

بررسی تاثیر افزودنی نانواهک بر مدول سختی آسفالت سرد بازیافتی

سید شهاب حسینی نسب*، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

سجاد یدالهی ده چشمه، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد الکترونیکی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: s.hasani@razi.ac.ir

دریافت: ۹۷/۰۴/۱۵ - پذیرش: ۹۷/۰۸/۰۵

صفحه ۲۰۸-۱۹۹

چکیده

مسائل زیست محیطی به یکی از مهمترین چالش‌های دنیای امروز بدل شده است. فرایند تولید و تراکم آسفالت گرم به دلیل مصرف زیاد سوخت‌های فسیلی و تولید آلودگی‌های مربوطه به یک صنعت پرهزینه تبدیل شده. جهت حل این معضل، راه‌های گوناگونی پیشنهاد شده که یکی از آن‌ها استفاده از آسفالت سرد بازیافتی است. در ساخت آسفالت بازیافتی استفاده از یک فیلر مانند سیمان ضروری است. تولید سیمان مستلزم ایجاد آلاینده‌های گلخانه‌ای است. به منظور کاهش این آثار مخرب و نیز به منظور بهبود خواص مکانیکی آسفالت بازیافتی می‌توان از مواد افزودنی دیگری به جای سیمان در این نوع آسفالت استفاده کرد. در این پژوهش با افزودن نانواهک به امولسیون قیر به جای سیمان در آسفالت بازیافتی، جهت بهبود خواص خستگی آسفالت استفاده شده است. روش تجزیه و تحلیل اطلاعات بصورت مقایسه‌ای و بر اساس نمودارهای بدست آمده از آزمایش‌های تجربی خواهد بود. در این پژوهش تنش کششی، کرنش کششی، و مدول سختی نمونه آسفالتی توسط آزمایش خمش چهار نقطه‌ای با ساخت تیرچه خمشی اندازه گیری شد. بر اساس نتایج بدست آمده، مقایسه میان مدول سختی دینامیکی برای نمونه‌های با درصد وزنی مواد افزودنی متفاوت نشان می‌دهد مدول سختی نمونه آسفالتی با افزودن نانو آهک بهبود می‌یابد. میانگین مدول سختی برای نمونه دارای ۲.۵ درصد وزنی نانو آهک بیشترین و برای حالت بدون نانو آهک، کمترین مقدار را داراست.

واژه‌های کلیدی: آسفالت بازیافتی، مدول سختی، نانواهک

۱- مقدمه

فناوری بازیافت در اکثر شاخه‌های علوم از جمله روسازی استفاده می‌شود. افزایش هزینه‌های ساخت و نگهداری راه، مشکلات تهیه مواد اولیه مرغوب، کمبود منابع مالی و نیاز برای ترمیم و نگهداری راه‌ها باعث شده است که بازیافت آسفالت به طور جدی مورد توجه قرار گیرد. در طول مراحل بازیافت سرد مصالح خرده آسفالت، حرارت به کار برده نمی‌شود. مصالح خرده آسفالت به کار رفته در بازیافت سرد، به دو صورت در مخلوط‌ها به کار گرفته می‌شوند. در روش اول (بازیافت سرد در کارخانه آسفالت مرکزی) مخلوط‌های بازیافتی سرد، با به کارگیری امولسیون یا کف قیر به همراه

مصرف سوخت‌های فسیلی به یکی از مهمترین چالش‌های دنیای امروز بدل شده است. فرایند تولید و تراکم آسفالت گرم به دلیل مصرف زیاد سوخت‌های فسیلی و تولید آلودگی‌های مربوطه همواره به عنوان یک صنعت پرهزینه و همچنین تولیدکننده‌ی گازهای گلخانه‌ای در معرض انتقاد کارشناسان و منتقدین قرار گرفته است [Anderson et al., 2008]. جهت حل این معضل، راه‌های گوناگونی پیشنهاد شده که در میان آنها تکنولوژی آسفالت سرد در سال‌های اخیر، مسائل زیست محیطی و همچنین کاهش بازیافتی یکی از راهکارها است [DiVito & Morris, 1982]. امروزه

بافت سطحی زیر و گوشه در و دانه بندی باز، انتظار می‌رود به دشواری متراکم گردد. لذا فضای خالی مخلوط آسفالتی بیشتر شده و عمر خستگی کاهش می‌یابد. در حالی که اگر خوب متراکم گردند منجر به سختی بیشتر مخلوط می‌گردد و در مقابل مصالح گرد گوشه انتظار می‌رود مخلوط‌های با سختی کمتر تولید کند که نهایتاً رفتار خستگی با تغییر سختی، تغییر خواهد کرد [Hefer et al. 2005].

