مطالعه‌ی آزمایشگاهی تأثیر سرباره‌ی مس بر خواص مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی سرد درجا با قیرهای امولسیونی

مصطفی وامق*، دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
حامد روح‌الامینی، دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
سید احمد موسوی رق آبادی، کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول:Mostafa_Vamegh@yahoo.com
دریافت: ۹۷/۰۶/۰۱- پذیرش: ۹۷/۱۱/۰۵
صفحه ۴۰۳-۳۹۰

چکیده

امروزه فناوری بازیافت در اکثر شاخه‌های علوم ازجمله روسازی استفاده می‌شود. افزایش هزینه‌های ساخت و نگهداری راه، مشکلات تهیه مواد اولیه مرغوب، کمبود منابع مالی از سوی دیگر حجم بالای تخریب و نوسازی ساختمان‌ها و راه‌ها باعث به وجود آمدن میزان قابل‌توجه ضایعات شده که این مواد ضایعاتی یکی از عوامل اصلی آلودگی محیط‌زیست بوده و از طرفی ذخیره و دپوی آن‌ها سطح قابل‌توجهی از زمین‌های باارزش را اشغال می‌کند و همچنین نیاز برای ترمیم و نگهداری راه باعث شده است که بازیافت آسفالت به‌طورجدی در دستور کار سازمان‌های زیربط قرار می‌گیرد. ازآنجایی‌که تحقیقات محدودی درزمینهٔ تأثیر افزودنی‌ها بر خواص آسفالت‌های بازیافتی در دنیا انجام‌شده است، ضرورت پژوهش بیشتر در زمینه تأثیر افزودنی‌ها بر خواص مخلوط‌های بازیافتی به چشم می‌خورد؛ در این پژوهش، کاربرد سرباره مس به‌عنوان مصالح سنگی جدید جهت اصلاح دانه‌بندی مخلوط بازیافتی آسفالت سرد طبق مشخصات فنی اجرایی این نوع آسفالت مورد ارزیابی قرار گرفت است. برای این منظور از مصالح خرده آسفالت با سرباره مس و مصالح آهکی با مقادیر ۱۵ و ۲۵ درصد وزنی مصالح و قیر امولسیونی آنیونی و کاتیونی مورداستفاده قرارگرفته است. تأثیر هرکدام از افزودنی‌های سنگ‌دانه‌ای بر خواص مخلوط‌های بازیافتی به‌وسیله آزمایش استقامت مارشال، آزمایش دوام، آزمایش مدول برجهندگی و آزمایش تغییر شکل دائم موردبررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن سرباره مس منجر به بهبود مقاومت آسفالت سرد در برابر تغییر شکل دائم (تا ۶۰ درصد)، استقامت مارشال (تا ۲۳ درصد) و افزایش مدول برجهندگی (تا ۲۷ درصد) می‌شود. نمونه‌های ساخته‌شده با قیر امولسیونی آنیونی عملکرد بهتری (از ۹ تا ۳۸ درصد) نسبت به نمونه‌های ساخته‌شده با قیر کاتیونی دارد.

واژگان کلیدی: بازیافت سرد درجا؛ سرباره مس؛ خرده آسفالت بازیافتی؛ تغییرشکل دائم؛ مدول برجهندگی.

۱-مقدمه

حفاظت از محیط‌زیست راهی برای بقا زندگی است و توسعه پایدار تنها با بهره‌وری از محیط‌زیست میسر می‌شود. در دهه‌های اخیر رشد تولیدات صنعتی و افزایش مداوم مصرف، سبب کاهش بیش‌ازپیش منابع طبیعی موجود شده است و در همین زمان محصولات توسط صنایع مختلف در حال تولید است و از سوی دیگر حجم بالای تخریب و نوسازی

ساختمان‌ها و راه‌ها باعث به وجود آمدن میزان قابل‌توجه ضایعات شده که این مواد ضایعاتی یکی از عوامل اصلی آلودگی محیط‌زیست بوده و از طرفی ذخیره و دپوی آن‌ها سطح قابل‌توجهی از زمین‌های باارزش را اشغال می‌کند [BAR Manual, 2001; Taherkhani et al, 2015]. در حال حاضر بسیاری از کشورها و شرکت‌های بین‌المللی در تلاش‌اند تا با استفاده از روش‌های نوین اثرات منفی ناشی از مواد ضایعاتی را به حداقل برسانند. یکی از روش‌هایی که امروزه بیشتر مورداستفاده قرار می‌گیرد، کاربرد مجدد ضایعات از طریق تبدیل آن‌ها به مواد قابل‌استفاده یا کاربرد مستقیم از آن‌ها در روسازی‌های آسفالتی است [Khanzadi and Behnood, 2009; Silva et al, 2012]. افزایش تقاضا برای حمل‌ونقل و وسایل نقلیه در دو دهه اخیر، در کنار محدودیت سرمایه‌ای، منجر به افزایش نیاز به بهسازی رویه راه‌های موجود شده است. بازیافت و بهسازی آسفالت، روشی مفید و سودمند برای بازسازی رویه راه‌های موجود می‌باشد .بازیافت و بهسازی رویه‌های آسفالتی نه‌تنها اهداف موردنظر ازجمله داشتن راه‌های ایمن و کارآمد را تأمین می‌کند، بلکه کاهش چشمگیری نیز در تأثیرات سوء زیست‌محیطی و مصرف انرژی (نفت) در مقایسه با روش‌های رایج و قبلی بازسازی رویه‌های آسفالتی دارد. علاوه بر جنس مصالح سنگی بکار رفته در مخلوط‌های آسفالتی، عامل دما (به‌عنوان مهم‌ترین و اثرگذارترین عامل در فرآیند تولید) نیز بر روی عملکرد مخلوط آسفالتی اعم از خصوصیات عملکردی (درازمدت، میان‌مدت و کوتاه‌مدت،) فنی و مکانیکی و همچنین عملکرد محیط‌زیستی مخلوط تأثیرگذار می‌باشند. بازیافت سرد روشی اقتصادی و محیط‌زیستی در راستای بهسازی و نوسازی رویه‌های آسفالتی است . بازیافت سرد درجا (CIR) یک روش نوسازی روسازی بدون استفاده از گرما می‌باشد. برخی از مزایای بازیافت سرد عبارت‌اند از کاهش اختلال در ترافیک، کاهش مصرف مصالح جدید و قیر در ساخت مخلوط آسفالتی و کاهش هزینه، انرژی و نگرانی‌های زیست‌محیطی می‌باشد. همچنین این روش زمان ساخت کمتری نسبت به روش‌های نوسازی متداول دارد و از این روش برای بازیابی مشخصات روسازی‌های قدیمی و از بین برد شیار شدگی، ناهمواری‌ها و چاله‌ها استفاده کرد [Ameri and Behnood, 2012]. بنابراین استفاده از مصالح خرده آسفالت[1] (RAP) در مخلوط‌های آسفالتی به‌جای مصالح جدید مورد استقبال فراوانی قرارگرفته است که موجب کاهش مصرف سنگ‌دانه طبیعی و قیر در مخلوط‌های آسفالتی جدید می‌شود. در سال ۲۰۰۶، در قاره اروپا بالغبر۵۰ هزار تن مصالح خرده آسفالتی موجود بوده است که بیش از ٤٠ درصد آن در بازیافت گرم، ۲۵ درصد در بازیافت سرد و حدود ۲۵ درصد نیز در تولید مخلوط‌های گرم آسفالتی مورداستفاده قرارگرفته است [Khanzadi and Behnood, 2009; Modares and Hosseini 2015]. سرباره مس محصول جانبی تولید و پالایش مس است که برای تولید هر تن مس، حدود ۲/۲ الی ۳ تن سرباره تولید می‌شود. سرباره مس به دلیل داشتن مقدار مناسب آهن دارای سختی و وزن مخصوص بالایی هست و از مزایای سرباره می‌توان به مقاومت فشاری و سایشی بالا، زاویه اصطکاک داخلی بالا، گوشه‌دار بودن و سطح زبر مصالح اشاره کرد. با توجه به مزایای سرباره مس به‌صورت گسترده در بالاست راه‌آهن، صنایع سیمان و ... استفاده می‌شود و همچنین از این محصول می‌توان به‌صورت گسترده در ساخت‌وساز راه‌ها در لایه‌های رویه، اساس و زیراساس مورداستفاده قرار داد [Khanzadi and Behnood, 2009; Behnood et al, 2015]. هرساله حدود ٢٤/٦ میلیون تن سرباره مس از صنعت مس در دنیا تولید می‌شود. میزان تولید سرباره مس در ایران، برزیل، ژاپن، آمریکا به ترتیب ۰/۳٦، ۰/۲٤٤، ۲ و ٤ میلیون تن در سال است[Kumar, 2013].

