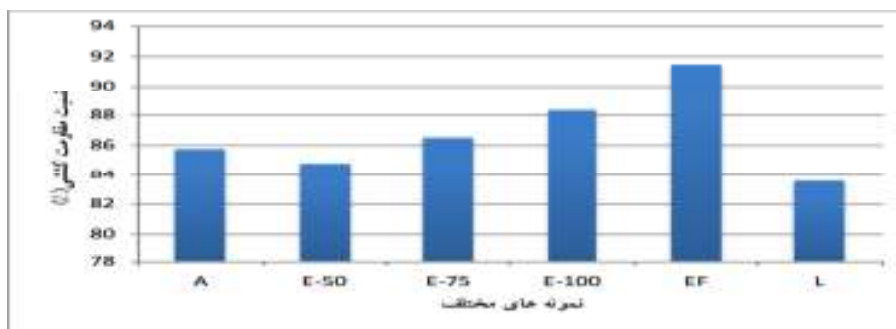
مخلوط شاهد بیشتر است که این امر میتواند به دلیل شکستگی بیشتر مصالح سرباره‌های و پیوند قویتر قیر با مصالح سرباره ای باشد. در بین نمونه های مختلف مخلوط آسفالتی با مصالح تماماً آهکی کمترین مقدار مدول برجهنگی را دارا می باشد.

همانطور که نتایج این آزمایش نشان میدهد با افزایش درصد سرباره، مدول برجهنگی نمونه ها افزایش یافته است بدین ترتیب که مدول برجهنگی مخلوط E100- حدود ۱۵٪ از

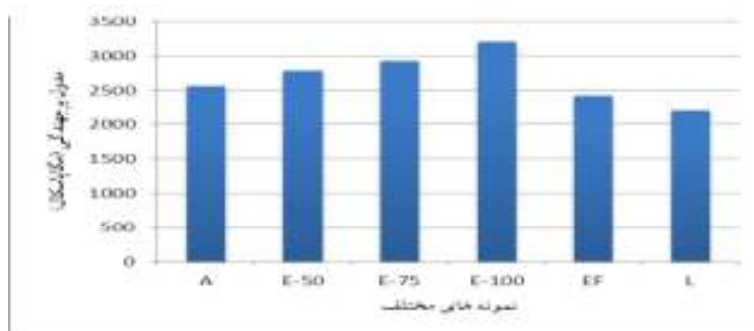
۴-۵- مدول برجهنگی



شکل ۳. مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه ها در حالت تر



شکل ۴. نتایج نسبت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها

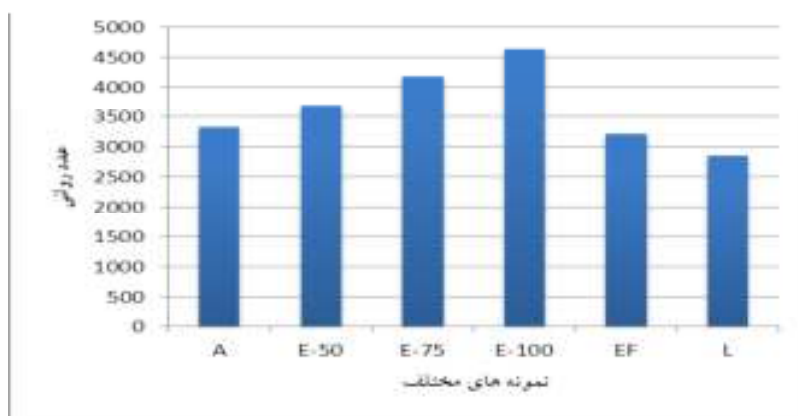


شکل ۵. نتایج مدول برجهنگی نمونه‌ها

۶-۴- تحلیل نتایج حاصل از آزمایش خزش دینامیکی

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می شود مخلوط با دانه بندی ۱۰۰ درصد سرباره بیشترین استحکام شیارشدگی را در بین مخلوط ها دارد و این بدین مفهوم است که این مخلوط بیشترین تعداد سیکل بارگذاری را تا رسیدن به ناحیه تسلیم شیارشدگی یا ناحیه سوم تحمل می کند. بعد از آن هم مخلوط با ۵۰ درصد سرباره بیشترین استحکام شیارشدگی را به خود اختصاص داده است. اضافه نمودن سرباره به قسمت درشت دانه مخلوط سبب افزایش قفل و بست سنگدانه ها و افزایش مقاومت مخلوط در برابر بارهای عمودی وارده می گردد. با کاهش میزان درصد سرباره به عنوان بخشی از مصالح درشت دانه، مقاومت شیارشدگی مخلوط کاهش می یابد. ولی همانطور که از نمودار پیداست کمترین مقدار استحکام شیارشدگی برای مخلوط با سنگدانه اهکی می باشد. با توجه به شکل می توان نتیجه گرفت که استفاده از درصد های مختلف سرباره در مخلوط های آسفالتی باعث افزایش استحکام شیارشدگی می گردد.