عمر خستگی و سختی خمشی روسازی آسفالتی از حجم قیر و مقدار فضای خالی مخلوط تاثیر می‌پذیرد. برای یک مخلوط آسفالتی با ۵ درصد وزنی قیر و فضای خالی ۵ درصد، یک درصد کاهش در مقدار قیر، همراه با یک درصد افزایش در مقدار فضای خالی منجر به ۳۹ درصد کاهش در عمر خستگی می‌شود. تحقیقات نشان دادند که با افزایش مقدار فضای خالی که بوسیله قیر در مخلوط پر می‌شود عمر خستگی افزایش می‌یابد. تاثیر مقادیر مختلف فضای خالی و درصد قیر بر سختی و عمر خستگی یک دانه بندی خاص ایالت کالیفرنیا مورد بررسی قرار گرفت، نتایج نشان دهنده افزایش عمر خستگی و افزایش سختی اولیه با کاهش فضای خالی مخلوط بوده است. همچنین در مقادیر بالاتر قیر، مدول سختی مخلوط کاهش و عمر خستگی آن افزایش می‌یابد [Kandhal, Parker, 1998]. نتایج تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که مقدار قیر بهینه‌ای وجود دارد که به ازای آن می‌توان به بیشترین عمر خستگی رسید. میزان قیر لازم برای تامین بهترین عملکرد خستگی، با میزان قیر مورد نیاز برای تامین بیشترین سختی مخلوط مرتبط است. در بررسی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی دو حالت بارگذاری تنش کنترل شده و کرنش کنترل شده، انواع حالت‌های بارگذاری هستند که نیازمند بررسی دقیق‌تر، برای نزدیک‌شدن به شرایط واقعی روسازی جاده می‌باشد. مطالعات نشان می‌دهد که حالت بارگذاری تنش کنترل شده معمولاً برای روسازی‌های ضخیم (ضخامت‌های بیشتر از ۸ اینچ) مورد پذیرش می‌باشد [Xiao et al., 2010] برای این نوع ساختار روسازی، لایه آسفالتی ضخیم، جزء اصلی بار بر سازه روسازی بوده و کرنش با تکرار بار با ضعیف شدن ساختار مصالح روسازی، افزایش می‌یابد. به دلیل ضخامت بالای روسازی، کاهش سختی؛ به همراه تغییرات کوچکتر در تنش اعمالی همراه بوده و این حقیقت منجر به در نظر گرفتن وضعیت تنش

افزودنی یا جوان ساز ساخته می‌شوند. در این روش ممکن است مصالح سنگی طبیعی برای تامین مشخصات دانه‌بندی به کار گرفته شوند [Xiao et al. 2010]. بازیافت سرد آسفالت به صورت درجا (CIRP) به روشی اطلاق می‌شود که در آن با استفاده از ماشین آلات خاصی لایه‌های آسفالتی (و یا سنگدانه‌های) موجود در سطح روسازی تا عمق ۳۰۰ میلیمتر (۱۲ اینچ) آسفالت تراشی شده، تا دانه بندی مناسب خرد گردیده و با امولسیون قیر (یا کف قیر) و یا سایر افزودنی‌های مناسب ترکیب شده و نهایتاً در همان محل پخش و متراکم می‌گردند [Zaniewski, Viswanathan, 2006]. با توجه به هزینه‌های سنگین روسازی‌های آسفالتی و همچنین آثار زیانبار زیست محیطی حاصل از استفاده مواد نفتی و گازهای آلاینده‌ای که در حین تولید و فراوری بتن آسفالتی گرم تولید می‌شود، اهمیت استفاده از آسفالت سرد بازیافتی نمود بیشتری می‌یابد. چراکه این نوع از روسازی نیازی به دمای بالا و مصالح سنگی جدید نداشته و می‌توان نوعی از روسازی را ارائه داد که چه از لحاظ هزینه‌های مالی و چه به جهت جلوگیری از آثار مخرب زیست محیطی کاملاً به صرفه باشد. اما در این بین مقاومت خستگی و مدول سختی روسازی مذکور نسبتاً ضعیف بوده و برای تقویت آن به ناچار باید از افزودنی‌هایی استفاده نمود. به شکست ماده در اثر اعمال نیروهای متناوب کمتر از استحکام نهایی و (اغلب) کمتر از حد تسلیم، خستگی گفته می‌شود. ترک خستگی به عنوان شکستی است که تحت تکرار بار با مقداری کمتر از حداکثر مقاومت کششی مخلوط آسفالتی ایجاد می‌شود. ترک خوردگی خستگی در اثر جمع شدن کرنش‌های کوچک غیر قابل برگشت ناشی از بارهای تکراری در طول زمان ایجاد می‌شود [Al-Balbissi, Little, 2002]. تشخیص مشخصات خستگی بطور معمول توسط آزمایشهای خستگی انجام می‌گیرد اما انجام این آزمایشها در بسیاری از شرایط غیر ممکن است در ضمن این آزمایشها گران و زمانبر هستند. عوامل مؤثر بر عملکرد خستگی روسازی‌های آسفالتی عبارتند از: مشخصات رفتاری مصالح، میزان فضای خالی، میزان قیر، اثر الگوی بارگذاری؛ تنش کنترل شده یا کرنش کنترل شده، دمای انجام آزمایش، دوره‌های استراحت، فرکانس بارگذاری. انتظار می‌رود بافت سطحی مصالح بر عمر خستگی تاثیر گذار باشد. مصالح با

