فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۳، شماره ۲، زمستان ۱٤۰۰، ص. ۱٤۱٤-۱۳۹۷
مقاله علمی-پژوهشی

بررسی پتانسیل شیارشدگی و مدول برجهندگی مخلوط آسفالت لاستیکی حاوی الیاف پارافیبر

غلامعلی شفابخش (مسئول مکاتبات)، استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
Email: ghshafabakhsh@semnan.ac.ir
سعید اسدی، دانشجو دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
ابوالفضل محمدی جانکی، دانشجو دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

دریافت: ۱۳۹۸/۰٦/۱۷ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۰

چکیده

در دهه‌های گذشته، پژوهشگران بسیاری در راستای اصلاح خصوصیات قیر و استفاده از اینگونه قیرها در مخلوط‌های آسفالتی تلاش کرده‌اند. افزودن پودر لاستیک به قیر و تولید آسفالت لاستیکی خصوصیات مطلوبی برای مخلوط آسفالتی ایجاد می‌نماید که گامی در جهت حرکت در مسیر توسعه‌ی پایدار و حفظ محیط زیست خواهد بود. ضعف اساسی این نوع مخلوط آسفالتی، افزایش دماهای اختلاط و تراکم و به موجب آن افزایش هزینه‌های ساخت و صعوبت اجرا است. در این تحقیق سعی شده‌است، اثر افزودنی نیمه‌گرم پارافیبر در کاهش دمای اختلاط آسفالت‌های لاستیکی مورد بررسی قرار گیرد. قیر با دو درصد مختلف ۸ و ۱۶درصد پودر لاستیک مخلوط و با سه درصد مختلف ۱ ، ۲ و ۳ درصد وزنی مخلوط آسفالتی افزودنی پارافیبر اصلاح شد. همچنین نمونه‌های مخلوط آسفالتی در دو دمای اختلاط ۱۳۰و۱۵۰ درجه به روش مارشال، آماده و سپس متراکم شدند. برای بررسی عملکردی روی نمونه های آسفالتی ساخته شده، آزمایشات مارشال (استحکام و روانی)، خزش دینامیکی و مدول برجهندگی انجام پذیرفت. نتایج آزمون مدول برجهندگی نشان داد که با افزودن پودر لاستیک، به مخلوط‌های آسفالتی و همچنین افزایش پارافیبر مدول برجهندگی افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش خزش دینامیکی نیز نشان داد که در دمای اختلاط ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت شیارشدگی بهتر از نمونه‌های شاهد بوده است. این در حالی است که در دمای اختلاط ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت شیارشدگی کاهش یافته است. همچنین نتایج نشان داد که افزایش درصد پارافیبر مقاومت شیارشدگی آسفالت‌های لاستیکی را بهبود می‌بخشد.

واژه‌های کلیدی: آسفالت لاستیکی، آسفالت نیمه گرم، پارافیبر، شیارشدگی، خزش دینامیکی

۱. مقدمه

در طی سال‌های اخیر، به علت افزایش میزان حجم ترافیک و بار محوری خودروها و همچنین کم بودن خدمات تعمیر و نگهداری، ساختار جاده‌ها به صورت بسیار سریع در حال اضمحلال می باشند. برای کاهش خسارت سطح روسازی جاده های و افزایش دوام روسازی‌های انعطاف‌پذیر، قیرهای خالص متداول، از نظر خواص عملکردی همانند مقاومت در برابر شیار شدگی و ترک‌های خستگی نیاز به بهبود خواهند داشت.

اصلاح چسبنده‌های قیری به منظور بهبود خصوصیات عملکردی روسازی جاده‌ها، در دهه‌های گذشته مدنظر قرار گرفته‌است. افزودنی‌های بسیاری مانند SBS[۱]، SBR[۲]، EVA[۳] و CRM[۴] (پودر لاستیک) وجود دارند که به طور متداول برای اصلاح قیر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در دهه‌های اخیر در کشورهای مختلف دنیا، مسأله بازیافت و استفاده مجدد از لاستیک‌های فرسوده که به عنوان یک عامل اصلی آلودگی محیط‌زیست می باشد و روز به روز بر مقدار این مواد در محیط افزوده می‌شود، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. رویکرد اصلی برای حل مسئله فوق الذکر، بازسازی و استفاده‌ی دوباره از لاستیک تایر ضایعاتی و احیای مواد خام لاستیک خواهد بود. در سال‌های اخیر، محققان از کاربرد چسب‌های قیری لاستیکی شده، مزایای بسیاری را گزارش کرده‌اند. درجه نرمی بالا و برجهندگی بهتر از جمله این مزایا به شمار می‌آیند [Yang et al. 2019] , [Autelitano, Bianchi, & Giuliani, 2017].

علاوه بر مزایای شمرده شده، پودر لاستیک در هنگام ترکیب با قیر مشکلاتی نیز به وجود می‌آورد که مهم‌ترین آن کاهش کارایی قیر و سخت شدن آن و دشواری عملیات اجرایی است. برای تقابل با این مشکل به ناچار دماهای اختلاط و تراکم آسفالت لاستیکی در حدود ۲۰ تا ۳۰ درجه افزایش می‌یابد که این امر خود موجب افزایش مصرف انرژی، افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای و افزایش گازهای متصاعد شده از قیر خواهد شد. وجود این مزایا و معایب و یافتن راه حل‌هایی برای رفع نواقص، انگیزه‌ای بزرگ برای مطالعات بیشتر را فراهم می‌سازد.

در چند دهه اخیر تلاش‌های بسیاری برای بهبود مشخصات و عملکرد مخلوط آسفالتی صورت گرفته است، یکی از این روش‌ها استفاده از مواد افزودنی نظیر الیاف است. الیاف‌ها به دو گروه آلی و معدنی تقسیم می‌شوند. ازجمله الیاف‌های آلی می‌توان به الیاف فورتا، پارافیبر، شیشه، نایلون، پلی‌پروپیلن و پلی‌استر اشاره کرد. همچنین باید توجه داشت که، الیاف معدنی شامل الیاف طبیعی و الیاف مصنوعی می‌باشد. هدف و پرسش اصلی این پژوهش، ارزیابی تاثیر افزودنی‌های پودر لاستیک و پارافیبر بر مقاومت شیارشدگی و مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی می‌باشد [Zhang, Li, 2019], [Zaman, Rahaman, Hossain, 2018].

اولین نمونه‌ی ترکیب قیر و لاستیک طبیعی برای تولید یک ماده‌ی ضد آب برای کشتی‌های چوبی در سال ۱۸۲۳ میلادی در هانکوک واقع در ایالت کالیفرنیا انجام شد. نخستین تلاش برای استفاده از قیر لاستیکی در مخلوط آسفالتی نیز در سال ۱۸٤٤ در شهر کاسل آلمان صورت گرفت. همچنین اولین تحقیقات علمی روی قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک نیز در سال ۱۹۰۱ در یک مرکز تحقیقاتی در فرانسه شکل گرفت [Way, Kaloush, & Biligiri., 2012].

در میانه‌ی دهه‌ی ۱۹۸۰، اروپایی‌ها شروع به توسعه‌ی افزودنی‌ها و پلیمرهای جدیدتر برای استفاده در اصلاح‌کننده‌های قیری کردند. در سال‌های اخیر، استفاده از خرده لاستیک به عنوان اصلاح کننده‌ی روسازی‌ها، علاقمندان بیشتری یافته است و ثابت شده است که خرده لاستیک می‌تواند خصوصیات عملکردی قیر و مخلوط آسفالتی را بهبود بخشد [Brown, Jared, Jones, & Watson, 1997].

مطابق بر مطالعه‌ای که توسط لی و همکاران در سال ۲۰۰۸ صورت گرفت، مقدار بالای خرده لاستیک، گرانروی افزوده شده‌ای را در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد ایجاد کرده و خواص شیارشدگی را بهبود بخشید [Huang, Bird, & Heidrich, 2007]. بر اساس مطالعات شن و همکاران، تاثیرات اندازه‌ی ذرات لاستیک روی خصوصیات دمای بالای قیرهای لاستیکی، عاملی مهم روی خصوصیات ویسکوالاستیک قیر می‌باشد [Shen, Amirkhanian, Xiao, & Tang, 2009].