در ایران بیشترین میزان سرباره‌ی مس در مجتمع مس سرچشمه کرمان تولید می‌گردد. دفع چنین مقادیر عظیمی از سرباره در طبیعت، علاوه بر اشغال پهنه‌ی وسیعی از زمین-های اطراف کارخانه‌های تولید مس، سبب به وجود آمدن مشکلات زیست‌محیطی زیادی می‌شود. سرباره فرآوری شده که توسط جریان هوا خنک و متبلور (دانه‌ای) شده باشد، مقاومت مناسب در برابر سایش و دوام بالا دارد که آن را گزینه‌ای مناسب جهت استفاده در بتن و آسفالت تبدیل می‌کند. استفاده از سرباره مس در مخلوط آسفالتی گرم توسط هیئت تحقیقات حمل‌ونقل واشنگتن و همچنین سرباره مس ریزدانه در مخلوط آسفالت گرم در کالیفرنیا و سرباره مس متبلور در جرجیا برای افزایش دوام آسفالت استفاده گردیده است. اداره کل راه و حمل‌ونقل ایالت

میشیگان سرباره مس ریز و درشت‌دانه را به‌عنوان مصالح متداول در مخلوط‌های آسفالتی معرفی کرده است[Ciesielski and Collins, 1994]. در سال ۲۰۱۱ پژوهشی توسط حسن و الجبری بر روی مخلوط آسفالتی گرم حاوی سرباره مس تا ٤٠ درصد وزن مخلوط به‌عنوان ریزدانه، انجام گردیده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های استقامت مارشال، مدول دینامیکی و مقاومت کششی غیرمستقیم نشان می‌دهد با افزایش درصد سرباره مقاومت مخلوط آسفالتی کاهش ولی نسبت مقاومت کششی (TSR) افزایش پیدا می‌کند[hassan and Al-Jabri, 2011]. Paselto و Baldo در سال ۲۰۱۱ تاثیر دو نوع سرباره آهن بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی بررسی کردند. در این پژوهش آزمایش‌های تغییر شکل دائم، مدول سختی، خستگی و مقاومت در برابر رطوبت بر روی مخلوط‌های آسفالتی ساخته‌شده با سرباره آهن انجام‌گرفته است و نتایج نشان می‌دهد استفاده از سرباره در تولید مخلوط آسفالتی نتایج رضایت‌بخش را به دنبال دارد [Pasetto and Baldo, 2011]. همچنین Oluwasola و همکاران در سال ۲۰۱۵ بر روی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره مس و سرباره آهن تحقیقی انجام دادند. در این مطالعه آزمایش‌های استقامت مارشال، حساسیت رطوبتی، مدول برجهندگی و خزش برای ارزیابی عملکرد نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف سرباره مس و سرباره آهن انجام گرفت و نتایج بیانگر بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی با افزایش درصد سرباره مس و سرباره آهن می‌باشد و بهترین عملکرد در مخلوط‌های حاوی ۲۰ درصد سرباره مس و ۸۰ درصد سرباره آهن اتفاق میافتد[Oluwasola et al, 2015]. Raposeiras و همکاران در سال ۲۰۱٦ با انجام آزمایش‌های مارشال، آزمایش کشش غیرمستقیم و آزمایش مدول برجهندگی خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی گرم حاوی سرباره مس و RAP را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این آزمون‌ها نشان داد استفاده از سرباره مس و RAP عمکرد این مخلوط‌ها بصورت مطلوبی بهبود میبخشد و همچنین بهترین عمکلرد در مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۳۵ درصد سرباره مس و ۲۰ درصد RAP اتفاق می‌افتد[Raposeiras et al, 2016].

همچنین تحقیقاتی متنوعی هم درزمینه‌ی استفاده از سرباره مس در بتن به‌عنوان مصالح سنگی درشت‌دانه و ریزدانه و تأثیر آن بر روی خواص مکانیکی و خواص بلندمدت ملات و بتن انجام‌گرفته است [Khanzadi and Behnood, 2009; Ayano et al, 2000]. باوجود تحقیقات گسترده انجام‌شده بر روی استفاده از سرباره مس در بتن، تابه‌حال مطالعات کمی درزمینه‌ی تأثیر این نوع سرباره در مخلوط‌های آسفالتی بازیافت سرد انجام‌گرفته است. در این تحقیق هدف اصلی، مقایسه تأثیر استفاده سرباره مس و مصالح آهکی به‌عنوان جایگزین برای مصالح سنگی جدید در مخلوط‌های بازیافتی سرد با قیر امولسیون آنیونی و کاتیونی می‌باشد. برای این منظور آزمایش‌های استقامت مارشال (ASTM D1559)، مدول برجهندگی (AUSTRALIAN AS2891.13.1)، حساسیت رطوبتی (ASTM D1075) و خزش دینامیکی(BS-DD226) بر روی ٤ نوع مخلوط آسفالتی شامل دو نمونه با ۱۵ و ۲۵ درصد مصالح آهکی و دو نمونه با ۱۵ و ۲۵ درصد سرباره‌ی مس انجام شد. مصالح آهکی و سرباره استفاده‌شده در این تحقیق به‌عنوان بخشی از مصالح سنگی ریزدانه جهت اصلاح دانه‌بندی مخلوط بازیافتی سرد استفاده‌شده است.