داد. دوره‌های استراحت بین بارگذاری‌ها در برخی آزمایش‌ها برای شبیه‌سازی دوره‌های بارگذاری و باربرداری ترافیک وسایل نقلیه مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عنوان یک تقریب عملی، محققین گستره دوره‌های استراحت در آزمایشگاه را بین یک تا صد برابر زمان بارگذاری معرفی کرده‌اند. دوره‌های استراحت موجب رها شدن تنش‌ها یا بهبود و ترمیم یافتن شیمیایی ترک‌های کوچک می‌شود و بنابراین عمر خستگی را در آزمون‌های آزمایشگاهی صرفنظر از هندسه نمونه یا شرایط بارگذاری افزایش می‌دهد. با این وجود، نوع مخلوط و شرایط آزمایش (دما و فرکانس) بدلیل سختی و خصوصیات ویسکوالاستیک مخلوط تأثیراتی بر سطح بهبود خصوصیات خستگی دارد. تأثیر مفید دوره‌های استراحت بر عمر خستگی که به صورت نسبت تعداد چرخه‌های گسیختگی با دوره‌های استراحت به تعداد چرخه‌های خرابی خستگی بدون دوره‌های استراحت بیان می‌شود عموماً بیشتر از یک است. تأثیر دوره‌های استراحت در بارگذاری تحت تنش کنترل شده موجب افزایش بیشتری در عمر خستگی نسبت به بارگذاری تحت تغییر شکل کنترل شده می‌شود [Pais, Pereira, Picado- Santos, 2002].

فرکانس بارگذاری در آزمایش خستگی، شبیه‌سازی سرعت ترافیک عبوری در جاده را نشان می‌دهد. تحقیقات انجام شده در خصوص مدت زمان اثر بار؛ حاکی از آن است که کاهش فرکانس بارگذاری (افزایش زمان اثر بار)، منجر به کاهش عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. بایستی در نظر داشت که تغییر زمان اثر بار، متضمن فرکانس‌ها و زمانهای استراحت متفاوتی است [Houang, 2004]. بدیهی است کاهش فرکانس بارگذاری یا به عبارت دیگر افزایش زمان اثر بار، باعث می‌شود انرژی تلف شده در طول سیکل بارگذاری به سرعت پیشرفت کرده و نمونه سریعتر با کاهش سختی مواجه گردد. در تایید این مطلب، با در نظر گرفتن دوره استراحت ثابت و بارگذاری موج سینوسی ولی با فرکانس بارگذاری متغیر، دریافتند افزایش فرکانس بارگذاری باعث افزایش عمر خستگی می‌شود [Al-Qadi, Nassar, 2003]. با این حال اکثر تحقیقات موجود در زمینه خستگی مخلوط‌های آسفالتی، از مقدار فرکانس بارگذاری ۱۰ هرتز (پیشنهادی آیین نامه‌ها) که معادل سرعت تقریبی ۹۸ کیلومتر بر ساعت وسیله نقلیه در جاده است، استفاده می‌شود. در این

ثابت می‌گردد. در حالت کرنش کنترل شده در آزمایشگاه که شبیه‌سازی لایه آسفالتی با ضخامت کم در جاده می‌باشد، به دلیل ضخامت کم لایه آسفالتی، این لایه جزء اصلی باربر ساختار روسازی نبوده و بنابراین با تغییر شکل لایه‌های زیرین روسازی؛ دچار تغییر شکل می‌گردد و این تغییر شکل‌ها تقریباً ثابت در نظر گرفته می‌شود. برای تعیین مد بارگذاری صحیح، بایستی به یک مرز از سختی مخلوط آسفالتی با آزمایش مدول دینامیکی رسید. تاکنون به این مسأله توجه نشده است و معمولاً محققان شرایط اختیاری از دو مد بارگذاری را در نظر می‌گیرند. منطقی است برای مقادیر سختی کمتر از مقدار مرزی عنوان شده، حالت کرنش کنترل شده و برای مقادیر بیشتر حالت تنش کنترل شده را قائل گردید. چرا که با ظهور افزودنی‌های مختلف برای بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی از جهات گوناگون، سختی مخلوط را دستخوش تغییرات قابل ملاحظه ای می‌کند؛ این در حالی است که با در نظر گرفتن ضخامت یکسان در مقایسه با مخلوط‌های کنترلی در شرایط جاده، نمی‌توان به فرض عنوان شده برای در نظر گرفتن فقط یکی از دو مد بارگذاری تنش کنترل شده یا کرنش کنترل شده برای تخمین عمر خستگی روسازی اعتماد کرد. مخلوط آسفالتی ماده ای ویسکوالاستیک است و خواص سختی آسفالت، به دما و سرعت بارگذاری وابسته است. خرابی خستگی یا ترک خوردگی یک روسازی آسفالتی در اثر بارگذاری ترافیکی، بسته به مشخصات سختی مصالح، ترکیب و مشخصات تنش‌های ناشی از ترافیک و همچنین کرنش‌های ایجاد شده در عمق لایه متغیر است. سطح کرنش کششی ایجاد شده در لایه آسفالتی به درجه حرارت وابسته بوده و این اثر به صورت تأثیر درجه حرارت بر سختی مخلوط آسفالتی قابل بررسی است [Al-Balbissi Little, 2002]. اثر دما بر رفتار خستگی توسط چندین محقق در هر دو حالت بارگذاری تنش کنترل شده و تغییر شکل کنترل شده مورد بررسی قرار گرفته است. نتیجه این که عمر خستگی در حالت آزمایش تنش کنترل شده، وابستگی دمایی بالایی دارد بطوری که در دماهای پایین منجر به افزایش عمر خستگی می‌گردد در صورتی که سایر عوامل ثابت نگه داشته شود می‌گردد. در شرایط آزمایش تغییر شکل کنترل شده به این نتیجه رسیدند که افزایش دما عمر خستگی را افزایش خواهد

تحقیق سعی بر این است که اثر نانو آهک به عنوان افزودنی بر روی خواص خستگی آسفالت سرد بازیافتی مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور آزمایشان تنش کششی، کرنش کششی، و سختی نمونه آسفالتی توسط آزمایش خمش چهار نقطه‌ای با ساخت تیرچه خمشی اندازه‌گیری خواهد شد. با مقایسه میان مدول سختی برای نمونه‌های با درصد وزنی مواد افزودنی متفاوت می‌توان نشان داد مدول سختی نمونه آسفالتی با افزودن نانو آهک چه میزان بهبود می‌یابد.