در یک تجربه‌ی نزدیک، ماشان و همکاران در سال ۲۰۱۱ دریافتند که زمان اختلاط، تاثیر بسیار اندکی روی خصوصیات فیزیکی و رئولوژیکی قیر لاستیکی دارد. این مورد با زمان اختلاط های ۳۰ و ٦۰ دقیقه انجام گرفته بود [Mashaan, Ali, Karim, & Abdelaziz, 2011]. پائولو و جورج در سال ۲۰۰۸ اثر شرایط اختلاط یعنی دما و مدت زمان را روی درجه نفوذ، نقطه نرمی و مدول برجهندگی بررسی کردند. نتایج نشان می‌داد که تاثیر قابل توجهی برای ۳ زمان اختلاط ٤٥، ٦۰ و ۹۰ دقیقه روی خصوصیات قیر اصلاح‌شده حاصل نشد. هر چند که گرایشی برای زمان اختلاط موثر وجود داشت که زمان ثابتی بین ٦۰ تا ۹۰ دقیقه مناسب است [Fontes, Pereira, Trichês, Pais, & Luzia, 2008].

اولیویرا در سال ۲۰۱۳ تاثیر مواد افزودنی بر کاهش دما و بهبود عملکرد آسفالت گرم را مورد بررسی قرار داد. او و همکارانش دریافتند که آسفالت گرم حاوی ۰/۳ الی ۰/۵ درصد ماده افزودنی باعث کاهش ۳۰ درجه سانتی گراد دمای تولید شده و حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاوی پودر لاستیک به میزان قابل توجهی بهبود یافته است [Oliveira, Silva, Abreu, &Fernandes, 2013]. شفابخش و رضائیان در سال ۱۳۸۹ در مطالعه‌ای به بررسی جامعی در خصوص افزودنی‌های کف قیر، سیمان پرتلند، آهک مرده، آهک زنده، پوزولان، سرباره و پودر لاستیک در مخلوط‌های بازیافتی که به روش سرد و درجا با استفاده از مصالح خرده آسفالتی تهیه شده اند، پرداخته‌اند [شفابخش و رضائیان، ۱۳۸۹] . اکیستی به بررسی اثر افزودنی‌های پودر لاستیک و ساسوبیت بر رئولوژی و خواص مخلوط آسفالتی پرداخت. وی دریافت که استفاده از ساسوبیت و آسفامین و ترکیب هر یک با ۱۰ درصد پودر لاستیک در قیر باعث بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل و کاهش دمای مخلوط و افزایش مقاومت در برابر خستگی شده است [Akisetty, Xiao, Gandhi, & .Amirkhanian, 2011]

یانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۷ به بررسی تاثیرات زیست محیطی مصرف انرژی در مخلوط‌های حاوی خرده لاستیک و عملکرد مکانیکی آن پرداختند. آن‌ها حساسیت رطوبتی، مقاومت شیارشدگی، عریان شدگی، خستگی و ... را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که مقدار صرفه جویی در مصالح معادل ۵/۸ درصد و صرفه‌جویی در سوخت معادل ۱۳ درصد بوده است[Yang et al., 2017].

یو و همکارانش در تحقیق در سال ۲۰۱٦ به بررسی تعامل میان اجزای مختلف آسفالت اصلاح شده با خرده لاستیک و افزودنی مخلوط‌های گرم از روش تحلیل حرارتی گرانی‌سنجی و آزمایش گرما سنجی رویشی تفاضلی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد تعامل بین خرده لاستیک و اجزای آسفالت یک فرآیند تبادل جزء بوده و مواد افزودنی طی فرآیند به داخل خرده لاستیک نفوذ کرده است[Yu, Leng, & Gao, 2016]. بهروزی‌خواه و همکارانش در سال ۲۰۱۷ طی تحقیقی با استفاده از دانش مکانیک شکست، عملکرد مخلوط آسفالتی اصلاح شده را بررسی کردند. نمونه‌ها حاوی ساسوبیت و خرده لاستیک بوده و تحت آزمایش‌های مدول برجهندگی، خزش استاتیک و آزمون کشش غیرمستقیم قرار گرفتند. نتایج نشان داد که استفاده از آسفالت بازیافتی، ساسوبیت و خرده لاستیک به طور همزمان باعث بهبود عملکرد خستگی مخلوط می‌شود [Behroozikhah, Morafa, & Aflaki, 2017].

میرعبدالعظیمی و شفابخش در تحقیق خود به وسیله آزمایش خزش دینامیکی ثابت کردند که افزودن الیاف فورتا باعث بهبود خواص دینامیکی بتن آسفالتی داغ می‌گردد. آن‌ها از الیاف با طول ۱۹ میلی‌متر و سه درصد ۰/۳ ، ۰/۵ و ۰/۷ استفاده نمودند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد بیشترین چگالی را نمونه با ۰/۵ درصد دارا بود. همچنین نمونه‌های ۰/۷ درصد الیاف، عملکرد ضعیف‌تری داشتند [Mirabdolazimi & Shafabakhsh, 2017].

کومار و همکارانش در سال ۲۰۰۹ میلادی به بررسی عملکرد آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی داغ اصلاح شده با الیاف پلی‌پروپیلن به طول ۲۰ میلی‌متر و درصدهای ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/٤ و ۰/۵ پرداختند. آزمایش‌های انجام شده شامل مارشال، کشش غیرمستقیم و تغییر شکل دائمی بوده است. نتایج نشان داد الیاف باعث افزایش مارشال، درصد قیر بهینه و کشش غیرمستقیم و کاهش چگالی و تغییر شکل‌های دائمی می‌شود[Kumar, Mehndiratta, & Immadi, 2009].

تن زاده و همکاران در سال ۲۰۱۷ مقاله‌ای با عنوان مطالعه آزمایشگاهی بر روی عملکرد مخلوط آسفالتی حاوی الیاف هیبرید ارائه کردند. هدف از این تحقیق، ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی تقویت شده با الیاف هیبرید بوده است. بدین منظور از آزمایش‌های خزش دینامیکی، شیارشدگی، مدول برجهندگی و مقاومت کشش غیرمستقیم استفاده شد. هیبرید ترکیبی از الیاف پروپیلن، پلی اتیلن با الیاف آرامید می‌باشد. نتایج نشان داد که الیاف هیبرید، عملکرد مخلوط آسفالتی را در مقابل شیارشدگی، ترک‌های خستگی و ترک‌های حرارتی بهبود می‌بخشد و در کاهش ضخامت نهایی روسازی از طریق افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی کمک می‌کند [Tanzadeh, Vafaeian, & Yusefzadeh-Fard, 2017].

نعمت زاده و همکاران در سال ۲۰۱۷ بر روی تاثیر الیاف فورتا بر خصوصیات مکانیکی بتن با مقاومت بالا و بدون سیمان کارکرده و نتیجه گرفتند که الیاف باعث افزایش استحکام فشاری و کششی می‌شود، همچنین علیها و همکاران بر روی تاثیر الیاف طبیعی و مصنوعی در رفتار مخلوط آسفالتی کارکرده و دریافتند که هر دو الیاف مقاومت مخلوط را در زمان شکست افزایش می‌دهد. [Hasan-Nattaj,et al. 2017]همچنین مهراز و همکاران استفاده از الیاف در مخلوط آسفالتی را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که الیاف شیشه باعث بهبود ویژگی‌های مخلوط آسفالتی مخلوط آسفالتی می‌شود [Mahrez, Karim, & Katman, 2005]. نام‌آور جهرمی و همکارانش در سال ۱۳۹٦ دو نوع الیاف پارافیبر و پلی اتیلن را به مخلوط آسفالتی افزودند و تاثیر آن را بر شیارشدگی مخلوط مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که نمونه مسلح شده با الیاف پارافیبر بیشترین افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی را داشته و الیاف پلی اتیلن تاثیر ناچیزی در افزایش مقاومت داشته است[نام‌آور جهرمی و همکاران، ۱۳۹٦]، [نام‌آور جهرمی و همکاران ۱۳۹۷]

نام‌آور جهرمی و همکارش در تحقیقی دیگر در سال ۱۳۹۷ عملکرد الیاف پارافیبر در مخلوط آسفالتی را با استفاده از آزمایش‌های مدول برجهندگی و مارشال مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که استفاده از الیاف پارافیبر باعث افزایش مدول برجهندگی و مقاومت مارشال می‌شود [نام‌آور جهرمی و ابوطالبی ۱۳۹۷].

۲. ضرورت انجام تحقیق

با توجه به متون بررسی شده مشخص شده‌است که با استفاده از پودر لاستیک در آسفالت، افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی، افزایش مقاومت در برابر خستگی، افزایش مقاومت در برابر ترک‌های ناشی از انقباض را در پی دارد، اما دمای اختلاط و تراکم مخلوط‌های آسفالتی با افزودن لاستیک افزایش می‌یابد. این خود باعث افزایش هزینه‌های سوخت و افزایش آلودگی می‌شود. با استفاده از تکنولوژی آسفالت نیمه‌گرم دمای اختلاط و تراکم مخلوط‌های آسفالتی را می‌توان کاهش داد. مزایای

متعددی را می‌توان برای استفاده از آسفالت نیمه‌گرم عنوان کرد ولی با این وجود نگرانی‌هایی نیز در ارتباط با عملکرد و کاربرد این تکنولوژی در زمینه‌هایی مثل شیارشدگی، اطلاعات ناکافی از عملکرد بلندمدت آن به دلیل عمر کوتاه به وجود آمدن تکنولوژی، باقی ماندن آب در مخلوط در طول فرآیند ساخت مخلوط و ... وجود دارد. بنابراین، هدف و پرسش اصلی این پژوهش، ارزیابی تاثیر افزودنی‌های پودر لاستیک و پارافیبر به صورت مجزا و هم زمان بر مقاومت شیارشدگی و مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی می‌باشد.

