

ارزیابی اثر لاتکس SBR بر خصوصیات عملکردی روسازی نیمه صلب

مقاله علمی - پژوهشی

حامد خانی سانچ، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

رضوان باباگلی*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

علی اصغر زرتشتی ایل بیگی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

محمد مهدی خیبری، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Rezvan.Babagoli1987@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۵ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

صفحه ۸۰-۵۳

چکیده

ساخت و ساز جاده و تعمیر آن معمولاً با سه نوع روسازی انعطاف پذیر، صلب و نیمه صلب انجام می شود. با وجود تمام مزیت هایی که دو نوع روسازی انعطاف پذیر و صلب دارند، دارای نقص هایی نیز هستند. روسازی نیمه صلب همه مزیت های روسازی صلب و انعطاف پذیر را با هم ادغام می کند. روسازی نیمه صلب، که به طور کلی به عنوان ماکدام جاذب شناخته می شود، شامل یک اسکلت آسفالت با دانه بندی باز با ۲۵ تا ۳۵ درصد حفره هایی است که در آن یک دوغاب سیمانی مورد استفاده قرار می گیرد. با توجه به اهمیت حفظ تعادل میان حالت های الاستیک و ویسکوز در روسازی نیمه صلب، هدف اصلی در این تحقیق بررسی تاثیر به کارگیری لاتکس استایرن بوتادین استایرن به عنوان اصلاح کننده قیر و دوغاب سیمان، بر خصوصیات عملکردی روسازی نیمه صلب است. برای این کار ابتدا به طراحی آسفالت متخلخل مورد نیاز پرداخته شد. مقدار درصد قیر بهینه آسفالت متخلخل ۳/۹۷۴ درصد محاسبه شد. گام بعدی تعیین خصوصیات دوغاب سیمان و محاسبه نسبت W/C بهینه بود. ۱۶ نوع نمونه روسازی نیمه صلب با درصدهای مختلف لاتکس SBR (موجود در قیر و دوغاب سیمان) در قالب های مارشال ساخته شد و تزریق دوغاب سیمان در آن ها انجام شد. سپس آزمایش های عملکردی روی نمونه ها انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از لاتکس SBR در قیر آسفالت متخلخل موجب افزایش مقاومت مارشال و مدول برجهندگی به ترتیب تا ۵ و ۵۸ درصد و استفاده از آن در دوغاب سیمان موجب کاهش مقاومت مارشال در کوتاه مدت تا ۳۵ درصد می شود. در حالی که استفاده از لاتکس SBR در دوغاب سیمان تاثیر قابل توجهی در مقدار مدول برجهندگی روسازی نیمه صلب ندارد. نتایج نشان داد که استفاده از لاتکس SBR در قیر آسفالت متخلخل و دوغاب سیمان (در بلند مدت) باعث بهبود عملکرد روسازی نیمه صلب در برابر بارگذاری های سنگین و مناطق نیازمند روسازی های خاص (باند فرودگاه و مسیر اتوبوس ها) می شود.

واژه های کلیدی : روسازی نیمه صلب، مخلوط آسفالت متخلخل، دوغاب سیمان، لاتکس SBR، آزمایش های عملکردی

۱-مقدمه

به همین دلیل رعایت اصول ایمنی جاده ای به منظور ایجاد امنیت خاطر کاربران جاده ها، کاهش تصادفات و به تبع آن کاهش مرگ و میر و جراحت افراد و همچنین کاهش خسارت مالی

تسهیلات حمل و نقلی به طور کلی در سه شاخه اصلی زمینی، دریایی و هوایی قرار می گیرند. در این بین حمل و نقل زمینی و به ویژه حمل و نقل جاده ای بیشترین میزان استفاده کننده را دارد.

ضروری می‌باشد. ساخت و ساز جاده و تعمیر آن معمولاً با سه نوع روسازی انعطاف پذیر، صلب و نیمه‌صلب انجام می‌شود. روسازی انعطاف پذیر دارای مزایایی همچون قابلیت خدمت دهی فوری، کیفیت سواری دهی خوب و عدم وجود درزهای اتصال است. از طرفی دیگر، روسازی‌های صلب دارای ظرفیت باربری بسیار زیاد و عمر خدمت‌دهی بالاتر هستند. با وجود تمام این مزیت‌ها این دو نوع روسازی دارای نقص‌هایی نیز هستند. روسازی انعطاف پذیر مقاومت مناسبی در برابر اثرات شیمیایی و حرارتی و بارگذاری بسیار سنگین ندارد و خرابی شیارشدگی از متداول‌ترین خرابی‌ها در این نوع روسازی است. از آن سو، روسازی صلب نیز دارای مشکلات بسیاری در مراحل ساخت و تعمیر و نگهداری است و وجود درزهای اتصالی که کیفیت رانندگی را پایین می‌آورند. روسازی نیمه‌صلب همه مزیت‌های روسازی صلب و انعطاف پذیر را با هم ادغام می‌کند. ساخت و نگهداری روسازی نیمه صلب مانند روسازی انعطاف پذیر آسان و سریع است و همچنین مانند روسازی صلب دارای ظرفیت باربری و دوام زیاد است. با این حال، نوع جدیدی از روسازی، که موضوع اصلی این پایان نامه است، در چند سال اخیر مورد استفاده قرار گرفته است. این روسازی که به عنوان روسازی نیمه صلب شناخته می‌شود، حاوی مواد نیمه انعطاف پذیر است که می‌تواند برخی از بهترین ویژگی‌های روسازی انعطاف پذیر و صلب، از جمله عدم وجود مفاصل، عمر طولانی و ظرفیت باربری بالا را داشته باشد. این روسازی همچنین حفاظت خوبی در برابر ورود آب فراهم می‌کند (Ahlrich et al, 1991). روسازی نیمه‌صلب، که به طور کلی به عنوان ماکادام جاذب شناخته می‌شود، شامل یک اسکلت آسفالت با دانه‌بندی باز با ۲۵ تا ۳۵ درصد حفره‌هایی است که در آن یک دوغاب سیمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مخلوط دوگانه یک ساختار بسیار مقاوم در برابر شیارشدگی برای استفاده در روسازی‌های سنگین و سطح بسیار مقاوم در برابر یختن سوخت و نفت است که اجازه می‌دهد تا آن در مناطق صنعتی، فرودگاه‌ها و بندرها که دارای ترافیک سنگین و آهسته هستند، استفاده شود (Zoorob et al, 2002). مکانیزم ساخت روسازی نیمه‌صلب یک عملیات دومرحله‌ای است که به طور معمول در دو روز متوالی انجام می‌شود. ابتدا آسفالت متخلخل با استفاده از تجهیزات عادی

ساخت روسازی انعطاف پذیر آماده می‌شود. در روز بعد (یا بعد از اینکه آسفالت خنک شده است)، دوغاب سیمان با استفاده از اسکرپ لاستیکی (سیلندرها) به حفره‌های آسفالت تا سطح پایین لایه تزریق می‌شود. خواص سودمند این روسازی به اتصال مناسب حفرات آسفالت متخلخل بستگی دارد (Anderton, 2000). با توجه به معایب روسازی انعطاف پذیر و سخت بودن ساخت و اجرای روسازی صلب و با در نظر گرفتن مزایای روسازی نیمه صلب و نیاز صنعت قیر و آسفالت به این نوع روسازی تحقیق و کار علمی در رابطه با این موضوع بسیار مهم است. جای و دستیارانش در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۷ به بررسی خصوصیات روسازی با خمیر سیمان تزریقی با عملکرد بالا پرداختند. نتایج نشان داد که سهم مشارکت بخش سیمانی روسازی نیمه‌صلب در ایجاد مقاومت فشاری و خمشی و مدول برجهندگی بیشتر از بخش آسفالت متخلخل است. همچنین نتایج نشان داد که میزان فضای خالی آسفالت متخلخل فاکتور اولیه برای عملکرد بهتر روسازی نیمه‌صلب در دمای بالاست. آن‌ها همچنین مقاومت مارشال نمونه‌های روسازی نیمه‌صلب را قبل و پس از گذراندن سیکل‌های ذوب و یخبندان بررسی کردند (Cai et al, 2017). بَنگ و دستیارانش در سال ۲۰۱۷ مطالعه‌ای بر روی تاثیر استفاده از سیمان فوق زودگیر و افزودنی‌های شیمیایی در دوغاب سیمان روسازی نیمه‌صلب پرداختند. برای ساخت آسفالت متخلخل از قیر اصلاح شده با پلیمر SBS^۴ استفاده شد. ۴ نوع دوغاب سیمان با استفاده از سیمان فوق زودگیر و کندگیرکننده‌ها و زودگیرکننده‌ها ساخته شد. در نهایت خصوصیات مکانیکی روسازی نیمه‌صلب شامل تخلخل، مقاومت مارشال، مقاومت خمشی، مقاومت شیارشدگی در آزمایش چرخ بارگذاری و ... ارزیابی شدند. از نتایج آزمایش‌ها، مشخص شد که تخلخل و سرعت پرشدن آسفالت متخلخل، تحت تأثیر سیالیت دوغاب سیمان قرار دارند. آنها در نهایت توصیه کردند که درصد فضای خالی آسفالت متخلخل باید در حدود ۲۰-۲۵ درصد و مقدار سیالیت دوغاب سیمانی در آزمایش سیالیت با قیف مارش در حدود ۱۲ ثانیه باشد (Bang et al, 2017). هو و همکارانش در مطالعه‌ی دیگری در سال ۲۰۱۷ به بررسی نقش دانه‌بندی سنگدانه‌ها در آسفالت متخلخل و تاثیر آن در کیفیت تزریق دوغاب سیمان پرداختند. آن‌ها با استفاده از ۲۲ نوع دانه‌بندی

مختلف و انجام آزمایش‌های تعیین درصد فضای خالی، کانتابرو و زهکشی قیر برای آسفالت متخلخل و تصویربرداری از نمونه‌های پرشده با دوغاب سیمان به نتایج زیر دست یافتند (Hou et al, 2017)

-اثر بخشی تزریق دوغاب سیمان با استفاده از اتصال متقابل بین منافذ مخلوط، ساختار و اندازه سنگدانه‌ها مشخص می‌شود.

در سال ۲۰۱۶ مینگ ونگ و همکاران تحقیق در مورد مکانیزم اصلاح ملات سیمان توسط لاتکس SBR انجام دادند. آن‌ها با انجام آزمایش‌های DSC^۶، FTIR^۶، XPS^۷ و SEM^۸ به بررسی جزییات ترکیب و مکانیزم اصلاح ملات سیمان با لاتکس SBR پرداختند. به علت تفاوت در زنجیره‌های پلیمری، بیشتر لاتکس‌های پلیمری که در زمینه سیمان اصلاح شده استفاده می‌شود را می‌توان به دو نوع تقسیم کرد. لاتکس بوتیل بنزن برای نشان دادن لاتکس نوع اول پلیمری بدون گروه فعال در زنجیره‌های پلیمری استفاده شد، مکانیسم این سیمان اصلاح شده با لاتکس‌های پلیمری فقط شامل مکانیزم اصلاح فیزیکی بود. فیلم لاتکس، سطوح کریستال‌های هیدراتاسیون را پوشش می‌دهد و ترک‌ها و منافذ سیمان را پر می‌کند، بنابراین، می‌تواند عملکرد بهتر را به سیمان القا کند. در مورد دیگر نوع از پلیمرها، این لاتکس‌های پلیمری با گروه‌های فعال است که می‌توانند با ذرات موثر در هیدراتاسیون واکنش دهند تا ساختار شبکه سه بعدی در سیستم سیمان اصلاح شده مانند لاتکس SBR ایجاد کنند. مکانیزم این لاتکس‌های پلیمری شامل مکانیسم‌های اصلاح فیزیکی و شیمیایی می‌باشد. ایجاد این شبکه سه بعدی موجب افزایش مقاومت خمشی و مقاومت در برابر ترک‌های انقباضی می‌گردد (Wang et al, 2016). آنکور و همکاران در سال ۲۰۱۸ به بررسی اثر افزودن فیبر پلاستیک بازیافتی و لاتکس SBR در بتن پرداختند. آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی جداشدگی، مقاومت خمشی و مقاومت در برابر نفوذ یون کلر انجام شدند. از ۲۰-۰ درصد SBR 0-2 فیبر لاستیک بازیافتی در نمونه‌ها استفاده شد. نهایتاً با استفاده از نتایج آزمایش‌ها مشخص شد که افزودن لاتکس SBR و فیبر لاستیک بازیافتی موجب بهبود خصوصیات سخت شدگی و تازگی بتن و افزایش مقاومت خمشی و مقاومت در برابر ترک و کاهش آسیب‌های رطوبتی و شیمیایی می‌شود. همچنین مقادیر بهینه ۱۵ و ۱ درصد به ترتیب برای لاتکس SBR و فیبر لاستیک بازیافتی