۲- پیشینه تحقیق

عمر خستگی معمولاً به وسیله آزمایش‌های خستگی یا بوسیله مدل‌های جانشین بدست می‌آید. که معمولاً در سطوح کرنش نسبتاً بالا و با استفاده از چندین سطح کرنش با هدف کمینه کردن زمان آزمایش انجام می‌گیرد و منحنی عمر خستگی ترسیم می‌گردد. دقت و صحت این تعمیم دهی به تعداد آزمایش‌های خستگی انجام شده برای این تعمیم دهی بستگی دارد. که معمولاً در دو یا چند سطح کرنش و چندین تکرار برای هر سطح کرنش انجام می‌شود. بدیهی است هرچه تعداد سطوح کرنش و تعداد تکرارها برای هر سطح کرنش افزایش یابد، دقت و صحت پیش بینی عمر خستگی افزایش می‌یابد. که خود باعث صرف هزینه‌های هنگفتی می‌گردد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که حداقل ۳ سطح کرنش و ۳ تکرار برای هر سطح کرنش جهت مدلسازی به منظور پیش بینی قابل قبول عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی ضروریست. برای جلوگیری از بروز خطا و افزایش صحت نتایج آزمایشات خستگی به روش تیرچه خمشی چهار نقطه‌ای؛ شرایط بارگذاری به صورت تغییر شکل کنترل شده سینوسی مطابق استاندارد AASHTO T321 ضروریست. در نظر گرفتن دمای ۲۰ درجه سانتیگراد و فرکانس ۱۰ هرتز برای بررسی رفتار خستگی، برای شبیه سازی دماهای محیط در جاده و سرعت ترافیک مطابق استانداردها ضروری است. روش تجزیه و تحلیل اطلاعات بصورت تجربی و بر اساس نتایج و نمودارهای است که از آزمایش‌های مارشال و خستگی بدست آمده و مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته‌اند. در آزمایش مارشال، وزن در هوا، وزنه غوطه ور در آب، وزن اشباع با سطح خشک، و در نهایت استحکام نمونه‌های آسفالتی بدون افزودنی و با درصد‌های

مختلف افزودنی مورد مقایسه و ارزیابی قرار خواهند گرفت. در آزمایش خستگی، تنش کششی حداکثر و همچنین کرنش کرنش کششی حداکثر و مدول سختی نمونه‌های آسفالتی بدون افزودنی و با درصد‌های مختلف افزودنی توسط آزمایش خمش چهار نقطه‌ای با ساخت تیر آسفالتی به ابعاد ۳۸۰ میلی‌متر طول و ۶۳ میلی‌متر عرض و ۵۰ میلی‌متر ارتفاع اندازه‌گیری شد. یکی از مراحل مهم کار، تشخیص کمبودهای آسفالت موجود و تعیین نیاز به مصالح جدید می‌باشد. بر این مبنا مصالح خرده آسفالتی مورد آزمایش قرار گرفته، خواص آن‌ها بررسی می‌گردد. ابتدا درصد قیر موجود در این مصالح تعیین شده و سپس دانه‌بندی مصالح مشخص می‌گردد.

۳- مصالح مصرفی

برای تعیین درصد قیر مصالح خرده آسفالت از روش ASTM D2172 استفاده شده است. برای این منظور، ابتدا از آسفالت مورد نظر نمونه تهیه می‌شود. سپس نمونه در سینی قرار داده و در گرمخانه با دمای 110 ± 0.5 درجه سانتیگراد قرار می‌گیرد تا نمونه از هم باز شود. پس از بیرون آوردن نمونه مقدار ۳۰۰ گرم از آن به روش چارک توزین می‌گردد. مقداری آسفالت در داخل ظرف ریخته شده، سپس مقداری حلال در نمونه ریخته می‌شود که سطح آسفالت درون آن کاملاً با حلال پوشیده شود. از جمله حلال‌هایی که برای این آزمایش متداول است می‌توان بنزین، تترا کلرواتیلن و نفت را نام برد. مخلوط آسفالت و حلال حدود ۱۰ دقیقه هم زده می‌شود تا به عمل حل شدن قیر و باز شدن آسفالت کمک نماید. سپس با استفاده از دستگاه سانتریفوژ قیر محلول از سنگدانه جدا می‌شود. و در نهایت درصد قیر نمونه تعیین می‌گردد. در این آزمایش درصد قیر نسبت به وزن مخلوط ۵٫۲٪ تعیین گردید. پس از جداسازی قیر از خرده آسفالت، بر اساس استاندارد ASTM C117, 136 اقدام به دانه‌بندی می‌گردد. دانه بندی مصالح در باز یافت سرد برحسب اینکه از دانه‌بندی باز یابسته استفاده شود باید با جداول نشریه ۳۳۹ سازمان برنامه و بودجه مطابقت داشته باشد. در صورت عدم مطابقت، مصالح سنگی جدیدی می‌بایست به آن اضافه شود. مصالح سنگی جدید نباید از ۲۵ درصد وزنی مخلوط فراتر رود.

