

ارزیابی آزمایشگاهی جایگزینی مصالح سنگی معمولی با مصالح خرده شیشه با رویکرد مقابله با آلودگی زیست محیطی

مقاله علمی - پژوهشی

آذین چیت سازان*، گروه ارزیابی و آمایش سرزمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Chitsazan.az@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸

صفحه ۴۹۹-۴۸۹

چکیده

استفاده از سنگدانه شیشه‌ای در مخلوط آسفالت، روشی مؤثر در مقابله با آلودگی زیست محیطی است. در این پژوهش، به جای قیر معمولی، از قیر اپوکسی استفاده شد. آزمایشات برای بررسی تأثیر سنگدانه شیشه‌ای بر عملکرد مخلوط آسفالت-اپوکسی نسبت به آسفالت با ماده نرم کننده کوپلیمر استایرن-بوتادین-استایرن^۱ (SBS) انجام شد. نتایج نشان داد که برای دو نوع مخلوط آسفالت، درصد بهینه افزودنی، فضای خالی و چگالی با افزایش درصد سنگدانه شیشه‌ای کاهش می‌یابد. مقاومت مارشال، مقاومت مارشال اشباع، نسبت استحکام کششی، مقاومت به شیارشدگی و ویژگی‌های دمای پایین مخلوط آسفالت-اپوکسی تحت تأثیر کمی درصد سنگدانه شیشه‌ای قرار می‌گیرند و مقادیر آنها با آسفالت-SBS اصلاح شده متفاوت است. علاوه بر این، مخلوط آسفالت-اپوکسی با سنگدانه شیشه‌ای دارای ویژگی‌های خوبی در زمینه مقاومت به سایش است. بنابراین، در مخلوط آسفالت-اپوکسی، درصد بالای سنگدانه شیشه‌ای می‌تواند بدون نیاز به ماده ضد عریان شدگی و با کاهش آلودگی زیست محیطی به عملکرد برتری دست یابد.

واژه‌های کلیدی: قیر اپوکسی، مخلوط آسفالتی، سنگدانه شیشه‌ای، تست آزمایشگاهی

۱-مقدمه

است. (Su and Chen 2002). اما چسبندگی پایین بین شیشه و آسفالت معمولی، مانند آسفالت با ماده نرم‌کننده کوپلیمر استایرن-بوتادین-استایرن (SBS)، باعث خشک شدن و جدا شدن فیلم آسفالتی از سطح سنگدانه شیشه‌ای تحت شرایط رطوبت و بار خودرو می‌شود. این خطا باعث تضعیف عملکرد مخلوط و کاهش مقاومت مارشال، مقاومت دینامیکی و مقاومت به خمش مخلوط می‌شود (Su and Chen 2002; Lu et al. 2011). برخی راهکارها برای بهبود چسبندگی بین سنگدانه شیشه‌ای و آسفالت اتخاذ شده است، مانند مخلوط شدن با سیمان، استفاده از مواد ضد عریان شدگی شیمیایی یا اضافه کردن مواد زیکوسویل مبتنی بر فناوری نانو (Maupin 1997; Ziari et al. Behbahani et al. 2015). این اقدامات می‌توانند چسبندگی بین سنگدانه شیشه‌ای و آسفالت معمولی را بهبود بخشند، اما نمی‌توانند این مشکل را به‌طور کامل حل کنند. لذا برای مخلوط آسفالتی سنتی

استفاده از مواد جامد زائد شیشه‌ای، مانند ضایعات ساختمانی شیشه یا ظروف شیشه‌ای خانگی، مشکلات زیست محیطی شدیدی را ایجاد کرده است. استفاده از مواد جامد شیشه‌ای در مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند آلودگی زیست محیطی را کاهش دهد و نیازهای سازه‌های ساختمانی و پوشش‌های جاده‌ای را برطرف کند. (Tam and Tam 2006) علاوه بر این، استفاده از مواد جامد شیشه‌ای می‌تواند دسترسی به سنگدانه‌های جاده را نیز افزایش دهد. (Huang et al. 2007). سنگدانه شیشه‌ای به دلیل زاویه‌دار بودن، می‌تواند به دلیل اصطکاک داخلی ایجاد شده، مدول سختی و مقاومت به خمش مخلوط آسفالتی را افزایش دهد. (Arabani 2011; Arabani et al. 2014). مخلوط آسفالتی حاوی سنگدانه شیشه‌ای، به نام مخلوط گلاسفالت شناخته می‌شود که دارای نفوذپذیری کم، ضریب اصطکاک بیشتر و ویژگی‌های خوبی در زمینه انعکاس نور برای ایمنی ترافیک و کاهش مصرف انرژی

بین آسفالت اپوکسی و آسفالت اصلاح شده با SBS بررسی شود. هدف این تحقیق ارزیابی عملکرد مکانیکی مخلوط آسفالت اپوکسی حاوی درصد‌های مختلف سنگدانه شیشه‌ای در مقایسه با آسفالت اصلاح شده با SBS ترموپلاستیک بوده است و تأثیر سنگدانه شیشه‌ای بر دو مخلوط و مزایای مخلوط آسفالت اپوکسی گرماشده با درصد بالای سنگدانه شیشه‌ای را بررسی کند. علاوه بر این، هدف دیگر بررسی عملکرد اصطکاک این مخلوط گلاسفالتهای گبود و ایمنی رانندگی این مخلوط بررسی شد.

۲- مواد و آماده سازی نمونه‌ها

مواد مورد استفاده در این تحقیق شامل آسفالت اپوکسی و آسفالت اصلاح شده با SBS، سنگدانه شیشه‌ای و سنگدانه بازالتهای می‌باشد.

۲-۱- آسفالت اپوکسی و قیر اصلاح شده با SBS

محصول آسفالت اپوکسی شامل دو جزء، کورر و رزین اپوکسی می‌باشد. وزن معادل اپوکسید رزین اپوکسی ۱۹۶ گرم بر مولکول است و کورر شامل آسفالت، اسید دی کربوکسیلیک و عامل عمل آوری آنیدراید است. نسبت پیشنهادی توسط تامین کننده برای رزین اپوکسی به کورر ۱ به ۳ است. دو جزء آسفالت اپوکسی باید در جای جداگانه نگهداری شوند و در هنگام استفاده، بایستی با توجه به نسبت تعیین شده، خوب مخلوط شوند. فرآیند عمل آوری پیشنهادی در آزمایشگاه برای این ماده در دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۴ ساعت است. پس از عمل آوری، آسفالت اپوکسی می‌تواند به یک ماده ترموستات تبدیل شود که با آسفالت معمولی مانند آسفالت تغییر یافته با SBS متفاوت است. روش‌های آزمایش دقیق برای بررسی عملکرد آن نیاز است و نتایج آن در جدول ۱ آمده است. برای مقایسه با آسفالت اپوکسی، آسفالت تغییر یافته با SBS در آزمایشگاه تهیه شده است و نتایج آزمایش در جدول ۲ ارائه شده است.

