

## بررسی تأثیر پودر ضایعاتی شیشه بر عملکرد مخلوط آسفالتی

مقاله علمی - پژوهشی

رضوان باباگلی\*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران  
محمدرضا خمده، دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Rezvan\_Babagoli@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۸ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵

صفحه ۴۰۴-۳۸۷

### چکیده

در این پژوهش با مرور بر تحقیقات و مقالات انجام شده، تأثیر پودر ضایعاتی شیشه بر عملکرد مخلوط آسفالتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در دهه اخیر، پژوهش‌گران برای جلوگیری از رفتن شیشه ضایعاتی به مکمل‌های زباله و کاهش تأثیر محیطی در بخش ساخت و ساز، از شیشه خرد شده در برنامه‌های ساخت استفاده کردند. شیشه خرد شده برای استفاده به عنوان مصالح در لایه‌های روسازی آسپال و زیراساس، و همچنین بتن مورد مطالعه قرار گرفته است. شیشه تنها ماده‌ای است که می‌توان آن را چندین بار به‌طور کامل بازیافت کرد. این ماده از طریق ذوب شدن کوارتز، سودا و آهک تهیه می‌شود و به‌علاوه تکه‌های شیشه نیز استفاده می‌شود. شیشه بازیافتی به عنوان یکی از مهمترین اجزای مواد بازیافتی جمع‌آوری شده، محسوب می‌شود. این ماده غیرفلزی است و نه می‌تواند سوخته شود و نه تجزیه می‌شود، بنابراین بازیابی آن ممکن است دشوار باشد. از این رو، در ساخت جاده‌ها به عنوان حاشین مواد سنگی در روسازی آسفالتی با مخلوط آسفالتی گرم استفاده شده است. نتایج نشان داد اضافه نمودن پودر شیشه سبب پایداری مخلوط می‌گردد، زیرا استفاده از فیلر پودر شیشه مقادیر پایداری مارشال برای تمام مخلوط‌ها را نسبت به پرکننده‌های سیمان پرتلند یا پودر سنگ آهک بهبود می‌بخشد. نتایج نشان داد پودر شیشه از مقاومت مخلوط در برابر رطوبت می‌کاهد. همچنین، نتایج به‌دست آمده، مناسب بودن پودر شیشه به عنوان فیلر را تأیید کرد.

واژه‌های کلیدی: پودر شیشه، مخلوط آسفالتی، شیارشدگی، خستگی، مدول برجهنگی

### ۱-مقدمه

بسیار الاستیک قیر را نیز تغییر می‌دهد. شیشه تنها ماده‌ای است که می‌توان آن را چندین بار به‌طور کامل بازیافت کرد. این ماده از طریق ذوب شدن کوارتز، سودا و آهک تهیه می‌شود و به‌علاوه تکه‌های شیشه نیز استفاده می‌شود. در سال ۲۰۱۱، میزان تولید ضایعات شیشه در کشورهای اتحادیه اروپا (EU-27) به ازای هر نفر ۳۲ کیلوگرم بود. در برخی از کشورهای اتحادیه اروپا، نسبت بازیافت تا ۶۰٪ هم رسیده است، که این میزان نسبت به وضعیت در جمهوری کرواسی که در آن در سال ۲۰۱۲ میلادی ۳۳،۷۴۷ تن ضایعات شیشه جمع‌آوری و دسته‌بندی شد، بسیار بیشتر است. ضایعات شیشه خرد شده که به‌عنوان

استفاده اولیه از آسفالت برای ساخت جاده‌ها و خیابان‌ها در دهه ۱۸۰۰ آغاز شد و با رشد صنعت خودرو سریعاً افزایش یافت. از آن زمان تاکنون، فناوری آسفالت به گونه‌ای پیشرفت کرده است که تجهیزات، تکنیک‌ها و مواد مورد استفاده برای ساخت روسازی آسفالتی بسیار پیچیده هستند. فیلر جزئی از مخلوط‌های آسفالت است و میزان درصد آن به طور قابل توجهی ویژگی‌های مکانیکی این مخلوط‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اگر درصد فیلر بیش از حد باشد، مخلوط آسفالتی می‌تواند به شدت ضعیف شود؛ زیرا در این حالت فیلر تأثیر زیادی بر درصد بهینه قیر و قابلیت قرارگیری دارد، همچنین ویژگی‌های