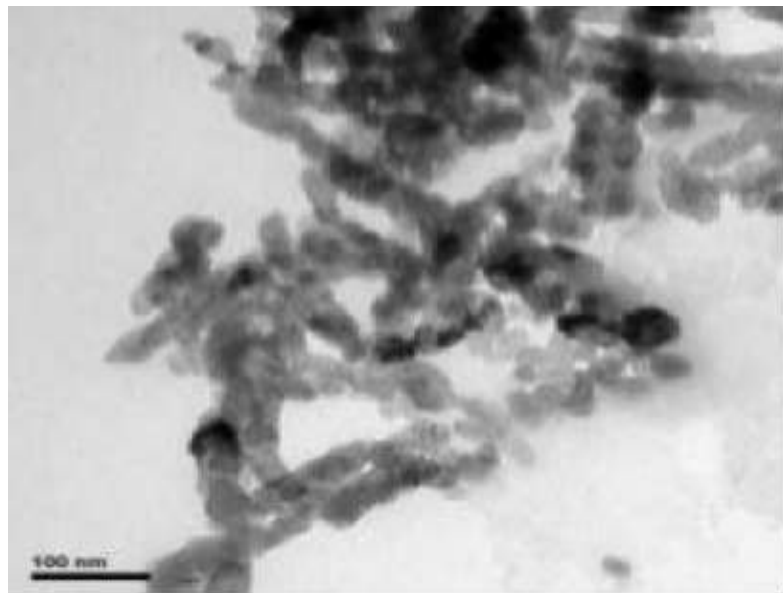
دمای مورد نیاز جهت اختلاط، کوبیدن و آزمایش نمونه، ۲۵ درجه سانتیگراد بوده است. نانو مواد در سالهای اخیر برای بهبود مشخصات مخلوطهای آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بالا بودن هزینه‌های تولید نانو مواد، از جمله موانعی است که استفاده ه از این گونه مواد را محدود به کارهای آزمایشگاهی و تحقیقاتی کرده و مانع کاربرد گسترده آنها در پروژه ها شده است. در این تحقیق سعی شده با استفاده از روش‌های فنی مناسب که انجام آنها از نظر اقتصادی نیز توجیه پذیر باشد، از نانو آهک استفاده شود.

مواد نانو به عنوان موادی که حداقل یکی از ابعاد آن (طول، عرض، ضخامت) زیر ۱۰۰ نانومتر باشد. یک نانومتریک هزارم میکرون یا حدود ۱۰۰۰۰۰۰ برابر کوچکتر از موی انسان است. مواد نانو بدلیل نسبت سطح به حجم بالا توانایی بالا در انجام واکنشهای شیمیایی با بازده بالاتر و با سرعت بیشتر را دارا می‌باشند. در این پژوهش آزمایشگاهی از نانو آهک با نام تجاری American Elements و سعی شد درصدهای مختلفی از نانوآهک به مخلوطهای آسفالتی افزوده شود و دوام و خستگی آن با نمونه‌های بدون افزودنی مقایسه و بررسی گردد.

انتخاب امولسیون‌های قیری مصرفی در عملیات بازیافت سرد برحسب اینکه از روش درجا یا کارخانه‌ای و یا دانه‌بندی‌های پیوسته، باز، مصالح ماسه‌ای و یا ماسه لای‌دار استفاده شود، بر اساس نشریه ۳۳۹ سازمان برنامه و بودجه انجام می‌گیرد. دمای مورد نیاز جهت اختلاط، کوبیدن و آزمایش نمونه، ۲۵ درجه سانتیگراد بوده است.

نمونه های با درصد آب ۱،۵- ۲- ۲،۵- ۳- ۴- آماده شده و پس از انجام آزمایش وزن مخصوص و درصد فضای خالی (بایستی بین ۹ تا ۱۴ درصد باشد). درصد بهینه آب اختلاط ۲ درصد وزن مخلوط انتخاب گردید. اگر از نانوآهک بصورت دوغاب استفاده شود، مقدار آبی که جهت آماده کردن دوغاب استفاده شود، از آب کل اختلاط کسر می‌شود.

امولسیون مصرفی در این روش، باتوجه به بازیافت سرد کارخانه ای و دانه بندی پیوسته مطابق با نشریه ۳۳۹ سازمان برنامه و بودجه از نوع CSS-1 انتخاب گردید. نمونه های با درصدهای مختلف، ۲، ۲،۵، ۳، ۳،۵، ۴ امولسیون و درصد ثابت ۲٪ آب ساخته شد و سپس با توجه به نتایج آزمایش استقامت مارشال و وزن مخصوص درصد امولسیون قیر ۲،۵٪ انتخاب گردیده است. از مصالح خرد شده توسط ماشین بازیافت مطابق با دانه بندی مناسب بهره گیری شد.



