

بررسی خصوصیات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح خرده آسفالت اصلاح شده با افزودنی‌های نیمه گرم

مقاله پژوهشی

امین چوپدار، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
علیرضا عاملی*، مربی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
امین فرج‌اللهی، مربی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Amelii@gmail.com

دریافت: ۹۸/۰۴/۳۰ - پذیرش: ۹۸/۰۹/۲۰

صفحه ۱۹۴-۱۷۷

چکیده

مصالح خرد آسفالتی (RAP) که شامل سنگدانه و قیر می‌باشد، می‌تواند در مخلوط آسفالتی جدید مورد استفاده قرار گیرد. بازیافت این مصالح موجب حفظ منابع طبیعی، کاهش هزینه‌ها و کاهش مصرف انرژی می‌شود. در میان انواع روش‌های تولید آسفالت، آسفالت گرم دارای دوام و مقاومت بالاتری نسبت به آسفالت سرد می‌باشد. اما برای استفاده از مصالح خرد آسفالت در تولید آسفالت گرم، درجه حرارت بالا (بیش از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد) در این فرایند ممکن است باعث تیر و سخت‌تر شدن قیر مصالح خرد آسفالت شود که از قبل یکبار تیر شده است، ضمن اینکه موجب تولید بسیار زیاد گازهای سمی می‌شود که این امر مقدار استفاده از مصالح خرد آسفالت در بازیافت را محدود می‌کند. در تکنولوژی آسفالت نیمه گرم با استفاده از کاهش ویسکوزیته قیر با افزایش حجم آن، کاهش دمای اختلاط و تراکم ممکن می‌شود. کاهش دما در این مخلوط‌ها می‌تواند راهکار خوبی برای حل مشکل حرارت زیاد در بازیافت گرم باشد تا بدین ترتیب بتوان ضمن کاهش آلودگی‌های زیست محیطی درصد استفاده از مصالح خرد آسفالت در مخلوط‌های آسفالتی را افزایش داد. در این پژوهش از دو واکنش آلی ساسوبیت و رتوفالت برای تولید مخلوط‌های بازیافتی نیمه گرم استفاده شد و خواص عملکردی این مخلوط‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند. بدین منظور چهار مخلوط بازیافتی با استفاده از ۱۰۰ درصد RAP و یک مخلوط شاهد با استفاده از مصالح سنگی RAP که قیر آن جدا شده است، ساخته شد. مخلوط‌های بازیافتی شامل یک نمونه بازیافتی گرم و سه نمونه بازیافتی نیمه گرم (یکی بدون افزودنی، یکی با افزودنی ساسوبیت، یکی با افزودنی رتوفالت) می‌باشد. آزمایش‌های مختلفی جهت ارزیابی عملکردی نمونه‌های مختلف انجام گردید، از جمله: استقامت مارشال، کشش غیرمستقیم، مدول برجهندگی، خزش دینامیکی و شیار جای چرخ. نتایج نشان داد که افزودنی‌های ساسوبیت و رتوفالت تاثیر مثبتی در بهبود تراکم و خواص عملکردی مخلوط‌ها داشته است. حساسیت رطوبتی و پتانسیل شیارشدگی در مخلوط‌های بازیافتی نیمه گرم با افزودنی، کمتر از مخلوط بازیافتی گرم بوده است.

واژه‌های کلیدی: بازیافت گرم، آسفالت نیمه‌گرم، مصالح خرد آسفالت، پیرشدگی، ساسوبیت، الیاف

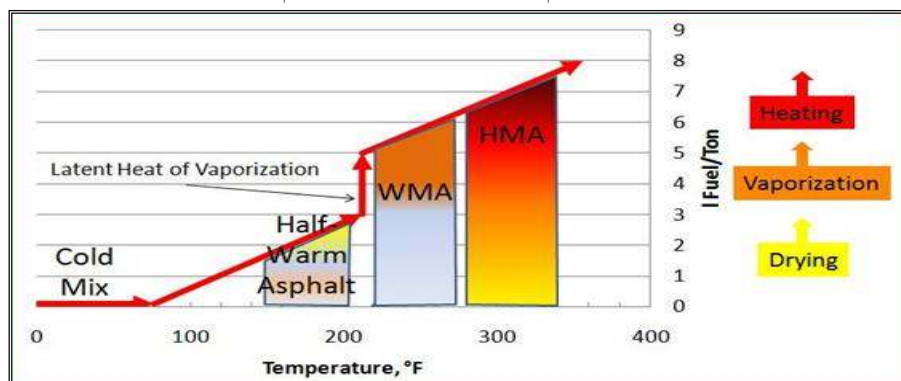
۱- مقدمه

مخلوط‌های آسفالتی جدید سرد و گرم مورد استفاده قرار گیرد و موجب صرفه جویی در هزینه و انرژی شود. آسفالت گرم نسبت به آسفالت سرد دوام و مقاومت بالاتری دارد (He and Wong, 2008) اما در مقابل باید

RAP مصالح فرسوده ای است که از طریق بازیافت، آسیاب نمودن یا تراشیدن آسفالت روسازی‌های مضمحل شده بدست می‌آید (Feipeng Xiao and Serji N Amirkhanian, 2007). این مصالح می‌تواند در

می‌تواند تا حد زیادی مشکلات ساخت و اتساع گازهای مضر را حل کند. افزایش آلاینده‌های زیست محیطی، سختی اجرا، وقوع خرابی‌های روسازی، محدودیت اجرا در فصول سرد و هزینه‌های بالای سوخت و انرژی از مهم‌ترین عواملی بودند که باعث پیدایش تکنولوژی آسفالت‌های نیمه گرم^۲ در صنعت راهسازی شد. نخستین تلاش‌ها در زمینه تولید این نوع آسفالت در اروپا و کشور آلمان صورت گرفت. مخلوط‌های آسفالتی دارای انواع مختلفی هستند که هر یک در محدوده درجه حرارت‌های خاصی، استفاده و تولید می‌شوند. عموماً این محدوده برای آسفالت نوع نیمه‌گرم، ۱۰۰ تا ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که کمتر از محدوده آسفالت گرم رایج قرار دارد. دامنه تولید مخلوط‌های آسفالت‌های گرم ۲۰ تا ۴۰ درجه سانتیگراد بیش‌تر از محدوده این پارامتر در آسفالت‌های نیمه‌گرم می‌باشد و برای مخلوط‌های آسفالتی نسبتاً گرم درجه حرارت تولید در محدوده ۳۵ درجه تا ۱۰۰ درجه قرار دارد. انواع مخلوط‌های آسفالت نیمه‌گرم نیز خود دارای دمای تولید متنوعی هستند. دمای تولید آسفالت‌های نیمه گرم با آسفامین^۳ و ساسوبیت^۴ حدود ۲۰ تا ۳۰ درجه سانتیگراد پایین‌تر از مخلوط آسفالت گرم است. برای این نوع مخلوط‌ها در آلمان با توجه به سختی قیر، از دمای ۱۳۰ تا ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد استفاده می‌شود. این محدوده برای مخلوط‌های آسفالت نیمه‌گرم کف‌قیری ۱۱۰ تا ۱۲۰ و برای آسفالت‌های نیمه گرم ساخته شده با اووترم^۵، ۸۵ تا ۱۱۵ درجه سانتیگراد می‌باشد (Mallick et al, 2009). شکل ۱، دامنه درجه حرارت تولید انواع مخلوط‌های آسفالتی را (از مخلوط آسفالتی سرد^۶ تا گرم^۷) نشان می‌دهد.