۲- مصالح

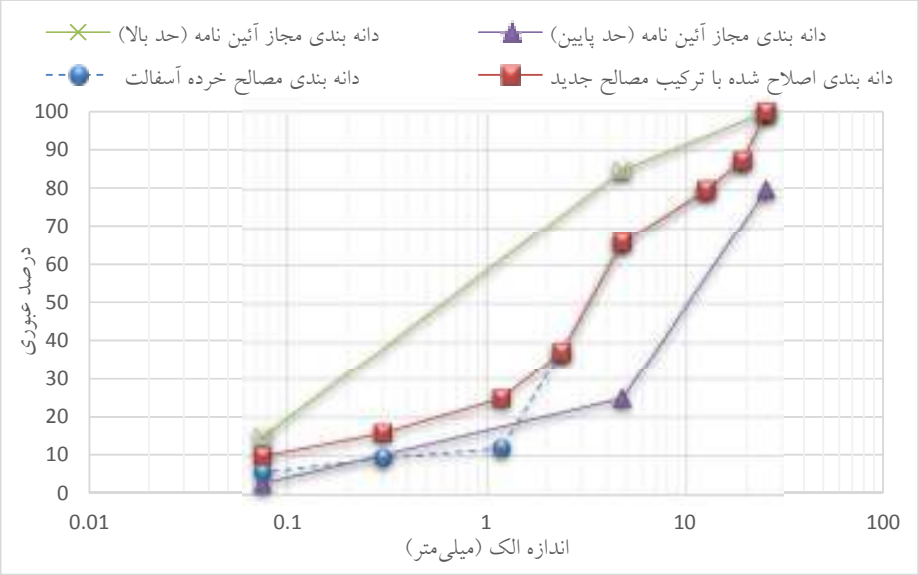
۲-۱- خرده آسفالت، سرباره مس و مصالح سنگی

مصالح خرده آسفالت از شهرداری منطقه ۱۳ تهران تهیه شد. مقدار قیر مطابق با استاندارد ASTM D2172 برابر با ۳/۹٪ به دست آمد. به‌منظور تطبیق دانه‌بندی خرده آسفالت با محدوده دانه‌بندی مجاز می‌بایست مصالح خرده آسفالت مانده روی الک ۲۵ میلی‌متر حذف یا شکسته شود [Cold Mix Recycling No. 339, 2007]. پس از استخراج قیر، دانه‌بندی مصالح در هیچ‌یک از رده‌بندی‌های مجاز آیین‌نامه بازیافت سرد آسفالت کشور (نشریه شماره ۳۳۹) قرار نگرفت. بنابراین برای اصلاح دانه‌بندی از مصالح سنگی جدید آهکی و سرباره مس استفاده گردید. لیکن به دلیل اینکه در بازیافت آسفالت به روش سرد استفاده از مصالح سنگی جدید حداکثر تا ۲۵٪ وزن کل مصالح سنگی مجاز است [Cold Mix Recycling No. 339, 2007]، مصالح سنگی جدید (آهکی و سرباره مس) به میزان ۱۵ و ۲۵ درصد وزن کل مصالح سنگی اضافه شد. با توجه به درصد کم ریزدانه در مصالح خرده آسفالتی، مصالح جدید در بخش ریز

دانه بندی به مخلوط اضافه گردید؛ با این تغییرات، دانه‌بندی مصالح در رده دانه‌بندی شماره ٤ مشخصات فنی اجرایی بازیافت سرد آسفالت (نشریه ۳۳۹) قرار گرفت [Cold Mix Recycling No. 339, 2007].

دانه‌بندی مصالح سنگی استخراج‌شده و همچنین دانه‌بندی اصلاح‌شده با مصالح سنگی جدید به همراه حدود بالا و پایین مجاز در شکل ۱ نشان داده‌شده است.

مصالح سنگی جدید آهکی از معدن اسب چران بومهن و سرباره مس از مجتمع مس سرچشمه کرمان تهیه گردید. مصرف سیمان برای مخلوط جهت کسب مقاومت اولیه بسیار مؤثر است ولی مقدار آن نباید بیش از ۲ درصد وزنی مخلوط باشد [Cold Mix Recycling No. 339, 2007; Kavossi And Modres, 2010] در این تحقیق از ۱/۵ درصد سیمان تیپ دو استفاده شد. مشخصات فیزیکی سرباره مس و مصالح آهکی در جدول ۱ و مشخصات شیمیایی سرباره مس و سیمان مصرفی در جدول ۲ آورده شده است.



شکل۱. دانه‌بندی مخلوط و محدوده‌ی دانه‌بندی مجاز

جدول۱. مشخصات فیزیکی سرباره مس و مصالح آهکی

خواص فیزیکی	سرباره مس	مصالح آهکی	استاندار آزمایش
چگالی(g/cm^3)	۳/۸۷	۲/۷۱	ASTM C127
درصد جذب آب	۰/٤۳	۰/٦۸	AASHTO T84
سختی(moh)	٦-۷	---	-
ارزش خرد شدن مصالح(%)	۱۰-۲۱	۲۳	IS:2386
ارزش ضربه(%)	۸/۲-۱٦	----	BS 812
سایش لس‌آنجلس(%)	۲٤/۱	۲۱/۷	AASHTO T96

جدول۲. مشخصات شیمیایی سرباره مس و سیمان مصرفی (درصد)

اکسیدهای اصلی تشکیل‌دهنده	سرباره مس	سیمان
Fe_2O_3	۵۳/۳٦	۳/۸٦
SiO_2	۳۳/۲٤	۲۰/۷۹
Al_2O_3	۸/۸۵	٤/۷٦
CaO	٦/٤	٦۲/۲۸
MgO	۳۲/۱	۳/۲۲
CuO	۰/۹۸	
SO_3	۱/۱۷	۱/۸۹
K_2O	۷٤/۱	۰/۸٦
TIO_2	۰/۷۵	
ZNO	۱/۱	

۲-۲- قیر امولسیون

انتخاب نوع امولسیون ازنظر سازگاری با مصالح سنگی و نوع دانه‌بندی حائز اهمیت است. ازآنجایی‌که قیرهای امولسیونی دارای بار الکتریکی سطحی مثبت یا منفی هستند، هنگام مخلوط شدن با مصالح سنگی مختلف ویژگی‌های متفاوتی را بروز می‌دهند[Ameri and Behnood, 2012].

در این تحقیق از قیر امولسیون آنیونیک (SS-1) و قیر امولسیون کاتیونیک (CSS-1) با توجه به دارا بودن بارهای سطحی متفاوت و مقایسه اثر آنها در مخلوط آسفالتی، استفاده‌شده است. در جدول ۳ ویژگی این نوع قیرهای امولسیونی ارائه‌شده است.