درصد مناسب سنگدانه شیشه‌ای معمولاً کمتر از ۱۵٪ طراحی می‌شود و اندازه ذرات سنگدانه شیشه‌ای توصیه می‌شود که کمتر از ۴٫۷۵ میلی‌متر باشد تا اطمینان حاصل شود که عملکرد مخلوط، الزامات پوشش جاده را برآورده می‌کند (Su and Chen 2002; Androjić and Dimter 2014). بر این، آسفالت معمولی باعث حرکت بیشتر سنگدانه شیشه‌ای در مخلوط در دمای بالا می‌شود، که باعث بروز لبه‌های تیز سنگدانه شیشه‌ای در خارج از روسازی جاده می‌شود. لبه‌ها یا گوشه‌های تیز بیانگر خطری برای لاستیک‌های خودرو یا عابران پیاده هستند (Wu et al. 2004). بنابراین، استفاده از مخلوط گلاسفالتهای برای استفاده در لایه پایین روسازی جاده توصیه می‌شود که ممکن است مصرف گسترده‌تر مواد جامد شیشه‌ای در مهندسی جاده را محدود کند. در این تحقیق، آسفالت اپوکسی گرمادیده شده به عنوان قیر برای تهیه مخلوط گلاسفالتهای استفاده شد. برخلاف آسفالت معمولی یا آسفالت اصلاح شده، آسفالت اپوکسی از رزین اپوکسی به عنوان ماده نرم کننده استفاده می‌کند تا با واکنش تقاطع شیمیایی، ساختار شبکه‌ای فضایی را در قیر ایجاد کند. در حال حاضر، مواد گرمادید شده اپوکسی در پوشش پل‌های فولادی یا بتنی استفاده می‌شوند (Huang et al. 2003; Lu and Bors 2015). بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که مخلوط آسفالت اپوکسی دارای دوام عالی، پایداری در دمای بالا، مقاومت به خستگی و پایداری در برابر رطوبت است (Qian and Lu 2015; Bocci et al. 2015; Min et al. 2017). حال، این مطالعات عمدتاً بر روی مخلوط‌های تهیه شده با سنگدانه معدنی، مانند سنگدانه بازالتهای یا سنگدانه آهک، تمرکز کرده‌اند (Qian and Lu 2015). اما تحقیقات اندکی به رفتار مخلوط‌های حاوی سنگدانه شیشه‌ای پرداخته‌اند. می‌توان انتظار داشت که آسفالت اپوکسی باعث بهبود ضعف چسبندگی بین سنگدانه‌های شیشه‌ای و قیر شود و از آشکار شدن گوشه‌های تیز در شرایط دمای بالا جلوگیری کند. در این تحقیق، آزمایشاتی روی مخلوط‌های آسفالت اپوکسی با درصد‌های مختلف سنگدانه شیشه‌ای انجام شده است تا تأثیر سنگدانه شیشه‌ای بر عملکرد مخلوط‌ها بررسی شود و تفاوت

جدول ۱. خصوصیات قیر اپوکسی

نتیجه	خصوصیت
۱٫۹۵	مقاومت کششی
۲۹۵	شکست در اثر افزایش طول
-۲۰	دمای تغییر شکل در اثر گرما
۷۰	زمان سیدن به ویسکوزیته ۱ پاسکال ثانیه

جدول ۲. خصوصیات قیر حاوی SBS

نتیجه	خصوصیت
۶۴	درجه نفوذ
۶۸	نقطه نرمی
۱۶۲	شکل پذیری
۱,۴۵	ویسکوزیته

۲-۲- سنگدانه شیشه و دانه بندی

ظاهری سنگدانه شیشه‌ای ۲,۴۹۳ کیلوگرم بر متر مکعب بوده است. میانگین مقدار خردشدگی سنگدانه شیشه‌ای ۴۶,۶٪ بوده است.

سنگدانه شیشه‌ای، از شیشه‌های شکسته تهیه شده است تا لبه‌ها و گوشه‌های منظم (شکل ۱) بدست آید. قبل از استفاده، پلاستیک، فلزات و سایر آلاینده‌ها حذف شده‌اند. چگالی

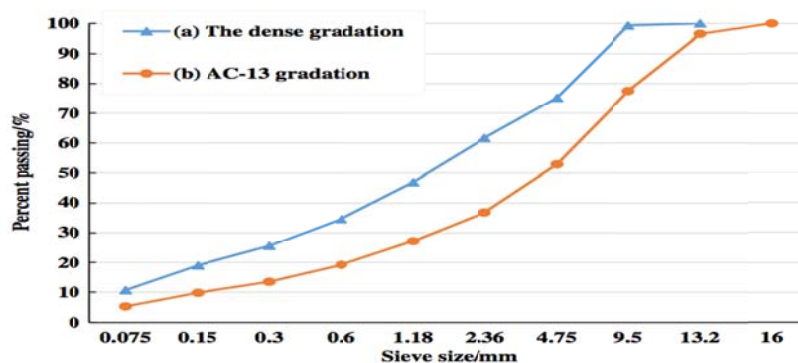


شکل ۱. نمونه های سنگدانه شیشه با اندازه ذرات در بازه: الف) ۲/۳۶-۱/۱۸ میلی‌متر ب) ۴/۷۵-۲/۳۶ میلی‌متر. ج) ۹/۵-۴/۷۵ میلی‌متر

۳-۲- دانه بندی مصالح سنگی

به ۵-۶ کیلونیوتن برسد، کمتر از مقاومت مارشال مخلوط‌های آسفالت معمولی، که نشان می‌دهد که جاده‌ای که با استفاده از مخلوط با دانه‌بندی متراکم ساخته می‌شود، نمی‌تواند به زودی به‌روی ترافیک باز شود. (Huang et al. 2003)

دانه‌بندی پیوسته نشان داده شده در شکل ۲ الف) برای مخلوط آسفالت اپوکسی مناسب است. با این حال، مقاومت مارشال مخلوط آسفالت اپوکسی بدون عمل آوری (با تهیه تازه و قبل از عمل آوری در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت در آزمایشگاه) با استفاده از چنین دانه‌بندی تنها می‌تواند