آلودگی زیست محیطی آسفالت گرم خصوصاً هنگامی که حاوی درصد بالایی مصالح RAP است را یادآور شد. این امر خود درصد استفاده از مصالح بازیافتی در روسازی آسفالتی جدید را محدود می‌کند. ضمناً درجه حرارت بالا در بازیافت گرم علاوه بر تولید گازهای مضر موجب پیرتر شدن قیر مصالح RAP می‌شود. بنابراین باید به دنبال راه حلی بود تا بتوان درجه حرارت اختلاط و تراکم آسفالت را کاهش داد تا ضمن کاهش اتساع گازهای سمی و مضر، درصد استفاده از مصالح خرده آسفالتی بازیافتی را افزایش داد. تحقیقات نشان می‌دهد کاهش ۱۰ تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد در دمای تولید آسفالت گرم می‌تواند تولید گازهای مضر را ۵۰ درصد کاهش دهد (Joe et al, 2007) و هنگامی که دمای اختلاط از ۱۵۰ به ۱۳۰ می‌رسد، کاهش انرژی بیش از ۵۰٪ خواهد بود (Karen et al, 2009). تکنولوژی آسفالت نیمه گرم اولین بار در اروپا پس از توافق نامه کیوتو جهت کاهش گازهای گلخانه‌ای ابداع شد و با توجه به بالا رفتن قیمت انرژی و به دلایل محیط زیستی استفاده از آن رو به افزایش است (Mallick et al, 2009) در این تکنولوژی با استفاده از روش‌های مختلفی ویسکوزیته قیر کاهش یا حجم قیر افزایش داده می‌شود تا قیر بتواند در درجه حرارت پایین‌تر اطراف مصالح را به خوبی پوشش دهد و بدین ترتیب درجه حرارت اختلاط و تراکم آسفالت کاهش می‌یابد. این عمل به دو طریق کلی انجام می‌شود: افزایش حجم قیر و تبدیل آن به کف قیر با استفاده از بخار آب یا مواد آبدوست و کاهش ویسکوزیته قیر با استفاده از افزودنی‌های شیمیایی و الی یا واکس‌ها. استفاده از تکنولوژی آسفالت نیمه گرم



شکل ۱. محدوده درجه حرارت تولید انواع مختلف مخلوط‌های آسفالتی

می‌شوند و اسکوزیته آن را کاهش می‌دهند. با استفاده از این روش می‌توان دمای تولید را تا ۴۰ درجه سانتیگراد کاهش داد اما در دماهای کمتر از ۸۰-۹۰ درجه ساختار مولکولی ساسوبیت به شکل شبکه بلوری در می‌آید و موجب افزایش سختی قیر می‌شود. این امر احتمال وقوع ترک‌های حرارتی را افزایش می‌دهد و توصیه می‌شود که در بازیافت همراه با یک قیر یک قیر نرمتر استفاده شود. (Jesse and Isaac, 2010) عموماً ساسوبست، پتانسیل شیارشدگی آسفالت را کاهش می‌دهد. به طور کلی با کاهش دمای تولید پتانسیل شیار شدگی افزایش پیدا می‌کند که یکی از دلایل آن می‌تواند کمتر پیر شدن قیر باشد. اما مخلوط‌های حاوی ساسوبیت کمتر تحت تاثیر کاهش حرارت قرار می‌گیرند. لی و همکاران تحقیقاتی را در زمینه تاثیر افزودنی‌های WMA بر روی خصوصیات قیرهای بازیافتی انجام دادند (Kai et al, 2009) در تحقیقات آنها ساسوبیت و اسکوزیته را کاهش داده اما استفاده از قیر نرمتر تاثیر بیشتری در کاهش و اسکوزیته داشته است. اثر استفاده از قیر نرمتر در بهبود عملکرد خستگی بیشتر از افزودنی‌ها بوده است. در واقع می‌توان با استفاده از افزودنی‌ها در هنگام ساخت، دمای ساخت را کاهش داد و با استفاده از یک قیر نرمتر خصوصیات مخلوط را بهبود بخشید. مالیک ۲ و همکاران نشان دادند، استفاده از قیر نرمتر مناسب با مقدار مناسب افزودنی WMA برای کاهش دما می‌تواند باعث جوان کردن قیر RAP بشود تا حدی که با مخلوط‌های جدید قابل مقایسه شود. آنها موفق شدند مخلوط بازیافتی نیمه گرم با ۷۵٪ RAP با افزودنی ساسوبیت تولید کنند به طوری که مخلوط بازیافتی از نظر درصد فضای خالی، مقاومت کششی در دمای پایین و پتانسیل شیارشدگی با مخلوط‌های رایج قابل مقایسه باشد (Mihai et al, 2004). در این پژوهش مخلوط‌های نیمه گرم با استفاده از ۱۰۰ درصد مصالح RAP و افزودنی‌های واکسی ساسوبیت و رئوفالت ساخته شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. ساسوبیت رایجترین واکس الی مورد استفاده در تکنولوژی آسفالت نیمه گرم می‌باشد اما مطالعات محدودی در زمینه استفاده از رئوفالت در تکنولوژی آسفالت نیمه گرم و بازیافت صورت گرفته است. هدف این پژوهش بررسی اثر واکس‌ها و کاهش دمای ساخت بر رفتار مصالح خرده آسفالت بوده است.

اما در مقابل، چالش‌های جدیدی را از جمله اثر این افزودنیها بر روی مصالح RAP، اثر کاهش دما بر روی مخلوط بازیافتی و در نهایت عملکرد مخلوط‌های بازیافتی، به وجود می‌آورد. جهت دستیابی به یک درک بهتر از رفتار مصالح خرده آسفالت هنگامی که با افزودنی‌های نیمه گرم استفاده می‌شود، در مخلوط‌های حاوی مصالح خرده آسفالت، قیر پیر شده در RAP با قیر جدید ترکیب می‌شود و بر روی درجه عملکردی قیر نهایی تاثیر می‌گذارد. در درصد‌های پایین RAP زیر ۲۰ درصد این تاثیر ناچیز است اما در درصد‌های بالا تاثیر آن قابل توجه می‌باشد و قیر موجود در RAP سختی قیر نهایی را افزایش می‌دهد. در عمل فقط بخشی از قیر موجود در RAP در اختلاط شرکت می‌کند که آن را "قیر موثر" می‌نامند. دوپل و همکاران نشان دادند درصد قیر موثر مصالح خرده آسفالتی با و اسکوزیته آن نسبت عکس دارد (Mallick et al, 2008) مقدار قیر موثر به چهار عامل بستگی دارد: ۱- دمای اختلاط ۲- خصوصیات مصالح RAP 3 (انرژی تراکم ۴) افزودنی‌ها (Soon-Jae et al, 2009). باید توجه داشت که قیری که در اختلاط شرکت نمی‌کند در مخلوط بی‌تاثیر نیست. قیر به طور کلی سه نقش اساسی در مخلوط ایفا می‌کند: ۱) پوشش مصالح سنگی برای جلوگیری از آسیب‌های رطوبتی ۲) روان کردن مخلوط هنگام تراکم ۳) چسباندن مخلوط به هم پس از انجام تراکم. در واقع قیری که در اختلاط شرکت نمی‌کند، در موارد ۲ و ۳ تاثیر کمتری دارد اما در مورد ۱ کاملاً تاثیر گذار است و از جذب قیر جدید توسط مصالح RAP جلوگیری می‌کند (Young et al, 2007) افزایش مقدار RAP در مخلوط آسفالتی افزایش در سختی و کاهش در تغییر شکل‌های برشی را به دنبال دارد. مخلوط‌های با درصد RAP بالا مقاومت بیشتری در برابر شیار شدگی از خود نشان می‌دهند. افزایش سختی برای مخلوط‌های با درصد RAP بالاتر می‌تواند موجب افزایش ترک خوردگی در دمای پایین و کاهش عمرخستگی شود. در درصد RAP بالا می‌توان اثر افزایش سختی را با استفاده از قیر تازه نرم‌تر تعدیل کرد. ساسوبیت و رئوفالت واکس‌های الی هستند که از فرایند فیشر-تروپس بدست می‌آیند. این واکس‌های الی دارای طول زنجیره شیمیایی بلندتری نسبت به واکسهای پارافینی می‌باشند و هنگامی که در مخلوط گرم با قیر مخلوط

۲- روش تحقیق

هدف از این پژوهش ارزیابی آزمایشگاهی اثر افزودنی‌های نیمه گرم و کاهش دمای ساخت بر رفتار مصالح خورده آسفالت در مخلوط‌های بازیافتی می‌باشد. ضمن اینکه امکان بازیافت ۱۰۰ درصدی مصالح RAP با استفاده از تکنولوژی آسفالت نیمه گرم بررسی شد. بدین منظور از دو نوع افزودنی نیمه گرم ساسوبیت و رثوفالت که هر دو از واکنش‌های آلی به دست آمده از فرایند فیشر- تروپس هستند، به عنوان