۳- طرح اختلاط

در این تحقیق از روش اصلاح‌شده مارشال برای تعیین درصد قیر و آب بهینه مخلوط‌های بازیافتی مورداستفاده قرار گرفت. بر اساس این روش در مرحله تعیین درصد قیر امولسیون بهینه، رطوبت کل موجود در مخلوط ۳ درصد می‌باشد و درصد قیر امولسیون برای ساخت نمونه‌ها ۲/۵، ۳، ۳/۵، ٤ و ٤/۵ درصد وزن کل مخلوط می‌باشد.

(درصد آب موجود در مصالح سنگی + درصد آب قیر امولسیون) – ۳ = آبی که باید به اختلاط افزوده شود

سپس با توجه به معیارهای مندرج در نشریه ۳۳۹ و AASHTO و نتایج آزمایش استقامت مارشال، وزن مخصوص و درصد فضای خالی، درصد قیر امولسیون بهینه تعیین گردید. بعد از تعیین درصد امولسیون قیر بهینه، نمونه‌هایی با درصد قیر امولسیون بهینه و درصدهای مختلف آب (۲/۵، ۳، ۳/۵، ٤، ٤/۵) تهیه شد و سپس با استفاده از نتایج آزمایش وزن مخصوص و درصد فضای خالی (درصد فضای خالی نمونه‌های بازیافتی بایستی بین ۹ تا ١٤ درصد باشد) درصد بهینه آب تعیین گردیده است[AASHTO-AGC-ARTBA, 1998, Cold Mix Recycling No. 339, 2007]. در مجموع برای تعیین درصد قیر و آب اختلاط، ۲٤۰ نمونه مارشال تهیه شد. نتایج درصدهای قیر و آب بهینه برای ٤ نوع مخلوط در جدول ٤ نشان داده‌شده است. پس از تعیین مقدار قیر امولسیون و آب بهینه، نمونه‌های لازم برای انجام آزمایش‌های مدول برجهندگی، حساسیت رطوبتی و خزش دینامیکی با استفاده از دستگاه متراکم کننده‌ی ژیراتوری متراکم و ساخته شد.

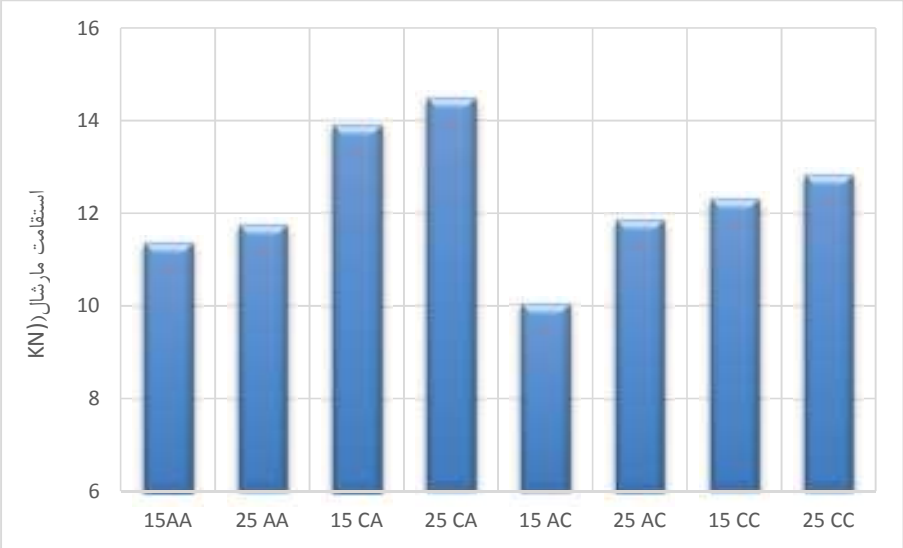
در این تحقیق نمونه‌ها با کلمات ۳ حرفی نام‌گذاری و معرفی شدند. اولین حرف بیانگر درصد مصالح و دومین حرف بیانگر نوع مصالح مصرفی می‌باشد و سومین حرف بیانگر نوع قیر امولسیونی می‌باشد. (در دومین حرف C نمایشگر سرباره مس و A نمایشگر مصالح سنگی آهکی و در حرف سوم A نمایشگر قیر امولسیونی کاتیونیک و C نمایشگر قیر امولسیونی آنیونیک می‌باشد. به‌عنوان‌مثال 15AA نمایشگر نمونه با ۱۵ درصد مصالح سنگی آهکی و با قیر آنیونیک می‌باشد).

جدول۳. خواص فیزیکی قیرهای امولسیونی

آزمایش	SS-1	CSS-1	استاندارد آزمایش
کند روانی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد(ثانیه)	۳/۸۷	۲/۷۱	ASTM D244
پایداری	۰/۴۳	۰/۶۸	ASTM D6930
درصد قیر شکسته شده در اختلاط با سیمان	۶–۷	---	ASTM D244
درصد وزنی قیر	۱۰–۲۱	۲۳	ASTM D244
درجه نفوذ قیر پس‌مانده در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۸/۲–۱۶	۱۱	ASTM D5

جدول٤. درصد قیر و آب بهینه مخلوط‌ها

نام نمونه	درصد قیر بهینه	درصد آب بهینه
15 AA	۳/۵۳	۳/۵۲
25 AA	۳/۵۸	۳/۵۷
15 CA	۳/۴۰	۳/۳۹
25 CA	۳/۳۵	۳/۴۳
15 AC	۳/۴۵	۳/۴۹
25 AC	۳/۵۱	۳/۵۱
15 CC	۳/۳۶	۳/۳۷
25 CC	۳/۳۵	۳/۴۱