نشان داده‌اند که مقاومت برشی کافی، توان تحمل، و مقاومت خردشدگی حاصل می‌شود. به‌طور مشابه، سو و همکاران (Su et al, 2002) نشان داده‌اند که استفاده از شیشه خردشده با ترکیب آن با لاستیک ضایعاتی به مقاومت فشاری غیرمحدود، نسبت تحمل کالیفرنیا، و مدول مقاومت ارتجاعی لایه‌های اساس و زیراساس تأثیرات مفیدی دارد. این به توده‌های بزرگ‌تر زوایای داخلی بالاتر از اصطکاک داخلی منجر شده که در نتیجه تقویت قفل و بست میان ذرات مصالح با یکدیگر قرار گرفته‌اند. فیلر پودر شیشه بازیافتی دارای درصد پایینی از سیلیکا ( $\text{SiO}_2$ ) حدود ۳۰٪ است، اگرچه این ماده جزء اصلی تشکیل دهنده آن است. اکسید کلسیم ( $\text{CaO}$ )، آلومینا ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) و اکسید سدیم ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) در درون ترکیب با درصدی بین ۱۰٪ تا ۱۹٪ وجود دارند. درصدهای سایر اکسیدها کمتر از ۱٪ است. با توجه به تجزیه و تحلیل شیمیایی، می‌توان گفت که منبع شیشه بازیافتی متنوع است، که این موضوع نشان‌دهنده این است که این ماده به فرآیندهای تصفیه ویژه نرفته است، که این موجب تولید یک محصول ارزان و دوستدار محیط زیست می‌شود. پودر شیشه بازیافتی در حالت مرطوب مانند گل و لای سفید و خاکی است. بعد از خشک شدن به یک پودر ریز با بافت و رنگ مشابه خاکستر تبدیل می‌شود (Issa et al, 2016). در مطالعه‌ای که توسط حسن و همکاران انجام شد، پودر شیشه به‌عنوان جایگزینی برای فیلر معدنی (غبار سنگ) در مخلوط آسفالت گرم استفاده شد. در کل نه مخلوط با سه نوع فیلر آزمایش شد (سه مورد آهک و غبار سنگ، سه مورد سیمان پرتلند و سه مورد پودر شیشه). سه مخلوط با میزان محتوای پودر شیشه به اندازه ۴، ۷ و ۱۰٪ از وزن کل دانه‌بندی آزمایش شدند. نویسندگان به این نتیجه رسیدند که نسبت به وزن کل دانه‌بندی، نسبت بهینه پودر شیشه مخلوطی است که هفت درصد از وزن کل دانه‌بندی را جایگزین می‌کند. در اینجا مقداری پایداری به میزان سیزده درصد نسبت به شش مخلوط دیگر به دست آمد، تغییر شکل به میزان