افزودنی‌های نیمه گرم، و برای تهیه مخلوط‌های بازیافتی از ۱۰۰ درصد مصالح RAP استفاده شد. از قیر ۸۵-۱۰۰ به عنوان قیر جدید اضافه شده به مخلوط آسفالتی استفاده گردید. برای تهیه مخلوط‌های آسفالتی تازه از مصالح سنگی جدا شده از قیر و از قیر ۷۰-۶۰ استفاده شد و در نهایت ۵ نوع مخلوط مختلف مورد مطالعه قرار گرفت که مشخصات نمونه‌های ساخته شده در جدول زیر آمده است:

جدول ۱. مشخصات نمونه های ساخته شده

نام اختصاری	مصالح	قیر جدید	نوع افزودنی	درصد افزودنی	دمای اختلاط (°C)	دمای تراکم (°C)
HMA150	RAP	۸۵-۱۰۰ (۱٪)	-	-	۱۵۰	۱۳۰
W-S	RAP	۸۵-۱۰۰ (۱٪)	ساسوبیت	۲٪	۱۳۰	۱۱۵
W-R	RAP	۸۵-۱۰۰ (۱٪)	رثوفالت LT70	۳٪	۱۳۰	۱۱۵
HMA130	RAP	۸۵-۱۰۰ (۱٪)	-	-	۱۳۰	۱۱۵
II-V	مصالح سنگی RAP (جدا شده از قیر)	۶۰-۷۰ (۵٪)	-	-	۱۶۰	۱۳۵

مصلح خورده آسفالت مورد استفاده در این پژوهش از انبار دپوی مصالح خورده آسفالت شهرداری منطقه ۱۳ تهران تهیه شد. در کشور ایران عموماً از قیر ۶۰/۷۰ برای ساخت آسفالت‌های جدید استفاده می‌شود. اما بر طبق مطالعات گذشته برای ساخت نمونه‌های بازیافتی با درصد RAP بالای ۴۰ درصد باید از یک قیر نرمتر از قیر مورد نظر استفاده کرد (نشریه شماره ۲۳۴، ۱۳۹۰) برای نمونه‌های ساخته شده با مصالح خورده آسفالت در این پژوهش از قیر ۸۵/۱۰۰ استفاده شد. این قیر از شرکت نفت پاسارگاد تهیه شد و خصوصیات آن در جدول ۱ آمده است. برای ساخت مخلوط‌های تازه از قیر ۶۰/۷۰ استفاده شد. زیرا اکثر روسازی‌های کشور با استفاده از همین قیر ساخته می‌شود. این قیر نیز از شرکت نفت پاسارگاد تهیه شده که مشخصات آن در جدول زیر آمده است.

نمونه‌های نیمه گرم ساخته شده با افزودنی‌های ساسوبیت و رثوفالت نمونه‌های مورد نظر برای بررسی استفاده از تکنولوژی WMA در بازیافت با درصد بالای RAP می‌باشد. برای بررسی امکان بازیافت با درصد بالای RAP با استفاده از WMA نمونه تازه با استفاده از مصالح جدا شده از قیر ساخته شد تا با مخلوط‌های مورد نظر مقایسه شود. برای بررسی رفتار مصالح خورده آسفالت همراه با افزودنی‌های نیمه گرم دو مخلوط بازیافتی نیمه گرم و گرم بدون افزودنی ساخته شد تا اثر کاهش حرارت و افزایش این افزودنی‌ها در دمای پایین تر به طور جداگانه بررسی شود. نمونه‌های مختلفی ساخته شد و تحت آزمایش‌های استقامت مارشال، کشش غیرمستقیم، مدول برجهنگی، خزش دینامیکی، شیار جای چرخ انجام پذیرفت.

۲-۱- مصالح سنگی و قیر

جدول ۱. مشخصات فیزیکی قیر ۸۵/۱۰۰

نتیجه آزمایش	استاندارد	نوع آزمایش
۴۷ درجه سانتی‌گراد	ASTM D36	نقطه نرمی
۹۳ دسی میلی‌متر	ASTM D5	درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه
۳۰۴ درجه سانتی‌گراد	ASTM D92	درجه اشتعال
بیش از ۱۰۰ سانتی‌متر	ASTM D113	شکل‌پذیری در دمای ۲۵

جدول ۲. مشخصات فیزیکی قیر ۶۰/۷۰

نوع آزمایش	استاندارد	نتیجه آزمایش
نقطه نرمی	ASTM D36	۴۷ درجه سانتی گراد
درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه	ASTM D5	۶۷ دسی میلی متر
درجه اشتعال	ASTM D92	۳۰۴ درجه سانتی گراد
شکل پذیری در دمای ۲۵	ASTM D113	بیش از ۱۰۰ سانتی متر
چگالی	ASTM D70	۱/۰۴۵ گرم بر سانتی متر مکعب
افت حرارتی	ASTM D6	۰/۰۵ درصد
قابلیت حل	ASTM D4	۹۹/۵ درصد

افزودنی‌های ساسوبیت و رئوفالت به عنوان افزودنی‌های نیمه گرم در ساخت نمونه‌ها استفاده شد. این افزودنی‌ها واکس‌های مصنوعی هستند که ویسکوزیته قیر را کاهش می‌دهند. خصوصیات افزودنی‌ها در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. مشخصات افزودنی‌ها

خصوصیات	رئوفالت LT70	ساسوبیت
اجزای سازنده	واکس‌های پارافینی و هیدروکربنی	هیدروکربن پلی اتیلن آلفاتیک
حالت فیزیکی	پاستیل	پاستیل و پرل
رنگ	سفید	سفید
بو	بی بو	بی بو
چگالی حجمی	۷۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب	۵۹۰-۶۲۲ کیلوگرم بر متر مکعب
نقطه اشتعال	۲۱۰ درجه سانتی گراد	۲۹۰ درجه سانتی گراد
حلالیت در آب	غیر قابل حل	غیر قابل حل
دز	۲-۴٪	۱-۳٪

۲-۲- محاسبه درصد قیر RAP

برای محاسبه درصد قیر موجود در مصالح RAP از روش سوزاندن AASHTO TP53-95 استفاده گردید. در این روش حدود ۲ کیلوگرم مصالح RAP که به طور دقیق وزن شده در دستگاه ACT بیش از ۹۰ دقیقه تحت حرارت ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی گراد قرار گرفت تا قیر آن به شکل گاز درآید و از مخلوط خارج گردد. سپس مصالح موجود دوباره وزن شد تا درصد قیر موجود محاسبه گردد. و مقدار ۰/۵ به دست آمد. درصد قیر کلی نمونه‌های بازیافتی ساخته شده از رابطه زیر به دست می‌آید. (گروه مهندسی مشاور هرازراه، ۱۳۸۵):

ابتدا درصد رطوبت مصالح RAP با استفاده از روش AASHTO T329 اندازه‌گیری گردید. در این روش حدود یک کیلوگرم از مصالح وزن می‌شود و در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد در گرم‌خانه قرار داده می‌شود و پس از ۹۰ دقیقه از گرم‌خانه خارج و دوباره وزن می‌گردد. (نشریه ۱۱۰، ۱۳۸۰) بدین طورت رطوبت از دست رفته محاسبه می‌گردد. این مصالح مجدداً به مدت ۳۰ دقیقه در گرم‌خانه قرار داده می‌شود و دوباره وزن می‌شود. اگر رطوبت از دست رفته در این مرحله نسبت به مرحله قبلی کمتر از ۰/۰۵ باشد، آزمایش متوقف می‌گردد و در غیراینصورت این روند ادامه می‌یابد.

$$\text{درصد قیر کل نه‌رته} = \frac{\text{agedB} + \text{virginB}}{\text{RAP} + \text{virginB}} = \frac{5/04 + 1}{100 + 1} = 5/99\% \approx 6\%$$

(۱)



شکل ۲. فرارگیری مصالح در دستگاه ATC

جدول ۴. نتایج به دست آمده برای درصد قیر موجود در مصالح RAP

۰/۳۲	درصد رطوبت مصالح
۵/۳۶	درصد قیر بدست آمده از ACT
۵/۰۴	درصد قیر واقعی

پس از جداکردن قیر از سنگدانه‌ها (شکل برخی از
مشخصات مصالح سنگی از جمله ضریب طولی، ضریب
تورق و درصد شکستگی به دست آمد. مشخصات در جدول
۴ آمده است.