(۲) سنگدانه‌های معدنی با اندازه ۲,۳۶ تا ۴,۷۵ میلی‌متر به طور کامل با سنگدانه شیشه‌ای جایگزین می‌شوند که ۱۶٪ از وزن کل سنگدانه را تشکیل می‌دهد؛ (۳) سنگدانه‌های معدنی با اندازه ۱,۱۸ تا ۲,۳۶ میلی‌متر و ۲,۳۶ تا ۴,۷۵ میلی‌متر به طور کامل با سنگدانه شیشه‌ای جایگزین می‌شوند که ۲۶٪ از وزن کل سنگدانه را تشکیل می‌دهد؛ و (۴) سنگدانه‌های معدنی با اندازه‌های ۱,۱۸ تا ۲,۳۶ میلی‌متر، ۲,۳۶ تا ۴,۷۵ میلی‌متر و ۴,۷۵ تا ۹,۵ میلی‌متر به طور کامل با سنگدانه شیشه‌ای جایگزین می‌شوند که ۵۰٪ از وزن کل سنگدانه را تشکیل می‌دهد. به ترتیب، درصد سنگدانه شیشه‌ای در مخلوط ۰٪، ۱۶٪، ۲۶٪ و ۵۰٪ است. جزئیات طرح اجرایی فوق در جدول ۳ آورده شده است.

در این تحقیق، یک دانه بندی متراکم پیوسته (2AC-13) که در شکل ۲ (ب) نشان داده شده است، به کار گرفته شد. سنگدانه خرد و نازک هر دو از بازالت و پودر معدنی از سنگ آهک استفاده شده‌اند. آزمایشات فوق نشان داد که پایداری مارشال مخلوط آسفالت اپوکسی بدون عمل آوری با دانه بندی متراکم پیوسته (AC-13) می‌تواند بیش از ۸,۰ کیلونیوتن باشد که کافی است برای مقاومت در برابر بار وسایل نقلیه و می‌تواند در کوتاه‌ترین زمان ممکن به ترافیک باز شود. سنگدانه شیشه‌ای با وزن مساوی به جای سنگدانه‌های معدنی با اندازه‌های ۱,۱۸ تا ۲,۳۶ میلی‌متر، ۲,۳۶ تا ۴,۷۵ میلی‌متر و ۴,۷۵ تا ۹,۵ میلی‌متر بدون تغییر در دانه بندی مخلوط انتخاب شدند. جزئیات طرح اجرایی به شرح زیر است: (۱) سنگدانه معدنی در مخلوط توسط سنگدانه شیشه‌ای جایگزین نمی‌شود؛

جدول ۳. درصد مصالح سنگی و شیشه در هر یک از بازه‌های اندازه ذرات

درصد مصالح شیشه‌ای (%)									
بازه اندازه مصالح		۰		۱۶		۲۶		۵۰	
سنگدانه معدنی	شیشه	سنگدانه معدنی	شیشه	سنگدانه معدنی	شیشه	سنگدانه معدنی	شیشه	سنگدانه معدنی	شیشه
۱.۱۸-۲.۳۶ میلی‌متر	۹,۷	۰	۹,۷	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰
۲.۳۶-۴.۷۵ میلی‌متر	۱۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۶
۴.۷۵-۹.۵ میلی‌متر	۲۴,۶	۰	۲۴,۶	۰	۰	۲۴,۶	۰	۰	۲۵
مجموع	۵۰,۳	۰	۳۴,۳	۰	۰	۲۴,۶	۰	۰	۵۰

۲-۴- آماده سازی نمونه

در آماده‌سازی نمونه، تفاوت‌های قابل توجهی بین مخلوط آسفالت اپوکسی و مخلوط آسفالت SBS وجود دارد. برای مخلوط آسفالت اپوکسی، دو قسمت اپوکسی قیر با نسبت ۱:۳ در دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد مخلوط شده و سپس به سنگدانه‌ها اضافه شده‌اند، که در دمای تقریباً ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد پیش‌گرم شده‌اند. پس از ۳۰ ثانیه مخلوط کردن، فیبر معدنی به مخلوط اضافه شده و تا زمانی که مخلوط به‌طور یکنواخت پوشش داده شود، مخلوط می‌شود. این نیمه تولیدی در دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه قرار داده شده و سپس متراکم شده تا نمونه‌های مارشال یا نمونه‌های آزمایش شیارشدگی به دست آید. نمونه‌های آماده شده به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد عمل آوری شده و سپس به دمای اتاق خنک شده‌اند. برای آماده‌سازی نمونه آسفالت SBS، قیر و سنگدانه‌ها به ترتیب در دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد و ۱۸۰ درجه سانتیگراد گرم شده‌اند.

۳- برنامه آزمایشگاهی

پس از آماده‌سازی نمونه‌های آسفالت اپوکسی و آسفالت-SBS اصلاح شده به‌طور جداگانه، ویژگی‌های مخلوط که برای روسازی حائز اهمیت هستند شامل ویژگی‌های مکانیکی (پایداری مارشال، عملکرد مقاومت به رطوبت، عملکرد مقاومت در برابر شیارشدگی و عملکرد در دمای پایین) و ویژگی‌های عملکردی (ویژگی‌های اصطکاکی و ویژگی‌های بازتابی) سپس ارزیابی شدند. جدول ۴ ماتریس آزمایشی برنامه تجربی را نشان می‌دهد. برای هر آزمایش سه تکرار در نظر گرفته شد. برخی آزمایش‌ها برای مخلوط آسفالت-SBS اصلاح شده توسعه داده نشده‌اند زیرا در زمینه‌های مرتبط بسیاری از مطالعات مشابه انجام شده است (Song et al. 2011).

۳-۱- مقاومت مارشال

برای بررسی تأثیر سنگدانه شیشه‌ای بر خصوصیات مقاومت و حجمی مخلوط، آزمایش‌های مارشال شامل پایداری مارشال (MS3)، جریان، چگالی و درصد حجمی هوا، برای مخلوط آسفالت اپوکسی و مخلوط آسفالت-SBS اصلاح شده در هر درصد قیر بهینه (OBC^4) انجام شد. این آزمایش‌ها با استفاده از استاندارد (ASTM 2015) ASTM D6927 انجام شدند. قبل از آزمایش، نمونه‌های مارشال آماده شده در یک حمام آب در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۴۰ دقیقه خیس‌مانده شدند.

۳-۲- آزمایش حساسیت رطوبتی

در این پژوهش، آزمایش مارشال اشباع و آزمایش شکست ذوب-انجماد برای بررسی مقاومت در برابر رطوبت مخلوط آسفالت اپوکسی و مخلوط آسفالت-SBS اصلاح شده انجام شدند.