به دست آمدند (Bhogayata et al, 2018). پرز و همکاران در تحقیقی مدل ضریب سختی بین المللی را بر عملکرد روسازی نیمه صلب مورد ارزیابی قرار دادند. دو مدل ارزیابی سختی برای روسازی‌های نیمه صلب مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که مواد مورد استفاده در اساس و زیراساس و ضخامتشان بر سختی تاثیرگذار است. استفاده از مواد تثبیت شده با قیر در لایه رویه دقت مدل را افزایش می‌دهد (Perez et al, 2021). لیو و همکاران مقاومت شیارشدگی مخلوط نیمه صلب را با استفاده از آزمایش روسازی تسریع شده و روش المان محدود ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد که مدول دینامیکی مصالح روسازی با افزایش اندازه نمونه افزایش و با افزایش دما کاهش می‌یابد. SUP-25 پس از ۵۴۰۰ بار بارگذاری مکرر، ارزش آسیب خستگی بسیار زیاد (۰٫۱۹) داشت. خطای بین شبیه‌سازی شیارها و نتایج آزمایش ۲٫۸۷ درصد بود که نشان می‌دهد این مدل به طور موثر برای مواد کامپوزیتی چند لایه اعمال می‌شود. تغییر شکل شیار در یک میلیون بار بارگذاری در تابستان ۴٫۶ برابر در زمستان بود. بار محور ۱۰۰ درصد افزایش یافته و عمق شیارها ۴۶٫۹ درصد افزایش یافته است که نشان می‌دهد اضافه بار خودرو باید به ویژه در بخش‌های کم سرعت در مناطق با دمای بالا محدود شود (Liu et al, 2024). سانیل و همکاران عملکرد روسازی نیمه صلب را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که درجه‌بندی انتخابی ASTM با محتوای قیر ۴/۵ درصد دارای خواص مقاومتی و عمر خستگی بهتری است. تغییر شکل دائمی درجه‌بندی ASTM در مقایسه با درجه‌بندی نیوزلند تغییرات جزئی را نشان می‌دهد. خواص مکانیکی درجه بندی انتخاب شده و ویژگی‌های عملکردی استانداردهای روسازی نیمه صلب را برآورده می‌کند، بنابراین پیشنهاد می‌شود که روسازی نیمه صلب می‌تواند یک روسازی جایگزین باشد (Sunil et al, 2021). سانگ تاو و همکاران طرح سازه ای روسازی آسفالتی با اساس نیمه صلب را براساس بهینه‌سازی مدول مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدول اندازه‌گیری شده در سازه ۱ و ۲ بیشتر از مدول طراحی است. علاوه بر این، در حالی که مدول اساس و زیراساس افزایش می‌یابد، انحراف به تدریج کاهش می‌یابد. تنش کششی در زیر لایه اساس و زیراساس افزایش یافت و حداکثر تنش برشی اساساً بدون تغییر بود (Songtao et al, 2021). ژاو و همکاران یک تحلیل مقایسه‌ای

ضعیف در برابر شیارشدگی بدترین را ارائه داد (Zhao et al, 2023). لیو و همکاران عملکرد شیارشدگی مخلوط آسفالتی بر روی اساس نیمه صلب را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی پیش‌بینی توسعه شیارها از نظر محاسباتی معقول است که می‌تواند مرجعی علمی برای تعمیر و نگهداری شیارهای روی روسازی‌های آسفالتی باشد (Liu et al, 2023).

بین عملکرد روسازی انعطاف‌پذیر و نیمه صلب و صلب مورد ارزیابی قرار دادند. تجزیه و تحلیل همبستگی نشان داد که حداکثر میکرو کرنش، همبستگی نمایی خوبی با حداکثر عمق شیار برای روسازی حاوی مصالح خرده آسفالتی، روسازی نیمه صلب و روسازی حاوی پلی اورتان داشت. در نهایت، روسازی نیمه‌صلب بهترین PCI را در بین سه روسازی ارائه کرد، در حالی که روسازی حاوی پلی اورتان عمدتاً به دلیل مقاومت

۲-روش تحقیق

۲-۱-مواد و مصالح

سنگی درشت‌دانه را بگونه‌ای پر نمایند که تأثیری در تماس سنگدانه با سنگدانه نداشته باشد. آسفالت متخلخل دارای دانه‌بندی باز (شماره ۱) و یا گسسته (شماره ۲) است که شامل مقدار زیادی از مصالح سنگی شکسته و همچنین دارای مقدار زیاد فضای خالی (معمولاً بیش از ۲۰٪) می‌باشد. دانه‌بندی‌های ارائه شده در جدول ۲ برای مخلوط آسفالتی متخلخل، توصیه می‌گردند. در دانه‌بندی‌های این جدول میزان عبوری از الک شماره ۴ باید به میزانی باشد تا امکان تماس سنگدانه به سنگدانه در مخلوط آسفالت متخلخل وجود داشته باشد.

سنگ‌دانه‌های آهکی شکسته کوهی از کارخانه آسفالت در شهرستان تفت تهیه شدند. فیلر مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها، آهک هیدراته تهیه شده از کارخانه آهک پرسیکا تهران می‌باشد. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ آورده شده است. دانه‌بندی مخلوط مصالح سنگی در این مخلوط‌ها باید بگونه‌ای باشد که مصالح سنگی درشت‌دانه که اسکلت اصلی این مخلوط‌ها را تشکیل می‌دهند، امکان تماس سنگدانه را ایجاد نمایند. مقدار ریزدانه مخلوط‌های آسفالت متخلخل باید به اندازه‌ای باشد که فضای بین مصالح

جدول ۱. مشخصات فیزیکی مصالح مصرفی

ویژگی	استاندارد	نتایج مصالح
سایش لس آنجلس (%)	AASHTO-T96	۱۷
جذب رطوبت درشت دانه (%)	AASHTO-T96	۰/۶
جذب رطوبت ریز دانه (%)	AASHTO-T96	۱/۴
درصد شکستگی در دو وجه (%)	ASTM-D5821	۹۸
افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (%)	AASHTO-T104	۰/۱۵
سنگدانه های پهن و دراز (%)	ASTM D4791	۹
درصد تورق	BS-812	۱۳
هم ارز ماسه‌ای	ASTM D2419	۷۶
وزن مخصوص حقیقی درشت دانه	ASTM C127	۲/۶۸۹
وزن مخصوص حقیقی ریز دانه	ASTM C127	۲/۵۹۴

پالایشگاه اصفهان تهیه گردید. با توجه به گستردگی استفاده از قیر ۶۰-۷۰ در اکثر پروژه‌های راه‌سازی خصوصاً در مناطق گرمسیری، قیر ۶۰-۷۰ پالایشگاه اصفهان جهت ساخت نمونه‌های آزمایشی مخلوط‌های آسفالتی انتخاب شده است. آزمایش‌های قیر براساس روش‌های مندرج در استاندارد ASTM بر روی نمونه قیر منتخب انجام پذیرفته و نتایج آن‌ها در جدول ۴ ارائه گردیده است. با توجه به نتایج آزمایش‌ها، قیر مذکور خصوصیات قیر را مطابق با استانداردها دارا می‌باشد.

برای انتخاب بهترین دانه‌بندی برای ساخت آسفالت متخلخل ۴ نوع دانه‌بندی در محدوده ذکر شده آیین‌نامه در نظر گرفته شد و آزمایش‌های تعیین درصد فضای خالی و کانتابرو برای انتخاب دانه‌بندی بهینه انجام شدند. مقدار فضای خالی حداقل ۲۵ درصد و حداکثر میزان سایش ۲۵ درصد در آزمایش کانتابرو در هر دانه‌بندی معیار انتخاب قرار گرفت. در نهایت دانه‌بندی زیر در جدول ۳ برای ادامه روند ساخت نمونه‌ها و انجام عمل تزریق سیمان مورد استفاده قرار گرفت. قیر با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ که از

جدول ۲. حدود دانه‌بندی آسفالت متخلخل مطابق با آیین‌نامه ایران (نشریه شماره ۳۸۴)

حدود رواداری	درصد وزنی عبوری از هر الک			شماره دانه‌بندی اندازه الک (میلی‌متر)
	۳	۲	۱	
	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۹
±۶	۷۵-۱۰۰	۷۰-۱۰۰	۸۵-۱۰۰	۱۲/۵
±۶	۶۰-۹۰	۳۸-۶۲	۵۵-۷۵	۹/۵
±۵	۳۲-۵۰	۱۳-۲۷	۱۰-۲۵	۴/۷۵
±۴	۱۰-۱۸	۹-۲۰	۵-۱۰	۲/۳۶
±۲	۳-۶	۳-۶	۲-۴	۰/۰۷۵

جدول ۳. دانه‌بندی بهینه انتخاب‌شده برای ساخت مخلوط آسفالت متخلخل در آزمایشگاه

مقدار مانده (g)	درصد مانده روی الک	درصد عبوری	اندازه الک (میلی‌متر)
۰	۰	۱۰۰	۱۹
۳۸۵	۳۵	۶۵	۱۲/۵
۲۷۵	۲۵	۴۰	۹/۵
۲۷۵	۲۵	۱۵	۴/۷۵
۸۸	۸	۷	۲/۳۶
۵۵	۵	۲	۰/۰۷۵
۲۲	۲	۰	فیلر

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده روی قیر

نوع آزمایش	نتیجه	روش استاندارد آزمایش ASTM
تعیین درجه نفوذ (دهم میلی‌متر)	۶۱	D5
تعیین نقطه نرمی (درجه سلسیوس)	۴۹	D36
تعیین قابلیت شکل‌پذیری (سانتی‌متر)	۱۰۰	D113
تعیین چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)	۱/۰۱۱	D70
تعیین نقطه اشتعال (درجه سلسیوس)	۳۲۰	D92
تعیین کندروانی (سانتی استوکس)	۳۳۵	D2170

در این تحقیق از سیمان تیپ ۲، تولید شده در کارخانه سیمان آباده استفاده شد. خصوصیات شیمیایی و فیزیکی سیمان مورد استفاده در جدول‌های ۵ و ۶ آورده شده است.

جدول ۵. خصوصیات شیمیایی سیمان تیپ ۲ کارخانه سیمان آباده

مقادیر	خصوصیات شیمیایی
21.5 ± 0.8	SiO ₂
4.72 ± 0.3	Al ₂ O ₃
3.9 ± 0.3	Fe ₂ O ₃
63.5 ± 0.5	CaO
2.1 ± 0.3	MgO
2.4 ± 0.3	SO ₃
1.2 ± 0.3	آهک آزاد

جدول ۶. خصوصیات فیزیکی سیمان تیپ ۲ کارخانه سیمان آباده

مقادیر	خصوصیات فیزیکی
3000 ± 100	سطح مخصوص (سانتی گراد بر گرم)
0.2 ± 0.1	پایداری خمیر سیمان (%)
180 ± 16	گیرش اولیه (دقیقه)
260 ± 16	گیرش ثانویه (دقیقه)
390 ± 50	مقاومت فشاری (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)

لاتکس SBR از شرکت تولید مواد شیمیایی تیوا تهران تهیه گردید.

۲-۲- تعیین قیر بهینه آسفالت متخلخل

۷ آورده شده است. شکل ۱ نمودار تغییرات درصد فضای خالی آسفالت متخلخل را نشان می‌دهد. این نمودار از برازش یک تابع توان ۲ بر روی نتایج آزمایشگاهی فضای خالی حاصل شده است. تابع برازش شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

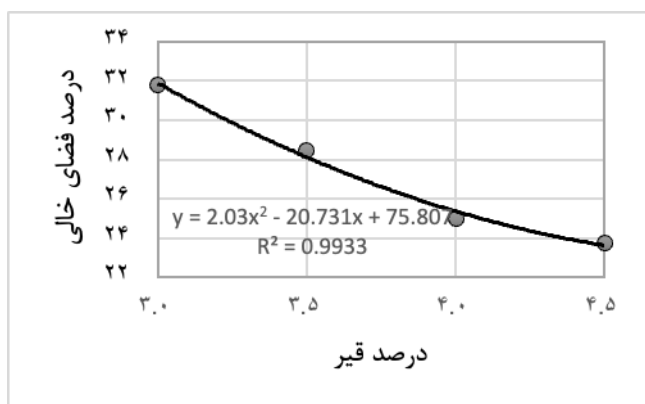
با استفاده از دانه‌بندی طرح که در جدول ۳ نشان داده شده است، نمونه‌های آسفالت متخلخل در درصد‌های قیر ۳، ۳/۵، ۴ و ۴/۵ ساخته شد. مقادیر G_{mb} ، G_{mm} ، درصد فضای خالی و درصد فضای خالی بین مصالح سنگی در نمونه آسفالت متخلخل برای هر درصد قیر تعیین شد. تمامی نتایج آزمایش‌ها در جدول

جدول ۷. نتایج آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های آسفالت متخلخل

درصد قیر	G_{mm}	G_{mb}	Va	VMA
۳	۲/۷۷	۱/۸۹	۳۱/۷۷	۹۹/۳۲
۳/۵	۲/۶۶	۱/۹	۲۸/۴۶	۹۹/۳۱
۴	۲/۵۹	۱/۹۴	۲۵/۰۲	۹۹/۳
۴/۵	۲/۵۷	۱/۹۶	۲۳/۷۴	۹۹/۲۹

دقیقه) وزن نمونه خارج شده با وزن اولیه نمونه مقایسه شد. نتایج آزمایش کانتابرو در جدول ۸ آورده شده است.