۳. روش تحقیق

با توجه به توضیحات ارائه‌شده در قسمت‌های قبل، قیر خالص ۶۰-۷۰ انتخابی و پودر لاستیک به میزان ۸ و ۱۶ درصد و پارافیبر با مقادیر ۱، ۲ و ۳ درصد، قیرهای اصلاح‌شده‌ی مورد استفاده در این پژوهش را تشکیل می‌دهند. بنابراین قیرهای مصرفی و نشانه‌گذاریشان به شرح جدول ۱ خواهند بود. همچنین در این جدول دمای اختلاط مربوط به هر یک از نمونه‌های آسفالتی طبق استاندارد ASTM D1559 آورده شده است.

جدول۱. نامگذاری نمونه‌های ساخته شده

ردیف	کد نمونه مارشالی آسفالتی	مقدار پودر لاستیک (٪)	مقدار پارافیبر(٪)	دمای اختلاط
۱	Neat	۰	۰	۱۵۰
۲	C8S0	۸	۰	۱۶۵
۳	C16S0	۱۶	۰	۱۶۵
٤	C8S3H	۸	۱	۱۵۰
٥	C8S6H	۸	۲	۱۵۰
٦	C8S9H	۸	۳	۱۵۰
۷	C8S3W	۸	۱	۱۳۰
۸	C8S6W	۸	۲	۱۳۰
۹	C8S9W	۸	۳	۱۳۰
۱۰	C16S3H	۱۶	۱	۱۵۰
۱۱	C16S6H	۱۶	۲	۱۵۰
۱۲	C16S9H	۱۶	۳	۱۵۰
۱۳	C16S3W	۱۶	۱	۱۳۰
۱٤	C16S6W	۱۶	۲	۱۳۰
۱۵	C16S9W	۱۶	۳	۱۳۰

٤. مواد و مصالح

٤-۱ مصالح سنگی و قیر

در این پژوهش از قیر ۶۰-۷۰ محصول شرکت پالایشگاه نفت پاسارگاد تهران به عنوان قیر خالص پایه استفاده شد. مصالح سنگی و پرکننده حدود ۹۵ درصد از مخلوط آسفالتی را تشکیل می‌دهد. سنگدانه‌های به‌کار رفته در ساخت نمونه‌های آسفالتی از کارخانه آسفالت تلو، واقع در شهر تهران تهیه شده و از نوع مصالح کوهی می‌باشند. جهت رسیدن به دانه‌بندی مورد استفاده در آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران و نیز سایر دانه‌بندی‌های

استفاده شده در این پروژه، سنگدانه‌ها مجدداً الک شده و در اندازه‌های مورد نیاز جمع‌آوری شدند. یکی از اهداف اصلی این پژوهش بررسی پتانسیل خرابی شیارشدگی مخلوط آسفالتی بود. خصوصیات رویه روسازی نقشی اساسی در این خرابی دارد. بنابراین دانه‌بندی شماره ٤ آیین نامه روسازی ایران که قابل استفاده برای رویه‌های آسفالتی است ملاک قرار گرفت. منحنی دانه‌بندی انتخابی و معیارهای آیین‌نامه‌ای در شکل ١ ملاحظه می‌شود.

٤-٢ افزودنی

پودر لاستیک مصرفی در این پروژه محصول جانبی دستگاه خردکن لاستیک خودرو بوده که توسط شرکت سپیدان لاستیک تولید می‌شود. این محصول دارای ذرات کوچکتر از ٢ میلی‌متر بوده و همچنین دارای مقادیر کمی نخ نیز بوده که با چند بار غربال کردن، نخ‌ها جدا شده و دانه‌بندی دلخواه حاصل شده است.

جدول ٢ شرایط اختلاط قیرهای مختلف با پودر لاستیک در پژوهش‌های مختلف گذشته را نشان می‌دهد. بنابر این بر اساس مطالعات گذشته دانه‌بندی پودر لاستیک نهایی حاوی ٤٠٪ عبوری از الک شماره‌ی ٣٠ و ٦٠٪ عبوری از الک شماره‌ی ٥٠ بوده است. یعنی تمامی ذرات ریزتر از ٠,٦ میلی‌متر بوده که دانه‌بندی مناسبی برای قیر لاستیکی است. همچنین دمای اختلاط ١٨٠ درجه‌ی سانتی‌گراد و زمان ٦٠ دقیقه و سرعت اختلاط ٣٦٠٠ دور بر دقیقه انتخاب شد [Shen, Amirkhanian, Xiao, & Tang, 2009]

برای انتخاب مقدار پودر لاستیک در قیر دو معیار حد بالا و حد پایین در نظر گرفته شد. معیار حد پایین درصدی از پودر لاستیک است که تغییر محسوسی در خصوصیات قیر حاصل شود و معیار بالا حدی است که قیر اصلاح‌شده کارایی مطلوبی داشته‌باشد. بنابراین مقدار ٨ و ١٦ درصد وزنی قیر که بین صفر درصد معیار پایین و ٢٥ درصد معیار بالاست انتخاب گردید. [Putman, Thompson, & Amirkhanian, 2005]

جدول٢. شرایط اختلاط انواع قیر و پودر لاستیک در پژوهش‌های گذشته

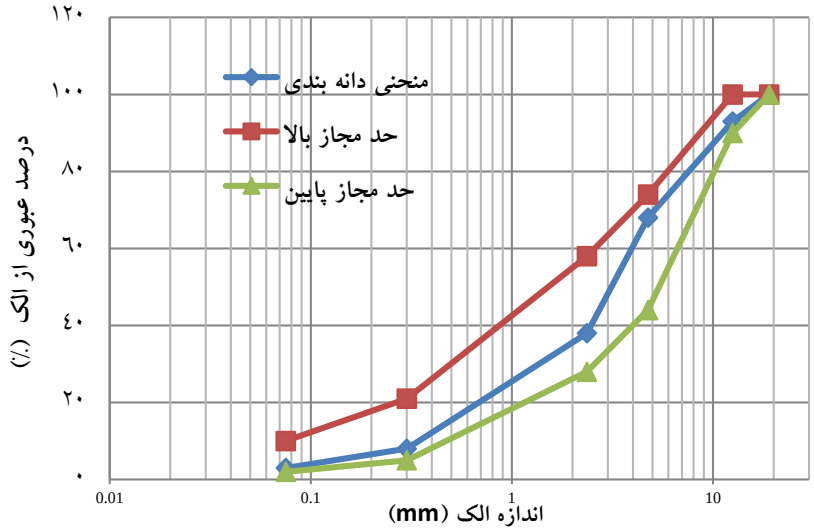
پژوهش	[Kumar, Mehndiratta, & Singh, 2010]	[Lee, Akisetty, & Amirkhanian, 2008]	[A Mahrez & Rehan, 2003]	[Gopal, Sebaaly, & Epps, 2002]	[Putman et al., 2005]
قیر پایه	٦٠-٧٠ ٨٠-١٠٠	PG64-22	80-100	SHRP AAM-1/AAB-1/ABL-3/AAA	PG64-22 PG58-22
دانه‌بندی پودر لاستیک	عبوری از #١٦	عبوری از #٤٠	عبوری از #٤٠	عبوری از #١٦	عبوری از #١٤/٣٠/٤٠
درصد پودر لاستیک	٣-٩	٥-٢٠	٣-١٥	١٢ و ٢٤	١٠ و ١٥
زمان اختلاط	min٤٥	min٣٠	min١٢٠	min٦٠	min١٥/٣٠/٤٥
سرعت اختلاط	rpm٢٠٠٠	rpm٧٠٠	rpm٢٥٠	rpm١٢٠٠	rpm٧٠٠

انتخاب درصد افزودنی پارافیبر بر اساس پیشنهاد شرکت سازنده ١، ٢ و ٣ درصد انتخاب شده است. نتایج کار تجربی و پژوهشی این شرکت نشان می‌داد که استفاده از این مقادیر افزودنی پارافیبر بین ١ الی ٣ درصد، دمای اختلاط را حدود ١٠ الی ٣٠ درجه سانتیگراد (با استفاده از تعیین دمای اختلاط و تراکم با تست ویسکوزیته چرخشی) کاهش خواهد داد. بر همین اساس در این

پژوهش فرض بر آن شد که پس از افزودن پارافیبر به آسفالت گرم (حدودا ۱۶۰ درجه سانتیگراد)، به دو دمای حد بالا و پایین ۱۵۰ و ۱۳۰ درجه سانتیگراد اختلاط آسفالت خواهیم رسید.