۳-۲-۱- آزمایش مقاومت مارشال اشباع

برای ارزیابی تأثیر رطوبت بلندمدت بر دو نوع مخلوط، آزمایش مقاومت مارشال اشباع با رعایت استاندارد ASTM (2015) ASTM D6927 انجام شد. پایداری رطوبتی مخلوط، با استفاده از نسبت پایداری مارشال (MSR^5) محاسبه شده به طوری که طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود قابل شناسایی است:

$$MSR = \frac{M_s}{M_d} \times 100\% \quad (1)$$

به ترتیب میانگین پایداری سه M_s و M_d در این معادله، نمونه غوطه ور شده در حمام آب با دمای ۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۴۸ ساعت و ۴۰ دقیقه هستند کیلونیوتن. آزمایش مقاومت مارشال اشباع نشان می‌دهد که پایداری مخلوط آسفالت اپوکسی با افزایش زمان اشباع افزایش می‌یابد، برخلاف مخلوط آسفالت معمولی. دلیل اصلی این موضوع این است که

(۲)

$$TSR = \frac{RT_2}{RT_1}$$

در این رابطه، RT_1 و RT_2 به ترتیب میانگین استحکام کششی نمونه‌های خشک (بدون شرایط خاص) و اشباع شده هستند (مگا پاسکال).

دما در طی اشباع باعث تشکیل و پخت شدن مخلوط آسفالت اپوکسی می‌شود و قدرت مخلوط را افزایش می‌دهد. برای حذف تأثیر دما در طی غوطه ور شدن، آزمایش پایداری مارشال اصلاح شده طراحی شد تا پایداری رطوبتی مخلوط آسفالت اپوکسی شناسایی شود. در این آزمایش، همان مجموعه نمونه‌ها با غشای پلی‌اتیلنی محکم شد و در جعبه حمام آب با دمای ۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۴۸ ساعت خیس‌مانده شدند. برای MSR_m محاسبه نسبت پایداری مارشال اصلاح شده از رابطه (۲) استفاده شد.

در این رابطه، M_s میانگین پایداری سه نمونه خیس‌مانده شده در حمام آب با دمای ۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۴۸ ساعت است و M_t میانگین پایداری سه نمونه محکم شده با غشای پلی‌اتیلنی در حمام آب با دمای ۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۴۸ ساعت است.

۳-۲-۲- آزمایش شکست ذوب-انجماد

آزمایش شکست انجماد-ذوب نیز برای بررسی مقاومت در برابر رطوبت دو نوع مخلوط با رعایت استاندارد ASTM (2014a) ASTM D4867 انجام شد. نمونه‌های مارشال آماده شده با ۵۰ ضربه در هر طرف در دو گروه تقسیم شدند. گروه اول به صورت خشک (بدون شرایط خاص) در دمای اتاق قرار گرفتند و گروه دوم ابتدا در آب غوطه ور شدند (تحت شرایط اشباع آب واکيومی ۷۰ کیلو پاسکال یا ۵۲۵ میلی‌متر جیوه حدود ۵ دقیقه)، سپس در دمای منفی ۱۸ درجه سانتیگراد به مدت ۱۶ ساعت منجمد شدند و سپس در آب غوطه ور شدند (۲۴ ساعت در حمام آب با دمای ۶۰ درجه سانتیگراد). قبل از آزمایش، نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در حمام آب در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد خیس‌مانده شدند. نرخ بارگذاری دستگاه آزمایش ۵۰ میلی‌متر در دقیقه بود. نسبت استحکام کششی (TSR^6) با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد:

۳-۳- آزمایش شیارشدگی

۵ ساعت تقویت شد. سپس آزمایش شیارشدگی با استفاده از یک لاستیک جامد بر روی نمونه دال در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۶۰ دقیقه انجام شد. فشار تماس ۰,۷ مگاپاسکال و سرعت لاستیک ۴۲ عبور در دقیقه بود. برای محاسبه پایداری دینامیکی از رابطه (۳) استفاده شد.

$$DS = \frac{(t_1 - t_2) \times N}{d_2 - d_1} \times C_1 \times C_2 \quad (3)$$

برای بررسی عملکرد در دمای بالا دو نوع مخلوط با مصالح شیشه‌ای با استفاده از پایداری دینامیکی در آزمایش شیارشدگی انجام شد. دال تخت با ابعاد ۳۰۰ میلی‌متر در عرض و ۳۰۰ میلی‌متر در طول و ۵۰ میلی‌متر در ضخامت ساخته شد. قبل از آزمایش شیارشدگی، دال در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد به مدت (۳)

۳-۴- آزمایش اصطکاک پاندول انگلیسی

حاصل پس از سطح محکم‌سازی، باید طبق روش تهیه نمونه، تقویت شوند. آزمایش اصطکاک پاندول برای ارزیابی مقادیر شماره پاندول بریتانیایی (BPN^7) نمونه‌های سطح محکم‌نشده و سطح محکم‌سازی شده با رعایت استاندارد ASTM E303 (ASTM 2013a) انجام شد. دمای آزمایش ۲۰ درجه سانتیگراد بود. نرخ از دست دادن شماره پاندول برای مشخص کردن تأثیر سطح محکم‌سازی با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شد.

$$Loss\ rate = \frac{(BPN_b - BPN_p)}{BPN_b} \quad (4)$$

سطح صاف مصالح شیشه‌ای ممکن است منجر به کاهش خواص اصطکاکی مخلوط شود. این کاهش هنگامی افزایش می‌یابد که ناحیه پوششی مصالح شیشه‌ای لایه بندی مواد روی سطح آن کندر زیر بار خودرویی جدا شود و سطح بیشتری از مصالح شیشه‌ای بر روی سطح مخلوط فعال شود. در این تحقیق، تری‌کلرواتیلن برای سطح محکم سازی نمونه‌ها به کار رفت تا شرایط حداکثری سطح مخلوط تحت بار خودرو شبیه‌سازی شود. برای مخلوط اپوکسی-آسفالت، نمونه‌های (۴)

۴- بحث و نتایج

۴-۱- آزمایش مارشال

چگالی دو مخلوط به همان روند پیروی می‌کند. زیرا تفاوت چشمگیری در تهیه نمونه‌ها وجود ندارد. به دلیل داشتن خواص حرارتی شبکه‌ای، مخلوط اپوکسی-آسفالت باید قبل از رسیدن ویسکوزیته سیستم اپوکسی-آسفالت به ۱۰۰۰ میلی‌پاسکال ثانیه مخلوط و فشرده شود تا مخلوط تازه دارای روانی مناسب باشد. این روش تهیه مخلوط مشابه مخلوط آسفالت با افزودنی SBS است. علاوه بر این، ویسکوزیته اپوکسی-آسفالت در حین مخلوط و فشرده‌سازی، کمتر از آسفالت با افزودنی SBS است که به این معناست که برای پر کردن فضاهای خالی بین مصالح و کاهش اصطکاک بین مصالح، باید مقدار بیشتری از پوشش مورد نیاز باشد. این پدیده باعث می‌شود که درصد بهینه آسفالت در مخلوط اپوکسی-آسفالت کمی بیشتر از آسفالت با افزودنی SBS باشد. در مقایسه با اپوکسی-آسفالت، مقاومت مارشال مخلوط آسفالت با افزودنی SBS به حساسیت بیشتری نسبت به درصد مصالح شیشه‌ای وابسته است. به عنوان مثال، مقاومت مارشال مخلوط اپوکسی-آسفالت با درصد ۵۰٪ مصالح شیشه‌ای ۹۷,۵۵٪