پس از تعیین نتایج بالا آزمایش کانتابرو بر روی نمونه‌ها انجام شد. نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد درون محفظه دستگاه لس آنجلس قرار گرفتند و پس از ۳۰۰ دور چرخش (معادل ۱۰



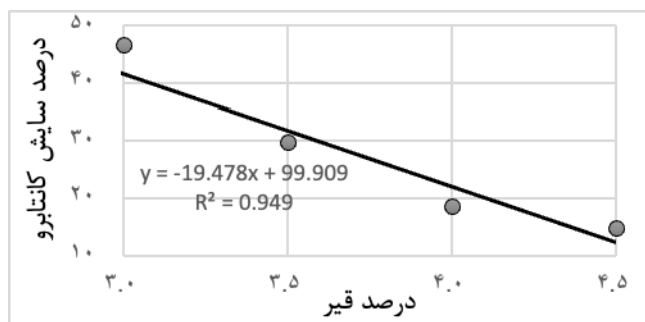
شکل ۱. نمودار تغییرات درصد فضای خالی آسفالت متخلخل

جدول ۸. نتایج آزمایش کانتابرو بر روی نمونه‌های آسفالت متخلخل

درصد قیر	درصد سایش کانتابرو
۳	۴۶/۵
۳/۵	۲۹/۸۱
۴	۱۸/۴۳
۴/۵	۱۴/۶۴

برازش یک تابع خطی بر روی نتایج آزمایشگاهی به دست آمده است. تابع برازش شده به ترتیب زیر می باشد.

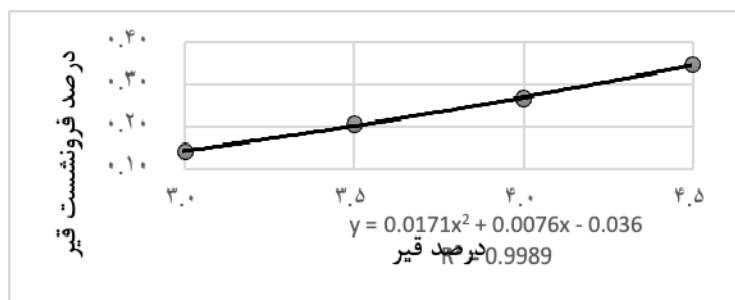
شکل ۲ تغییرات درصد سایش کانتابرو در نمونه های آسفالت متخلخل در درصد های قیر مختلف نشان می دهد. این نمودار از



شکل ۲. تغییرات میزان سایش کانتابرو در نمونه های آسفالت متخلخل

در نظر گرفتن این مقدار درصد قیر متناظر توسط تابع، مقدار ۳/۹۷۴ درصد به دست آمد. با جایگذاری این مقدار در تابع فضای خالی مقدار این تابع ۲۶/۱۶ درصد فضای خالی حاصل شد. همانطور که قبلا اشاره شد مقدار فضای خالی در آسفالت متخلخل بایستی بین ۳۰-۲۵ درصد باشد، پس این مقدار ۲۶/۱۶ قابل قبول است. با جایگذاری درصد قیر ۳/۹۷۴ در تابع آزمایش فرونشست قیر، مقدار زهکشی قیر در این آزمایش ۰/۲۶۹ به دست آمد و همانطور که قبلا گفته شد حداکثر آن ۰/۳ درصد است. پس قیر بهینه آسفالت متخلخل برای ساخت نمونه های روسازی نیمه صلب ۳/۹۷۴ درصد است.

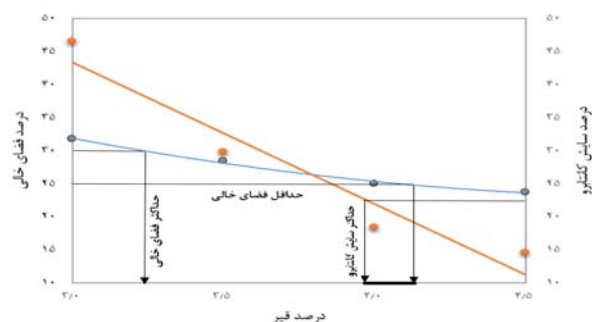
یکی دیگر از آزمایش های مهم طرح اختلاط آسفالت متخلخل آزمایش ریزش (زهکشی) قیر است. این آزمایش در دمای ۱۵-۱۰ درجه بالاتر از دمای ساخت نمونه انجام می شود. نتایج حاصل از این آزمایش در جدول ۹ آورده شده است. شکل ۳ نمودار تغییرات میزان فرونشست قیر در درصد های مختلف قیر در نمونه های آسفالت متخلخل را نشان می دهد. این نمودار از برازش یک تابع توان ۲ بر روی نتایج آزمایشگاهی حاصل شده است. حداکثر میزان فرونشست قیر طبق آیین نامه اسپانیا ۰/۳ درصد می باشد. برای تعیین قیر بهینه ابتدا مقدار ۲۲/۵ درصد سایش کانتابرو به عنوان حد قابل قبول مشخص شد. پس با



شکل ۳. تغییرات میزان فرونشست قیر در نمونه های آسفالت متخلخل

جدول ۹. نتایج آزمایش ریزش قیر بر روی نمونه های آسفالت متخلخل

درصد قیر	درصد فرونشست قیر
۳	۰/۱۴
۳/۵	۰/۲۰۵
۴	۰/۲۶۴
۴/۵	۰/۳۴۷



شکل ۴. تعیین محدوده قابل انتظار درصد قیر بهینه

تعیین قابلیت شکل پذیری، تعیین چگالی، تعیین نقطه اشتعالی، قشر نازک قیر، تعیین کندروانی و تعیین درجه خلوص.

۳-۲- آزمایش مخلوط آسفالتی

۳-۲-۱- آزمایش کانتابرو

همانطور که بیان شد، رایج ترین آزمایش مکانیکی مورد استفاده، آزمایش کانتابرو (Cantabro) است که با نمونه های مارشال قرار داده شده در دستگاه لس آنجلس و بدون استفاده از گلوله های فولادی انجام می شود. بر طبق این آزمایش، بعد از ۳۰۰ بار گردش، افت وزنی نمونه ها به خاطر هدر روی ذرات اندازه گیری می شود. نتایج این نوع از آزمایش به درجه حرارت محیط بسیار حساس هستند، بنابراین آزمایش در درجه حرارت های مشخصی انجام می گیرد (جایروند، ۱۳۸۳).

پارامترهای درصد فضای خالی و درصد سایش کانتابرو مهمترین پارامترها در تعیین قیر بهینه آسفالت متخلخل هستند. شکل ۴، تلاقی نمودارهای تغییرات درصد فضای خالی و درصد سایش کانتابرو را نشان می دهد. با مشخص کردن حداقل و حداکثر درصد فضای خالی و حداکثر مجاز سایش کانتابرو، محدوده ای که با خط پررنگ مشکی نمایان است محدوده ی قابل انتظار درصد قیر بهینه است. با توجه به اینکه مقدار ۳/۹۷۴ در این بازه قرار می گیرد، صحت محاسبات در تعیین قیر بهینه را نشان می دهد. محاسبات بالا روند تعیین قیر بهینه آسفالت متخلخل با استفاده از قیر معمولی را نشان می دهد. برای تعیین قیر بهینه آسفالت متخلخل با استفاده از قیر اصلاح شده با SBR از روش سطح پاسخ استفاده شد. با استفاده از این روش قیر بهینه آسفالت متخلخل اصلاح شده با ۳، ۵ و ۷ درصد لاتکس SBR به ترتیب ۴/۰۶، ۴/۲۱ و ۴/۳۸ درصد به دست آمد.

۳- روش آزمایشگاهی

۳-۱- آزمایش قیر

در این تحقیق برای ساخت نمونه های آسفالت متخلخل از دو نوع قیر خالص و قیر خالص اصلاح شده با پلیمر لاتکس SBR استفاده شد. آزمایش های مختلفی جهت تعیین خصوصیات قیرهای خالص به کار می روند. آزمایش های متداول برای تعیین خصوصیات قیرهای خالصی براساس استانداردهای ASTM و AASHTO عبارت اند از: تعیین درجه نفوذ، تعیین نقطه نرمی،

$$p = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \quad (1)$$

P=درصد سایش

P1=وزن اولیه نمونه

P2=وزن نمونه پس از سایش

۳-۲-۲-آزمایش ریزش قیر

آزمایش سبب زهکشی در بریتانیا، آزمایش NCAT در آمریکا که در سال ۱۹۹۸ توسط مرکز ملی تکنولوژی آسفالت منتشر شد و آزمایش اشلنبرگ در آلمان، آزمایش‌هایی هستند که برای اندازه‌گیری میزان فرونشست قیر ابداع شده‌اند. البته بیشتر کشورهای اروپایی از آزمایش اشلنبرگ استفاده می‌نمایند. در طی آزمایش زهکشی قیر بخشی از مصالح که از یکدیگر جدا شده و از سبب آزمایش در مدت آزمایش عبور می‌نمایند. مصالحی که زهکش می‌شوند ممکن است ترکیبی از چسباننده‌های قیری یا ترکیبی از چسباننده قیری و افزودن‌ها یا به همراه مصالح سنگی

ریز باشند. مخلوط غیرمتراکم که در آزمایشگاه یا در کارخانه آسفالت تهیه شده با مقدار قیر بهینه در یک سبب سیمی کوچک با اندازه سوراخ ۴/۶ میلی‌متر قرار می‌گیرد، که این سبب روی یک بشقاب که وزن آن معلوم می‌باشد قرار می‌گیرد، سپس نمونه به همراه سبب و بشقاب در یک آون از پیش گرم شده به مدت یک ساعت که دمای آن ۱۰ درجه از حرارت تولید بیشتر می‌باشد قرار می‌گیرد. پس از یک ساعت نمونه به همراه بشقاب از آون بیرون آورده و بشقاب به همراه محتویات آن وزن می‌شود. سپس مقدار فرونشست چسباننده بر حسب درصد با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌گردد (جایروند، ۱۳۸۳).

$$F = \frac{D - C}{B - A}$$

(۲)

که در آن:

F= درصد ریزش قیر

A= وزن سبب خالی

B= وزن نمونه به اضافه سبب

C= وزن بشقاب خالی

D= وزن بشقاب و محتویات آن بعد از یک ساعت در آون

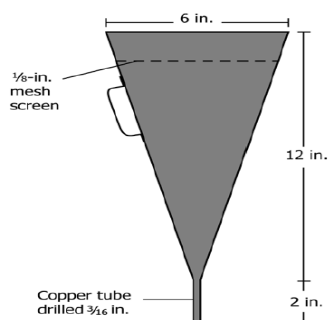
حداکثر ریزش قیر نباید از ۰/۳ درصد کل وزن مخلوط تجاوز کند.

۳-۳-آزمایش‌های تعیین خصوصیات دوغاب سیمان

۳-۳-۱-آزمایش سیالیت

برای کار با دوغاب دانستن و اندازه‌گیری خواص رئولوژی آن ضروری است. این کار با وسایل مختلفی جهت تعیین ویسکوزیته و سیالیت انجام می‌گیرد. در آزمایشگاه با اندازه‌گیری زمان جریان دوغاب از یک قیف استاندارد، سیالیت دوغاب سیمان تعیین می‌شود. عقیده عمومی بر این است که با قیف مارش می‌توان ویسکوزیته دوغاب را اندازه‌گیری نمود. این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D6910 انجام می‌شود. روش آزمایش به این شکل است که ابتدا مقدار ۹۴۶ میلی‌لیتر از دوغاب

سیمان درون قیف می‌ریزیم. سپس با کرنومتر زمان تخلیه این مقدار دوغاب از داخل قیف را اندازه می‌گیریم و برحسب ثانیه گزارش می‌کنیم. دیواره‌های قیف بایستی به گونه‌ای باشد که مزاحمتی برای خروج دوغاب ایجاد نکند. به عبارتی دیگر زبری این دیواره‌ها باید نزدیک به صفر باشد تا اصطکاکی بین دوغاب و آن‌ها رخ ندهد. شکل ۵ ابعاد توصیه شده توسط استاندارد ASTM D6910 برای ساخت قیف مارش را نشان می‌دهد (ASTM D6910, 2009).