جایگزینی برای بخشی از پرکننده در آزمایش‌ها استفاده می‌شود (Simone et al, 2019). شیشه بازیافتی به عنوان یک جایگزین مصالح در ساخت جاده در مخلوط‌های آسفالت گرم استفاده شده است. کشورهای زیادی اخیراً شیشه را در استانداردهای جاده‌ای خود گنجانده‌اند، که این امر تشویق به استفاده بیشتر از این ماده شده است. تولید ضایعات شیشه به تخمین حدود ده میلیون تن در سال می‌رسد. در تحقیقات اولیه مشاهده شده که ضایعات شیشه بخشی از مواد معدنی تازه استخراج شده در گذشته را تشکیل می‌دهد. پختگی پایین و سطح صاف ذرات شیشه منجر به مشکلاتی نظیر جدا شدن زود هنگام، کاهش مقاومت لغزشی و پتانسیل ریزش بالا می‌شود. بسیاری از پژوهشگران مشاهده کرده‌اند که پودر شیشه به عنوان ماده پرکننده منجر به تخریب عملکرد مخلوط‌های آسفالتی نمی‌شود (Kalamhdad, 2018). شیشه بازیافتی به عنوان یکی از مهمترین اجزای مواد بازیافتی جمع‌آوری شده، محسوب می‌شود. این ماده غیرفلزی است و نه می‌تواند سوخته شود و نه تجزیه می‌شود، بنابراین بازیابی آن ممکن است دشوار باشد. از این رو، در ساخت جاده‌ها به عنوان جانشین مواد سنگی در روکش آسفالتی با مخلوط آسفالتی گرم استفاده شده است. زمانی که شیشه بازیافتی خرد شده به مخلوط آسفالتی گرم افزوده می‌شود، مخلوط حاصل گاهاً به عنوان "گلاسفالت" اشاره می‌شود.

#### ۱-۱- پودر شیشه

در دهه اخیر، پژوهش‌گران برای جلوگیری از رفتن شیشه ضایعاتی به مکمل‌های زباله و کاهش تأثیر محیطی در بخش ساخت‌وساز، از شیشه خردشده در برنامه‌های ساخت استفاده کردند. شیشه خرد شده برای استفاده به عنوان مصالح در لایه‌های روسازی اساس و زیراساس، و همچنین بتن مورد مطالعه قرار گرفته است. عربانی (Arabani, 2011) استفاده از شیشه ضایعه در لایه‌های اساس و زیراساس جاده‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند و

آزمون مارشال تقریباً مشابه است و همچنین نتیجه گرفتند که این ماده ضایعاتی مناسب برای استفاده در مخلوط‌های آسفالتی است (Salem et al, 2017). مواد شیشه به دلیل شکنندگی و غنی بودن در سیلیکون، شاخص‌های فنی کلیدی گلاسفالت شامل مقاومت مارشال و مقاومت در برابر آسیب آبی است. شفافیت و همکاران در مطالعه‌ای که انجام دادند، نتیجه‌گیری کردند که شیشه شکسته بازیافتی می‌تواند با حداکثر اندازه ۴٫۷۵ میلی‌متر و نسبت جایگزینی بهینه ۱۰٪ در مخلوط آسفالتی استفاده شود. آنها همچنین اشاره کرده‌اند که عملکردی همچون شاخص مقاومت، پایداری در دمای بالا و پایداری در برابر آب معیارها را دست یافته است (Shafabakhsh et al, 2017).

۳۹٪ کاهش یافت و چگالی مخلوط آسفالت به مقدار ۱۰٪ کاهش یافت (Hassan et al, 2011).. در مقاله جونی و همکاران، تأثیر استفاده از پرکننده‌های مختلف، از جمله پودر شیشه، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نویسندگان پیشنهاد می‌دهند که از پودر شیشه استفاده شود زیرا این امر منجر به افزایش پایداری مارشال نسبت به پرکننده‌های سیمان پرتلند و آهک می‌شود (Joney et al, 2011). جین و همکاران به این نتیجه رسیدند که می‌توان پودر شیشه را به‌عنوان جایگزینی برای پرکننده معدنی و دانه‌بندی تا اندازه دانه به ابعاد ۴٫۷۵ میلی‌متر استفاده کرد. میزان بیشینه محتوا نسبت به وزن کل دانه‌بندی ۱۰٪ است (Jin et al, 2021). سالم و همکاران تأثیر شیشه ضایعاتی را در جایگزینی پرکننده در مخلوط آسفالت مورد تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند و به این نتیجه رسیدند که تفاوت بزرگی از نظر تأثیر نسبت به استفاده از غبار سنگ وجود ندارد، به عبارت دیگر مقادیر