همچنین در این پژوهش به دلیل ایجاد یکنواختی و کارایی بیشتر مخلوط آسفالتی از دانه بندی ریز برای پودر لاستیک استفاده شده است. بر همین اساس پودر لاستیک مورد استفاده در این تحقیق مخلوطی از ٤٠درصد عبوری از الک شماره ۳۰ و ٦٠ درصد عبوری از الک شماره ۵۰ بوده است.

نسبت پودر و الیاف توسط شرکت تعیین می‌شود که نسبت آنها در این تحقیق ۷۸ به ۲۲ (۷۸ درصد پودر و ۲۲ درصد میکرو الیاف) می‌باشد. همچنین مشخصات پارافیبر در جدول ۳ آمده است.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی شماره ٤ و حدود مجاز آیین‌نامه‌ای روسازی ایران مصالح سنگی (نشریه ۲۳٤)

جدول ۳. مواد تشکیل دهنده الیاف پارافیبر [نام‌آور جهرمی و همکاران، ۱۳۹٦]

جذب آب	قطر	نقطه ذوب	مدول الاستیسته	مقاومت کششی	طول	چگالی	رنگ
ندارد	۰/۱۳ میلی‌متر	۲۳۰ درجه سانتی‌گراد	٦ گیگا پاسکال	۹۰۰ مگاپاسکال	۱۲–۱۸ میلی‌متر	۱/۱۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب	**سفید**

٤-۳ آزمایش‌ها

٤-۳-۱ طرح اختلاط به روش مارشال

برای ساخت مخلوط آسفالتی لازم است ابتدا یک طرح اختلاط مناسب انتخاب گردد. با توجه به امکانات آزمایشگاهی روش طرح اختلاط مارشال برای طراحی اختلاط انتخاب گردید. پس از انتخاب دانه‌بندی مناسب و دمای اختلاط مناسب از روی قیر خالص به روش گرانروی معادل با دما، از روش طرح اختلاط مارشال مطابق با استاندارد ASTM D1559 برای تعیین درصد قیر بهینه استفاده می‌شود. در این پژوهش درصد قیر بهینه برابر ٦ درصد وزنی مصالح سنگی به دست آمد.

در این تحقیق طبق استاندارد ۳ بار تکرار برای هر آزمایش در نظر گرفته شد. آزمایش مدول برجهندگی غیرمخرب بوده و پس از این آزمایش می‌توان آزمایش دیگری مانند آزمایش خزش دینامیکی را انجام داد؛ لازم به ذکر است که غیرمخرب بودن آزمون مدول برجهندگی به دلیل مقدار بسیار پایین کرنش‌های پسماند این آزمایش می باشد. بنابراین با یک نمونه ساخته شده

با سایز مارشالی، می‌توان هر دو آزمون مورد نظر را انجام داد. بنابراین برای این دو آزمون ٤٥ نمونه‌ی مارشالی ساخته شد.

٤-٣-٢ آزمون‌های قیر

در این پژوهش آزمایش‌های درجه نفوذ، تعیین نقطه نرمی، تعیین کندروانی، خاصیت انگمی انجام گردید.

٤-٣-٣ آزمون‌های مخلوط

پس از بدست آوردن درصدهای قیر بهینه، نمونه‌های اصلی ساخته شده و آزمایش‌های زیر روی آن‌ها صورت گرفت:

- آزمایش مارشال (استحکام و روانی)
- آزمایش مدول برجهندگی
- آزمایش خزش دینامیکی جهت تعیین عدد روانی نمونه‌ها

٤-٣-٣-١ آزمایش استحکام مارشال

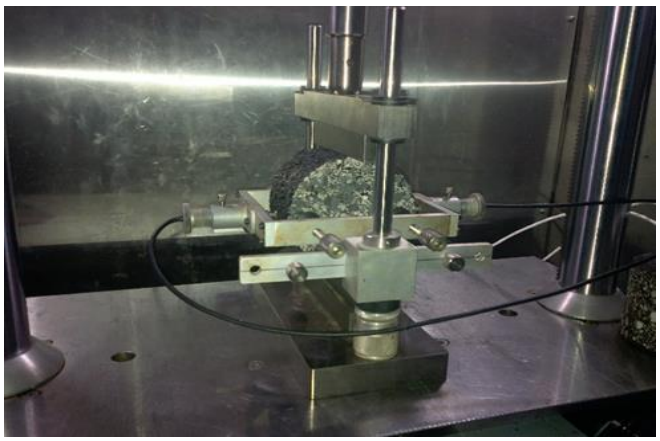
به منظور انجام آزمایش مارشال روی نمونه‌های اصلی مجدداً از هر نوع مخلوط، سه نمونه با درصد قیر بهینه ساخته شده و میانگین مقادیر بدست آمده از آزمایش مارشال به عنوان استحکام مارشال و مقدار روانی، وزن مخصوص آسفالت، درصد فضای خالی ، درصد فضای خالی مصالح سنگی ، درصد فضای خالی پر شده با قیر برای هر نوع مخلوط، در درصد قیر بهینه در نظر گرفته شده‌است.

٤-٣-٣-٢ آزمون مدول برجهندگی

سختی مخلوط‌های آسفالتی پارامتری بسیار مهم و شاخصی از خصوصیات مکانیکی آن‌ها است. به خاطر سهولت انجام و قابلیت کاربرد برای مغزه‌های تهیه شده از سطح راه، آزمایش مدول برجهندگی (Mr) رایج ترین آزمایش به منظور محاسبه سختی مخلوط‌های آسفالتی است. در این پژوهش مدول برجهندگی نمونه‌ها در دو دمای میانه و بالا اندازه‌گیری شود. در این تحقیق دمای انجام آزمایش ٢٥ درجه‌ی سانتی‌گراد و ضریب پواسون ٠/٣٥ در نظر گرفته شد. مقدار بار اعمالی به نمونه‌ها ٩٠٠ نیوتن در دمای ٢٥ درجه انتخاب شد. لازم به ذکر است این مقدار بارها بر اساس ١٠ درصد مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های حاوی ١٦ درصد پودر لاستیک انتخاب شدند. استاندارد مورد استفاده ASTM D4123 و زمان اعمال بار ٠/١ ثانیه به شکل نیمه‌سینوسی و مدت زمان استراحت ٠/٩ ثانیه انتخاب شد. همچنین از دستگاه UTM25 و نرم‌افزار UTS3 جهت انجام آزمایش بهره گرفته شد. شکل ٢ نشان دهنده دستگاه UTM25 درحال انجام آزمایش مدول برجهندگی است.

٤-٣-٣-٣ آزمون خزش دینامیکی

یکی از انواع خرابی در مخلوط‌های آسفالتی، ایجاد شیار در مسیر چرخ بر اثر عبور ترافیک است. یکی از آزمایش‌هایی که به منظور ارزیابی مقاومت یک مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی از آن استفاده می‌شود، آزمایش خزش دینامیکی است. در این تحقیق از استاندارد BS-DD226 به منظور انجام آزمایش استفاده شد. طبق استاندارد مورد استفاده به منظور شبیه‌سازی جریان ترافیک از یک بار تکراری، به نحوی که ٤٠٠KPa تنش در سطح نمونه ایجاد کند، استفاده می‌شود. همچنین نمونه به مدت ١٢٠S قبل از شروع آزمایش تحت تنش ١٢KPa، پیش بارگذاری می‌شود. دمای انجام این آزمایش ٥٠ درجه سانتیگراد و بارگذاری به صورت مربعی و به مدت ١ ثانیه بارگذاری و ١ ثانیه استراحت.



شکل ۲. تنظیمات ماژول آزمایش مدول برجهندگی

شکل ۳. نمونه تحت آزمایش خزش دینامیکی

۵. نتایج و بحث

۵-۱ آزمایش‌های قیر

نتایج آزمایش درجه نفوذ نمونه‌های قیرهای لاستیکی با ۸ درصد و ۱۶ درصد پودر لاستیک نشان داد که با افزایش درصد پودر لاستیک از ۸ به ۱۶ درصد درجه نفوذ کاهش یافته است. همچنین با افزایش درصد پارافیبر مقدار درجه نفوذ کاهش یافته است. به نظر می رسد افزودن پارافیبر به قیرهای لاستیکی باعث سخت شدگی اولیه قیرها شده است و به همین دلیل درجه نفوذ با افزایش درصد پارافیبر کاهش یافته است.