شکل ۵. ابعاد قیف مارش برای آزمایش سیالیت

۳-۳-۲-آزمایش مقاومت فشاری

برای تعیین مقاومت فشاری دوغاب سیمان مطابق با استاندارد ASTM C109 از قالب‌های مکعبی با ابعاد ۵۰ میلی‌متر استفاده شده است. دوغاب سیمان با نسبت آب به سیمان مشخص شده ساخته شده و درون قالب‌ها ریخته شده است. برای جلوگیری از ایجاد حباب در درون نمونه با چکش به قالب‌ها ضربه زده شد. دمای آزمایشگاه حین ساخت دوغاب سیمان بایستی در حدود ۲۵ درجه سانتی‌گراد باشد. سپس نمونه‌ها به منظور گیرش ۲۴ ساعت در قالب رها شد. بعد از آن نمونه‌ها از قالب خارج شده و برای عمل‌آوری در آب با دمای ۲۵ درجه قرار داده شد. در مطالعه حاضر نمونه‌ها در سن‌های ۱ و ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج ثبت شد.

۳-۳-۳-آزمایش مقاومت خمشی

برای تعیین مقاومت خمشی خمیر سیمان مطابق با استاندارد ASTM C348 از قالب‌های مکعب مستطیلی با ابعاد ۴۰×۴۰×۱۶۰ میلی‌متر استفاده شده است. دوغاب سیمان با نسبت آب به سیمان مشخص شده ساخته شده و درون قالب‌ها ریخته شده است. برای جلوگیری از ایجاد حباب در درون نمونه با چکش به قالب‌ها ضربه زده شد. دمای آزمایشگاه حین ساخت دوغاب سیمان بایستی در حدود ۲۵ درجه سانتی‌گراد باشد. سپس نمونه‌ها به منظور گیرش ۲۴ ساعت در قالب رها شد. بعد از آن نمونه‌ها از قالب خارج شده و برای عمل‌آوری در آب با دمای ۲۵ درجه قرار داده شد. در مطالعه حاضر نمونه‌ها در سن‌های ۱ و ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج ثبت شد. شکل ۶ نمونه‌های خمیر سیمان برای تعیین مقاومت خمشی را نشان می‌دهد.

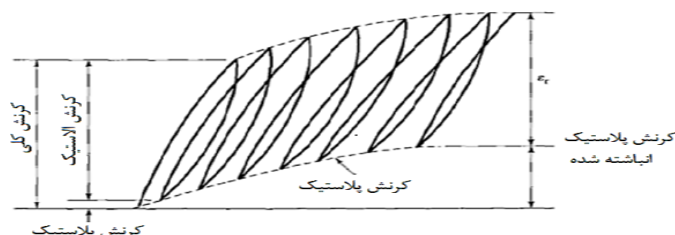


شکل ۶. نمونه‌های خمیر سیمان برای تعیین مقاومت خمشی

۳-۳-۴- آزمایش مدول برجهندگی

بارگذاری دوره‌ای نشان می‌دهد. در مرحله ابتدایی اعمال بار، مقدار قابل توجهی تغییر شکل دائمی وجود دارد که در شکل با عنوان کرنش پلاستیک بیان شده‌است. هر چه تعداد تکرار افزایش می‌یابد، کرنش پلاستیک ناشی از هر تکرار بارگذاری کاهش می‌یابد. پس از ۱۰۰ تا ۲۰۰ تکرار کرنش عملاً برگشت‌پذیر خواهد بود که در شکل ۷ با ϵ_r نشان داده شده است.

مدول برجهندگی همان مدول ارتجاعی تحت بارگذاری دوره‌ای پایدار است که در تئوری الاستیک به کار می‌رود. واضح است که مصالح روسازی اکثراً الاستیک نبوده و پس از هر بارگذاری مقداری تغییر شکل دائمی را تجربه می‌کنند. هر چند چنانچه مقدار بار در مقایسه با مقاومت مصالح کم باشد و به تعداد زیادی تکرار شود، تغییر شکل تحت هر تکرار بارگذاری تقریباً به طور کامل قابل بازگشت می‌باشد و (بسته به میزان بار) می‌توان آن را الاستیک در نظر گرفت. شکل ۲۲ کرنش نمونه را تحت تست



شکل ۷. کرنش‌های ایجاد شده تحت بارگذاری دوره‌ای

مدول الاستیک بر اساس کرنش بازگشتی تحت بارهای دوره‌ای، مدول برجهندگی MR نامیده می‌شود.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

(۳)

و نمونه مشابه در تست‌های مختلف با شرایط محیطی متفاوت قابل استفاده هستند. آزمایش تعیین مدول برجهندگی بر اساس استاندارد ASTM D4123 صورت گرفت.

که در رابطه ۳، ϵ_r کرنش بازگشتی و σ_d تنش انحرافی در تست فشردگی سه‌محوری می‌باشد. به دلیل آنکه بار وارده معمولاً کوچک است، تست مدول برجهندگی یک تست غیر مخرب بوده

۴- بحث

۴-۱- نتایج آزمایش‌های قیر اصلاح‌شده با لاتکس SBR

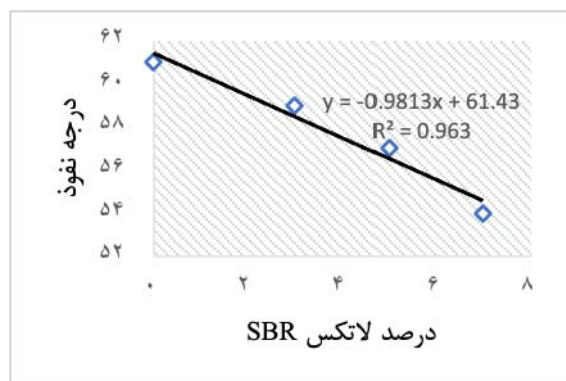
مخلوط و جلوگیری از شیارشدگی اهمیت دارد. جدول ۱۰، نتایج آزمایشگاهی انجام آزمایش‌های معمولی قیر بر روی قیر اصلاح‌شده با لاتکس SBR را نشان می‌دهد. در خدمت‌دهی راه در دماهای پایین (زیر ۱۰ درجه سانتی‌گراد)، وجود الاستومر خصوصیات الاستیک قیر را بدون افزایش سختی بهبود می‌بخشد، در مقابل آنچه برای قیر خالص با درجه نفوذ پایین اتفاق می‌افتد. اصلاح قیر با SBR، ممکن است منجر به ارتقای عمر خستگی مخلوط آسفالتی به دلیل کاهش ترک‌های ناشی از خستگی شود. قیر پلیمری ساخته شده با SBR، باید مطابق با استاندارد ASTM D5840 مورد استفاده قرار گیرد.

پلیمر SBR، یک پلیمر الاستومریک می‌باشد که به شکل لاتکس به قیر و به صورت برهم‌زدن افزوده می‌شود. اختلاط قیر و لاتکس SBR توسط میکسر برش بالا ساخت شرکت پاکریست مدرن در آزمایشگاه روسازی دانشگاه یزد انجام شد. توان خروجی دستگاه ۱۱۰۰ وات و سرعت چرخش میکسر ۵۰۰۰ دور در دقیقه بود. در خدمت‌دهی با دمای بالا (۵۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد) رفتار قیر اصلاح‌شده با پلیمر SBR، به وسیله افزایش ویسکوزیته و نرخ برشی ارتقا می‌یابد. همچنین با افزایش سختی، عملکرد قیر تحت بارهای با زمان ماندگاری بیشتر (فرکانس کمتر) بهبود می‌یابد. این ارتقای عملکرد به منظور مقاومت نرمی

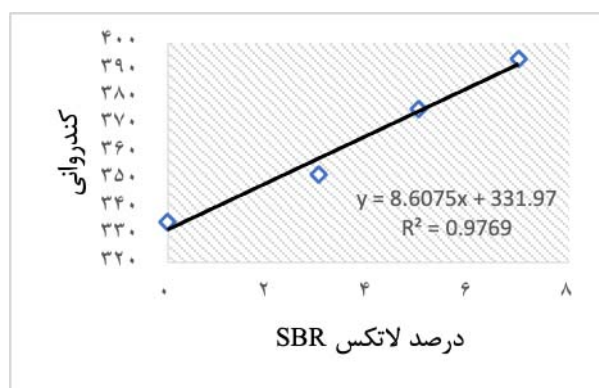
جدول ۱۰. نتایج آزمایش‌های قیر اصلاح‌شده با لاتکس SBR

درصد لاتکس SBR	عنوان آزمایش	درصد ۳	درصد ۵	درصد ۷
درجه نفوذ	۵۹	۵۷	۵۴	
درجه نرمی	۵۶	۶۳	۷۲	
کندروانی	۳۵۲	۳۷۶	۳۹۴	
قابلیت شکل‌پذیری	۹۷	۹۱	۸۸	
درجه اشتعال	۳۸۰	۴۰۰	۴۱۰	

شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب تغییرات درجه نفوذ و تغییرات کندروانی قیر اصلاح‌شده با SBR را نشان می‌دهند.



شکل ۸. تغییرات درجه نفوذ قیر اصلاح‌شده با لاتکس SBR



شکل ۹. تغییرات کندروانی قیر اصلاح‌شده با لاتکس SBR

۴-۱-۱- بررسی شاخص‌های PI و PVN قیر اصلاح‌شده با لاتکس SBR

پارامتر شاخص نفوذ (PI)، شاخصی است از حساسیت قیر نسبت به تغییرات درجه حرارت که تابعی از درجه نفوذ و نقطه نرمی قیر است و مطابق روابط زیر تعریف می‌شود.

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (۴)$$

$$A = \frac{\log 800 - \log P}{T_{RB} - T_P} \quad (5)$$

که در این روابط:

PI: شاخص نفوذ قیر، A پارامتر کمکی است که از رابطه ۵ تعیین می‌شود.

P: مقدار درجه نفوذ (دهم میلی‌متر)

TP: دمای قیر هنگام انجام آزمایش درجه نفوذ که معمولاً ۲۵ درجه سانتیگراد در نظر گرفته می‌شود.

TRB: نقطه نرمی قیر (درجه سانتی‌گراد).

در جدول ۱۱ نتایج محاسبات شاخص PI برای قیر اصلاح‌شده با لاتکس SBR در درصد‌های مختلف آورده شده است. همانطور که در شکل پیداست افزایش درصد لاتکس SBR موجب افزایش سختی قیر و بهبود خصوصیات الاستیک آن می‌شود.

جدول ۱۱. شاخص درجه نفوذ (PI) برای قیر اصلاح شده با لاتکس SBR

درصد لاتکس SBR	شاخص PI
۰	-۰/۱۸۶
۳	۰/۶۱۹
۵	۱/۹۷۶
۷	۳/۳۶۳

این فرض که در درجه حرارت نقطه نرمی، قیرها دارای درجه نفوذ ۸۰۰ هستند، درباره همه قیرها از جمله قیر کانادا صادق نیست و در نتیجه بررسی حساسیت حرارتی این نوع قیرها از

طریق شاخص PI صحیح نمی‌باشد. بدین لحاظ پس از بررسی‌های فراوان، PI اصلاح‌شده یا PVN توسط مک لید معرفی شد که در آن بعد از تعیین درجه نفوذ، به جای استفاده از نقطه نرمی، ویسکوزیته قیر در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد تعیین می‌گردد. مقدار PVN از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$PVN = (-1.5) \frac{L - \log Vis}{L - M} \quad (6)$$

$$L = 4.258 - 0.6976 (\log P) \quad (7)$$

$$M = 3.46289 - 0.61094 (\log P) \quad (8)$$

نتایج محاسبات شاخص اصلاح‌شده PVN برای قیر اصلاح‌شده با لاتکس SBR در جدول ۱۲ آورده شده است.