جدول ۵. مشخصات مصالح سنگی RAP استفاده شده

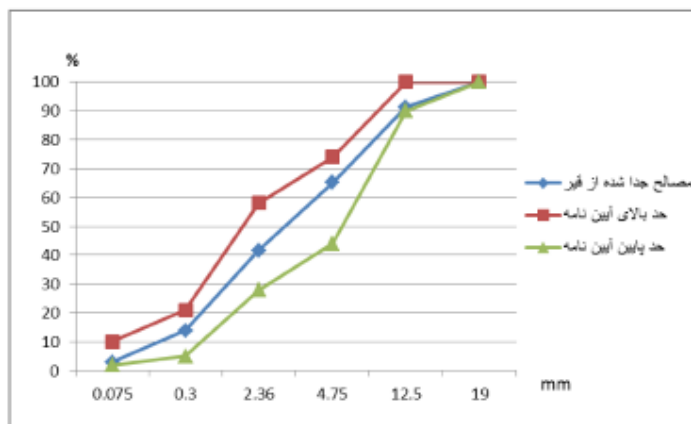
نتایج (%)	استاندارد	آزمایش
۲۲/۰۲	BS 812	ضریب تورق
۸۸/۲۷	ASTM-D5821	حداقل درصد شکستگی در دووجه
۸/۴۹	BS 812	ضریب تطویل



شکل ۳. مصالح به دست آمده از RAP

از قیر در مخلوط نمونه‌های استوانه‌های و تیر خستگی به همین شکل باشد و از تغییرات دانه بندی در نمونه‌های مختلف جلوگیری شود، مقدار کافی از مصالح RAP عبوری از الک ۱۹ میلی‌متر بر روی شش الک دانه بندی شماره ۴ دانه بندی شد (شکل ۵) و برای ساخت هر نمونه، نسبت مانده روی هر الک رعایت شد.

دانه بندی مصالح جداشده از قیر، در شکل ۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که دانه‌بندی این مصالح در میان دو حد بالا و پایین دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ برای دانه بندی پیوسته بتن آسفالتی می‌باشد. در این پژوهش برای کنترل راحت‌تر دانه‌بندی از مصالح RAP عبوری از الک ۱۹ میلی‌متر استفاده شد. برای اینکه دانه‌بندی مصالح جدا شده



شکل ۴. نمودار دانه‌بندی مصالح جداشده از قیر



شکل ۵. مصالح RAP مانده روی هر الک

۷۵ ضربه به هر طرف متراکم شدند. در نهایت از بین مخلوط‌هایی که با درصد قیر مختلف ساخته شد مخلوط با قیر ۱ درصد انتخاب شد زیرا با وجود اینکه مقاومت و روانی نمونه‌ها به هم نزدیک بود. درصد فضای خالی مخلوط‌های با ۱ درصد قیر جدید از سایر نمونه‌ها کمتر بود.

برای محاسبه درصد قیر تازه بهینه، مصالح RAP به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد برای مخلوط گرم و در دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد برای مخلوط نیمه گرم قرار داده شدند. این زمان برای رسیدن این مصالح به دمای مورد نظر کافی می‌باشد. نمونه‌های بازیافتی با سه مقدار قیر مختلف ۵/۰، ۱ و ۵/۱ درصد با استفاده از چکش مارشال و

۳-روش کار آزمایش

۳-۱-آزمایش کشش غیر مستقیم

نیز استفاده کرد. آزمایش کششی غیرمستقیم بر اساس آیین‌نامه ASTM D6931-12 با نرخ ثابت ۵۰/۸ میلی‌متر بر دقیقه و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها با استفاده از معادله زیر تعیین شد:

$$ITS = \frac{2 P_{max}}{\pi D t}$$

در آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم، یک نمونه استوانه‌ای به صورت قطری بارگذاری می‌شود. آزمایش کشش غیرمستقیم برای تعیین مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی و پیش‌بینی ظهور ترک‌ها در مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود. همچنین می‌توان از این آزمایش برای ارزیابی عمر خستگی

(۲)

که ITS: مقاومت کششی نمونه‌ها بر حسب پاسکال

P_{max}: بار اعمالی در زمان شکست بر حسب نیوتون

D: قطر نمونه‌ها بر حسب میلی‌متر

t: ارتفاع نمونه‌ها بر اساس میلی‌متر می‌باشد.

۳-۲-مدول برجهنگی

۲۵ سانتی‌گراد 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. مدول برجهنگی بر اساس معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$M_r = \frac{P(\mu + 0.2734)}{\sigma \times t}$$

(۳)

M_r = مدول برجهنگی بر حسب مگا پاسکال

P = بار تکراری بر حسب نیوتون

μ = نسبت پواسون

t = ضخامت نمونه بر حسب میلی‌متر

σ = کل تغییر شکل بازگشت‌پذیر افقی بر حسب میلی‌متر

۶۰ درجه قرار گرفتند (طباطبایی و همکاران، ۱۳۸۰).

۳-۴-خزش دینامیکی

جهت بررسی شیار شدگی نمونه‌ها از آزمایش خزش دینامیکی استفاده شد. آزمایش خزش دینامیکی یکی از

۳-۳-آزمایش حساسیت رطوبتی

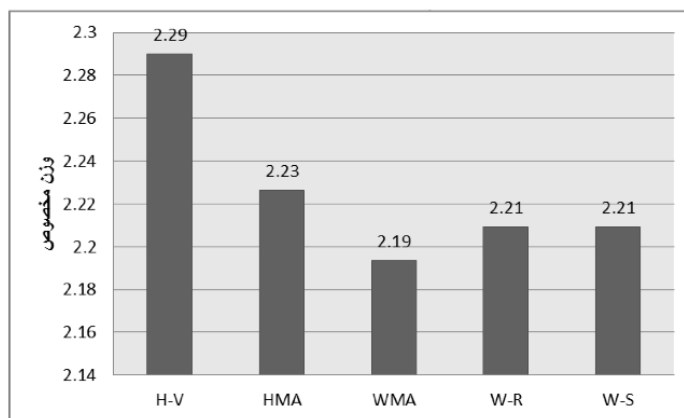
این آزمایش بر اساس استاندارد T283-AASHTO انجام می‌گیرد. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها بر طبق این استاندارد در شرایط اشباع و غیراشباع باید بیش از ۰/۸ باشد. برای اشباع شدن، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب

مقدار فضای خالی و وزن مخصوص آسفالت اثر زیادی بر خصوصیات آسفالت از جمله سختی، مقاومت و نفوذپذیری آن دارد. در شکل ۶ نمودارهای نتایج مربوط به وزن مخصوص و درصد فضای خالی را مشاهده می‌کنید. همانطور که انتظار می‌رود مخلوط بازیافتی گرم (HMA150) فضای خالی بیشتری نسبت به مخلوط تازه داشته و ملاحظه می‌شود هنگامی که دما از ۱۵۰ به ۱۳۰ درجه سانتیگراد کاهش می‌یابد فضای خالی مخلوط افزایش زیادی داشته و به ۸/۲۲ درصد می‌رسد (مخلوط HMA130) اما افزودن افزودنی‌های نیمه گرم ساسوبیت و رئوفالت (مخلوط های WS,WR) فضای خالی نمونه‌ها را تا حدی کاهش داده و به مخلوط بازیافتی گرم نزدیک کرده است. این امر نشان می‌دهد ساسوبیت و رئوفالت باعث بهبود تراکم در دمای ۱۳۰ درجه شده است اما اثر کاهش ۲۰ درجه‌های دما را به طور کامل جبران نکرده است.