نتایج آزمایش نقطه نرمی نمونه‌های قیرهای لاستیکی با ۸ و ۱۶ درصد پودر لاستیک نشان داد که با افزایش درصد پارافیبر در قیرهای لاستیکی نقطه نرمی افزایش می‌یابد. تغییرات حاصله در نقطه نرمی قیرهای لاستیکی با افزایش افزودنی نشان از کاهش حساسیت حرارتی قیرها دارد. برای این آزمایش تعیین کندروانی قیر از دستگاه سی بولت فیورول استفاده شد و ۱۰ میلی‌لیتر قیر مایع در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد در آن قرارداده شد تا کندروانی آن تعیین شود، ولی کندروانی نمونه‌های قیری به قدری زیاد بود که با این دستگاه قابل اندازه گیری نبود. همچنین نتایج آزمایش خاصیت انگمی نشان داد، میزان انگمی قیرهای لاستیکی بسیار پایین است و با افزودن پارافیبر تغییر خاصی در آن مشاهده نمی‌شود. نتایج آزمایش‌های قیر در جدول ٤ آورده شده است.

جدول ٤. نتایج عددی آزمایشات قیر

نمونه	درجه نفوذ 0/1 mm	نقطه نرمی درجه سانتیگراد (c^0)	انگمی سانتیمتر (Cm)
Neat	٦٨	٤٩	١٠٠
C8S0	٤٥	٥٥	٢٣,٦
C16S0	٣٨	٦١	٢٠,٨
C8S1	٣٧	٥٩	٢٣,٨
C16S1	٣٢	٦٨	٢٠,٧
C8S2	٣٣	٦٨	٢٢,٦
C16S2	٣١	٧٦	٢١
C8S3	٣١	٧٣	٢٢,٨
C16S3	٣٠	٧٩	٢٠,٦

٥-٢ آزمایش مارشال

خروجی آزمایش مقاومت مارشال، دو ویژگی استقامت و روانی مارشال است. نتایج حاصل از این آزمایش در جدول ٥ آمده است. با مشاهده نتایج مشخص شد، با افزودن پودر لاستیک به مخلوط، مقاومت مارشال افزایش می‌یابد و با افزایش درصد پودر لاستیک مقاومت مارشال نیز افزایش می‌یابد. استقامت مارشال نمونه‌های حاوی ٨ درصد پودر لاستیک ساخته شده در دمای اختلاط ١٥٠ درجه سانتی‌گراد با نمونه شاهد تفاوت قابل توجهی نداشت و با افزایش درصد پارافیبر از ١ به ٣ درصد، استقامت مارشال ٠/٤٤ KN افزایش یافت. استقامت مارشال نمونه‌های حاوی ٨ درصد پودر لاستیک ساخته شده در دمای اختلاط ١٣٠ درجه سانتی‌گراد با افزایش درصد پارافیبر افزایش داشت و با افزایش درصد پارافیبر از ١ به ٣ درصد، استقامت مارشال ١/٠٩ KN افزایش یافت.

٥-٣ مدول برجهندگی

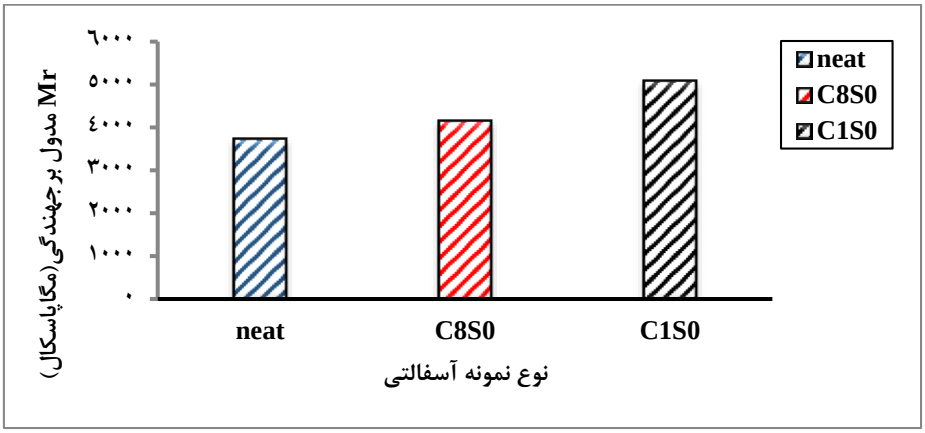
نمودارهای شکل٤، ٥ و ٦ تغییرات مدول بر جهندگی نمونه‌های مختلف را در دمای ٢٥ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. براساس نتایج موجود در شکل‌ها، موارد زیر نتیجه می‌شود:

- با افزودن پودر لاستیک به مخلوط‌های آسفالتی مدول برجهندگی افزایش می‌یابد.
- به طور کلی با افزایش پارافیبر مدول برجهندگی نیز افزایش یافت.

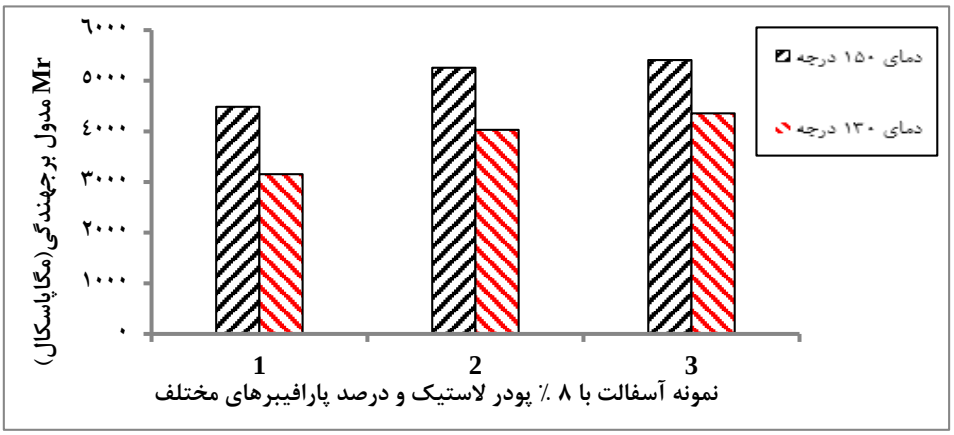
جدول ٥. نتایج آزمون مارشال

ردیف	کد نمونه	استقامت مارشال (کیلو نیوتن)	روانی مارشال(٠,٢٥ میلی متر)
١	Neat	٩/٧٨	٤/١٤
٢	C8S0	١١/٢٦	٤/٠٢
٣	C16S0	١١/٢٤	٣/٨٩
٤	C8S3H	١٠/٨٧	٣/٨٣
٥	C8S6H	١١/٠٢	٣/٧٠

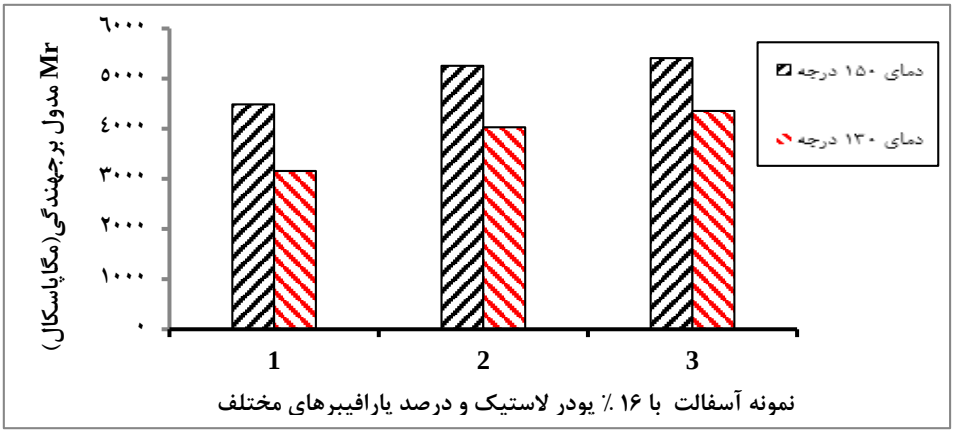
ردیف	کد نمونه	استقامت مارشال (کیلو نیوتن)	روانی مارشال(۰,۲۵ میلی متر)
٦	C8S9H	۱۱/۳۱	٤/۳۲
۷	C8S3W	۸/٥٤	۳/۳۹
۸	C8S6W	۸/۹٦	۳/۸۱
۹	C8S9W	۹/٦۳	۳/٦۱
۱۰	C16S3H	۹/۷٦	٤/۱۳
۱۱	C16S6H	۱۰/۱۹	٤/۳۸
۱۲	C16S9H	۱۰/٥٦	٤/۳۳
۱۳	C16S3W	۹/٤۹	٤/۱۷
۱٤	C16S6W	۹/۷۹	٤/۲۳
۱٥	C16S9W	۸/۸۹	٤/۲٦