جدول ۱۲. نتایج محاسبات شاخص PVN برای قیر اصلاح شده با لاتکس SBR

شاخص PVN	درصد لاتکس SBR
-۱/۰۰۵	۰
-۰/۹۶۸	۳
-۰/۹۰۸	۵
-۰/۸۹۴	۷

قیر با حساسیت حرارتی کم ویژه کاربرد ترافیک سنگین ($PVN > -0.5$)

قیر با حساسیت حرارتی متوسط ویژه مصرف در ترافیک سبک ($-1 < PVN < -0.5$)

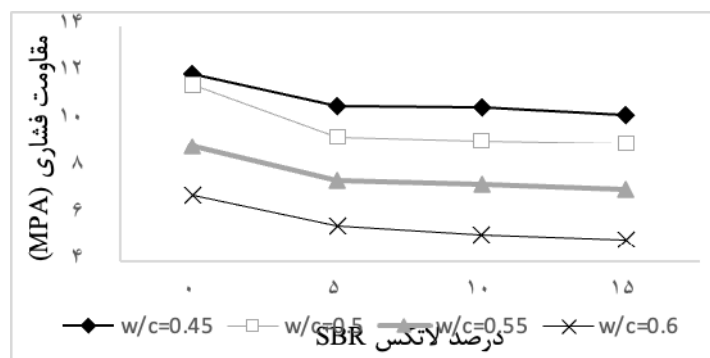
قیر با حساسیت حرارتی زیاد برای ترافیک سبک ($PVN < -1$)

۴-۲-آزمایش های دوغاب سیمان

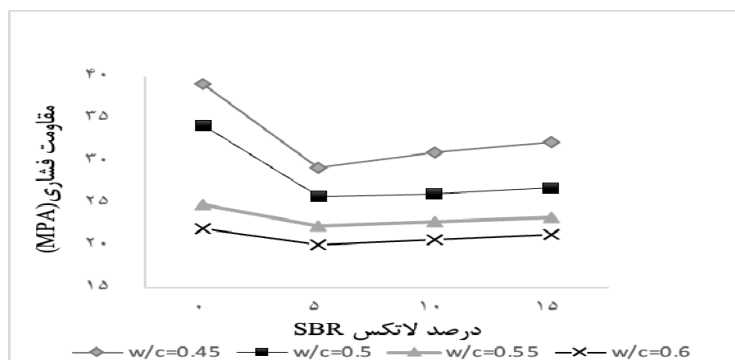
۴-۲-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

افزایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز عمل آوری شده است. دلیل آنچه که در شکل های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می شود این است که پلیمر SBR برای ساخت شبکه های سیمانی و تشکیل ساختارهای پلیمر-سیمانی به زمان نیاز دارد. در سن های پایین (یک روز) افزودن پلیمر لاتکس SBR ابتدا مانعی برای پیشرفت هیدراتاسیون است. دلیل این اتفاق این است که پس از اختلاط دوغاب سیمان تازه با لاتکس SBR، هیدراتاسیون شروع می شود. گرانول های جامد از لاتکس SBR بر روی سطح ذرات جامد سیمان جذب می شوند و منجر به کاهش سطح تماس بین ذرات سیمان و آب می گردد. سپس لاتکس SBR به شکل یک لایه کم آب در می آید. برخی از ذرات سیمان توسط این لایه احاطه می شوند و هیدراتاسیون به تاخیر می افتد، بنابراین ساختارهای پلیمر-سیمان به خوبی تشکیل نمی شوند و در سنین پایین افزودن پلیمر تاثیر منفی در مقاومت فشاری دارد و موجب کاهش آن می شود. در سنین بالا (۲۸ روز) نتایج نشان داد که افزودن لاتکس SBR موجب کاهش تخلخل و افزایش مقاومت فشاری دوغاب سیمان می شود.

برای بررسی مقاومت فشاری دوغاب سیمان ۲ سری نمونه در درصدهای ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد لاتکس SBR و با در نظر گرفتن نسبت آب به سیمان های ۰/۴۵، ۰/۵، ۰/۵۵ و ۰/۶ و با در نظر گرفتن ۱۶ طرح اختلاط متفاوت ساخته شدند. قابل ذکر است که به مقدار ۴۰ درصد (با توجه به توصیه شرکت تولید کننده) از وزن لاتکس SBR از مقدار آب محاسبه شده برای هر طرح اختلاط کاسته شد. یک سری از نمونه ها به مدت یک روز و سری دوم به مدت ۲۸ روز عمل آوری شدند. نتایج آزمایش مقاومت فشاری یک و ۲۸ روزه دوغاب سیمان به ترتیب در شکل های ۱۰ و ۱۱ آورده شده است. شکل های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب تغییرات مقاومت فشاری یک و ۲۸ روزه دوغاب سیمان در درصدهای مختلف لاتکس SBR را نشان می دهند. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود افزودن لاتکس SBR با کاهش مقاومت فشاری در سنین کم همراه است، اما شیب تغییرات در درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد لاتکس SBR کمتر از تغییرات میان درصدهای ۰ و ۵ است. اما در شکل ۱۱ همانطور که قابل مشاهده است افزودن لاتکس SBR از ۵ تا ۱۵ درصد موجب



شکل ۱۰. تغییرات مقاومت فشاری یک روزه دوغاب سیمان

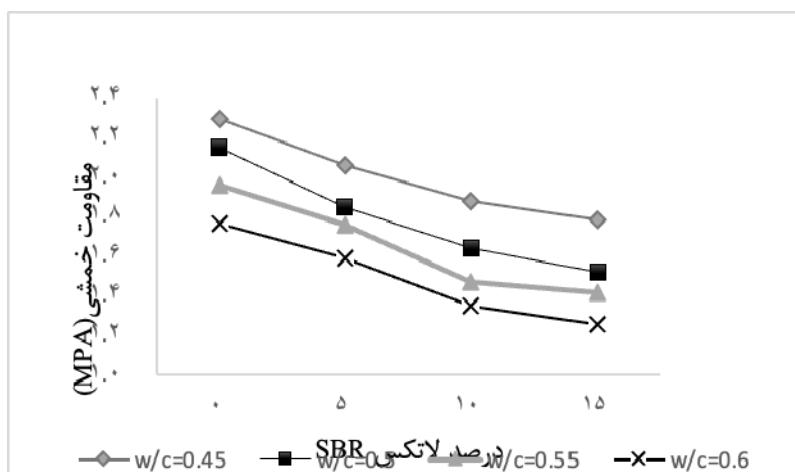


شکل ۱۱. تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه دوغاب سیمان

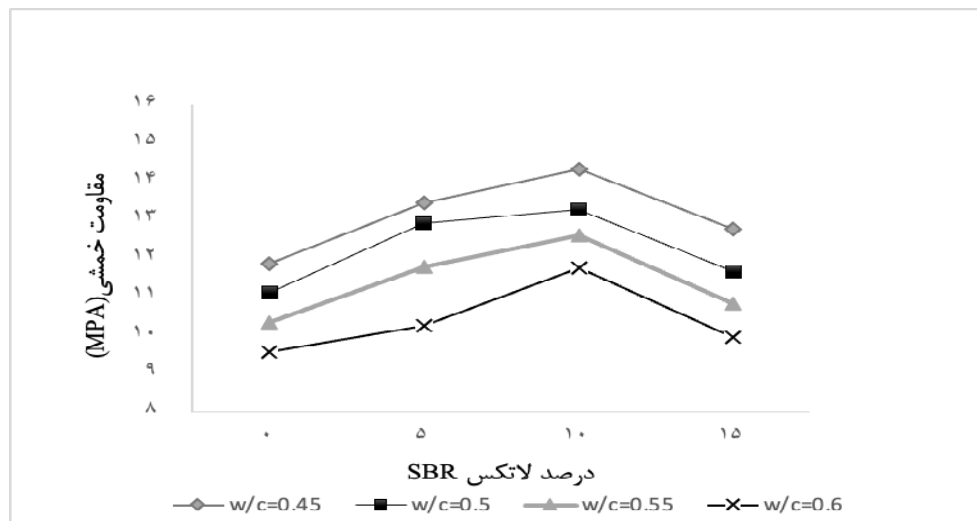
۲-۲-۴- نتایج آزمایش مقاومت خمشی

عملآوری مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمایش مقاومت خمشی دوغاب سیمان در شکل های ۱۲ و ۱۳ آورده شده است.

برای بررسی مقاومت خمشی دوغاب سیمان نیز مانند مقاومت فشاری ۲ سری نمونه ساخته شد. نمونه ها پس از یک و ۲۸ روز



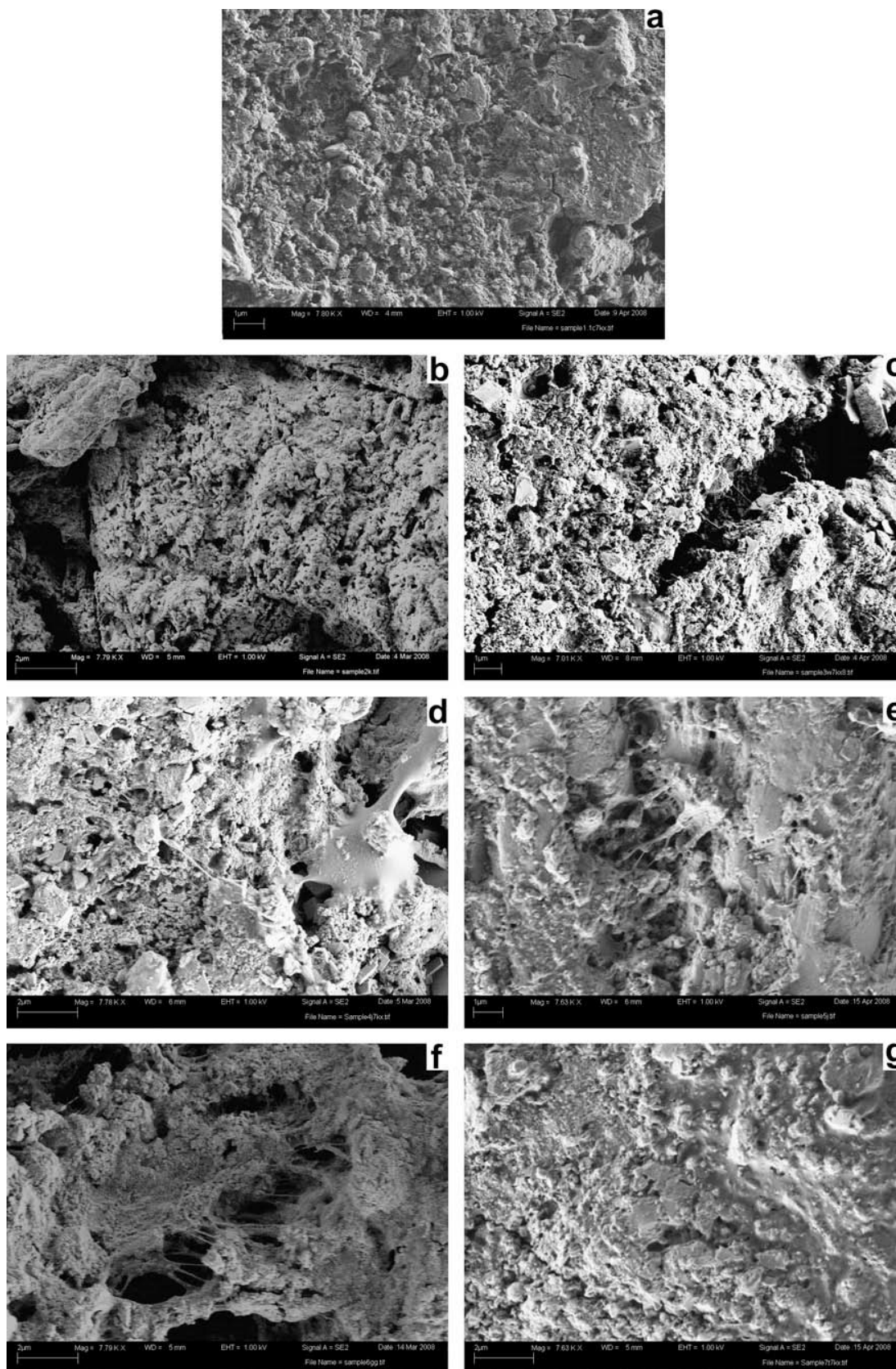
شکل ۱۲. تغییرات مقاومت خمشی یک روزه دوغاب سیمان



شکل ۱۳. تغییرات مقاومت خمشی ۲۸ روزه دوغاب سیمان

تصویر a حالتی است که ملات بدون لاتکس SBR است و یک ریز ساختار آزاد را نشان می‌دهد. در تصویر b افزودن لاتکس SBR موجب جمع‌شدگی ذرات برای تشکیل پیوندهای پلیمری می‌شود. با افزایش درصد لاتکس SBR از ۲ به ۴ درصد (تصویر c) پل‌ها و پیوندهای بسیار نازکی تشکیل می‌شود و این پیوندها با افزایش لاتکس SBR به ۶ درصد (تصویر d) قوی‌تر می‌شوند. افزایش درصد پلیمر به ۸ درصد (تصویر e) باعث نزدیک شدن پیوندهای پلیمری می‌شود. در این حالت شبکه‌های ماتریسی بین ذرات سیمان و پلیمر ایجاد می‌شود. این شبکه‌های ماتریسی با افزایش درصد لاتکس SBR تا ۱۰ و ۱۲ درصد (تصاویر f و g)، قوی‌تر و منسجم‌تر می‌شوند. همانطور که در شکل نیز مشاهده می‌شود، در تحقیق حاضر نیز بیشترین مقاومت خمشی دوغاب سیمان در ۱۰ درصد استفاده از پلیمر لاتکس SBR رخ می‌دهد. انسجام پیوندهای پلیمری بهبود چسبندگی بین ذرات شبکه پلیمری و ذرات سیمان و همچنین تقویت لایه نازک لاتکس SBR روی دانه‌های سیمان منجر به افزایش مقاومت دوغاب سیمان و بهبود عملکرد آن در برابر ترک می‌شود (Yang et al, 2009).