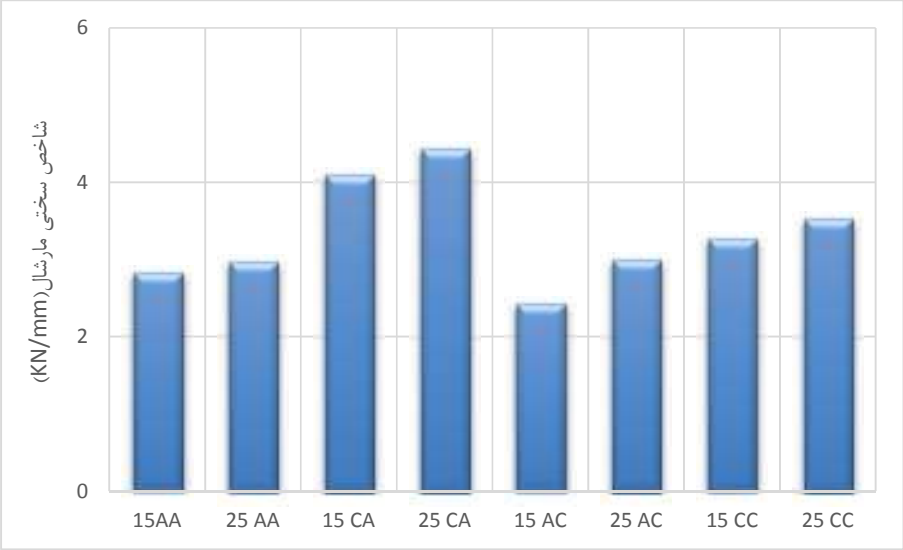
شکل۲. نتایج آزمایش مارشال

٤- آزمایش‌ها و نتایج

٤-١- آزمایش مارشال

در ایـن آزمـایش مقاومـت مارشـال و روانـی (ASTM D1559) وزن مخصـوص (ASTM D2726) و درصـد فضای خالی نمونه‌ها تعیین گردید. همچنین نسبت مقاومت مارشـال بـه روانـی یـا شـاخص سـختی مارشـال (MQ)(KN/mm) محاسبه گردید. این پارامتر شاخصی برای تعیین مقاومت مخلـوط در برابـر تغییـر شـکل دائـم هنگـام بهره‌برداری از روسازی است. هر چه ایـن نسـبت بـزرگ‌تـر باشد، مخلوط تولیدشده سخت‌تر و در برابر تغییر شکل دائم مقاوم‌تر مـی‌باشـد[Zoorob and Suparma, 2000]. نتـایج آزمایش مارشال نمونه‌های آزمایش‌شده در جدول ۵ ارائه‌شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده مـی‌شـود، اسـتقامت مارشال نمونه‌های 15CA به میزان ۲۲٪ از نمونه‌های 15AA بیشتر است. همچنین مقاومت نمونه‌های 25CA، ٪۲۵بیشـتر از به نمونه‌های 25AA می‌باشد. مقایسـه‌ی نتـایج اسـتقامت مارشال نمونه‌هـای 15AA بـا 25AA و 15CA بـا 25CA نشان‌دهنده‌ی تأثیر اندک درصد مصالح جدید در برابـر نـوع مصالح جدید می‌باشد.

برای مثال مقاومت نمونه‌هـای 25AA تنهـا ٪۳/۷ بیشـتر از 25AA و مقاومت نمونه‌های 15CA، 22% بیشتر از 15AA می‌باشد. در مورد نمونه‌های ساخته‌شده بـا قیـر امولسـیونی کاتیونیک روند با اندکی اخـتلاف شـبیه بـه قیـر امولسـیونی آنیونیک می‌باشد ولی استقامت مارشـال نمونـه‌هـای آنیـونی بیشتر از نمونه‌های حاوی قیر امولسیونی کـاتیونی مـی‌باشـد. بعلاوه نمونه‌های حاوی سرباره مس دارای شـاخص سـختی مارشال بزرگ‌تری نسبت به نمونه‌های حاوی مصـالح آهکـی می‌باشند. با توجه به شکل ۳ با افزایش درصد مصالح آهکـی از مقدار شاخص سختی مارشال کاسته می‌شـود ولـی مقـدار این شاخص با افـزایش سـرباره مـس افـزایش مـی‌یابـد کـه نشان‌دهنده مقاومت بیشتر مخلوط در برابر تغییر شـکل دائـم است. نمونه‌های حاوی سرباره مس شاخص سختی مارشـال بالاتری نسبت به نمونه‌های حاوی مصالح آهکـی دارنـد. بـا افزایش درصد مصالح آهکی این افزایش قابل‌ملاحظه نیسـت ولی افـزایش ایـن شـاخص بـا افـزایش سـرباره مـس قابـل توجه است.



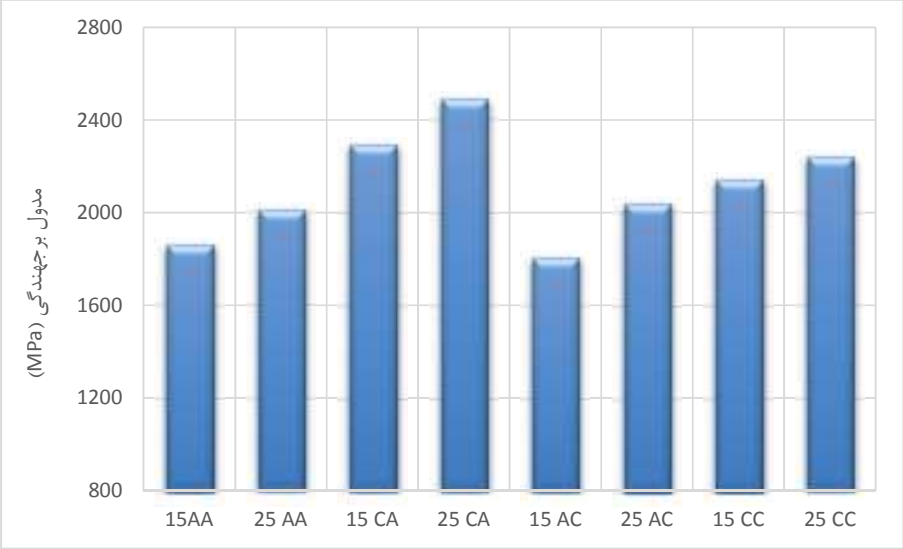
شکل۳. نتایج شاخص سختی مارشال

٤-۲- مدول برجهندگی

مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی مهم‌ترین متغیری است که در طرح روسازی به روش مکانیستیک بکار برده می‌شود. ضریب برجهندگی به‌عنوان ورودی مدل تئوری‌های الاستیک برای به دست آوردن طرح ضخامت بهینه بکار می‌رود. دقت تعیین مدول برجهندگی جهت بررسی میزان عریان شدگی آسفالت، خستگی و ترک‌های ناشی از دمای پایین نیز مهم می‌باشد [Wahhab and Asi, 1997; Niazi and Jalili, 2009]. آزمایش مدول برجهندگی با استفاده از دستگاه UTM-5P[۲] طبق استاندارد AUSTRALIAN AS2891.13.1-1995 انجام شد. این آزمایش در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و شکل بارگذاری نیمه سینوسی با مدّت زمان اعمال بار ۰/۱ ثانیه و زمان استراحت ۰/۹ ثانیه انجام شد.

تعداد پیش بارگذاری برابر ۵۰ سیکل و بار اعمالی برابر ۱۲۰۰ نیوتن در نظر گرفته شد. ضریب پواسون نیز برابر با ۰/۳۵ انتخاب گردید. در شکل ۲ نتایج آزمایش مدول برجهندگی نمونه‌های آزمایش‌شده آورده شده است.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود نمونه‌های حاوی قیر امولسیون آنیونیک و سرباره مس دارای مدول برجهندگی بالاتری است. در نمونه‌های قیر امولسیون آنیونیک، نمونه‌های 15CA و 25CA دارای مدول برجهندگی به ترتیب ۲۲٪و ۲۵٪ بزرگ‌تری نسبت به نمونه‌های 15AA و 25AA هستند. افزایش مدول برجهندگی ۹ درصدی نمونه‌های 25AA نسبت به نمونه‌های 15AA و افزایش ۱۲ درصدی نمونه‌های 25CA به 15CA نشان‌دهنده‌ی تأثیر بیشتر نوع مصالح سنگی نسبت به درصد استفاده از آن‌ها می‌باشد.