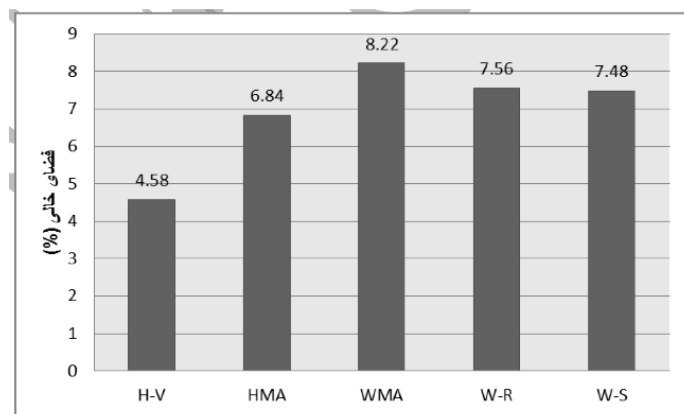
معیارهای مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های دائم می‌باشد. آزمایش با استفاده از دستگاه UTM- 5P در دمای ثابت ۵۰ درجه سانتی گراد و تحت تنش ثابت ۴۵۰ کیلو پاسکال که به صورت شبه سینوسی اعمال شد، انجام گرفت. در این آزمایش یک تنش ثابت در دمای ثابت با مدت بارگذاری ۰/۱ ثانیه و زمان استراحت ۰/۹ ثانیه، 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-تحلیل نتایج آزمایشات

۴-۱-مقاومت مارشال



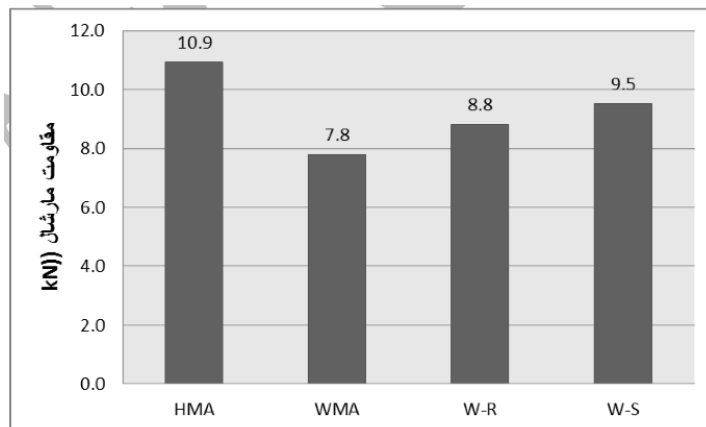
شکل ۶. نتایج مربوط به وزن مخصوص نمونه‌ها



شکل ۷. نتایج مربوط به درصد فضای خالی نمونه‌ها

بیشتری از خود نشان داده و افزودنی‌ها در افزایش مقاومت تاثیر داشته‌اند. نمونه ساسوبیتی مقاومت بیشتری از نمونه رئوفالتی داشته و بیش‌ترین مقاومت مربوط به نمونه بازیافتی گرم می‌باشد.

نتایج آزمایش مقاومت مارشال در شکل ۸ نشان داده شده است. نمونه‌های بازیافتی به جز نمونه نیمه گرم بدون افزودنی که مقدار جزئی کمتر از حد مجاز است، بیشتر از مقدار مجاز می‌باشند. نمونه‌ها با فضای خالی کمتر، مقاومت

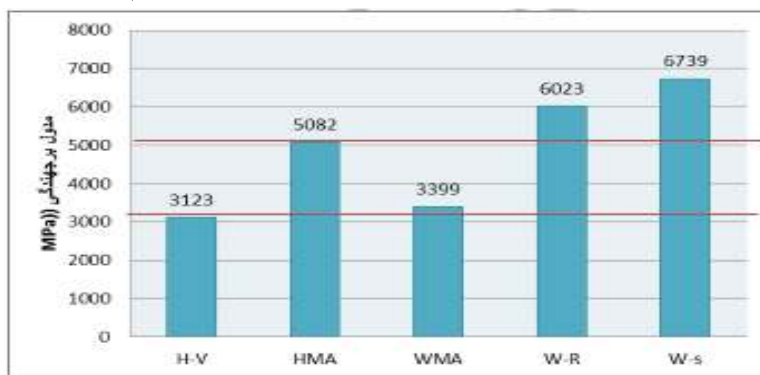


شکل ۸. نتایج مقاومت مارشال نمونه‌ها

۴-۲- آزمایش مدول برجهنگی

بازیافتی نیمه گرم با افزودنی از مدول نمونه بازیافتی گرم نیز بیشتر شده است. این امر به دو دلیل می‌تواند اتفاق بی‌افتد: (۱) افزودنی‌ها درصد قیر موثر را افزایش داده‌اند در نتیجه قیر بیشتری از RAP در اختلاط شرکت کرده و موجب سختتر شدن قیری شود که بار را تحمل می‌کند. (۲) واکنش‌های ارگانیک که از فرایند فیشر-تراپس بدست می‌آیند در دمای اختلاط ویسکوزیته قیر را کاهش می‌دهند اما هنگامی که دما پایین می‌آید یک ساختار شبکه‌های کریستالی به وجود می‌آورد که موجب سختی قیر می‌شوند. مخلوط بازیافتی نیمه گرم ساسوبیتی بیشترین مدول برجهنگی را داشته است و مدول مخلوط بازیافتی رئوفالتی نسبت به نمونه ساسوبیتی کمتر بوده و به مخلوط بازیافتی گرم نزدیک‌تر است.

همانطور که در نمودار شکل ۹ نشان داده شده است کلیه مخلوط‌های بازیافتی مدول بالاتری نسبت به مخلوط تازه دارند. این امر به دلیل استفاده از مصالح RAP و افزایش سختی مخلوط می‌باشد. مخلوط HMA130 نزدیکترین مقدار به مخلوط تازه را دارد اما این امر دلیل بر عملکرد بهتر این مخلوط نبوده بلکه می‌تواند نتیجه دو عامل مختلف باشد: یکی فضای خالی بیشتر نسبت به سایر نمونه‌های بازیافتی و دیگری اینکه دمای پایتتر ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد موجب شده اختلاط قیر جدید و قیر RAP به خوبی انجام نشود و نمونه مانند مخلوطی با قیر نرم‌تر عمل کند. نتایج نشان می‌دهد افزودنی‌ها به شدت موجب افزایش مدول برجهنگی شده است به طوری که مدول نمونه‌های

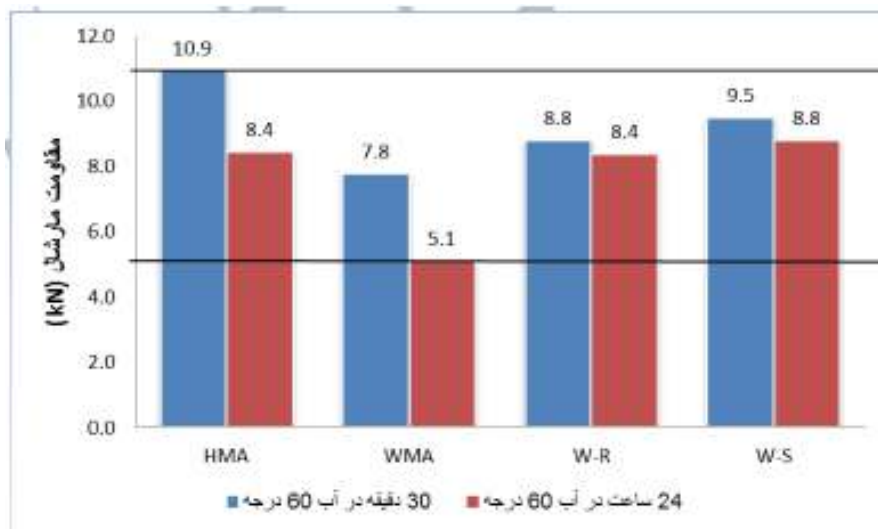


شکل ۹. تعیین MR برای نمونه‌های ساخته شده

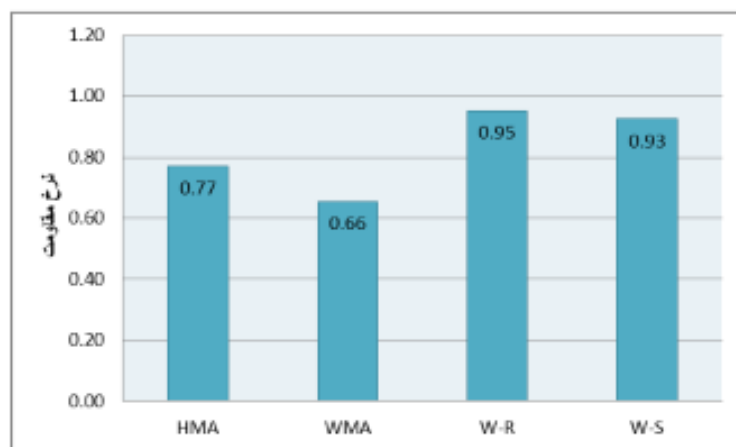
۳-۴- آزمایش حساسیت رطوبتی

نتایج مشاهده می‌شود که با کاهش دمای ساخت به ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد، حساسیت رطوبتی افزایش یافته و مقدار آن بیش از مقدار مجاز می‌شود. اما نمونه‌های با افزودنی نیمه گرم حساسیت رطوبتی کمی از خود نشان داده‌اند و کاهش مقاومت آنها از نمونه بازیافتی گرم نیز کمتر بوده است. این امر نشان می‌دهد واکس ساسوبیت و رئوفالت تاثیر مثبتی در کاهش حساسیت رطوبتی این مخلوط‌های بازیافتی داشته‌اند. این واکس‌ها دارای زنجیره‌های مولکولی بلند می‌باشند که موجب افزایش پایداری قیر می‌شوند.