همانطور که در شکل ۱۲ قابل مشاهده است افزودن پلیمر لاتکس SBR به دوغاب سیمان موجب کاهش مقاومت خمشی می‌شود. این روند را در مقاومت فشاری یک روزه نیز مشاهده کردیم. گفته شد که به دلیل فرصت کم پلیمر برای تشکیل ساختارهای پلیمر-سیمانی افزودن پلیمر لاتکس SBR موجب کاهش مقاومت در سنین پایین خواهد شد. شکل ۱۳ نشان می‌دهد که افزودن لاتکس SBR در درصدهای ۰ تا ۱۰ موجب افزایش مقاومت خمشی در سنین بالا می‌شود. این در حالی است که زمان کافی برای تشکیل ساختارهای پلیمر-سیمانی مهیا بوده است. اما افزایش درصد لاتکس SBR از ۱۰ تا ۱۵ درصد موجب کاهش مقاومت خمشی می‌گردد. این اتفاق به خاطر وجود آب در پلیمر لاتکس SBR (حدود ۵۰ درصد) است. این مقدار آب در درصدهای بالای استفاده از لاتکس SBR، موجب افزایش بیش از حد نسبت آب به سیمان می‌شود و همانطور که واضح است بالا رفتن مقدار W/C منجر به کاهش مقاومت می‌شود. در شکل ۱۴ تصاویر آنالیز SEM از تحقیق آقای ینگ که در سال ۲۰۰۹ به بررسی مقاومت ملات سیمان اصلاح‌شده با لاتکس SBR در برابر نفوذ یون کلر پرداخته است، آورده شده است.



شکل ۱۴. تصاویر آنالیز SEM از ملات سیمان اصلاح شده با لاتکس SBR

۴-۳- نتایج آزمایش سیالیت دوغاب سیمان

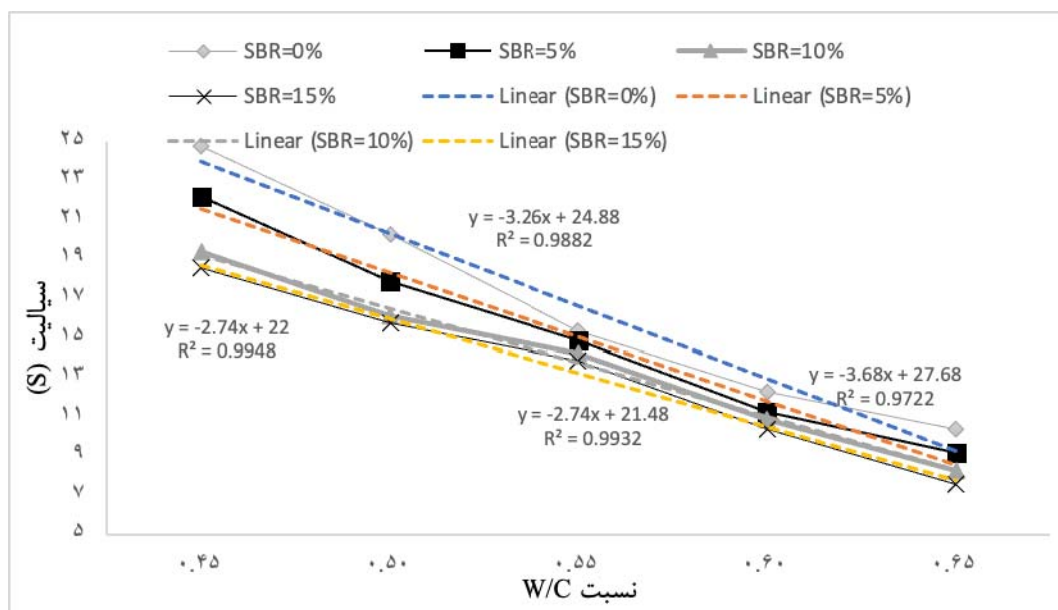
یکی از مهم‌ترین خصوصیات دوغاب سیمان برای تزریق در آسفالت متخلخل، روانی و سیالیت آن است. این آزمایش توسط قیف مارش در آزمایشگاه بتن دانشگاه یزد انجام شد. نتایج آزمایش در جدول ۱۳ آورده شده است.

جدول ۱۳. نتایج آزمایش سیالیت دوغاب سیمان

نسبت W/C	درصد لاتکس SBR			
	۰	۵	۱۰	۱۵
۰/۴۵	۲۴/۸	۲۲/۲	۱۹/۴	۱۸/۶
۰/۵	۲۰/۳	۱۷/۹	۱۶/۱	۱۵/۸
۰/۵۵	۱۵/۴	۱۴/۹	۱۴/۲	۱۳/۹
۰/۶	۱۲/۳	۱۱/۳	۱۰/۹	۱۰/۴
۰/۶۵	۱۰/۴	۹/۲	۸/۳	۷/۶

بیشتر شده است. این موضوع می‌تواند با توجه به نتایج تحقیقات گسترده در خصوص ملات‌های اصلاح‌شده با لاتکس SBR، تایید شود. استفاده از لاتکس SBR و افزایش درصد آن موجب افزایش سیالیت و بهبود کارایی دوغاب سیمان شد. بهبود سیالیت به افزایش کیفیت تزریق دوغاب سیمان در آسفالت متخلخل کمک ویژه‌ای می‌کند.

سیالیت دوغاب سیمانی توسط زمانی که صرف تخلیه قیف مارش می‌شود، سنجیده می‌شود. این به این معناست که هرچه زمان تخلیه قیف کمتر باشد، سیالیت و روانی دوغاب بیشتر است. شکل ۱۵ روند تغییرات سیالیت دوغاب سیمان متناظر با درصدهای مختلف SBR را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با افزایش نسبت W/C روانی دوغاب بیشتر شده است. از سویی با افزایش درصد لاتکس SBR در دوغاب سیالیت



شکل ۱۵. تغییرات سیالیت دوغاب سیمان

توصیه شده ۱۴-۱۰ ثانیه است. در این تحقیق برای محاسبه نسبت‌های بهینه W/C، سیالیت مناسب ۱۲ ثانیه در نظر گرفته شد. با استفاده از توابع برازش داده شده نسبت آب به سیمان بهینه برای هر درصد SBR به مقدار زیر است.

$$SBR = 0 \text{ ————— } = W/C / 0.592$$

$$SBR = 5 \text{ ————— } W/C = 0.571$$

$$SBR = 10 \text{ ————— } W/C = 0.554$$

$$SBR = 15 \text{ ————— } W/C = 0.533$$

برای ساخت نمونه‌های روسازی نیمه صلب (SRP)، ابتدا باید مقادیر بهینه نسبت آب به سیمان (W/C) در هر درصد لاتکس SBR محاسبه می‌شد. برای این کار تابع خطی بر روی نمودار تغییرات سیالیت دوغاب سیمان برازش داده شد. مقدار سیالیت

۴-۵- نتایج آزمایش مارشال

نمونه‌های روسازی نیمه‌صلب در ۳ حالت ساخته شدند.

- نمونه شاهد (آسفالت متخلخل و دوغاب سیمان معمولی و بدون لاتکس SBR)
- آسفالت متخلخل اصلاح شده با لاتکس SBR و دوغاب تزریقی معمولی (۳ نوع نمونه)
- آسفالت متخلخل معمولی و دوغاب تزریقی اصلاح شده با لاتکس SBR (۳ نوع نمونه)
- آسفالت متخلخل و دوغاب سیمان هر دو اصلاح شده با لاتکس SBR (۹ نوع نمونه)

نتایج آزمایش مارشال روی نمونه‌های روسازی نیمه‌صلب در جدول ۱۴ آورده شده است. شکل ۱۶ روند تغییرات مقاومت مارشال یک روزه نمونه‌های روسازی نیمه‌صلب را نشان می‌دهد. ابتدا نقش افزودن لاتکس SBR در قیر آسفالت متخلخل و اثر آن بر مقاومت مارشال روسازی SRP مورد بررسی قرار می‌گیرد. با افزودن لاتکس SBR به قیر و افزایش درصد آن شاهد افزایش مقاومت مارشال در نمونه‌های BxC0 هستیم. مشاهده می‌شود که مقاومت از مقدار ۱۶۴۳ تا مقدار ۱۷۱۲ کیلوگرم افزایش می‌یابد. نتایج تحقیقات گذشته نیز اثبات می‌کند که افزودن SBR موجب بهبود مقاومت مارشال و سختی نمونه آسفالتی می‌شود.

در مجموع برای بررسی خصوصیات عملکردی روسازی نیمه‌صلب به ۱۶ نوع نمونه نیاز است. نمونه‌ها در آزمایشگاه روسازی دانشگاه یزد ساخته شد (شکل ۱۵) و به مدت یک روز در معرض رطوبت عمل‌آوری شدند. برای سهولت ارائه نتایج نمونه‌ها به شکل زیر نام‌گذاری شدند.

Bx Cy

درصد لاتکس SBR در قیر با حرف x و درصد لاتکس SBR در دوغاب سیمان با y مشخص شد. پس ۱۶ نوع نمونه SRP به این ترتیب نام‌گذاری شدند.



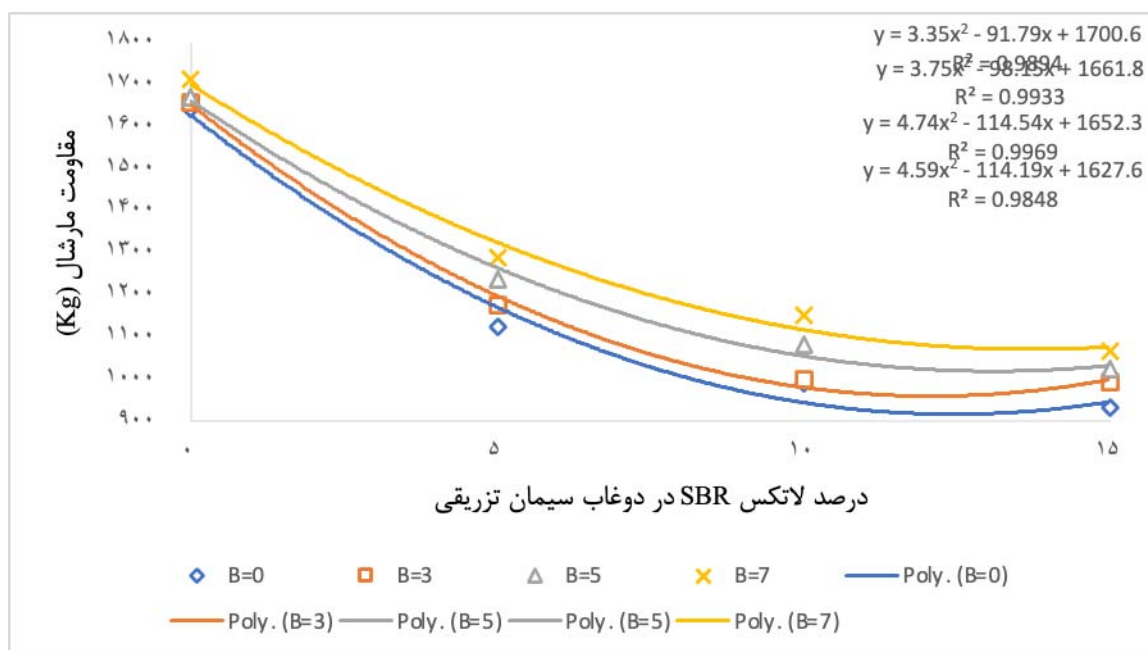
شکل ۱۶. نمونه روسازی نیمه‌صلب ساخته شده در آزمایشگاه