شکل ٤. نتایج آزمایش مدول برجهندگی

٤-٣- حساسیت رطوبتی

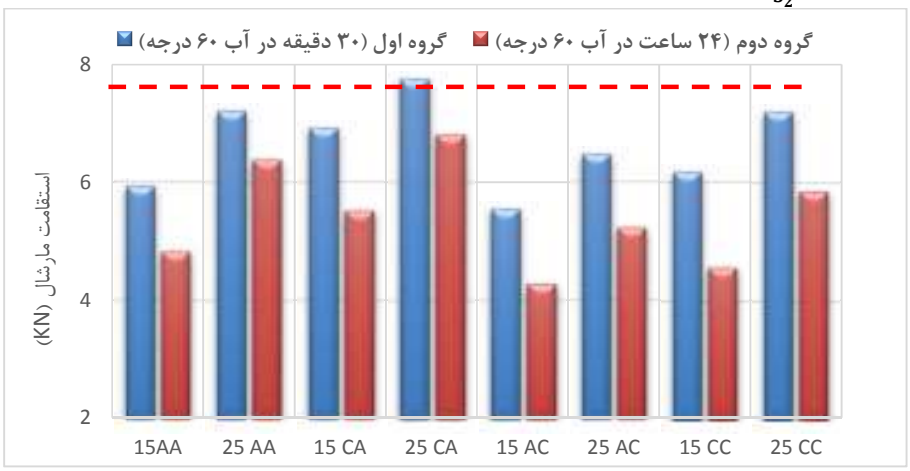
در این تحقیق برای ارزیابی صدمات ناشی از رطوبت آزمایش غرقاب کردن مکانیکی طبق ضوابط مندرج در استاندارد ASTM-1075 انجام شد. برای انجام این آزمایش ٢٤ نمونه تهیه گردید. سپس نمونهها را به دستههای سهتایی بهنحوی‌که میانگین درصد فضای خالی هر دسته سهتایی تقریباً برابر باشد، تقسیم شدند. زیرا نتایج آزمایش به درصد فضای خالی نمونهها که نمایانگر مقدار آب جذب‌شده است، حساس می‌باشد. استقامت مارشال گروه اول بعد از ۳۰ دقیقه غرقاب شدن در آب با دمای ٦٠°C تعیین گردید.گروه دوم پس‌ازاینکه به مدت٢٤ ساعت در آب ٦٠°c قرارداده شدند، تحت آزمایش قرار گرفتند[Abo-Qudais and Al-Shweily, 2007; Niazi and Jalili, 2009]. شاخص مقاومت باقیمانده نمونه‌های غرقاب شده از رابطه (۱) به دست آمد:

$$\text{نسبت استقامت مارشال} = \frac{S_1}{S_2} \times ۱۰۰ \qquad (۱)$$

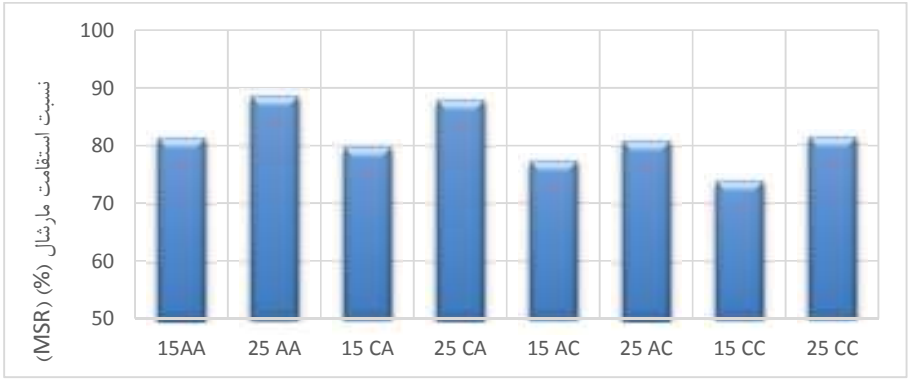
S_1: میانگین استقامت مارشال گروه اول (۳۰ دقیقه غرقاب)

S_2: میانگین استقامت مارشال گروه دوم (٢٤ ساعت غرقاب)

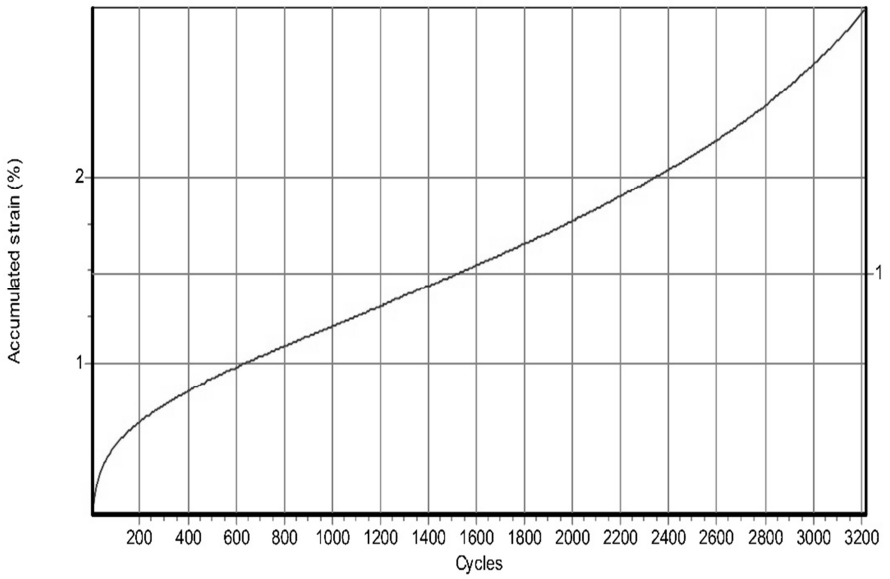
بر اساس ضوابط مندرج در مشخصات فنی عمومی راه (نشریه ۱۰۱) نسبت استقامت مارشال حداقل نبایستی از ۷۵ درصد کمتر باشد. نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی برای هشت گروه نمونهها در شکل ۵ و شکل ٦ ارائه‌شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این آزمایش نمونه‌های حاوی قیر امولسیونی آنیونیک و مصالح سنگی آهکی عملکرد بهتری در برابر رطوبت دارند. نمونه‌های قیر امولسیونی آنیونیک که حاوی ۲۵ درصد مصالح سنگی و سرباره مس هستند حدود ۷ درصد مقاومت بالاتری در برابر رطوبت نسبت به نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد مصالح جدید دارند و نمونه 15CC دارای کمترین مقاومت در برابر رطوبت می‌باشد.