نتایج آزمایش مارشال در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است. مشخص شد که درصد بهینه‌ی پوشش دو نوع مخلوط با افزایش درصد مصالح شیشه‌ای کاهش می‌یابد. دلیل اصلی این کاهش می‌تواند این باشد که سطح مصالح شیشه‌ای چگال و صاف است و می‌تواند منجر به کاهش جذب پوشش مصالح شیشه‌ای نسبت به مصالح بازالت شود. هر چه درصد مصالح شیشه‌ای بیشتر باشد، کمتر پوشش جذب می‌شود و درصد پوشش بهینه کاهش می‌یابد. این روند در مورد درصد بهینه پوشش، مطابق با یافته‌های سو و چن (۲۰۰۲) است. مقادیر متوسط شکست مصالح بازالتی و شیشه‌ای به ترتیب ۲۴,۷٪ و ۴۶,۶٪ بودند که با استفاده از آزمایش شکست مصالح خرد انجام شد. این مقادیر نشان می‌دهند که مقاومت مصالح شیشه‌ای به مراتب کمتر از مصالح بازالتی است. به همین دلیل، مصالح شیشه‌ای می‌تواند خرد شده و برای پر کردن فضاهای خالی در مرحله تهیه نمونه، استفاده شود که به کاهش درصد حفره‌های هوایی مخلوط منجر می‌شود. این روند نیز در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده است. در کل، درصد حفره‌های هوایی یا

مقاومت مخلوط با درصد صفر مصالح شیشه‌ای است، اما این درصد برای مخلوط آسفالت با افزودنی SBS به ۶۵٫۶۷٪ کاهش می‌یابد. اختلاف این مقادیر می‌تواند به دلیل این باشد که اپوکسی-آسفالت دارای چسبندگی بهتر بین پوشش و مصالح شیشه‌ای نسبت به آسفالت با افزودنی SBS است.

جدول ۴. نتایج مارشال مخلوط حاوی قیر اپوکسی

روانی	مقاومت مارشال	وزن مخصوص	درصد هوا	درصد بهینه قیر	درصد مصالح سنگی شیشه
۴٫۴۶	۲۹٫۴۲	۲٫۵۷۲	۳٫۴	۵٫۴	۰
۴٫۱۶	۲۸٫۲۵	۲٫۵۱۷	۳٫۱	۵٫۳	۱۶
۴٫۲۴	۲۸٫۹۵	۲٫۴۷۴	۲٫۹	۵٫۲	۲۶
۳٫۷۷	۲۸٫۷	۲٫۳۹۵	۲٫۴	۵٫۱	۵۰

جدول ۵. نتایج مارشال مخلوط حاوی قیر SBS

روانی	مقاومت مارشال	وزن مخصوص	درصد هوا	درصد بهینه قیر	درصد مصالح سنگی شیشه
۳٫۷	۱۴٫۰۴	۲٫۵۱۱	۲٫۴	۵٫۳	۰
۳٫۲۶	۱۲٫۵۷	۲٫۴۸۴	۳٫۹	۵٫۲	۱۶
۳٫۶۱	۱۱٫۰۱	۲٫۴۶۱	۳٫۷	۵٫۱	۲۶
۳٫۱۴	۹٫۲	۲٫۳۷۹	۳٫۳	۴٫۹	۵۰

۴-۲- آزمایش حساسیت رطوبتی

۴-۲-۱- آزمایش مقاومت مارشال اشباع

اصلاح شده در تمام درصد مصالح شیشه‌ای بیشتر از ۹۷٪ است که نشان می‌دهد که مخلوط اپوکسی-آسفالت با مصالح شیشه‌ای مقاومت خوبی در برابر آسیب ناشی از رطوبت دارد. اما، در مخلوط آسفالت با افزودنی SBS پس از ۴۸ ساعت اشباع شدن در حوضچه آب به دلیل چسبندگی پایین بین پوشش و مصالح شیشه‌ای، مقاومت مارشال قابل توجهی را از دست می‌دهد. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، نسبت مقاومت مارشال برای مخلوط آسفالت با افزودنی SBS با درصد ۵۰٪ مصالح شیشه‌ای به ۷۹٫۲۳٪ کاهش می‌یابد.

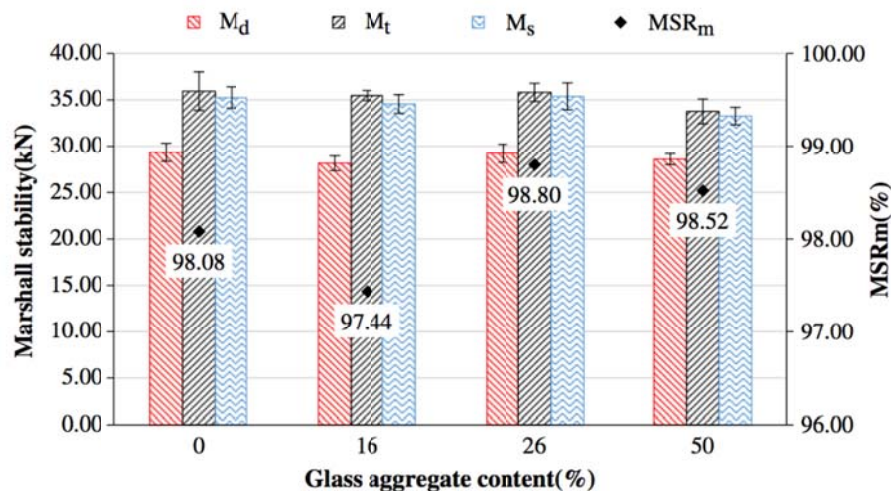
مخلوط‌های اپوکسی-آسفالت و آسفالت با افزودنی SBS در آزمایش مقاومت مارشال اشباع شده برای به دست آوردن نسبت MSR آن‌ها بررسی شدند. همچنین مشخصات مارشال اصلاح شده مخلوط‌های اپوکسی-آسفالت در نسبت MSRm نیز بررسی شدند. نتایج آزمایش‌های مقاومت مارشال اشباع و مقاومت مارشال اصلاح شده در شکل‌های ۳ و ۴ نمایش داده شده‌اند. مشخص است که مقاومت مارشال مخلوط اپوکسی-آسفالت با درصد مختلف مصالح شیشه‌ای پس از ۴۸ ساعت اشباع در دمای ۶۰ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد، در حالی که مخلوط آسفالت با افزودنی SBS این گونه نیست. این پدیده ممکن است به دلیل این باشد که اشباع نمودن طولانی مدت ممکن است واکنش شیمیایی اپوکسی-آسفالت را شتاب دهد، هرچند دمای خیس‌اندن از دمای استاندارد ۱۲۰ درجه سلسیوس پایین‌تر است. نسبت مقاومت مارشال اصلاح شده در شکل ۳ نمایش داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که مقاومت اپوکسی-آسفالت با درصد مختلف مصالح شیشه‌ای تحت تاثیر اشباع کمی قرار می‌گیرد. نسبت مقاومت مارشال