شکل ۱. پودر شیشه

#### ۱-۲- خواص پودر شیشه

پودر شیشه با تکیه بر مطالعات پژوهش‌های گذشته به عنوان یک بخش از مواد معدنی اولیه در تحقیقات بسیاری بررسی شده است. این مطالعات نشان داده‌اند که ویژگی‌های جذب کم ذرات شیشه نقش کلیدی در عدم عملکرد بهتر مخلوط‌های حاوی شیشه دارند. ترک خوردگی زودرس، توانایی تخریب بالا و مقاومت کم به لغزش تنها برخی از مشکلات اصلی به دلیل تخلخل کم ذرات شیشه هستند، که منجر به استفاده از شیشه به عنوان فیلر یا مخلوط‌های ریز مواد استفاده شده است. طبیعت مواد معدنی از عوامل اصلی است که خصوصیات همچنین

تراکم و چسبندگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Choudhary et al, 2021). با توجه به فیلر پودر شیشه، چندین محقق مشاهده کرده‌اند که استفاده از پودر شیشه بازیافتی خواص مکانیکی و عملکرد مخلوط‌های آسفالتی را تشدید نمی‌کند. به عنوان مثال، نشان داده شده است که جایگزینی پرکننده سنگ آهک با پودر شیشه منجر به نرخ جریان کمتر و پایداری بیشتر می‌شود (Ziari et al, 2020). با این حال، به طور معکوس، پژوهش دیگر نشان داد که جایگزینی پرکننده سنگ آهک با پودر شیشه منجر به افزایش نرخ جریان و کاهش پایداری می‌شود (Ge et al, 2015). مطالعات بیشتر

#### ۱-۴- خواص و عملکرد الیاف شیشه

الیاف شیشه‌ای می‌تواند سختی و مقاومت کششی مخلوط آسفالت گرم را افزایش دهد، اما باید در هنگام تولید آسفالت به دقت رفتار شوند. با این حال، کاهش پایداری و سختی و افزایش فضاهای خالی در مخلوط مشاهده شده است. افزودن الیاف شیشه‌ای منجر به مقاومت بیشتر در برابر ترک، خستگی و تراکم شد. این الیاف به انواع تصادفی در یک مخلوط توزیع می‌شود که از جابجایی تخته‌ای داخلی توده‌ها به طور مؤثر جلوگیری می‌کند. الیاف شیشه‌ای به طور قابل ملاحظه‌ای انرژی شکست و عامل شدت ترک را افزایش می‌دهند. مخلوط‌های آسفالتی با افزودن الیاف شیشه‌ای نیز مقاومت بیشتری در برابر تراکم، شروع ترک و گسترش ترک دارند. پژوهشگران اثرات تقویت‌کنندگی الیاف در مخلوط‌ها و روسازی‌های آسفالتی گزارش کرده‌اند. الیاف می‌تواند آسفالت‌ها را استوار نمایند تا به‌ویژه در مخلوط‌های با سطح آسفالتی باز و مخلوط‌های آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای، از تغییر شکل آسفالت جلوگیری کنند، به‌خصوص در حمل‌ونقل و بتن‌ریزی مواد الیاف ویسکوالاستیسیته مخلوط را تغییر می‌دهند، مدول دینامیکی را بهبود می‌بخشند، حساسیت به رطوبت، مقاومت خمشی و مقاومت در مقابل تراکم را بهبود می‌بخشند ترک خوردگی مخلوط‌ها و روسازی‌های آسفالتی را کاهش می‌دهند.