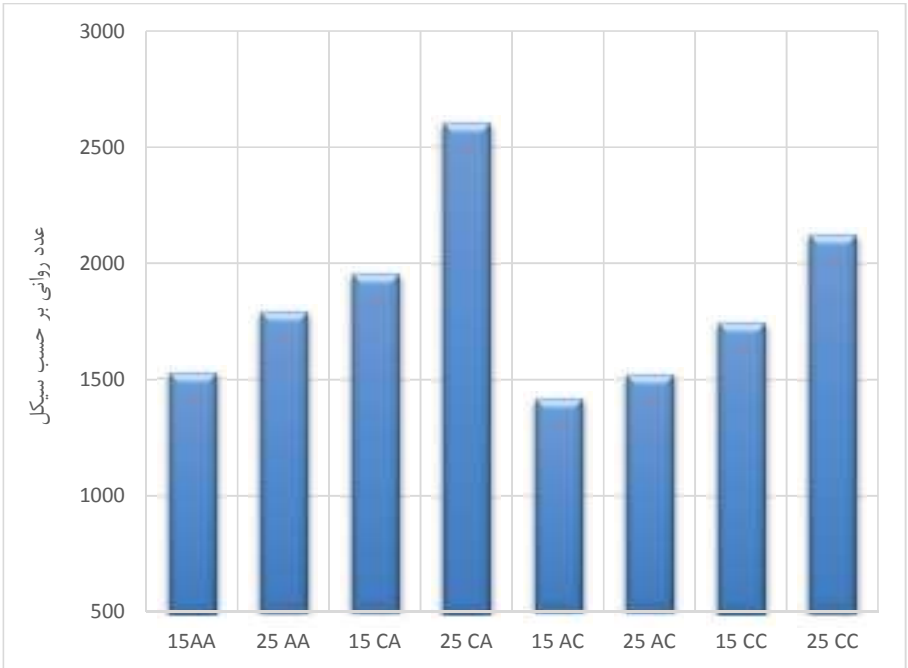
شکل ۵. نتایج آزمایش استقامت مارشال



شکل ٦. نسبت استقامت مارشال (MSR)



شکل ۷. نمونه خروجی آزمایش خزش دینامیکی (کرنش تجمعی در برابر تعداد سیکل)



شکل ۸. نتایج آزمایش خزش دینامیکی

٤-٤- آزمایش خزش دینامیکی

تغییر شکل دائم پارامتر مهمی در طرح روسازی‌های انعطاف‌پذیر می‌باشد. این موضوع در مورد روسازی‌هایی که در معرض بارهای سنگین یا در مناطق گرمسیر قرار دارند بیشتر صدق می‌کند. برای ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های دائم معمولاً از آزمایش خزش استفاده می‌شود. از این آزمایش برای تخمین پتانسیل شیار شدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از بار استاتیکی و یا دینامیکی نیز استفاده می‌شود [Niazi and Jalili, 2009]. در این پژوهش برای تخمین پتانسیل شیار شدگی نمونه‌های آسفالتی تهیه‌شده با مصالح خرده آسفالتی حاوی سرباره مس و مصالح آهکی از دستگاه UTM-5P استفاده، که نتایج این آزمایش به صورت منحنی کرنش دائمی تجمعی در برابر تعداد سیکلهای بارگزاری ارائه می‌شود. این آزمایش در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و با تنش ثابت ٤۵۰ کیلوپاسکال با بارگذاری مربعی با تکرار 0.5 HZ (۵۰۰ میلی‌ثانیه بارگذاری و ۱۵۰۰ میلی‌ثانیه استراحت) برای بدست آوردن عدد روانی (FN) به عنوان معیار مقاومت در برابر تغییرشکل دائم انجام گرفته است. مقایسه نتایج آزمایش‌های فوق نشان می‌دهد که مصالح جدید و نوع قیر در کاهش میزان شیار شدگی نقش مهمی دارند اما تأثیر سرباره مس نسبت به مصالح آهکی بیشتر است. کمترین مقدار شیار شدگی مربوط به نمونه‌های حاوی قیر امولسیونی آنیونیک است و در این نوع نمونه‌ها تأثیر سرباره مس در کاهش شیار شدگی بیشتر از نمونه قیر کاتیونیک است.

کمترین مقاومت در برابر شیار شدگی مربوط به نمونه‌های با ۱۵ درصد مصالح آهکی با قیر کاتیونیک و بیشترین مقاومت در برابر شیار شدگی مربوط نمونه 25CA که حاوی سرباره مس و قیر امولسیونی می‌باشد.

۵- تحلیل آماری یک طرفه ANOVA

بمنظور مقایسه بهتر نتایج از تحلیل آماری یک طرفه ANOVA برای نتایج مدول برجهندگی و شیارشدگی استفاده شده است. جدول نشان دهنده نتایج تحلیل یک طرفه بر روی سه نمونه هر یک از مخلوط‌های طرح می‌باشد. مقایسه واریانس درون گروهی و برون گروهی نشان دهنده تاثیر بیشتر خطای آزمایش نسبت به تاثیر میانگین متغییرهای آزمایش مدول برجهندگی می‌باشد. با توجه به نتایج تحلیل بدست آمده برای شیارشدگی امکان استفاده از روش آنالیز دو به دو توکی با ضریب اطمینان ۹۰٪ میسر بوده که نتایج حاصل از این تحلیل برای مقایسه اثر متغیرهای مورد مطالعه در جدول ٦ نشان داده شده است. همانطور که از نتایج تحلیل قابل مشاهده است نمونه‌های ساخته‌شده با قیر امولسیون آنیونیک دارای تاثیرگذاری معنی‌داری بر روی نتایج مخلوط‌های آسفالتی داشته و نمونه‌های حاوی این نوع قیر ارتباط معناداری با یکدیگر دارند حال آنکه برای قیر کاتیونی تنها نمونه‌های ساخته‌شده با مصالح آهکی تاثیر گذاری معناداری با درصد اطمینان ۹۰ درصد داشته است که این نتایج بیانگر اثر قابل ملاحظه بار سطحی قیر بر عملکرد این آزمایش می‌باشد.

جدول۵. نتایج تحلیل یک طرفه ANOVA بر روی نتایج مدول برجهندگی و شیارشدگی

مدول برجهندگی					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1075904.625	7	153700.661	.742	.641
Within Groups	3316201.678	16	207262.605		
Total	4392106.303	23			
شیارشدگی					
Between Groups	.189	7	.027	2.547	.058
Within Groups	.169	16	.011		
Total	.358	23			

(*: معناداری اندرکنش دو مخلوط بر یکدیگر)

جدول ٦. نتایج آنالیز توکی بر روی نتایج آزمایش شیارشدگی

	15AA	25AA	15CA	25CA	15AC	25AC	15CC	25CC
15AA	-	*	*	*				
25AA	*	-						
15CA	*		-					
25CA	*			-	*	*		
15AC				*	-			
25AC				*		-		
15CC							-	
25CC								-

٦- نتیجه‌گیری

هدف اصلی تحقیق حاضر بررسی و تحلیل خصوصیات عملکردی مخلوط‌های بازیافتی سرد با مصالح جدید (سرباره مس و مصالح آهکی) با دو نوع قیر امولسیون می‌باشد. بعد از انجام آزمایش بر روی ۳٦۰ نمونه ساخته‌شده مخلوط‌های بازیافتی سرد و مقایسه نتایج به‌دست‌آمده می‌توان نتایج زیر را استنباط کرد.