۴-۲-۲- آزمایش شکست انجماد-ذوب

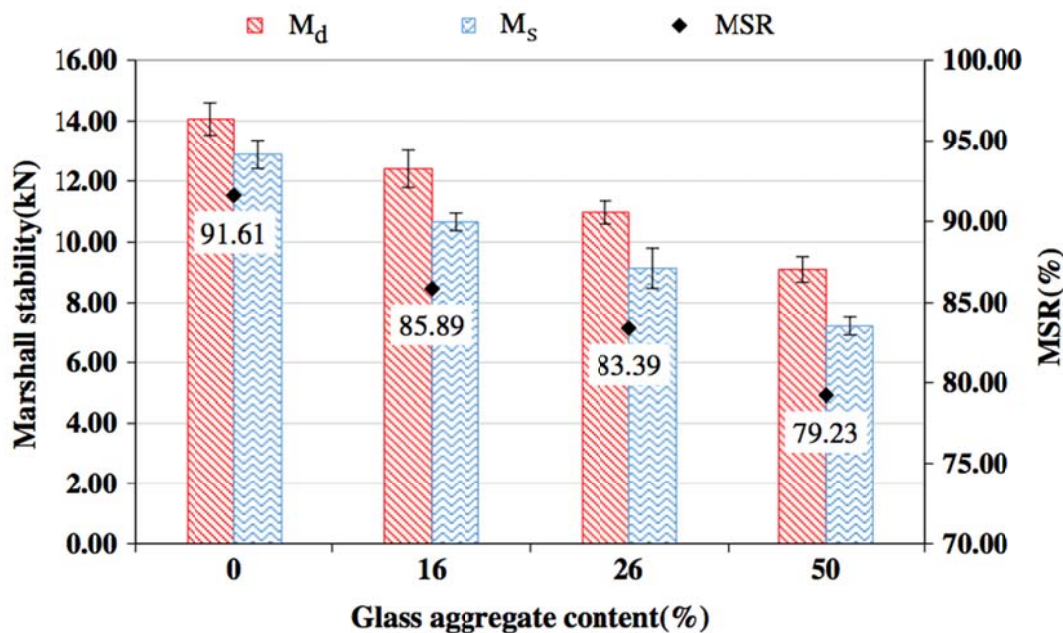
نتایج آزمایش شکست ذوب-انجماد برای دو مخلوط در شکل ۵ نمایش داده شده است. مشخص است که مقادیر TSR مخلوط اپوکسی-آسفالت در سه سطح مختلف درصد مصالح شیشه‌ای همگی بالای ۸۰٪ است. با این حال، در درصد ۱۶٪ مصالح شیشه‌ای، مقدار TSR مخلوط آسفالت با افزودنی SBS کمتر از ۸۰٪ است. با افزایش درصد مصالح شیشه‌ای، مقدار TSR مخلوط اپوکسی-آسفالت به طور کمی تغییر

افزودنی SBS به ۷۱٫۸۷٪ کاهش می‌یابد. لذا، می‌توان نتیجه گرفت که مخلوط اپوکسی-آسفالت با مصالح شیشه‌ای مقاومت بهتری نسبت به مخلوط آسفالت با افزودنی SBS در برابر ذوب-انجماد دارد.

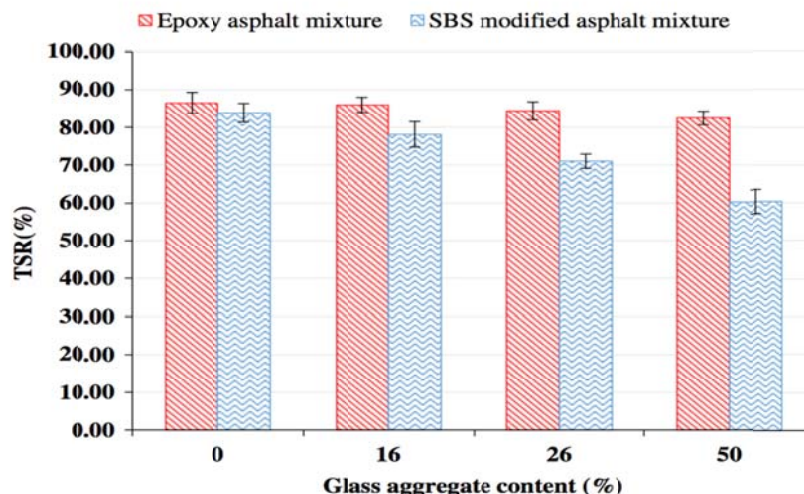
می‌کند در حالی که مقدار TSR مخلوط آسفالت با افزودنی SBS به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، مقدار TSR مخلوط اپوکسی-آسفالت با درصد ۵۰٪ مصالح شیشه‌ای از مقدار TSR مخلوط با درصد صفر مصالح شیشه‌ای را دارد. در همین حال، همین درصد برای مخلوط آسفالت با



شکل ۳. نتایج مارشال نمونه اشباع در مخلوط‌های حاوی قیر اپوکسی



شکل ۴. نتایج مارشال نمونه اشباع در مخلوط‌های حاوی قیر SBS



شکل ۵. نتایج نسبت مقاومت کششی

۳-۴- نتایج آزمایش شیارشدگی

SBS، مقاومت دینامیکی در درصد ۱۶٪ مصالح شیشه‌ای نسبت به بدون مصالح شیشه‌ای ۴۰٫۸۷٪ کاهش می‌یابد. هنگامی که درصد مصالح شیشه‌ای به ۲۶٪ یا ۵۰٪ می‌رسد، مقاومت دینامیکی مخلوط آسفالت با افزودنی SBS به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. بنابراین، مشخص است که مصالح شیشه‌ای تنها تأثیر کمی بر عملکرد مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط اپوکسی-آسفالت دارد، اما بر عملکرد مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط‌های آسفالت ترموپلاستیک معمولی (مانند آسفالت با افزودنی SBS تأثیر منفی قابل توجهی دارد. (Lu et al. 2011 Song et al. 2011)