توابع اصلی تقویت با الیاف در مخلوط‌های قیری این است که مقاومت کششی اضافی در ترکیب نهایی فراهم کند و جذب انرژی کرنش مخلوط قیری را افزایش دهد تا تشکیل و گسترش ترک‌ها که می‌تواند از یکپارچگی سازه جاده کاسته و تخریب کند، را مهار کند. این ایده بر اساس مفهوم عمومی است که اگر مخلوط آسفالتی در فشار قوی و در کشش ضعیف باشد، آنگاه الیاف می‌تواند برای ارائه مقاومت لازم در مقابل تنش‌های کششی استفاده شود. مخلوط قیری تقویت‌شده با الیاف به‌طور گسترده استفاده می‌شود، به‌ویژه در مخلوط آسفالت با استخوان‌بندی

نشان داده‌اند که پودر شیشه نقش مؤثری در اصطکاک آبی و مدولوس انعطاف‌پذیری مخلوط‌های آسفالتی معمولی دارد (Guo et al, 2015). در ادبیات، توافقی در تجزیه و تحلیل حجمی مخلوط‌ها حاصل از پودر شیشه وجود دارد. تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که جایگزینی پرکننده معدنی با پودر شیشه منجر به تراکم کمتر و حجم هوای بیشتر می‌شود. توضیح منطقی برای این موضوع به جذب کمتر و تبادل شیمیایی بین سیلیس و آسفالت برمی‌گردد، که باعث ایجاد مقدار بیشتری از ماده اتصال‌زا در مخلوط می‌شود (Eisa et al, 2021). در این تحقیق، پرکننده پودر شیشه به دلیل درصد کمتر ماستیک در مخلوط‌های مورد مطالعه، تأثیر زیادی بر پایداری ندارد. افزایش ماتریس ماستیک در حجم مخلوط، که معمولاً در مخلوط‌ها آسفالتی مشاهده می‌شود، تأثیر متناسبی روی نتایج پایداری پرکننده پودر شیشه دارد اگر آن را با مخلوط کنترل با استفاده از پرکننده سنگ آهک مقایسه کنیم. (Kang et al, 2019)

#### ۱-۳- تأثیر پودر شیشه بصورت الیاف

روسازی‌های انعطاف‌پذیر که به عنوان یک نوع اصلی روسازی در مهندسی راه در سراسر جهان ساخته می‌شوند، با تأثیر بارگذاری ترافیک و شرایط آب و هوایی به مرور زمان تضعیف می‌شوند. تحقیقات زیادی بهبود مواد و اصلاحاتی برای بهبود خواص مخلوط آسفالتی گرم و کاهش ضعف مخلوط‌های آسفالتی انجام شده‌اند. بنابراین، انواع مختلفی از الیاف در مخلوط‌های آسفالتی برای افزایش عملکرد استفاده شده‌اند. استفاده از الیاف در مخلوط آسفالت گرم خواص مهندسی، مقاومت به خستگی، مقاومت به تراکم و سختی را بهبود می‌بخشد و به همین دلیل به عنوان جایگزین مؤثری در ساخت پوشش جاده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. به این منظور، تعداد زیادی از مطالعات برای بررسی خواص و عملکرد مخلوط‌های آسفالت گرم که حاوی انواع مختلفی از الیاف مانند فولادی، کربن، آرامید، پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن، بازالت، پلی‌استر و الیاف شیشه‌ای هستند، انجام شده‌اند.

دانه‌بندی خرده سنگی دانه‌بندی شده و درصد بالای مصالح سنگی مشخص می‌شود. این درصد بالای سنگ پس از متراکم سازی منجر به تماس سنگ به سنگ می‌شود. مخلوط آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه‌ای یک چهارچوب پایدار سنگ به سنگ را ایجاد می‌کند که توسط مخلوط پر سنگین آسفالتی، که ترکیبی از قیر، فیلر، شن و افزودنی‌های استحکام‌بخش است، به هم متصل می‌شود. افزودنی‌های استحکام‌بخش می‌توانند الیاف آلی یا معدنی، یا به صورت کم‌تر پلیمرها باشند. آنها چسبندگی آسفالت را استحکام می‌بخشند و به بهبود یا افزایش حجم قیر می‌پردازند تا از جدا شدن قیر از دانه‌ها جلوگیری کنند. بنابراین، آنها به ساختار پایداری و مقاومت می‌بخشند.