- نمونه‌های ساخته‌شده با سرباره مس استقامت مارشال (تا ۲۰ درصد) و وزن مخصوص بزرگ‌تری نسبت به نمونه‌های ساخته‌شده با مصالح سنگی آهکی دارند. نمونه‌های ساخته‌شده با درصدهای بالاتر (۲۰ درصد) از مصالح جدید استقامت مارشال و وزن مخصوص بزرگ‌تری نسبت به نمونه‌های ۱۵ درصدی از هر نوع مخلوط دارند.
- نتایج آزمایش‌های مدول برجهندگی نشان می‌دهد که اضافه کردن سرباره مس یا مصالح سنگی جدید و استفاده از قیر امولسیونی آنیونیک در افزایش ضریب برجهندگی (تا ۲۸ درصد) نقش مهمی دارند. اما این بهبود عملکرد در مورد سرباره مس به دلیل خواص مقاومتی و سازگاری بهتر با قیر امولسیون از سنگ‌دانه‌های آهکی (تا ۲۱ درصد) بیشتر است.
- نمونه‌های ساخته‌شده با سرباره مس و قیر امولسیونی کاتیونیک حساسیت بیشتری (تا ١٤ درصد) در برابر رطوبت نسبت به نمونه‌های ساخته‌شده با مصالح آهکی قیر امولسیونی آنیونیک دارند.
- مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره مس به دلیل ویژگی‌های فیزیکی این نوع مصالح بالاترین مقاومت در برابر شیار شدگی در بین مخلوط‌ها را دارا می‌باشند. یکی از دلایل بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره مس، قفل و بست بهتر دانه‌ها و نهایتا پایداری این مخلوط‌ها در برابر بار می‌باشد.
- با توجه به حجم انبوه سرباره مس در منطقه سرچشمه و بهبود خواص مخلوط‌های بازیافت سرد حاوی سرباره مس، استفاده از این محصول در راه‌های منطقه توصیه می‌شود.
- با توجه به حساسیت بالای مخلوط‌های بازیافتی سرد حاوی سرباره مس در برابر رطوبت، استفاده از این مخلوط در مناطق مرطوب توصیه نمی‌شود.
- در تمام آزمایش‌های انجام‌شده نمونه‌های ساخته‌شده با قیر امولسیون آنیونیک دارای عملکرد بهتری نسبت نمونه‌های ساخته‌شده با قیر امولسیون کاتیونیک می‌باشد که دلیل آن را بار سطحی آن بیان کرد.

۷- پی‌نوشت‌ها

1- Reclaimed Asphalt Pavement
2- Universal Testing Machine

۸- مراجع

- نشریه شماره ۳۳۹، (۱۳۸۵)، "مشخصات فنی اجرائی بازیافت سرد آسفالت"، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، وزارت راه و شهرسازی، تهران.

-طاهرخانی، ح. فرخی، ف. شایسته فر، الف.، (۱۳۹۳)، "بررسی خصوصیات مکانیکی ترکیبات مختلف از آسفالت و بتن بازیافتی تثبیت‌شده با سیمان و مسلح شده با الیاف فولادی"، فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل، سال ششم، شماره دوم، ص. ۳۱۱-۳۲٤.

-مدرس، الف. حسینی، ز. (۱۳۹٤)، "بررسی خصوصیات رفتاری بتن غلتکی حاوی مصالح خرده آسفالتی"، فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل، سال هفتم، شماره دوم، ص. ۲۹۷-۳۱۳.

-AASHTO-AGC-ARTBA Joint Cooperation Committee, & AASHTO-AGC-ARTBA Joint Cooperation Committee. Task Force No. (1998), "Report on cold recycling of asphalt pavements", American Association of State Highway and Transportation Officials.

-Abo-Qudais, S. and Al-Shweily, H. (2007), "Effect of antistripping additives on environmental damage of bituminous mixtures", Building and Environment, Vol.42, No.8, pp. 2929-2938.

-Ameri, M. and Behnood, A. (2012), "Laboratory studies to investigate the properties of CIR mixes containing steel slag as a substitute for virgin aggregates", Construction and Building Materials, Vol.26, No.1, pp.475-480.

-Ayano, T., Kuramoto, O. and Sakata, K. (2000), "Concrete with copper slag fine aggregate", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.49, pp.1097-1102.

-Behnood, A., Gharehveran, M. M., Asl, F. G. and Ameri, M. (2015), "Effects of copper slag and recycled concrete aggregate on the properties of CIR mixes with bitumen emulsion, rice husk ash, Portland cement and fly ash", Construction and Building Materials, Vol.96, pp.172-180.

-Ciesielski, S. K. and Collins, R. J. (1994), "Recycling and use of waste materials and by-products in highway construction". National cooperative highway research program synthesis of highway practice, No.199.

-Hassan, H. F. and Al-Jabri, K. (2011), "Laboratory evaluation of hot-mix asphalt concrete containing copper slag aggregate", Journal of materials in civil engineering, Vol.23, No.6, pp.879-885.

Kavussi, A. and Modarres, A. (2010), "Laboratory fatigue models for recycled mixes with bitumen emulsion and cement", Construction and Building Materials, Vol.24, No.10, pp.1920-1927.

-Khanzadi, M. And Behnood, A. (2009), "Mechanical properties of high-strength concrete incorporating copper slag as coarse aggregate", Construction and Building Materials, Vol.23, No.6, pp.2183-2188.

-Kumar, B. (2013), "Properties of pavement quality concrete and dry lean concrete with copper slag as fine aggregate", International Journal of Pavement Engineering, Vol.14, No.8, pp.746-751.

-Manual, B. A. R. (2001), "Asphalt recycling and reclaiming association", Annapolis, Maryland.

-Niazi, Y. and Jalili, M. (2009), "Effect of Portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion", Construction and Building Materials, Vol.23, No.3, pp.1338-1343.

-Oluwasola, E. A., Hainin, M. R. and Aziz, M. M. A. (2015), "Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road construction", Transportation Geotechnics, Vol.2, pp.47-55.

-Pasetto, M. and Baldo, N. (2011), "Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag", Construction and Building Materials, Vol.25, No.8, pp.3458-3468

-Silva, H. M., Oliveira, J. R. and Jesus, C. M. (2012), "Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving?", Resources, Conservation and Recycling, Vol.60, pp.38-48.

-Wahhab, H. A. A. and Asi, I. M. (1997), "Improvement of marl and dune sand for highway construction in arid areas", Building and Environment, Vol.32, No.3, pp.271-279.

-Zoorob, S. E. and Suparma, L. B. (2000), "Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded Asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt)", Cement and Concrete Composites, Vol.22, No.4, pp.233-242.