جدول ۱۴. نتایج آزمایش مارشال بر روی نمونه‌های SPP

نام نمونه	مقاومت مارشال (کیلوگرم)	نام نمونه	مقاومت مارشال (کیلوگرم)
BC	۱۶۴۳	BC _۰	۱۱۲۵
BC _۱	۹۹۱	BC _۳	۹۳۲
BC	۱۶۵۹	BC _۵	۱۱۷۸
BC _۱	۱۰۰۱	BC _۷	۹۹۴
BC	۱۶۷۱	BC _{۱۰}	۱۲۳۷
BC _۱	۱۰۸۳	BC _{۱۳}	۱۰۲۴
BC	۱۷۱۲	BC _{۱۵}	۱۲۹۱
BC _۱	۱۱۵۲		۱۰۶۶

بعد از آن نقش افزودن پلیمر در دوغاب سیمان و تاثیر آن بر مقاومت مارشال بررسی می‌شود. همانطور که در شکل مشخص است با افزایش درصد لاتکس SBR مقاومت مارشال نمونه SRP کاهش یافته است. این روند بسیار شبیه روند کاهش مقاومت فشاری دوغاب سیمان است. نتایج تحقیق ستیاوان در سال ۲۰۱۳ روند تغییرات شکل ۱۷ را تایید می‌کند. نتایج کار ستیاوان نشان داد که مقاومت مارشال روسازی نیمه‌صلب مستقیماً

تحت تاثیر مقاومت فشاری دوغاب سیمان تزریق‌شده است. مقاومت مارشال روسازی نیمه‌صلب بیشتر از آن‌که تحت تاثیر مقاومت برشی مخلوط آسفالت متخلخل باشد، تحت تاثیر مقاومت سنگدانه و کیفیت دوغاب تزریق‌شده درون آن است. نتایج تحقیقات سابق نشان داد که ۲۵ درصد از مقاومت مارشال روسازی نیمه‌صلب مربوط به بخش سیمانی آن است (Setyawan et al, 2013).



شکل ۱۷. تغییرات مقاومت مارشال یک روزه روسازی نیمه‌صلب

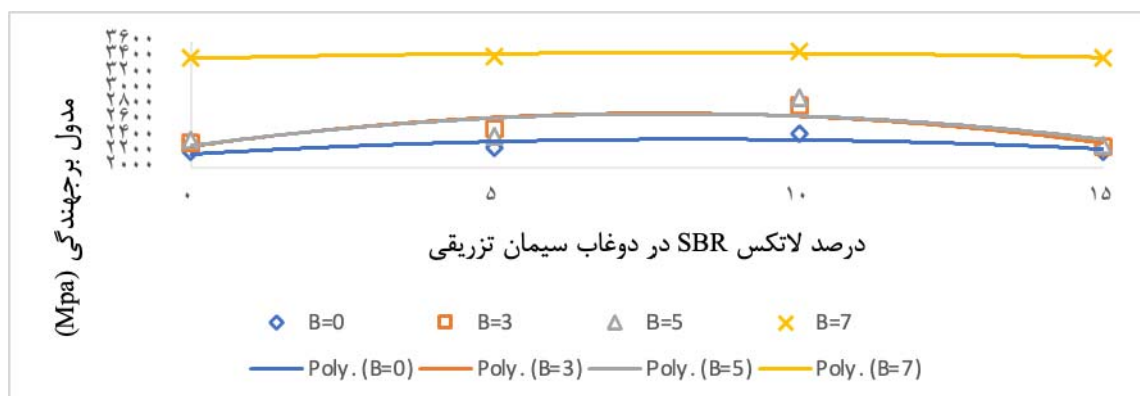
۶-۴- نتایج آزمایش مدول برجهندگی

قابل توجهی بر مقدار مدول برجهندگی روسازی نیمه صلب دارد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار SBR از ۰ تا ۷ درصد در نمونه‌های BxC0 تا ۵۴ درصد افزایش مقدار مدول برجهندگی مشاهده می‌شود. زمانی که بار محوری ضربان‌دار بر روی نمونه اعمال می‌شود، تنش‌های کششی در جهت افقی در صفحه میانی نمونه گسترش می‌یابد. از آنجا که لاتکس SBR موجب بهبود خصوصیات الاستیک و بالا بردن توانایی نمونه برای بازیابی کرنش‌ها می‌شود، بنابراین روسازی نیمه صلبی که قیر آن با لاتکس SBR اصلاح شده است مقادیر بالاتر مدول برجهندگی را نشان می‌دهد.

در این تحقیق، مدول برجهندگی نمونه‌های روسازی نیمه صلب به وسیله دستگاه UTM-14 موجود در آزمایشگاه روسازی دانشگاه یزد اندازه‌گیری شد. از جمله مواردی که با توجه به استاندارد برای دستگاه تعریف شد می‌توان به شکل موج بارگذاری هاورساین، زمان بارگذاری ۲۵۰ میلی‌ثانیه، میزان اوج بارگذاری ۳۸۰۰ نیوتن، تعداد ۵ پالس بارگذاری و مقدار پیش‌فرض ۰/۵ برای ضریب پواسون اشاره کرد. نتایج انجام آزمایش مدول برجهندگی برای ۱۶ نوع نمونه روسازی نیمه صلب پس از یک روز عمل‌آوری در جدول ۱۵ آورده شده است. همانطور که در شکل ۱۸ مشخص است لاتکس SBR تاثیر

جدول ۱۵. نتایج آزمایش مدول برجهندگی روی نمونه‌های SFP

نام نمونه	مدول برجهندگی (مگاپاسکال)	نام نمونه	مدول برجهندگی (مگاپاسکال)
BC	۲۱۹۷	BC _۰	۲۲۴۲
BC _۱	۲۴۳۶	BC _۲	۲۲۰۳
BC _۳	۲۳۱۶	BC _۴	۲۴۹۲
BC _۵	۲۷۹۵	BC _۶	۲۲۶۱
BC _۷	۲۳۵۲	BC _۸	۲۳۹۹
BC _۹	۲۸۸۳	BC _{۱۰}	۲۲۷۹
BC _{۱۱}	۳۳۹۷	BC _{۱۲}	۳۴۱۵
BC _{۱۳}	۳۴۸۴	BC _{۱۴}	۳۳۸۸



شکل ۱۸. مدول برجهندگی نمونه‌های روسازی نیمه صلب

-برهم‌کنش بین مقداری از دوغاب سیمان و سنگدانه‌ها که باعث فعال شدن سطح برخی سنگدانه‌ها می‌گردد. دوغاب سیمان باعث افزایش مدول سختی و شکنندگی روسازی نیمه‌صلب می‌شود. برای ایجاد تعادل بین صلیبیت و انعطاف‌پذیری دوغاب سیمان از افزودنی‌هایی مانند لاتکس SBR استفاده می‌شود. لاتکس SBR نوعی سورفکتانت (عامل موثر در سطح) است. این ویژگی موجب تولید حباب‌هایی هنگام اختلاط با دوغاب سیمان می‌شود. حباب‌ها ذرات سیمانی را به صورت یکنواخت در مخلوط دوغاب سیمان تجزیه می‌کنند. این امر موجب پایداری دوغاب سیمان می‌گردد.

۴-۷- نتایج آزمایش سایش کانتابرو

نمونه‌های روسازی نیمه‌صلب پس از یک روز عمل‌آوری در شرایط مرطوب در دستگاه لس‌آنجلس قرار گرفتند و پس از ۳۰۰ دور گردش درصد سایش آن‌ها نسبت به حالت اولیه اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از انجام آزمایش سایش کانتابرو در جدول ۱۶ آورده شده است.

از جهتی دیگر همانطور که در شکل قابل مشاهده است افزایش مقدار لاتکس SBR موجب افزایش مقدار مدول برجهندگی می‌گردد. این افزایش مدول برجهندگی از ۰ تا ۱۰ درصد لاتکس SBR را از چند جنبه می‌توان بررسی کرد.

اثر متقابل بین قیر و دوغاب سیمان

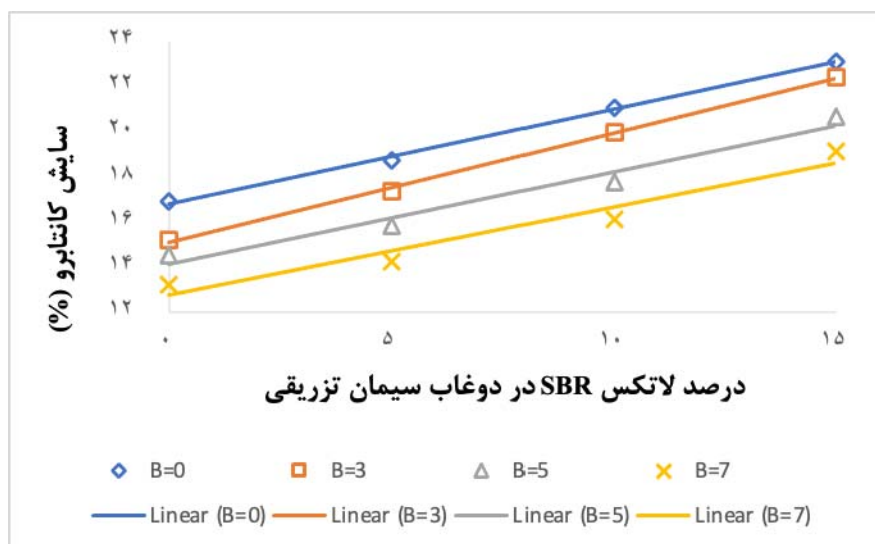
با اضافه کردن دوغاب سیمان به داخل حفره‌های مخلوط آسفالت، شبکه‌های ماتریسی تحت عنوان "انعقاد کریستالوئید" تشکیل و سخت می‌شوند. با تشکیل این شبکه‌های ماتریسی چگالی و تراکم کل مخلوط افزایش می‌یابد و اصطکاک داخلی SRP افزایش قابل‌توجهی دارد. پر شدن فضای خالی با دوغاب سیمان موجب برهم‌کنش قیر و سیمان می‌شود که این امر کاهش مقدار قیر آزاد را در پی دارد. پس در نتیجه ثبات و مقاومت روسازی نیمه‌صلب بالا می‌رود.

اثر متقابل بین دوغاب سیمان و سنگدانه‌ها

دو نوع برهم‌کنش بین دوغاب سیمان و سنگدانه‌ها وجود دارد. -ساختار شبکه‌ای که با پوشانده شدن لایه نازک قیر اطراف سنگدانه‌ها توسط دوغاب سیمان تشکیل می‌شوند.

جدول ۱۶. نتایج آزمایش سایش کانتابرو روی نمونه‌های SP

نام نمونه	سایش کانتابرو (%)	نام نمونه	سایش کانتابرو (%)
BC	۲۳/۱۲	BC _۰	۲۱/۰۶
BC _۱	۱۸/۷۳	BC _{۱۰}	۱۶/۹۱
BC	۲۲/۴۳	BC _{۲۰}	۱۹/۹۸
BC _۱	۱۷/۳۵	BC _{۳۰}	۱۵/۱۸
BC	۲۰/۶۷	BC _{۴۰}	۱۷/۷۴
BC _۱	۱۵/۸۲	BC _{۵۰}	۱۴/۴۹
BC	۱۹/۱۲	BC _{۶۰}	۱۶/۰۹
BC _۱	۱۴/۲۳	BC _{۷۰}	۱۳/۲



شکل ۱۹. تغییرات درصد سایش کانتابرو در نمونه‌های روسازی نیمه‌صلب

سیمانی به عنوان پوششی اطراف قیر آزاد روی سنگدانه‌ها تلقی می‌شوند. با ایجاد برهم‌کنش میان قیر و سیمان که در بخش قبل به آن اشاره شد اتصال میان سنگدانه‌ها قوی‌تر می‌گردد، در نتیجه مقدار سایش کانتابرو نمونه‌های نیمه‌صلب از آسفالت متخلخل بسیار کمتر است. همانطور که در شکل بالا مشخص است استفاده از لاتکس SBR در سیمان تزریقی موجب افزایش درصد سایش کانتابرو شده‌است. این امر به این دلیل است که وجود لاتکس SBR موجب به تاخیر افتادن هیدراتاسیون می‌شود که این خود باعث تضعیف چسبندگی و اتصال میان سنگدانه‌هاست.