شکل ٤. مدول برجهندگی نمونه‌های HMA و آسفالت‌های لاستیکی بدون پارافیبر



شکل ٥. مدول برجهندگی نمونه‌ها با ۸ درصد پودر لاستیک و پارافیبر

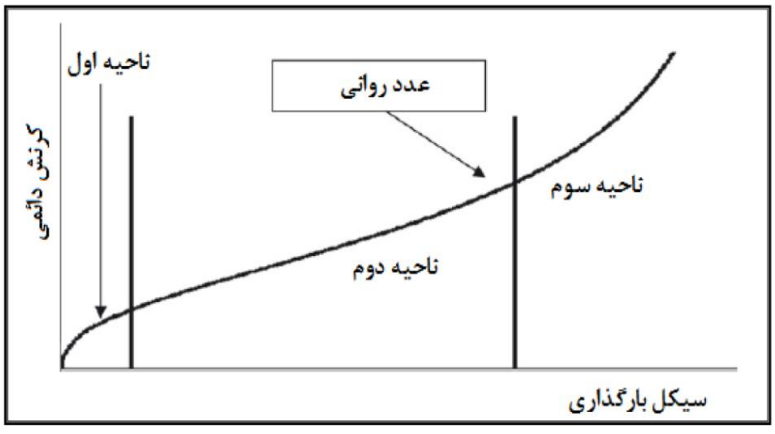


شکل٦. مدول بر جهندگی نمونه‌های حاوی ١٦درصد پودر لاستیک و پارافیبر

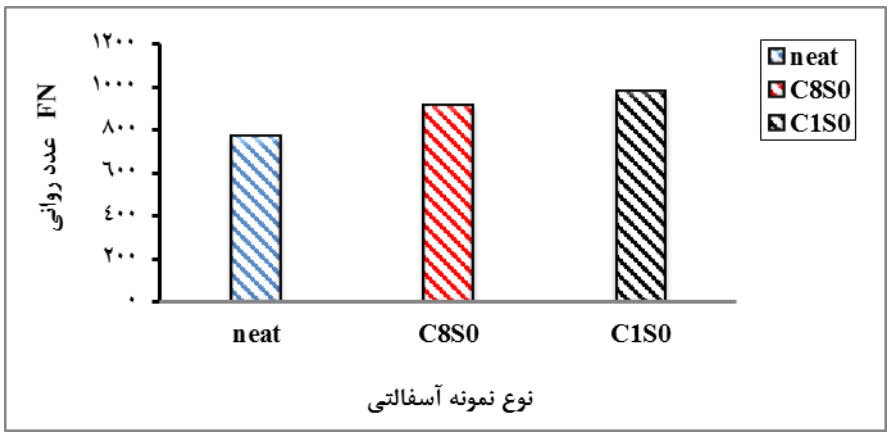
٤-٥ آزمون خزش دینامیکی

در این تحقیق، عدد روانی بر اساس پیشنهاد NCHRP Project 09-33 برای ارزیابی مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این آزمایش از هر نوع مخلوط ۲ نمونه به مدت ۵ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و هم‌دمایی انجام گرفت. سپس آزمایش در دمای ثابت ۵۰ درجه سانتی‌گراد و با تنش ثابت ٤۰۰ کیلو پاسکال، انجام گرفت. در این تحقیق با توجه به منحنی سیکل - کرنش تجمعی که از آزمایش خزش دینامیکی بدست می‌آید و با بررسی سه ناحیه رفتاری در تغییر شکل‌های دائمی و در نهایت تعیین عدد روانی برای هر یک از نمونه‌های آزمایش شده، استحکام شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی ارزیابی شده‌است. شکل ۷ نمونه شماتیک از نتیجه یک آزمایش خزش دینامیکی است که سه ناحیه رفتاری در آن مشخص شده است. سیکل شروع ناحیه سوم به عدد روانی معروف است. عدد روانی بیشتر بیانگر مقاومت بیشتر در برابر شیارشدگی است[عامری و همکاران، ۱۳۹۸].

شکل ۸ عدد روانی را برای مخلوط‌های آسفالتی شاهد نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است با افزایش درصد پودر لاستیک در مخلوط‌های بدون افزودنی پارافیبر عدد روانی افزایش می‌یابد که نشان از افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی است.



شکل۷. نحوه تعیین عدد روانی[عامری و همکاران، ۱۳۹۸]



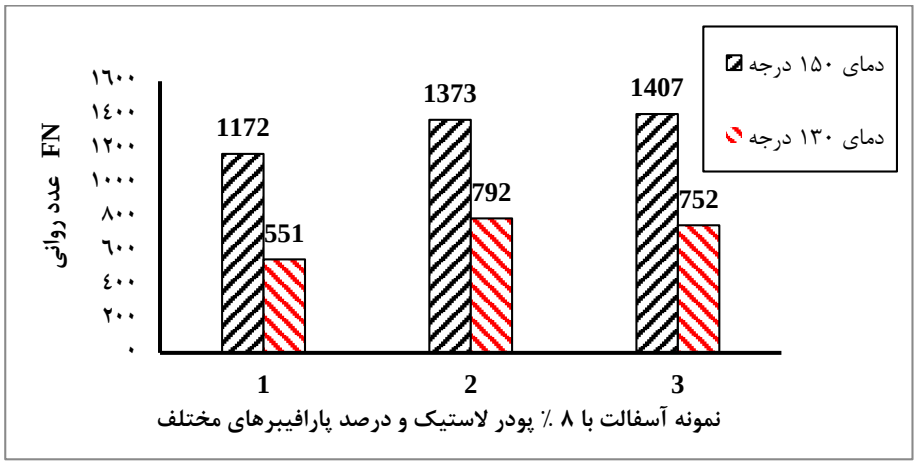
شکل۸. نتایج آزمایش خزش دینامیکی برای نمونه‌های شاهد

شکل ۹ اعداد روانی مخلوط‌های حاوی ۸ درصد پودر لاستیک را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار عدد روانی مخلوط‌های حاوی ۸ درصد پودر لاستیک و حاوی افزودنی پارافیبر عدد روانی آن افزایش یافته که نشان از افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی است. اما با کاهش دمای اختلاط به ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت در برابر شیارشدگی کاهش یافته است و با وجود اینکه با افزایش درصد پارافیبر مقاومت شیارشدگی بهتر شده است ولی عدد روانی آنها کمتر از مخلوط حاوی ۸ درصد پودر لاستیک بدون افزودنی پارافیبر است.

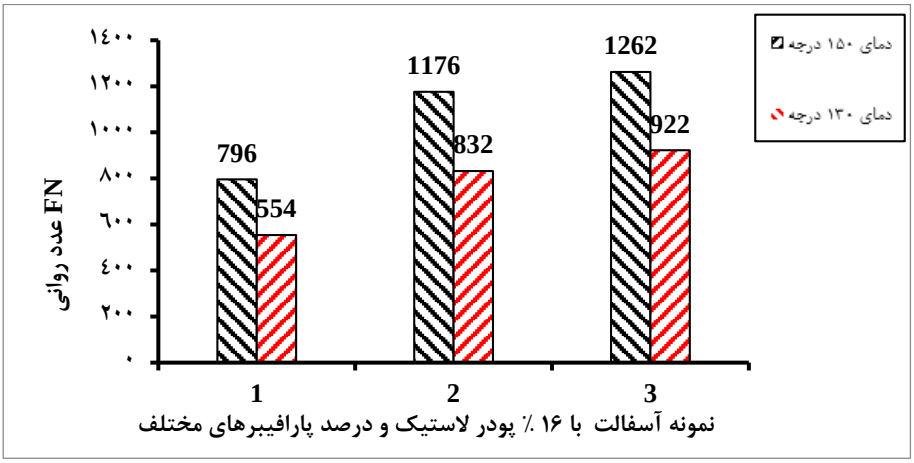
با مقایسه اعداد روانی در دو دمای اختلاط دیده می‌شود که با کاهش دما از ۱۵۰ به ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد اعداد روانی به حدود نصف اعداد روانی در دمای اختلاط ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است. پس با کاهش دمای اختلاط از ۱۵۰ به ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد به شدت مقاومت شیارشدگی کاهش می‌یابد.

شکل ۱۰ اعداد روانی مخلوط‌های حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در این نوع مخلوط‌ها نیز در هر دو دما با افزایش درصد پارافیبر، مقاومت شیارشدگی بهتر شده‌است.