برای ارزیابی حساسیت رطوبتی نمونه‌های بازیافتی از دو آزمایش مارشال و کشش غیرمستقیم استفاده شد. در نمودار زیر مقاومت مارشال نمونه‌ها پس از ۳۰ دقیقه و ۲۴ ساعت ماندن در حمام آب ۶۰ درجه سانتیگراد نشان داده شده است. طبق نشریه ۲۳۴، مقاومت نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت ماندن در آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد نباید از ۰/۷۵ مقاومت نمونه‌هایی که ۳۰ دقیقه در آب ۶۰ درجه بوده‌اند کمتر شود. مقاومت همه نمونه‌های بازیافتی به جز نمونه نیمه گرم بدون افزودنی (WMA) بیش از حد مجاز ۰/۷۵ بوده است. با توجه به



شکل ۱۰. نتایج آزمایش مقاومت مارشال نمونه‌های بازیافتی



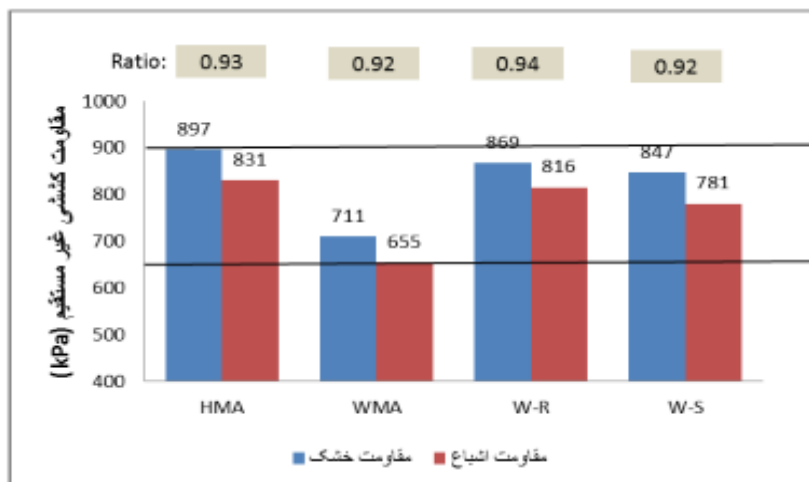
شکل ۱۱. نسبت مقاومت مارشال نمونه‌های بازیافتی

۲ (کاهش مقاومت قیر) (زیبای و همکاران، ۱۳۸۵). چسبندگی قیر یک عامل مهم در جلوگیری از این نوع

رطوبت به دو صورت می‌تواند موجب خرابی مخلوط آسفالتی شود ۱ (کاهش چسبندگی میان مصالح سنگی) و قیر

احتمال وقوع آسیب‌های رطوبتی در مخلوط‌های نیمه گرم افزایش یابد که دلیل آن دمای تولید کمتر و امکان از بین رفتن رطوبت مخلوط به طور کامل، در این دما است (طباطبایی و همکاران، ۱۳۸۰). همانطور که از نتایج مشخص است با اینکه نمونه‌ها دارای مقاومت‌ها کششی متفاوتی می‌باشند، اما نرخ کاهش مقاومت همه نمونه‌های بازیافتی تقریباً برابر می‌باشد و همه آنها بالای ۰/۹ می‌باشد.

خرابی‌ها است و تراکم خوب و درصد فضای خالی کم می‌تواند مقاومت مخلوط را در برابر آسیب‌های رطوبتی افزایش دهد. طبق استاندارد AASHTO T283 برای کنترل حساسیت رطوبتی، نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها در شرایط اشباع و غیر اشباع باید بیش از ۸/۰ باشد. مطالعات نشان داده در مخلوط‌های حاوی RAP حساسیت رطوبتی کاهش می‌یابد که دلیل آن می‌تواند سختی قیر و چسبندگی زیاد مصالح به قیر پیر شده باشد. ممکن است



شکل ۱۲. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم نمونه‌ها در حالت خشک و تر و نسبت مقاومت‌ها

مدول برجهندگی گفته شد دمای پایین‌تر تراکم موجب می‌شود قسمت کمتری از قیر سخت شده مصالح RAP در اختلاط شرکت کند. بنابراین مخلوط بیشتر مانند مخلوطی با قیر نرمتر (۱۰۰-۸۵) عمل می‌کند. دلیل عمق شیار بیشینه در مخلوط WMA می‌تواند همین امر باشد ضمن اینکه این مخلوط فضای خالی بیشتری نیز نسبت به بقیه مخلوط‌ها دارا می‌باشد و قیر آن نسبت به قیر مخلوط گرم کمتر پیر شده است. عمق شیار در مخلوط‌های نیمه گرم با افزودنی کمتر از نصف مخلوط نیمه گرم بدون افزودنی می‌باشد که نشان دهنده اثر افزودنی‌ها در کاهش پتانسیل شیارشدگی می‌باشد. این اثر می‌تواند ناشی از بهبود تراکم، افزایش درصد قیر موثر و سختی قیر به خاطر خواص ملکولی این افزودنی‌ها باشد. ملاحظه می‌شود مخلوط بازیافتی ساسوبیتی که در آزمایش شیار جای چرخ کمترین عمق شیار را داشته، بیشترین عدد روانی را نیز داشته است و مخلوط نیمه گرم بدون افزودنی که بیشترین عمق شیار را داشته است اینجا کمترین عدد روانی را دارد و از این جهت

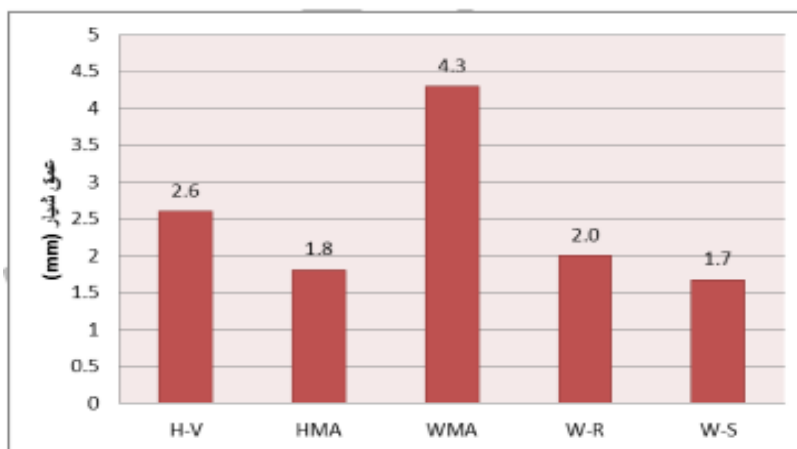
در نهایت با توجه به نتایج هر دو آزمایش می‌توان دریافت به جز نمونه نیمه گرم بازیافتی بدون افزودنی، بقیه نمونه‌های بازیافتی با توجه به معیارها مشکل خاصی از نظر حساسیت رطوبتی نداشته‌اند و در این میان نمونه‌های نیمه گرم با افزودنی کم‌ترین حساسیت رطوبتی را از خود نشان داده‌اند. نمونه بازیافتی نیمه گرم حاوی افزودنی رئوفالت (WR) در هر دو آزمایش بهترین عملکرد را داشته است.

۴-۴- شیار جای چرخ

در نمودار زیر نتایج مربوط عمق شیار حاصل در آزمایش شیار جای چرخ را مشاهده می‌کنید. ملاحظه می‌شود نمونه بازیافتی گرم (HMA150) و نمونه‌های بازیافتی نیمه گرم (W-S و W-R) دارای عمق شیار کمتری نسبت به مخلوط تازه (H-V) بوده‌اند. اما مخلوط بازیافتی HMA130 بیشترین عمق شیار را داشته است که این مقدار از مخلوط تازه نیز بیشتر بوده است. همانطور که در قسمت

افزودنی‌ها اثر قابل ملاحظه‌ای در کاهش پتانسیل شیارشده‌گی مخلوط‌های بازیافتی داشته‌اند.