شکل ۱. نانوآهک

بدون افزودنی و با درصدهای مختلف افزودنی توسط آزمایش خمش چهار نقطه ای با ساخت تیر آسفالتی به ابعاد ۳۸۰ میلیمتر طول و ۶۳ میلی‌متر عرض و ۵۰ میلی‌متر ارتفاع اندازه گیری شد. در این روش از روابط استفاده شده است.

$$S = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{3ap}{bh^2} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{12\Delta h}{3l^2 - 4a^2} \quad (3)$$

- σ تنش کششی برحسب مگاپاسکال
- ε کرنش کششی حداکثر بر حسب میلی‌متر
- Δ افت و خیز در وسط دهانه بر حسب میلی‌متر
- b عرض تیرچه (۶۳ میلی‌متر)
- S مدول سختی بر حسب مگاپاسکال
- P باروراده بر حسب نیوتن
- l طول تیر بین تکیه گاه‌های بیرونی (۰/۳۵۷ میلیمتر)
- a فاصله بین گیره‌های داخلی
- h ارتفاع تیر برحسب میلیمتر

در عملیات اجرایی بازیافت سرد از آب برای تنظیم رطوبت مصالح سنگی و سهولت کوبیدن مخلوط آسفالت سرد حاوی امولسیون استفاده می‌شود. نمونه آب مصرفی باید قبلاً مورد آزمایش قرارگیرد. بدیهی است چنانچه اثر زیان بخشی بر عملکرد امولسیون داشته باشد، از مصرف آن خودداری کرده و منبع دیگری جایگزین گردد.

۳-۱- طرح اختلاط

برای هر ترکیبی از مخلوط مطابق با دانه‌بندی و درصد امولسیون سه نمونه کوبیده شده و یک نمونه کوبیده نشده جهت تعیین حداکثر وزن مخصوص و فضای خالی آماده سازی شده است. از نانواهک با درصدهای ۱ - ۱,۵ - ۲ - ۲,۵ - ۳ - ۳,۵ - ۴ درصد وزن مخلوط نمونه های آماده شد و پس از انجام آزمایش، درصد بهینه نانواهک ۲,۵ درصد وزن مخلوط انتخاب گردید. در این پژوهش نتایج آزمایش با ۱ و ۲,۵ و ۴ درصد نانواهک آورده شده است. در این پژوهش، تنش کششی حداکثر و همچنین کرنش کرنش کششی حداکثر و مدول سختی نمونه های آسفالتی



شکل ۲. نمونه تیرهای آسفالتی آماده شده برای آزمون خستگی

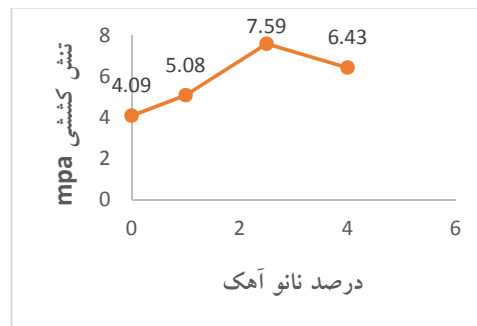


شکل ۳. نحوه اجرای آزمایش خستگی

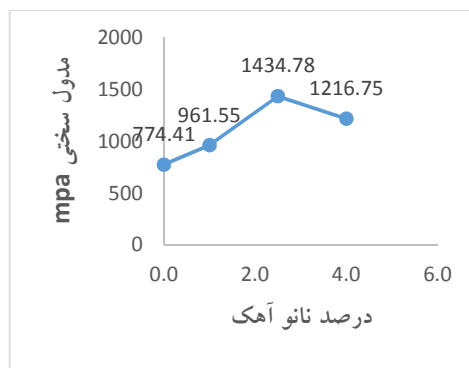
۲-نتایج

درصد امولسیون و ۲ درصد آب و ۲,۵ درصد مواد افزودنی نانو آهک است در جدول ۳ نمایش داده شده است. نتایج حاصل از بررسی ۳ نمونه که شامل ۲,۵ درصد امولسیون و ۲ درصد آب و ۴ درصد مواد افزودنی نانو آهک است در جدول ۴ نمایش داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، مقایسه میان تیرهای آسفالتی مشخص گردید که افزودن نانو آهک تا ۲,۵ درصد وزن مخصوص نمونه باعث افزایش تنش کششی و مدول سختی نمونه می‌شود و افزودن بیشتر از ۲,۵ درصد نتیجه عکس دارد و تنش کششی و مدول سختی نمونه کاهش می‌یابد.

پس از انجام آزمایشات مربوط به دانه بندی بر اساس بررسی نتایج حاصل شده، مشاهده شد که دانه بندی در حدود مشخصات دانه بندی شماره ۴ نشریه ۳۳۹ سازمان برنامه و بودجه قرار می‌گیرد. بنابراین نیازی به افزودن مصالح سنگی جدید نبوده و دانه بندی پیوسته است. نتایج حاصل از بررسی ۳ نمونه که فقط شامل ۲,۵ درصد امولسیون و ۲ درصد آب هستند و هیچ گونه مواد افزودنی به آنها اضافه نشده است در جدول ۱ نمایش داده شده است. نتایج حاصل از بررسی ۳ نمونه که شامل ۲,۵ درصد امولسیون و ۲ درصد آب و ۱ درصد مواد افزودنی نانو آهک است در جدول ۲ نمایش داده شده است. نتایج حاصل از بررسی ۳ نمونه که شامل ۲,۵