همانطور که در شکل ۱۸ مشخص است با افزایش درصد لاتکس SBR مورد استفاده در قیر آسفالت متخلخل، درصد سایش کانتابرو نمونه‌های روسازی نیمه‌صلب کاهش یافته است. این به این معنا است که چسبندگی و قدرت باندینگ میان سنگدانه‌ها تقویت شده‌است. در واقع همانطور که از قبل به آن اشاره شد استفاده از پلیمر لاتکس SBR و بالا بردن درصد استفاده از آن موجب افزایش خاصیت الاستیک قیر و تقویت چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها می‌گردد. با پر شدن فضای خالی آسفالت متخلخل توسط دوغاب سیمان و پس از وقوع هیدراتاسیون، شبکه‌های ماتریسی کریستالی تشکیل می‌شود. این کریستال‌های سخت‌شده

۵- نتیجه‌گیری

-مقدار فضای خالی توصیه‌شده برای بهبود عملکرد دوغاب تزریقی، ۲۵-۳۰ درصد است.

-برای تامین چسبندگی لازم بین قیر و سنگدانه در آسفالت متخلخل میزان سایش در آزمایش کانتابرو نباید از ۲۵ درصد تجاوز کند.

-استفاده از افزودنی پلیمری در قیر باعث افزایش خاصیت الاستیک و مقاومت فشاری و عملکرد مناسب‌تر در برابر ترک‌های حرارتی می‌گردد، که این امر باعث بهبود عملکرد روسازی نیمه‌صلب تولید شده، می‌شود.

هدف از انجام تحقیق حاضر بررسی خصوصیات عملکردی روسازی نیمه‌صلب از جمله مقاومت مارشال و مدول برجهندگی بود. از سویی با در نظر داشتن نتایج مثبت استفاده از لاتکس SBR در قیر مخلوط آسفالتی و صنعت سیمان و بتن، هدف‌گذاری بعدی بررسی تاثیر لاتکس SBR بر خصوصیات عملکردی روسازی نیمه‌صلب در ۳ حالت استفاده بود. پس از انجام آزمایش‌ها و تحلیل و بررسی آن‌ها به کمک تحقیقات گذشته نتایج زیر حاصل شد:

-میزان فضای خالی آسفالت متخلخل مهمترین و موثرترین عامل در طراحی روسازی نیمه‌صلب است.

۵، ۱۰ و ۱۵ درصد لاتکس SBR به ترتیب ۰/۵۷۱، ۰/۵۵۴ و ۰/۵۳۳ به دست آمد.

-استفاده از لاتکس SBR در قیر آسفالت متخلخل روسازی نیمه صلب موجب افزایش مقاومت مارشال آن شد.

-استفاده از لاتکس SBR منجر به کاهش مقاومت مارشال روسازی نیمه صلب یک روز عمل آوری شد.

-استفاده از لاتکس SBR در قیر آسفالت متخلخل روسازی نیمه صلب موجب افزایش مدول برجهندگی SRP شد.

-افزودن لاتکس SBR بین مقادیر ۰ تا ۱۰ درصد در دوغاب سیمان تزریقی موجب افزایش مدول برجهندگی SRP شد.

-درصد سایش کانتابرو با استفاده از لاتکس SBR در قیر کاهش پیدا کرد.

-استفاده از لاتکس SBR در دوغاب سیمان موجب کاهش چسبندگی و افزایش درصد سایش کانتابرو شد.

-نمونه روسازی نیمه صلب B7C0 در آزمایش مقاومت مارشال، نمونه B7C10 در آزمایش مدول برجهندگی و نمونه B7C0 در آزمایش کانتابرو بهترین عملکرد را نشان دادند.

-با توجه به افزایش مقاومت فشاری دوغاب سیمان در بلند مدت و تکمیل فرآیند هیدراتاسیون سیمان، به احتمال قوی استفاده از لاتکس SBR در نمونه های روسازی نیمه صلب و عمل آوری ۲۸ روزه آن ها، نتایج مثبتی در آزمایش های مقاومت مارشال و سایش کانتابرو نشان می دهند. پس با این دیدگاه استفاده از ۷ درصد لاتکس SBR در قیر و ۱۰ درصد از آن در دوغاب سیمان (نمونه B7C10) بهترین خصوصیات عملکردی را به دنبال دارد.

-استفاده از دانه بندی درشتدانه موجب افزایش درصد تخلخل و نفوذپذیری آسفالت متخلخل می شود که این امر باعث کمک به تزریق دوغاب سیمان در داخل اسکلت نمونه خواهد شد.

-در بحث دوغاب سیمان، سیالیت، کارایی و نسبت w/c دوغاب تولید شده بیشترین تاثیر در کیفیت تزریق و پر شدن فضای خالی آسفالت متخلخل دارند.

-مقدار سیالیت توصیه شده در آزمایش قیف مارش بین ۱۰ تا ۱۴ ثانیه است.

-اثر بخشی تزریق دوغاب سیمان با استفاده از اتصال متقابل بین منافذ مخلوط، ساختار و اندازه سنگدانه ها مشخص می شود.

-درصد قیر بهینه آسفالت متخلخل با استفاده از قیر خالص، ۳/۹۷۴ به دست آمد.

-درصد قیر بهینه آسفالت متخلخل با قیر اصلاح شده با ۳، ۵ و ۷ درصد لاتکس SBR به ترتیب ۴/۰۶، ۴/۲۱ و ۴/۳۸ به دست آمد.

-استفاده از لاتکس SBR در دوغاب سیمان در کوتاه مدت (۱ روز) موجب کاهش مقاومت فشاری و در بلند مدت (۲۸ روز) پس از کاهش مقطعی از ۰ تا ۵ درصد، منجر به افزایش مقاومت فشاری از ۵ تا ۱۵ درصد می شود.

-لاتکس SBR موجب کاهش مقاومت خمشی دوغاب سیمان در کوتاه مدت و افزایش آن در بلند مدت بین مقادیر ۰ تا ۱۰ درصد می شود.

-استفاده از لاتکس SBR موجب بهبود کارایی دوغاب سیمان می شود، به طوری که سیالیت دوغاب سیمان بین مقادیر ۰ تا ۱۵ درصد افزایش قابل توجهی داشت.

-میزان W/C بهینه برای ساخت دوغاب سیمان تزریقی در آسفالت متخلخل برای ساخت روسازی نیمه صلب در مقادیر ۰،

۶- پی نوشت ها

- 1- Styrene-Butadiene Rubber
- 2- Bus Rapid Transit
- 3- Semi Rigid Pavement
- 4- Styrene-Butadiene-Styrene
- 5- Differential Scanning Calorimetry
- 6- Fourier Transform Infrared Spectra
- 7- X-Ray Photoelectron Spectroscopy
- 8- Scanning Electron Microscope

۷- مراجع

- Liu, Zhen, Xingyu Gu. and Hua Ren. (2023). Rutting prediction of asphalt pavement with semi-rigid base: Numerical modeling on laboratory to accelerated pavement testing. *Construction and Building Materials* 375, 130903.
- Liu, Zhen, Xingyu Gu. and Qiao Dong. (2024). Permanent deformation evaluation and instability prediction of semi-rigid pavement structure using accelerated pavement testing and finite element method. *Journal of Testing and Evaluation* 52, No. 1.
- Pérez-Acebo, Heriberto, Hernán Gonzalo-Orden, Daniel J. Findley, and Eduardo Rojí. (2021). Modeling the international roughness index performance on semi-rigid pavements in single carriageway roads. *Construction and Building Materials* 272, 121665.
- Setyawan. A. (2013). Assessing the compressive strength properties of semi-flexible pavements. *Procedia Engineering*, Vol. 54, 863–874.
- Sunil, S., M. Varuna, and M. S. Nagakumar. (2021). Performance evaluation of semi rigid pavement mix. *Materials Today, Proceedings* 46, 4771-4775.
- Songtao, Lv, Jiang Yuan, Xinghai Peng, Naitian Zhang, Hongfu Liu, and Xinzi Luo. (2021). A structural design for semi-rigid base asphalt pavement based on modulus optimization. *Construction and Building Materials* 302, 124216.
- Wang et al. M., (2016). Research on the mechanism of polymer latex modified cement. *Construction and Building Materials*, Vol. 111. 710–718.
- Yang. Z., X. Shi, A. T. Creighton, and M. M. Peterson, (2009). Effect of styrene-butadiene rubber latex on the chloride permeability and microstructure of Portland cement mortar. *Construction and Building Materials*, 23, No. 6. 2283–2290.
- Zoorob .S. E., A. Collop, and S. F. Brown, (2002). Performance of Bituminous and Hydraulic materials in Pavements. *Proceedings of the Fourth European Symposium*, Vol.5, 151-164.
- Zhao, Zifeng, Ling Xu, Xianrui Li, Xin Guan, and Feipeng Xiao. (2023). Comparative analysis of pavement performance characteristics of flexible, semi-flexible and rigid pavement based on accelerated pavement tester. *Construction and Building Materials* 387, 131672.
- بسپاران، (۱۳۹۴). استایرن بیوتادین رابر. مرجع دانش و فناوری پلیمر.
- جایروند، کوروش، (۱۳۸۳). معیارها و ضوابط طرح اختلاط آسفالت متخلخل. دومین همایش قیر و آسفالت ایران، تهران، موسسه قیر و آسفالت ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، جلد ۴۳، ۱-۱۴.
- Anderton. G. L., (2000). Engineering Properties of Resin Modified Pavement (RMP) for Mechanistic Design .Final no. March. U.S. Army Engineer Research and Development Center.
- Ahlich .R. C. and G. L. Anderton (1991). Evaluation of Resin-Modified Paving Process. *Procedia Center*, Vol.48, 32–41.
- ASTM D6910 (2009). Standard Test Method for Marsh Funnel Viscosity of Clay Construction Slurries (Withdrawn 2018). *ASTM International*, West Conshohocken.
- Bhogayata C. and N. K. Arora (2018). Workability, strength, and durability of concrete containing recycled plastic fibers and styrene-butadiene rubber latex. *Construction and Building Materials*, Vol. 180, 382–395.
- Cai. J., J. Pei, Q. Luo, J. Zhang, R. Li, and X. Chen (2017). Comprehensive service properties evaluation of composite grouting materials with high-performance cement paste for semi-flexible pavement. *Construction Building Material*, Vol. 153, 544–556.
- Hou. S., T. Xu, and K. Huang (2017). Aggregate Gradation Influence on Grouting Results and Mix Design of Asphalt Mixture Skeleton for Semi-Flexible Pavement. *Journal Test and Evaluation*, Vol. 45, No. 2, 19-27.
- Husain. N. M., M. R. Karim, H. B. Mahmud, and S. Koting (2014). Effects of aggregate gradation on the physical properties of semiflexible pavement. *Advance Material Science Engineering*, Vol. 201, 1-14.
- J. W. B. and B. J. Lee (2017). Development of a Semirigid Pavement Incorporating Ultrarapid Hardening Cement and Chemical Admixtures for Cement Grouts. *Advance Material Science Engineering*, Vol.3, 1–9.

Evaluation of the Styrene Butadiene Rubber Latex Effect on the Performance Characteristics of Semi Rigid Pavement

*Hamed Khani Sanij, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University,
Yazd, Iran.*

*Rezvan Babagoli, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Science
and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran.*

*Aliasghar Zartoshti ilbeygi, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Yazd University,
Yazd, Iran.*

*Mohammad Mehdi Khabiri, Associate Professor, Department of Civil Engineering,
Yazd University, Yazd, Iran.*

E-mail: rezvan.babagoli1987@gmail.com

Received: January 2025- Accepted: April 2025

ABSTRACT

Road construction are usually done with three types of flexible, rigid, and semi rigid pavements. Despite all the advantages of these two types of flexible and rigid pavement, they have also some disadvantages. However, the new type of pavement, which is the main subject of this thesis, has been used in recent years. This pavement is known as the semi-rigid pavement (SRP), where the surface consists of semi-flexible materials that can provide some of the best features of flexible and rigid pavement. Semi-rigid pavement, generally known as a grouted macadam, includes an open-graded asphalt structure with 25 to 35 percent voids in which a cementations slurry is used. The main purpose of this thesis is to investigate the effect of SBR latex on the performance characteristics of semi-rigid pavement. To do this, the porous asphalt design was first required. The optimum bitumen content of porous asphalt was calculated to be 3.974 %. The next step was to determine the properties of the cement slurry and to calculate the optimal W/C ratio. Sixteen types of semi-rigid pavements specimens were made in Marshall moludus and cement slurry injection was performed. Then, the Marshall Stability Test, the resilient modulus and Cantabro loss were carried out. The results showed that the use of latex SBR in bitumen porous asphalt improves the properties of semi-rigid pavement. The use of SBR latex in cement slurry increased the resilient modulus both in the long time and in the short time, but reduced the amount of marshal stability and adhesion between aggregates in the short time.

Keywords: Semi-Rigid Pavement, Porous Asphalt Mixture, Cement Slurry, SBR Latex, Performance Tests