نتایج آزمایش شیارشدگی در جدول ۶ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در درصد ۱۶٪ مصالح شیشه‌ای، مقاومت دینامیکی مخلوط اپوکسی-آسفالت تقریباً ۴٪ بیشتر از مخلوط بدون مصالح شیشه‌ای است. هنگامی که درصد مصالح شیشه‌ای به ۲۶٪ می‌رسد، مقاومت دینامیکی مخلوط اپوکسی-آسفالت به یک مقدار مشابه مخلوط بدون مصالح شیشه‌ای کاهش می‌یابد. با افزایش درصد مصالح شیشه‌ای تا ۵۰٪، مقاومت دینامیکی مخلوط به‌طور مداوم کاهش می‌یابد و از دست رانش ۳٫۱۸٪ می‌دهد. با این حال، در مخلوط آسفالت با افزودنی

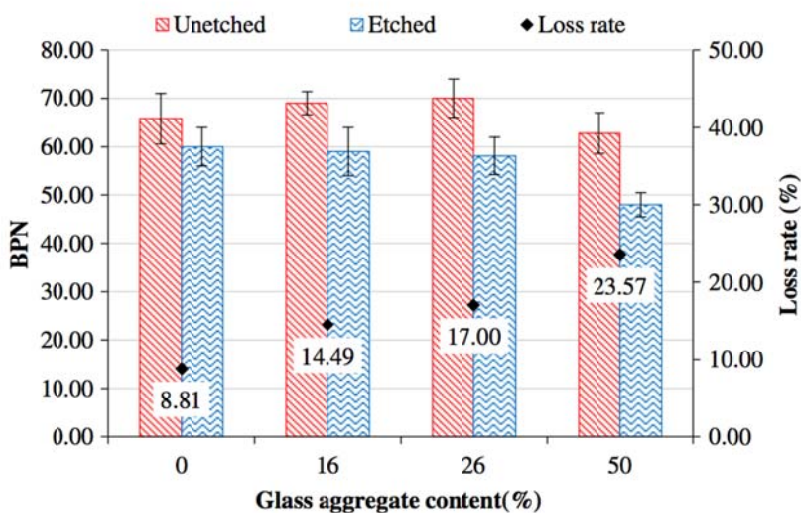
جدول ۶. نتایج آزمایش شیارشدگی

نوع مخلوط آسفالتی	درصد مصالح سنگی شیشه	میانگین پایداری دینامیکی
قیر اپوکسی	۰	۱۷۳۵۰
	۱۶	۱۸۰۵۰
	۲۶	۱۷۵۰۰
	۵۰	۱۶۷۸۰
قیر اصلاح شده SBS	۰	۴۵۰۰
	۱۶	۲۹۰۰
	۲۶	۱۹۸۵
	۵۰	۸۳۲

۴-۴- آزمایش اصطکاک پاندول انگلیسی

روی سطح پس از غلتش افقی قرار دارند، بنابراین لبه و زاویه شیشه به میزان محدودی به اصطکاک سطح مخلوط کمک می‌کند. قبل از آتش‌زنی، مصالح شیشه‌ای افقی روی سطح به مقدار زیادی با مرمت اپوکسی-آسفالت چسبیده‌اند که منجر به افزایش مساحت تماس و بالارفتن ضریب اصطکاک می‌شود. هنگامی که ملات جسییده به سطح مصالح شیشه‌ای سایشی برداشته می‌شود، ضریب اصطکاک به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد، همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است. در مورد مصالح معدنی معمولی، ضریب اصطکاک تنها به طور کمی کاهش می‌یابد زیرا روی مصالح بسیاری از خلاء و بافت سطحی وجود دارد، حتی اگر مرمت چسبیده کاملاً آتش‌زنی شود. هدف استفاده از سطوح سایشی با استفاده از حلال تری‌کلروتری‌کلروترایتین به شبیه‌سازی یک شرایط حدی است که تمامی ملات قیری که به مصالح شیشه‌ای چسبیده، به‌طور کامل از بین می‌رود. در واقع، جدا شدن ملات قیر به طور طولانی و آهسته تحت بارگذاری خودرو رخ خواهد داد. این نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک مخلوط، حتی با درصد ۵۰٪ مصالح شیشه‌ای، در طول این فرآیند نیز الزامات ایمنی را برآورده می‌کند.

مقادیر میانگین BPN مخلوط‌های اپوکسی-آسفالت با درصد‌های مختلف مصالح شیشه‌ای در شکل ۶ نمایش داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که در ضریب اصطکاک مخلوط‌هایی که تحت فرآیند سایشی قرار گرفته‌اند، تفاوت قابل توجهی با مخلوط‌هایی که تحت فرآیند سایشی نبوده‌اند وجود دارد. قبل از سایش، ضریب اصطکاک مخلوط با درصد ۱۶٪ و ۲۶٪ مصالح شیشه‌ای کمی بیشتر از مخلوط‌های بدون مصالح شیشه‌ای است. حتی در صورتی که درصد مصالح شیشه‌ای به ۵۰٪ برسد، ضریب اصطکاک تنها کمی کمتر از ضریب اصطکاک بدون مصالح شیشه‌ای است. با این حال، پس از سایش، ضریب اصطکاک تمام مخلوط‌هایی که شامل مصالح شیشه‌ای هستند، کمتر از مخلوط‌های بدون مصالح شیشه‌ای است. ضریب اصطکاک مخلوط‌های سایشی نسبت به مخلوط‌های سایش نشده به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، ضریب اصطکاک مخلوط سایشی با ۱۶٪، ۲۶٪ و ۵۰٪ درصد مصالح شیشه‌ای به ترتیب به میزان ۱۴،۴۹٪، ۱۷٪ و ۲۳،۵۷٪ کاهش می‌یابد. تغییرات BPN در مخلوط اپوکسی-آسفالت می‌تواند توسط تحلیل مصالح شیشه‌ای تفسیر شود. تصاویر سایشی نشان می‌دهند که بیشتر مصالح شیشه‌ای



شکل ۶. نتایج آزمایش پاندول انگلیسی

۵- نتیجه‌گیری

۲- مقاومت مارشال، مقاومت مارشال اشباع شده، TSR، مقاومت به خمش و عملکرد در دمای پایین مخلوط اپوکسی-آسفالت کمتر توسط درصد مصالح شیشه‌ای تحت تاثیر قرار می‌گیرند. در عین حال، این پارامترها در مخلوط آسفالت اصلاح شده با SBS با افزایش درصد مصالح شیشه‌ای به شدت کاهش می‌یابند. ۳- ضریب اصطکاک مخلوط اپوکسی-آسفالت ساییده شده با مصالح شیشه‌ای نسبت به مخلوط ساییده نشده، کمتر است. ضریب اصطکاک مخلوط ساییده شده با درصد ۵۰٪ مصالح شیشه‌ای به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد و همچنان الزامات روسازی را برآورده می‌کند.