شکل ۴. مقایسه تنش کششی برای نمونه‌های دارای مواد افزودنی متفاوت



شکل ۵. مقایسه مدول سختی برای نمونه‌های دارای مواد افزودنی متفاوت

جدول ۱. نتایج آزمایش بر روی نمونه‌ها بدون افزودنی

شماره نمونه	عرض نمونه mm	ارتفاع نمونه mm	فاصله بین گیره mm	فاصله بین تکیه گاه mm	افت و خیز وسط دهانه mm	بار وارده N	تنش کششی Mpa	کرنش کششی mm/mm	مدول سختی Mpa
۱	۶۳	۵۰	119	0.357	0.5	۱۸۰۰	4.08	0.00529	771.26
۲	۶۳	۵۰	119	0.357	0.5	۱۸۴۵	4.18	0.00529	790.17
۳	۶۳	۵۰	119	0.357	0.5	۱۷۸۰	4.03	0.00529	761.81
میانگین							4.09		774.41

جدول ۲. نتایج آزمایش بر روی نمونه‌ها با ۱ درصد افزودنی

شماره نمونه	عرض نمونه mm	ارتفاع نمونه mm	فاصله بین گیره mm	فاصله بین تکیه گاه mm	افت و خیز وسط دهانه mm	بار وارده N	تنش کششی Mpa	کرنش کششی mm/mm	مدول سختی Mpa
1	63	50	119	0.357	0.5	2200	4.98	0.00529	941.39
2	۶۳	۵۰	119	0.357	0.5	2250	5.10	0.00529	964.08
3	۶۳	۵۰	119	0.357	0.5	2285	5.18	0.00529	979.20
میانگین							5.08		961.55

جدول ۳. نتایج آزمایش بر روی نمونه‌ها با ۲/۵ درصد مواد افزودنی

شماره نمونه	عرض نمونه mm	ارتفاع نمونه mm	فاصله بین گیره mm	فاصله بین تکیه گاه mm	افت و خیز وسط دهانه mm	بار وارده N	تنش کششی Mpa	کرنش کششی mm/mm	مدول سختی Mpa
1	63	50	119	0.357	0.5	3350	7.59	0.00529	1434.78
2	۶۳	۵۰	119	0.357	0.5	3310	7.50	0.00529	1417.77
3	۶۳	۵۰	119	0.357	0.5	3390	7.68	0.00529	1451.79
میانگین							7.59		1434.78

جدول ۴. نتایج آزمایش بر روی نمونه‌ها با ۴ درصد افزودنی

شماره نمونه	عرض نمونه mm	ارتفاع نمونه mm	فاصله بین گیره mm	فاصله بین تکیه گاه mm	افت و خیز وسط دهانه mm	بار وارده N	تنش کششی Mpa	کرنش کششی mm/mm	مدول سختی Mpa
1	63	50	119	0.357	0.5	2850	6.46	0.00529	1221.17
2	63	50	119	0.357	0.5	2880	6.53	0.00529	1234.40
3	63	50	119	0.357	0.5	2790	6.32	0.00529	1194.70
میانگین							6.43		1216.75

۳- نتیجه گیری

داراست. همچنین مقایسه بین نتایج نشان می‌دهد که در مجموع افزودن حتی مقدار کمی نانو آهک موجب بهبود شرایط استحکام و سختی در نمونه‌های آسفالت بازیافتی شده است. بر این اساس، بهینه‌ترین حالت برای زمانی که درصد نانو آهک برابر با ۲٫۵ درصد وزنی بوده است حاصل شده است و با افزایش این مقدار مقدار استحکام و سختی کاسته می‌شود.

۴- مراجع

- محمدزاده مقدم، م.، (۱۳۹۱)، "بررسی کاربرد سیمان و الیاف پلیپروپیلن در مخلوط آسفالت بازیافتی به روش سرد با امولسیون قیر"، نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان.

-صادقیان، م. و کاوسی، الف.، (۱۳۹۳)، "بررسی معیار دانه‌بندی در مخلوط حاوی مصالح آسفالت بازیافتی و سیمان در استانداردهای مختلف دنیا"، اولین کنفرانس ملی مهندسی عمران و توسعه پایدار ایران، تهران.

-نجار، ش. و میراشرف، س.س.، (۱۳۹۵)، "ارزیابی مقاومتی آسفالت بازیافتی با استفاده از مخلوط سیمان، آهک، ماسه و فیبر"، دومین کنفرانس بین‌المللی یافته‌های نوین پژوهشی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، تهران.

نتایج حاصل از بررسی ۳ نمونه که فقط شامل ۲٫۵ درصد امولسیون و ۲ درصد آب هستند و هیچ گونه مواد افزودنی به آنها اضافه نشده نشان می‌دهد که میانگین مدول سختی نمونه بدون افزودنی برابر با ۷۷۴/۴۱ مگاپاسکال می‌باشد.