در دمای اختلاط ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به جز نمونه‌ی حاوی ۱ درصد پارافیبر، باقی نمونه‌ها افزایش مقاومت شیارشدگی را نتیجه دادند. مخلوط حاوی ۱ درصد پارافیبر ساخته شده در دمای اختلاط ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد عدد روانی کمتری نسبت به نمونه‌ی ۱۶ درصد پودرلاستیک داشت در صورتی که در حالت مشابه در مخلوط‌های حاوی ۸ درصد پودر لاستیک نمونه‌ی دارای ۱ درصد پارافیبر مقاومت بیشتری نشان داده بود. در دمای اختلاط ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد تمام نمونه‌ها مقاومت شیارشدگی کمتری نسبت به نمونه‌ی شاهد داشتند.



شکل۹. اعداد روانی برای مخلوط‌های حاوی ۸ درصد پودر لاستیک



شکل۱۰. اعداد روانی برای مخلوط‌های حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک

با مقایسه اعداد روانی در دو دمای اختلاط مشاهده می‌شود که با کاهش دما از ۱۵۰ به ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد اعداد روانی به حدود سه چهارم اعداد روانی در دمای اختلاط ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته‌است. به عبارت دیگر کاهش عدد روانی و یا کاهش مقدار شیار شدگی در نمونه‌های آسفالتی ساخته شده در دمای اختلاط ۱۵۰ درجه نسبت به ۱۳۰ درجه نمایانگر ترکیب و پیوند بهتر قیر و پودر لاستیک و افزودنی و مصالح سنگی در این دما خواهد بود.

٦. نتیجه‌گیری

اهداف اصلی این تحقیق، بررسی و تحلیل خصوصیات مکانیکی آسفالت‌های لاستیکی است که از تکنولوژی آسفالت نیمه‌گرم برای کاهش دمای اختلاط آنها استفاده شده‌است، می باشد. بدین منظور قیر با درجه نفوذ ٦٠-٧٠ با دو درصد مختلف (٨ و ١٦) پودر لاستیک مخلوط شده و از افزودنی پارافیبر به عنوان افزودنی نیمه‌گرم استفاده شد و با درصدهای ١، ٢ و ٣ درصد با قیرهای لاستیکی مخلوط شد. در ابتدا آزمایش‌های مربوطه روی نمونه‌های قیر انجام شد. دو سری نمونه برای آسفالت‌های لاستیکی حاوی افزودنی پارافیبر ساخته شد. نمونه‌های آسفالتی سری اول، در دمای اختلاط ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و سری دوم، در دمای اختلاط ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد ساخته شد تا اثر دمای اختلاط در ترکیب پودر لاستیک و قیر و تأثیر آن بر خواص عملکردی مورد آزمایش در این پژوهش بهتر نمایان گردد. سپس آزمایش‌های مارشال، خزش دینامیکی و مدول برجهندگی روی نمونه‌های آسفالتی انجام گرفت. با انجام این آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های قیر و مخلوط‌های آسفالتی نتایج زیر بدست آمد:

- درجه نفوذ قیر با افزایش درصد پودر لاستیک کاهش یافت. با افزودن ١٦ درصد پودر لاستیک به قیر درجه نفوذ تقریباً به نصف قیر خالص اولیه کاهش یافت. همچنین با افزایش درصد پارافیبر مقدار درجه نفوذ کاهش یافته‌است. بعبارت دیگر افزایش درصد پودر لاستیک و پارافیبر به قیر باعث افزایش سفتی قیر در دمای محیط و کاهش میزان درجه نفوذ قیر می گردد.
- نقطه نرمی با افزایش درصد پودر لاستیک افزایش یافت. با افزایش درصد پارافیبر در قیرهای لاستیکی نقطه نرمی افزایش می‌یابد. تغییرات حاصله در نقطه نرمی قیرهای لاستیکی با افزایش درصد پارافیبر نشان از کاهش حساسیت حرارتی قیرها دارد.
- کندروانی قیر با افزودن پودر لاستیک به آن افزایش می‌یابد که با افزودن پارافیبر به آن، کاهش کندروانی آن قدری نیست که با دستگاه سی بولت فیورول قابل اندازه‌گیری باشد.

- میزان انگمی یا شکل‌پذیری قیرهای لاستیکی بسیار پایین است و با افزودن پارافیبر تغییر خاصی در آن مشاهده نمی‌شود.
- با افزودن پودر لاستیک به مخلوط مقاومت مارشال افزایش می‌یابد و با افزایش درصد پارافیبر مقاومت مارشال نیز افزایش می‌یابد. استقامت مارشال و روانی نمونه‌های حاوی ۸ درصد پودر لاستیک ساخته شده در دمای اختلاط ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد با نمونه شاهد تفاوت قابل توجهی نداشت. با کاهش دمای اختلاط از ۱۵۰ به ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد استقامت مارشال حدود ۲۰ درصد کاهش داشت. استقامت مارشال نمونه‌های حاوی ۱٦ درصد پودر لاستیک ساخته شده در هر دو دما کمتر از نمونه شاهد بود، البته برای نمونه حاوی ۱ درصد پارافیبر ساخته شده در دمای اختلاط ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد استقامت مارشال کمی کمتر از نمونه شاهد بود.
- بر اساس نتایج آزمایش خزش دینامیکی، مقاومت در برابر شیار شدگی با افزایش درصد پودر لاستیک در مخلوط‌های آسفالت لاستیکی افزایش می‌یابد. بعبارت دیگر با افزودن پودر لاستیک به مخلوط آسفالتی، فضای خالی بین مصالح سنگی کاهش یافته و انسجام و ساختار آسفالت مستحکم تر شده و مقدار تغییر شکل های ماندگار مخلوط حاضر نسبت به نمونه‌های آسفالت معمولی، در برابر بارهای وارده کاهش می یابد.
- در دمای اختلاط ۱۵۰ درجه مقاومت شیارشدگی بهتر از نمونه‌های شاهد بود و با افزایش درصد پارافیبر مقاومت شیارشدگی افزایش یافت. در این دما مقاومت در برابر شیارشدگی برای نمونه‌های حاوی ۳ درصد پارافیبر در مخلوط‌های آسفالت لاستیکی حاوی ۸ درصد پودر لاستیک ٤۳ درصد و در مخلوط های آسفالت لاستیکی حاوی ۱٦ درصد پودر لاستیک ۳٦ درصد افزایش نشان داد. می توان بیان کرد که با افزایش پارافیبر با افزایش کارایی در مخلوط آسفالتی، عملیات اختلاط پودر لاستیک با مخلوط بهتر انجام می گردد. در نتیجه تراکم پذیری مخلوط راحت تر انجام شده و در نتیجه مقاومت آسفالت تولیدی در برابر تغییر شکل های ماندگار و بار های ترافیکی افزایش می یابد.
- با مقایسه اعداد روانی در دو دمای اختلاط مشاهده می‌شود که کاهش دما از ۱۵۰ به ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد اعداد روانی مخلوط‌های آسفالت لاستیکی حاوی ۸ درصد پودر لاستیک ۵۰ درصد و اعداد روانی مخلوط‌های آسفالت لاستیکی حاوی ۱٦ درصد پودر لاستیک به حدود سه چهارم کاهش یافته‌است. ملاحظه شد که مخلوط‌های آسفالت لاستیکی حاوی ۸ و ۱٦ درصد پودر لاستیک، در مقایسه با HMA مقاومت شیار شدگی بهتری داشتند. اما در ادامه و با کاهش دمای اختلاط دیگر این افزایش مقاومت شیارشدگی با افزایش درصد پودر لاستیک برقرار نیست؛ بلکه با کاهش دمای اختلاط، افزایش درصد پودر لاستیک مقاومت شیار شدگی را کاهش می‌دهد. هرچند که افزودن ساسوبیت این کاهش مقاومت شیارشدگی را جبران می‌کند ولی این جبران حدی داشته و پس از آن پارافیبر هم نمی تواند بهبودی صورت دهد.
- در دمای اختلاط ۱۳۰ درجه مقاومت شیارشدگی کمتر از نمونه‌های شاهد حاوی پودر لاستیک بود ولی نمونه‌های آسفالت لاستیکی حاوی ۱٦ درصد پودر لاستیک با ۲ و ۳ درصد پارافیبر مقاومت شیارشدگی بهتری از نمونه‌های شاهد HMA داشتند.

۷. پی‌نوشت‌ها

1. Styrene Butadiene Styrene
2. Styrene Butadiene Rubber
3. Ethylene Vinyl Acetate
4. Crumb Rubber Modifier

۸. منابع

- شفابخش، غلامعلی، رضائیان، محمدرضا (۱۳۸۹) " بررسی تاثیر درصد و نوع افزودنی ها بر پارامترهای مقاومتی مخلوز های بازیافت سرد با کف قیر"، پژوهشنامه حمل و نقل, شماره دوم، ص۵۳-٦٦.

- عامری، محمود، امیری‌هرمزکی، مهدی و وامق، مصطفی، خیبری، محمد مهدی (۱۳۹۸) "ارزیابی عملکرد مخلوط های آسفالتی گرم (WMA) با مواد افزودنی های گرم آلی و شیمیایی"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل دوره دهم، شماره ٤ ص ۹۸۷-۱۰۰۲.