دو آزمایش با هم همخوانی دارد می‌باشد. در مجموع با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که علاوه بر این که کاهش دمای ساخت موجب افزایش پتانسیل شیارشده‌گی شده است،

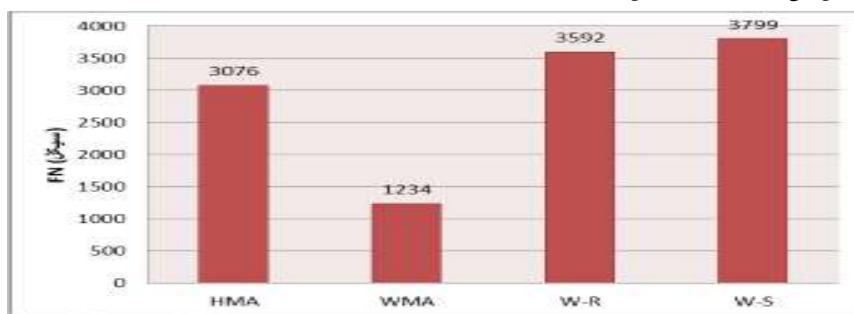


شکل ۱۳. نتایج مربوط به آزمایش شیار جای چرخ

۴-۵- آزمایش خزش دینامیکی

چرخ معیار اندازه تغییر شکل های دائمی می باشد، اما در آزمایش خزش دینامیکی نحوه و نرخ تغییر شکل‌ها در بارگذاری متوالی معیار می‌باشد. در واقع با اینکه نمونه رئوفالته عدد روانی بیشتری نسبت به مخلوط گرم داشته است، کرنش‌های تجمعی بیشتری نیز داشته است. به عنوان مثال در بارگذاری ۳۰۷۶ ام که عدد روانی مخلوط گرم می‌باشد، کرنش تجمعی برای مخلوط رئوفالته ۱/۲۲ درصد و برای مخلوط گرم ۱/۱۷ درصد بوده است. بنابراین می‌توان دریافت که مخلوط رئوفالته علاوه بر تغییر شکل‌های بیشتر، FN بالاتری نیز داشته است. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که علی‌رغم اینکه کاهش دمای ساخت موجب افزایش پتانسیل شیارشده‌گی شده است، افزودنی‌ها اثر قابل ملاحظه‌ای را در کاهش پتانسیل شیارشده‌گی مخلوط بازیافتی داشته‌اند.

شیارشده‌گی یکی از خرابی‌های رایج در روسازی‌های آسفالتی می‌باشد و به تغییر شکل‌های دائمی گفته می‌شود که بصورت شیار فرورفته در مسیر چرخ وسایل نقلیه به موازات محور طولی راه دیده می‌شود. لذا در این تحقیق شیارشده‌گی نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. برای بررسی شیارشده‌گی نمونه‌ها از آزمایش خزش دینامیکی استفاده شد. آزمایش خزش دینامیکی یکی از معیارهای مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های دائم می‌باشد. ملاحظه می‌شود مخلوط بازیافتی ساسوبیتی که در آزمایش شیار جای چرخ کمترین عمق شیار را داشته است، اینجا نیز بیشترین عدد روانی را داشته و مخلوط نیمه گرم بدون افزودنی که بیشترین عمق شیار را داشته است، کمترین عدد روانی را دارا می‌باشد. این روند در ارتباط با دو مخلوط بازیافتی رئوفالته و مخلوط بازیافتی گرم رعایت نشده است. دلیل این امر تفاوت در معیار ارزیابی دو آزمایش می‌باشد. در آزمایش شیار جای

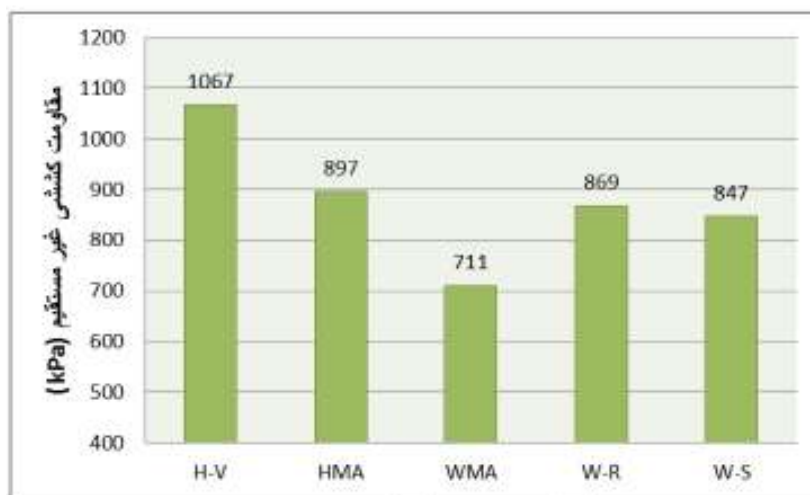


شکل ۱۴. نتایج آزمایش شیار جای چرخ

۴-۲-۳- آزمایش کششی غیر مستقیم

محدوده قرار دارند. نتایج نشان می‌دهد کاهش دمای ساخت در بازیافت موجب کاهش مقاومت کششی مخلوط شده است این امر به دلیل عدم تراکم مطلوب در دمای پایین‌تر و همچنین عدم اختلاط مناسب دو قیر و کاهش قیر موثر در تحمل بار اتفاق می‌افتد. در اینجا افزودنی‌ها توانسته‌اند اثر کاهش دما را تا حد قابل ملاحظه‌ای جبران کنند. افزودنی‌های ساسوبیت و رثوفالت ضمن تسهیل تراکم و افزایش درصد قیر موثر به دلیل اینکه از ساختار ماکولی بلند زنجیره‌ای برخوردارند موجب افزایش پایداری قیر می‌شوند. عملکرد کششی غیر مستقیم نمونه‌رثوفالتی اندکی بیشتر از نمونه ساسوبیتی بوده است.

پس از اینکه نمونه‌های ساخته شده با قیر بهینه تحت آزمایش کششی غیر مستقیم قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد مقاومت کششی تمامی نمونه‌ها از نمونه شاهد کمتر می‌باشد که دلیل آن چسبندگی بیشتر قیر خالص و فضای خالی کمتر می‌باشد. زیرا فضای خالی کمتر موجب افزایش سطح مقاوم در برابر نیرو شده و تنش موثر را کاهش می‌دهد. در میان مخلوط‌های بازیافتی مخلوط بازیافتی نیمه گرم بدون افزودنی کمترین و مخلوط بازیافتی گرم بیشترین مقاومت کششی را از خود نشان داده است. هرچند تفاوت مقاومت کششی مخلوط بازیافتی گرم با مخلوط‌های بازیافتی نیمه‌گرم با افزودنی ساسوبیت و رثوفالت ناچیز می‌باشد و تقریباً در یک



شکل ۱۵. نتایج آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد

۵- نتیجه‌گیری

نمونه‌های نیمه گرم شده‌اند. ضمن اینکه ساسوبیت نسبت به رثوفالت تاثیر بیشتری در افزایش مقاومت داشته است. کلیه مخلوط‌های بازیافتی مدول برجهندگی بیشتری نسبت به مخلوط گرم شاهد داشته‌اند و در این میان مخلوط ساسوبیتی و رثوفالتی بیشترین مدول را داشته‌اند. افزودنی‌های ساسوبیتی و رثوفالت در نمونه‌های بازیافتی موجب افزایش مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی شده‌اند. به طوری که نمونه‌های نیمه گرم ساسوبیتی و رثوفالتی حتی عملکرد بهتری نسبت به مخلوط بازیافتی گرم داشته‌اند. در آزمایش حساسیت رطوبتی اختلاف نتایج به دست آمده از نسبت مارشال بیشتر از نتایج بدست آمده از نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم می‌باشد که دلیل آن می‌تواند

در این تحقیق جهت ارزیابی عملکرد مخلوط‌های خرده آسفالتی حاوی افزودنی نیمه گرم آزمایش‌های مختلفی از قبیل: مقاومت مارشال، کشش غیرمستقیم، مدول برجهندگی، حساسیت رطوبتی، خزش دینامیکی و شیار جای چرخ انجام پذیرفت که نتایج به شرح زیر می‌باشد:

به کارگیری ساسوبیت و رثوفالت در کاهش فضای خالی مخلوط بازیافتی نیمه‌گرم تاثیرگذار بوده است، هرچند که کمترین فضای خالی مربوط به مخلوط گرم می‌باشد.