نتایج حاصل از بررسی ۳ نمونه که شامل ۲٫۵ درصد امولسیون و ۲ درصد آب و ۱ درصد نانو آهک، به عنوان مواد افزودنی است نشان می‌دهد که میانگین مدول سختی برابر با ۹۶۱/۵۵ مگاپاسکال می‌باشد. نتایج حاصل از بررسی ۳ نمونه که شامل ۲٫۵ درصد امولسیون و ۲ درصد آب و ۲٫۵ درصد نانو آهک، به عنوان مواد افزودنی است نشان می‌دهد که میانگین مدول سختی برابر با ۱۴۳۴/۷۸ مگاپاسکال می‌باشد. نتایج حاصل از بررسی ۳ نمونه که شامل ۲٫۵ درصد امولسیون و ۲ درصد آب و ۴ درصد نانو آهک، به عنوان مواد افزودنی نشان می‌دهد که میانگین مدول سختی نمونه با ۴ درصد افزودنی برابر با ۱۲۱۶/۷۵ مگاپاسکال می‌باشد. بر اساس نتایج بدست آمده، مقایسه میان مقاومت خمشی برای نمونه‌های با درصد وزنی مواد افزودنی متفاوت نشان می‌دهد میانگین مقاومت خمشی برای نمونه دارای ۲٫۵ درصد وزنی نانوآهک بیشترین و برای بدون نانوآهک، کمترین مقدار را داراست. بر اساس نتایج بدست آمده، مقایسه میان مدول سختی برای نمونه‌های با درصد وزنی مواد افزودنی متفاوت نشان می‌دهد میانگین مدول سختی برای نمونه دارای ۲٫۵ درصد وزنی نانوآهک بیشترین و برای بدون نانوآهک، کمترین مقدار را

- Hurley, G. C. and Prowell, B. D. (2005), "Evaluation of Sasobit® for Use in Warm Mix Asphalt". NCAT Report, 05-06, Auburn Univ., Auburn, AL.
- Kandhal, P. S. (1992), "Moisture Susceptibility of HMA Mixes: Identification of Problem and Recommended Solutions". NCAT No. 92-1, Auburn Univ., Auburn, AL.
- Kandhal, P. S. and Parker, F. (1998), "Aggregate tests related to asphalt concrete performance in pavements". NCHRP Project 4-19, Transport. Res. Board.
- Khodaii, A., Haghshenas, H. F. and Kazemi Tehrani, H. (2012), "Effect of grading and lime content on HMA stripping using statistical methodology". *Constr. Build. Mater.* 34: 131-135.
- Kim, Y., Little, D.N., and Lytton, R.L., (2003), "Fatigue and Healing Characterization of Asphalt Mixtures", *Journal of Materials in Civil Engineering*, January/February: pp.75-83.
- Pais, J., Pereira, P., Picado- Santos, L., (2002), "Variability of Laboratory Fatigue Life of Asphalt Mixes Using Four Point Bending Test Results", *IJP Volume 1, Number 2, May*.
- Sangsefidi, E., Ziari, H. and Mansourkhaki, A. (2014), "The effect of aggregate gradation on creep and moisture susceptibility performance of warm mix asphalt". *Int. J. Pavement Eng.* 15(2): pp.133-141.
- Xiao, F., Zhao, W., Gandhi, T. and Amirkhanian, S. (2010), "Influence of antistripping additives on moisture susceptibility of warm mix asphalt mixtures". *J. Mater. Civil Eng.* 22(10): pp.1047-1055.
- Zaniewski, J. and Viswanathan, A. G. (2006), "Investigation of moisture sensitivity of hot mix asphalt concrete". Report Submitted to West Virginia Division of Highways.
- Al-Balbissi, A., and Little, D.N., (2002), "Effect of Fracture Healing on Laboratory-to-Field Shift Factor", *Transportation Research Record 1286*, Transportation Research Board, Washington, DC, pp. 173-183.
- Al-Qadi, I., and Nassar, W.N., (2003), "Fatigue Shift Factors to Predict HMA Performance", *International Journal of Pavement Engineering*, 4:2, 1 June: pp.69-76.
- Anderson, R. M., Baumgardner, G., May, R. and Reinke, G. (2008), "Engineering properties, emissions, and field performance of warm mix asphalt technology". National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Interim Report, pp. 9-47.
- DiVito, J. A. and Morris, G. R. (1982), "Silane pretreatment of mineral aggregate to prevent stripping in flexible pavements". Arizona Transport. Res. Center, Arizona State Univ., Tempe, AZ.
- Dukatz, E. L. (1989), "Aggregate properties related to pavement performance". *Proc. of the Assoc. Asphalt Paving Technol.*, Vol. 58.
- Hefer, A. W., Little, D. N. and Lytton, R. L. (2005), "A synthesis of theories and mechanisms of bitumen-aggregate adhesion including recent advances in quantifying the effects of water (with discussion)". *J. Assoc. Asphalt Paving Technol.*, Vol. 74.
- Hesami, S., Ameri, M., Goli, H. and Akbari, A. (2015), "Laboratory investigation of moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates". *Int. J. Pavement Eng.* 16(8): pp.745-759.
- Houang Y., (2004), "Material Characterization and Performance Properties of Superpave Mixtures", North Carolina State University,
- Huang, S. C., Robertson, R. E., Branthaver, J. F. and Claine Petersen, J. (2005), "Impact of lime modification of asphalt and freeze-thaw cycling on the asphalt-aggregate interaction and moisture resistance to moisture damage". *J. Mater. Civil Eng.* 17(6): pp.711-718.