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می شود مخلوط با دانه بندی ۱۰۰ درصد سرباره کمترین مقدار عمق شیار را دارا می باشد و این بدین مفهوم است که بیشترین استحکام شیارشدگی را در بین مخلوط ها دارد. بعد از آن هم مخلوط با ۵۰ درصد سرباره بیشترین استحکام شیارشدگی را به خود اختصاص داده است. با کاهش میزان درصد سرباره به عنوان بخشی از مصالح درشت دانه، مقاومت شیارشدگی مخلوط کاهش می یابد. اضافه نمودن سرباره به قسمت درشت دانه مخلوط سبب افزایش قفل و بست سنگدانه ها و افزایش مقاومت



شکل ۶. تغییر شکل دائمی برای نمونه های ساخته شده با درصد های مختلف سرباره

۶-۵- نتایج آزمایش شیار جای چرخ هامبورگ

مخلوط در برابر بارهای عمودی وارده می گردد. ولی همانطور که از نمودار پیداست کمترین مقدار استحکام شیارشدگی برای مخلوط با سنگدانه اهکی می باشد. با توجه به شکل می توان نتیجه گرفت که استفاده از درصد های مختلف سرباره در مخلوط های آسفالتی باعث افزایش استحکام شیارشدگی می گردد. همانطور که از نتایج پیداست، نتایج آزمایش شیار جای چرخ هامبورگ با نتایج آزمایش عدد روانی مطابقت دارد.

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می شود مخلوط با دانه بندی ۱۰۰ درصد سرباره کمترین مقدار عمق شیار را دارا می باشد و این بدین مفهوم است که بیشترین استحکام شیارشدگی را در بین مخلوط ها دارد. بعد از آن هم مخلوط با ۵۰ درصد سرباره بیشترین استحکام شیارشدگی را به خود اختصاص داده است. با کاهش میزان درصد سرباره به عنوان بخشی از مصالح درشت دانه، مقاومت شیارشدگی مخلوط کاهش می یابد. اضافه نمودن سرباره به قسمت درشت دانه مخلوط سبب افزایش قفل و بست سنگدانه ها و افزایش مقاومت



شکل ۷. نتایج عمق شیار نمونه‌ها

۶. نتیجه گیری

- نمونه‌های آسفالتی حاوی سرباره در آزمایش مدول برجهنگی عملکرد بهتری نسبت به مخلوط ساخته شده با مصالح سنگی آهکی داشتند.
- مقایسه مقدار شیارشدگی مخلوط حاوی ۱۰٪ سرباره با مخلوط گرم تازه نشان می‌دهد که کاربرد سرباره موجب افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی می‌شود.
- مقدار عدد روانی نمونه‌های حاوی سرباره که از آزمایش خزش دینامیکی بدست آمده است نشان می‌دهد عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره از مخلوط‌های آسفالتی با مصالح آهکی بهتر است.
- با توجه به نتایج آزمایش شیارشدگی بر روی مخلوط می‌توان نتیجه گرفت که جایگزینی ۱۰٪ بخش درشت دانه مخلوط با سرباره بالاترین مقاومت را در برابر تغییر شکلهای دائمی از خود نشان می‌دهد.

۷- پی‌نوشت‌ها

- 1- Blast Furnace Slag
- 2- Stone matrix Asphalt
- 3- Scanning Electron Microscopy
- 4- X-Ray Diffraction
- 5- Mercury Intrusion Porosimetry
- 6- Universal Testing Mashine
- 7- Basic Oxygen Furnace
- 8- Dissipated Creep Strain Energy
- 9- Electric Arc Furnace