با توجه به مطالعه عملکرد مخلوط‌های اپوکسی-آسفالت و آسفالت اصلاح شده با SBS با درصد مختلف مصالح شیشه‌ای، می‌توان به نتایج زیر پی‌برد:

۱- مخلوط‌های اپوکسی-آسفالت و آسفالت اصلاح شده با SBS با مصالح شیشه‌ای، در پارامترهای حجمی مارشال و درصد قیر بهینه، روند مشابهی دارند. به عبارت دیگر، با افزایش درصد مصالح شیشه‌ای، درصد قیر بهینه در دو مخلوط کاهش می‌یابد و درصد هوا و چگالی مخلوط نیز با افزایش درصد مصالح شیشه‌ای در زیر قیر بهینه، کاهش می‌یابد.

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Styrene-Butadiene-Styrene
- 2- Asphalt Cement
- 3- Marshall Stability
- 4- Optimum Bitumen Content
- 5- Marshall Stability Ratio
- 6- Tensile Strength Ratio
- 7- British Pendulum Number

۷- مراجع

epoxy asphalt concrete for pavement layers of orthotropic steel decks." *Constr. Build. Mater.* 79: 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.120>.

-Huang, Y., R. N. Bird, and O. Heidrich. 2007. "A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements." *Resour. Conserv. Recycl.* 52 (1): 58–73. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.02.002>.

-Huang, Y., R. N. Bird, and O. Heidrich. 2007. "A review of the use of re-cycled solid waste materials in asphalt pavements." *Resour. Conserv. Recycl.* 52 (1): 58–73. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.02.002>.

-Lu, H., W. Huang, K. Li, L. Liu, and L. Sun. 2011. "Glasphalt mixtures' performance research and analysis." In *Proc., 3th Int. Conf. on Transportation Engineering (ICTE)*, 1427–1432. Reston, VA: ASCE.

-Lu, Q., and J. Bors. 2015. "Alternate uses of epoxy asphalt on bridge decks and roadways." *Constr. Build. Mater.* 78: 18–25. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.125>.

-Androjić, I., and S. Dimter. 2014. "Properties of hot mix asphalt with substituted waste glass." *Mater. Struct.* 49 (1–2): 249–259. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0492-3>.

-Arabani, M. 2011. "Effect of glass cullet on the improvement of the dynamic behaviour of asphalt concrete." *Constr. Build. Mater.* 25 (3): 1181–1185. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.043>.

-Arabani, M., R. Jamshidi, and M. Sadeghnejad. 2014. "Using of 2D finite element modeling to predict the glasphalt mixture rutting behavior." *Constr. Build. Mater.* 68: 183–191. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.057>.

-Behbahani, H., H. Ziari, N. Kamboozia, A. Mansour Khaki, and S. M. Mirabdolazimi. 2015. "Evaluation of performance and moisture sensitivity of glasphalt mixtures modified with nanotechnology zycosoil as an anti-stripping additive." *Constr. Build. Mater.* 78: 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.053>.

-Bocci, E., A. Graziani, and F. Canestrari. 2015. "Mechanical 3D characterization of

- recycled glass.” *Resour. Conserv. Recycl.* 35 (4): 259–274. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00007-1](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00007-1).
- Tam, V. W. Y., and C. M. Tam. 2006. “A review on the viable technology for construction waste recycling.” *Resour. Conserv. Recycl.* 47 (3): 209–221. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.12.002>.
- Ziari, H., H. Behbahani, N. Kamboozia, and M. Ameri. 2015. “New achievements on positive effects of nanotechnology zyco-soil on rutting resistance and stiffness modulus of glasphalt mix.” *Constr. Build. Mater.* 101: 752–760. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.150>.
- Wu, S., W. Yang, and Y. Xue. 2004. *Preparation and properties of glass- asphalt concrete*. Wuham, China: Key Laboratory for Silicate Materials Science and Engineering of Ministry of Education.
- Maupin, G. W. 1997. *Glasphalt test sections in Virginia*. Final Rep. No. FHWA/VTRC 98-R6. Charlottesville, VA: Virginia Transportation Research Council.
- Min, Z., Y. Xia, X. Li, and Z. Tao. 2017. “Performances evaluation of epoxy asphalt mixture containing snow-melting agent.” *Constr. Build. Mater.* 155: 762–769. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.009>.
- Qian, Z., and Q. Lu. 2015. “Design and laboratory evaluation of small particle porous epoxy asphalt surface ixture for roadway pavements.” *Constr. Build. Mater.* 77: 110–116. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.056>.
- Song, C., J. X. Zhang, and J. Wang. 2011. “Laboratory study on road performance of glasphalt concrete.” [In Chinese.] *J. Wuhan Univ. Technol.* 33 (12): 32–36. <https://doi.org/10.3963/j.issn.1671-4431.2011.12.008>.
- Su, N., and J. S. Chen. 2002. “Engineering properties of asphalt concrete made with

Laboratory Evaluation of Replacement of Virgin Aggregates with Glass Materials with the Approach of Environmental Pollution

Azin Chitsazan, Department of Land Use Planning and Assessment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

E-mail: Chitsazan.az@gmail.com

Received: March 2023- Accepted: August 2023

ABSTRACT

Using glass aggregate in asphalt mixture is an effective way to deal with environmental pollution. In this research, epoxy asphalt was used instead of normal asphalt. Experiments were conducted to investigate the effect of glass aggregate on the performance of asphalt-epoxy mixture compared to asphalt with styrene-butadiene-styrene copolymer softener 1 (SBS). The results showed that for two types of asphalt mixtures, the optimal percentage of additive, void space and density decrease with the increase of glass aggregate content. Marshall stability, Marshall water absorption stability, tensile strength ratio, flexural strength and low temperature properties of asphalt-epoxy mixture are slightly affected by glass aggregate content and are different from SBS-modified asphalt. In addition, the asphalt-epoxy mixture with glass aggregate has good characteristics in terms of wear resistance and light reflection. Therefore, in the asphalt-epoxy mixture, the high content of glass aggregate can achieve superior performance without the need for anti-adhesion agent and with the reduction of environmental pollution.

Keywords: Epoxy Bitumen, Asphalt Mixture, Glass Aggregate, Laboratory Test