- نام‌آورجهرمی، محمد، ابوطالبی‌اصفهانی، محسن (۱۳۹۷) " بررسی آزمایشگاهی الیاف پارافیبر"، دهمین همایش ملی و نمایشگاه قیر، آسفالت و ماشین آلات، ۲۲ آبان ۱۳۹۷.

- نام‌آورجهرمی، محمد، سی‌سختی، سعید و قزل‌بیگلو، امیر (۱۳۹٦) "بررسی عملکرد الیاف پلی اتیلن و پارافیبر در مخلوط آسفالتی با آزمایش خزش دینامیکی"، دومین همایش ملی مهندسی عمران و توسعه پایدار، دانشگاه استهبان، ۱۰ اسفند ۱۳۹٦.

- نام‌آورجهرمی، محمد، میریان، وحید، دادیار، محمد و ذوالقدری‌جهرمی، علی‌رضا (۱۳۹۷) "بررسی عملکرد الیاف پارافیبر و پلی اتیلن در مخلوط آسفالتی با آزمایش شیارافتادگی"، دومین کنفرانس ملی مهندسی عمران، معماری با تاکید بر اشتغال‌زایی در صنعت ساختمان، تهران، ۱۳ تیر ۱۳۹۷.

- Akisetty, C., Xiao, F., Gandhi, T., and Amirkhanian, S. (2011) "Estimating correlations between rheological and engineering properties of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm mix asphalt additive". Construction and Building Materials., Vol 25, No. 2, PP. 950-956.

- Behroozikhah, A., Morafa, S. H., and Aflaki, S. (2017) "Investigation of fatigue cracks on RAP mixtures containing Sasobit and crumb rubber based on fracture energy". Construction and Building Materials., No. 141, PP. 526-532.

- Brown, D. R., Jared, D., Jones, C., and Watson, D. (1997) "Georgia’s Experience With Crumb Rubber in Hot-Mix Asphalt. Transportation Research Record". the Transportation Research Board., Vol 1583, No. 1, PP. 85-51.

- Fontes, L. P. T. L., Pereira, P. A. A., Trichês, G., Pais, J. C., and Luzia, R. (2008) "Laboratory optimization of continuous blend asphalt rubber". Retrieved from.

- Gopal, V. T., Sebaaly, P. E., and Epps, J. (2002) "Effect of Crumb Rubber Particle Size and Content On The Low Temperature Rheological Properties of Binders". Retrieved from., Vol 99, No. 100, PP. 955-959.

- Hasan-Nattaj, F. and Materials, M. N.-. (2017) "The effect of forta-ferro and steel fibers on mechanical properties of high-strength concrete with and without silica fume and nano-silica". Construction and Building., Retrieved from. Vol. 137, pp. 552-572.

- Huang, Y., Bird, R. N. and Heidrich, O. (2007) "A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements". Resources, Conservation and Recycling., Vol 52, No. 1, pp. 58-73.

- Kumar, P., Mehndiratta, H. C., and Immadi, S. (2009) "Investigation of Fiber-Modified Bituminous Mixes. Transportation Research Record". the Transportation Research Board., Vol 2126, No. 1, PP. 91-99.

- Kumar, P., Mehndiratta, H. C., and Singh, K. L. (2010) "Comparative Study of Rheological Behavior of Modified Binders for High-Temperature Areas". Materials in Civil Engineering., Vol 22, No. 10, PP. 978-984.

- Lee, S. J., Akisetty, C. K., and Amirkhanian, S. N. (2008) "The effect of crumb rubber modifier (CRM) on the performance properties of rubberized binders in HMA pavements". Construction and Building Materials., Vol 22, No. 7, PP. 1368-1376.

- Mahrez, A, and Rehan, M. (2003)" Rheological evaluation of aging properties of crumb rubber-modified bitumen. Of the Eastern Asia Society for Transportation Studied". Retrieved from., Vol 5, PP. 820-833.

- Mahrez, Abdelaziz, Karim, M. R., and Katman, H. Y. bt. (2005), "Fatigue and Deformation Properties of Glass Fiber Reinforced Bituminous Mixes". the Eastern Asia Society for Transportation Studies., Vol 6, PP. 997-1007.

- Mashaan, N. S., Ali, A. H., Karim, M. R., and Abdelaziz, M. (2011) "Effect of crumb rubber concentration on the physical and rheological properties of rubberised bitumen binders". the Physical Sciences., Vol 6, No. 4, PP. 684-690.

- Mirabdolazimi, S. M., and Shafabakhsh, G. (2017) "Rutting depth prediction of hot mix asphalts modified with forta fiber using artificial neural networks and genetic programming technique". Construction and Building Materials., Vol 148, PP. 666-674.

- Oliveira, J. R. M., Silva, H. M. R. D., Abreu, L. P. F., and Fernandes, S. R. M. (2013) "Use of a warm mix asphalt additive to reduce the production temperatures and to improve the performance of asphalt rubber mixtures". Cleaner Production., Vol 41, PP. 15-22.

- Putman, B. J., Thompson, J. U., and Amirkhanian, S. N. (2005) "High temperature properties of crumb rubber modified binders". Proceeding of the Mairepav 4.

- Shen, J., Amirkhanian, S., Xiao, F., and Tang, B. (2009) "Influence of surface area and size of crumb rubber on high temperature properties of crumb rubber modified binders". Construction and Building Materials., Vol 23, No. 1, PP. 304-310.

- Tanzadeh, J., Vafaeian, M., and Yusefzadeh-Fard, M. (2017) "Laboratory study on the performance of hybrid macro soil fiber reinforced mixture". Vol 134, PP. 50-55. Construction and Building. Retrieved from.

- Way, G. B., Kaloush, K., and Biligiri., K. P. (2012) "Asphalt-rubber standard practice guide–an overview. Proceedings of Asphalt Rubber". PP. 23–40.

- Yang, X., You, Z., Hasan, M. R. M., Diab, A., Shao, H., Chen, S., and Ge, D. (2017) "Environmental and mechanical performance of crumb rubber modified warm mix asphalt using Evotherm". Cleaner Production, Vol 159, PP. 346–358.

- Yu, H., Leng, Z., and Gao, Z. (2016), "Thermal analysis on the component interaction of asphalt binders modified with crumb rubber and warm mix additives". Construction and Building Materials., Vol 125, PP. 168–174.

غلامعلی شفابخش، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران – عمران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران – راه و ترابری را از دانشگاه علم و صنعت ایران و همچنین دومین کارشناسی ارشد خود در رشته عمران را از دانشگاه INSA فرانسه اخذ نمود. وی در سال ۱۳۷٦ موفق به کسب درجه دکتری در رشته عمران – راه و ترابری، از دانشگاه INSA فرانسه گردید. تالیفات ایشان شامل ۱۲۰ مقاله در مجلات ISI و ISC و ۱٦۰ مقاله در کنفرانس‌های داخلی و خارجی، ۵ کتاب در زمینه‌های راه و راه آهن و ٤ ثبت اختراع می‌باشد. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان، حوزه روسازی راه، فرودگاه، مهندسی راه آهن و ترافیک بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استاد در دانشگاه سمنان است.

سعید اسدی، درجه کاردانی را در دانشکده نقشه برداری در سال ۱۳۸٦، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران – عمران را در سال ۱۳۸۹ و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران – راه و ترابری را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه امیرکبیر تهران اخذ نموده و هم اکنون دانشجوی دکتری در رشته مهندسی عمران – راه و ترابری در دانشگاه سمنان است. تالیفات ایشان شامل ۷ مقاله در مجلات ISI و ISC و ۷ مقاله در کنفرانس‌های داخلی و خارجی می‌باشد. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان حوزه روسازی راه و فرودگاه و راهسازی بوده و در حال حاضر مدرس حق‌التدریس در چندین دانشگاه دولتی و غیردولتی است.

ابوالفضل محمدی جانکی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران – عمران را در سال ۱۳۹۵ و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران – راه و ترابری را در سال ۱۳۹۷ از دانشگاه تربیت مدرس تهران اخذ نموده و هم اکنون دانشجوی دکتری در رشته مهندسی عمران – راه و ترابری در دانشگاه سمنان است. تالیفات ایشان شامل ۱۰ مقاله در مجلات ISI و ISC و ۱۵ مقاله در کنفرانس‌های داخلی و خارجی، ۲ کتاب در زمینه‌های روسازی راه و تکنولوژی بتن می‌باشد. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان حوزه روسازی راه و فرودگاه، تکنولوژی بتن و راهسازی بوده و در حال حاضر مدرس حق‌التدریس در چندین دانشگاه دولتی و غیردولتی است.