- با بررسی نتایج آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه به طور خلاصه می‌توان نتایج را به دست آورد.
- نتایج آزمایش‌های مصالح سنگی نشان می‌دهد که سرباره‌های فولادی، خصوصیات لازم برای استفاده در لایه‌های روسازی راداراست و در بسیاری از پارامترها، مانند سایش لوس انجلس، شاخص شکل و بافت سطحی و درصد فضای خالی متراکم نشده، بهتر از سنگدانه‌های آهکی است.
- فراوری مصالح سرباره‌ای به خوبی انجام شده و آهک و منیزیم آزاد موجود در آن هیدراته شده است چرا که افزایش حجم نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با مصالح کاملاً سرباره‌ای کمتر از ۱٪ است. از این رو استفاده از این مصالح در مخلوط آسفالتی خطر افزایش حجم مخرب در اثر جذب رطوبت را ندارد.
- نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم نشان می‌دهد که مقاومت کششی نمونه‌های حاوی سرباره در هر دو حالت خشک و اشباع بطور معنی داری بیشتر از نمونه شاهد است. که این امر می‌تواند ناشی از شکستگی بیشتر مصالح سرباره‌ای و ایجاد قفل و بست بهتر مصالح و قیر و همچنین چسبندگی بیشتر قیر با مصالح سرباره‌ای باشد. نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌ها، حداقل مقدار TSR پیشنهادی اکثر استانداردها (۸۰٪) را تامین می‌نماید. با افزایش درصد سرباره این نسبت نیز افزایش یافته است.

-Cheryl Solomon, Slag-iron and Steel, (1988),
www.minerals.usgs.gov/minerals/plus.

10- Strategic Highway Research Program
11- Tensile Strength Ratio

۸- مراجع

-Kim, S., & Coree, B. J. (2005). Evaluation of hot mix asphalt moisture sensitivity using the Nottingham asphalt test equipment (No. IHRB Project TR-483), Iowa State University, Center for Transportation Research and Education.

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

-Qi, X., & Witczak, M., (1998), "Time-dependent permanent deformation models for asphaltic mixtures", Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, (1639), pp.83-93.

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

-Shah, B. D., (2003), "Evaluation of Moisture Damage within Asphalt Concrete Mixes", a Thesis for master of science, Texas A& M University.

-Ahmedzade, P., & Sengoz, B. (2009), "Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete", Journal of Hazardous Materials, 165(1), pp.300-305.

-Shen, D.H., Wu, C.M., Du, J.C., (2009), "Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture", Construction and Building materials, 23(1), pp. 453-61.

-Babagoli, R., (2020), "Investigation of the high-temperature behavior of asphalt binders modified by warm additives through performance grade and multiple stress creep and recovery system", Journal of Materials in Civil Engineering, 32(2), 04019344.

-Wen Haifang, Bhusal Sushanta, and Wu Edward, (2014), "Evaluation of Steel Slag as Hot Mix Asphalt Aggregate", Washington Center for Asphalt Technology (WCAT) Washington State University Pullman, WA 99164.

-Behiry, A. E. A. E. M., (2013), "Evaluation of steel slag and crushed limestone mixtures as subbase material in flexible pavement", Ain Shams Engineering Journal, 4(1), pp.43-53.

-Zumrawi, M. M., (2016), "Experimental Study of Steel Slag Used As Aggregate in Asphalt Mixture".

-Brown, E. R., Kandhal, P. S., & Zhang, J., (2001), "Performance testing for hot mix asphalt, National Center for Asphalt Technology Report, (01-05).

Evaluation of Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt Mixture Containing Electric Arc Furnace (EAF) Steel Slag

Ehsan Hassanzadeh Khabbaz, Department of Mechanical Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran.

E-mail: Hasanzadeh.Khabbaz@gmail.com

Received: March 2020-Accepted: September 2020

ABSTRACT

The major national investment in the transportation sector is the creation and construction of pavements. Currently in Iran, most of the pavements are asphalt mixture. It has been damaged by the passage of time, traffic loads, and atmospheric changes. One of the most important types of flexible pavements is the change of permanent forms known as rutting. In recent years, the use of metal melting slag, one of the waste of the metal melting plants, has been considered as an alternative to parts or all rock materials in different layers of metal. In this study, we investigated the use of different percentages of steel slag as a percentage of coarse rock material in gradation of mixture (0 - 25 - 75 - 75 % of slag in alternative rock material)... using the method of mixing Marshall, optimum bitumen and other Marshall parameters. In order to investigate the properties of the pure bitumen, penetration point, ductility, viscosity, and degree of fire were performed. Also, the tests of Marshall and flow, indirect tensile, moisture susceptibility, resilient modulus, dynamic creep and wheel placement were performed to investigate the effect of the use of فولاد slag on the functional properties of asphalt mixture. The results of this study showed that the compressive strength, indirect tensile strength and tensile strength ratio (saturation to dry of mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag were higher than control mixture.

Keywords: Hot Mix Asphalt, Rutting Resistance, Resilient Modulus, Steel Slag, Tensile Strength