نتایج آزمایش استقامت مارشال کاملاً با درصد فضای خالی نسبت عکس دارد و با کاهش دما از ۱۵۰ به ۱۳۰ درجه سانتیگراد، مقاومت نمونه‌ها به شدت کاهش یافته است. اما افزودنی ساسوبیت و رثوفالت سبب افزایش مقاومت

۷- مراجع

- "آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران"، (۱۳۹۰)، نشریه شماره ۲۳۴، پژوهشکده حمل و نقل، دفتر نظام فنی و اجرایی، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور.

- زیاری، ح. طباطبایی، س. ع. و خبیری، م. م. (۱۳۸۵)، "راهنمای کاربردی آزمایش‌های قیر و آسفالت"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

- سازمان برنامه و بودجه، معاونت فنی، (۱۳۸۰)، نشریه ۱۱۰، "مشخصات فنی عمومی راه".

- گروه مهندسين مشاور هرازراه، (۱۳۸۵)، "روش‌های بازیافت سرد و گرم و امکانسنجی اقتصادی آن در ایران"، معاونت آموزش، تحقیقات، فناوری پژوهشکده حمل و نقل.

- طباطبایی، ا. م. (۱۳۸۰)، "روسازی راه"، مرکز نشر دانشگاهی، تهران.

- Feipeng Xiao and Serji N Amirkhanian, (2007), "Laboratory Investigation of Moisture Damage in Rubberized Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement," Int.J. Pavement Engineering, Vol.10, Issue 5.

- He Gui-Ping , Wong Wing-Gun, (2008), "Effects of moisture on strength and permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating RAP materials," Construction and Building Materials. Vol. 22, Issue 1, pp.30-40.

- Joe W. Button, Cindy Estakhri, and Andrew Wimsatt, (2007), "A Synthesis of Warm-mix Asphalt," Technical Report: 0-5597-1Project, performed in cooperation with the Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration.Us.

- Karen A. O'Sullivan, Phyllis A. Wall, (2009), "The Effects of Warm Mix Asphalt

شرایط سختگیرانه تر آزمایش مارشال باشد. به طوری که به جز نمونه نیمه گرم بدون افزودنی حساسیت رطوبتی همه نمونه‌ها در حد مجاز بوده است. مقایسه مقدار مقاومت شیارشدگی مخلوط بازیافتی گرم شاهد نشان می‌دهد مصالح RAP موجب افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی می‌شود. باوجوداینکه در مخلوط بازیافتی از یک قیر نرمتر نسبت به مخلوط شاهد استفاده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که افزودنی‌های ساسوبیت و رئوفالت سبب افزایش مقاومت مخلوط در برابر شیارشدگی شده‌اند. بیشترین مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های بازیافتی در دمای ۲۵ درجه مربوط به مخلوط گرم می‌باشد. هنگامی که دمای ساخت نمونه‌ها کاهش یافته، مقاومت کششی نیز کاهش می‌یابد. اما افزودنی‌های نیمه گرم در افزایش مقاومت تاثیر داشته‌اند. ضمن اینکه مقاومت مخلوط حاوی رئوفالت به مقدار کمی بیشتر از مخلوط ساسوبیتی می‌باشد.

نتایج حاصل از آزمایش‌های مدول برجهندگی، شیارشدگی و خستگی نشان می‌دهد افزودنی‌ها سختی مخلوط را افزایش داده اند که این افزایش سختی در مخلوط ساسوبیتی بیشتر از رئوفالتی بوده است و مخلوط رئوفالتی نتایج نزدیکتری به مخلوط گرم داشته است. افزایش سختی توسط افزودنی‌ها به دو شکل ممکن است رخ دهد:

به خاطر ساختار شبکه‌ای که افزودنی‌ها در دمای محیط ایجاد می‌کنند.

بهبود اختلاط قیر جدید با قیر RAP، به طوری که مقدار بیشتری از قیر سخت شده RAP در اختلاط شرکت می‌کند.

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- German Technical Specification
- 2- Warm Mix Asphalt (WMA)
- 3- Aspha-min
- 4- Sasobit
- 5- Evotherm
- 6- Cold mix Asphalt
- 7- Hot mix Asphalt (HMA)
- 8- Rutting Potential
- 9- Aging
- 10- Rutting Resistance
- 11- Softening point
- 12- Penetration grade
- 13- Penetration index
- 14- Penetration-viscosity index
- 15- Performance Grade (PG)

- Jesse D.Doyle, Isaac L.Howard P., (2010), "Compactibility and bitumen utilization of 100% warm mixed RAP," Transportation Research Board Annual Meeting 2010 Paper #10-0279.
- Kai su, Ryota Maekawa, Yoshitaka Hachiya. (2009), "laboratory evaluation of WMA mixture for use in airport pavement rehabilitation," Int.J. Construction and building materials, Vol. 23, Issue 7, pp. 2709– 2714.
- Mihai O. Marasteanu, Xue Li, Timothy R. Clyne, Vaughan R. Voller, David H. Timm, David E. Newcomb, (2004), "Low Temperature Cracking Of Asphalt Concrete Pavements," Technical Report: MN/RC – 2004-23, University of Minnesota Department of Civil Engineering.
- Additives on Recycled Asphalt Pavement," B.S. thesis, Major Qualifying Project, Number: MQPRBM0903, Worcester Polytechnic Institute, US.
- Mallick, R. B., Bergendahl, J., & Pakula, M., (2009), "A Laboratory Study on CO2 Emission Reductions Through the Use of Warm Mix Asphalt", Transportation Research Board Annual Meeting Paper #09-1951.
- Mallick, R; Kandhal, P & Bradbury, R., (2008), "Using Warm Mix Asphalt Technology to Incorporate High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Material in Asphalt Mixtures," Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2051, pp. 71-79.
- Soon-Jae Lee a, Serji N. Amirkhanian b, Nam-Won Park c, Kwang W. Kim., (2009), "Characterization of warm mix asphalt binders is containing artificially long-term aged binders," Int.J. Construction and Building Materials, Vol. 23, Issue 6, pp. 2371–2379.
- Young S. Doh, Jin C. Kim, Min Y. Ryu, (2007), "Evaluation of selected warm-mix additives for asphalt recycle," Transportation Research Board Annual Meeting 2010 Paper #10-1063.

Evaluation of Performance properties of Reclaimed Asphalt pavement (RAP) mixtures containing Warm Mix Asphalt (WMA) additives

A. Choubdar, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.

A. R. Ameli, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.

A. Farajollahi, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.

E-mail: Amelii@gmail.com

Received: September 2019-Accepted: December 2019

ABSTRACT

The use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) helps us save our natural resources and money. Of the different types of asphalt pavements that can be built, HMA pavements are considered the best in the terms of strength and durability. But the production temperature limits the amount of RAP used in the new mixture because this production's high temperature requirement causes the deterioration of the aged binder of RAP and increases greenhouse gas emission. In the recent years there has been much focus on Warm Mix Asphalt (WMA) technology, because the aim of this approach is to reduce the production temperature by using additives which increase the workability of the binder at a lower temperature. The use of WMA additives helps us reduce the temperature while preserving the desired workability, thus enables HMA to contain higher percentages of RAP. The purpose of this experimental study was to evaluate the effect of production temperature reduction by using WMA additives on the performance properties of asphalt mixture containing 100% RAP. To reach this goal, five mixes were prepared and tested: a control mix (100% RAP-mixing temperature 150°C), three mixes with Sasobit, Rheofalt and without additives (mixing temperature of 130°C), and one virgin mix with extracted aggregate (mixing temperature of 160°C). The performance properties of the mixtures were evaluated based on indirect tensile strength, resilient module, four point beam fatigue test, and dynamic creep test etc. The results showed that the mixtures with WMA additives had better performance according to their moisture susceptibility and rutting potential, but the control mix had better performance in fatigue and low temperature cracking.

Keywords: Recycling, Warm Mix Asphalt, RAP, Aging, Fatigue, Sasobit, Rheofalt