سنگدانه‌ای<sup>۱</sup> SMA. مخلوط SMA یک مخلوط آسفالتی گرم با تشکیل یک چهارچوب مخلوط خرده سنگی با درصد قیر بالا است. این تکنیک در دهه شصت میلادی در آلمان توسعه یافت و بیش از ۲۰ سال در اروپا به منظور ارائه مقاومت بهتر در برابر خرابی و سایش لاستیک تحت مطالعه (Airey, 2004) استفاده شده است. هدف اصلی SMA در ابتدا ارائه مخلوطی بود که مقاومت بیشینه را در برابر سایش لاستیک‌های چوبی ارائه کند. همچنین SMA مقاومت بالایی در برابر تغییر شکل پلاستیکی تحت بارهای ترافیک سنگین با فشارهای بالای لاستیک نشان داده است، و همچنین ویژگی‌های خوب دمای پایین (Enieb, 2021) را دارد. SMA توسط ترکیبات

## ۲-تاثیر پودر شیشه بر عملکرد مخلوط آسفالتی و قیر

### ۲-۱-۱- عملکرد مخلوط

#### ۲-۱-۱-۱- تاثیر بر پایداری مارشال

آهک) از ۴٪ محتوا به ترتیب به ۲ میلی‌متر و ۲٫۴ میلی‌متر در ۱۰٪ محتوا افزایش یافت. در حالی که مقدار جریان برای مخلوط آسفالت با پرکننده پودر شیشه از ۳ میلی‌متر در ۴٪ محتوا به ۲ میلی‌متر در ۷٪ و ۱۰٪ محتوا کاهش یافت و این رفتار ممکن است به ویژگی‌های سیلیسی پودر شیشه باز گردد. نتایج نشان می‌دهند که مقادیر V.T.M<sup>۱</sup> با افزایش محتوای پرکننده کاهش می‌یابد. مقادیر V.T.M برای مخلوط آسفالت با غبار سنگ آهک از ۶٫۱٪ در ۴٪ درصد به ۳٫۱٪ در ۱۰٪ درصد کاهش یافت، در حالی که V.T.M با سیمان پرتلند از ۴٫۲٪ در ۴٪ درصد به ۳٫۳٪ کاهش یافت. اما مقادیر V.T.M با پرکننده پودر شیشه افزایش یافته است و این ممکن است به عملکرد لغزشی ذرات در درصد معینی محدود شده از مقدار قابل قبول V.T.M در محدودیت مشخصات بازگردد. از طرف دیگر، می‌توان مشاهده کرد که مخلوط‌های با فیلرهای با دانه‌بندی باریک‌تر مقادیر کمتری از V.T.M دارند. نتایج تفاوت کمی در مقادیر چگالی نشان می‌دهند که وابسته به چگالی خاص پرکننده‌ها هستند. نتایج نشان داد که چگالی برای

در تحقیقی که توسط مهرز و همکاران انجام شد، (Mahrez et al, 2010) نه مخلوط با سه نوع پرکننده تهیه شده است: سیمان پرتلند معمولی، پودر سنگ آهک و پودر شیشه. سه درصد فیلر برای هر فیلر (۴، ۷ و ۱۰ درصد به وزن کل مخلوط) مورد بررسی قرار گرفته است. تمامی مخلوط‌ها با درصد یکسان قیر (۵٪) تهیه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که افزایش درصد فیلر تا ۷٪ برای همه انواع فیلرها منجر به افزایش مقدار مقاومت مارشال می‌شود. مخلوط‌های پودر شیشه نسبت به مخلوط‌های پودر سنگ آهک و سیمان پرتلند معمولی، رفتار بهتری دارند. با توجه به نتایج، مقدار مقاومت برای پودر شیشه بیشتر از سیمان پرتلند و غبار سنگ آهک است که حداکثر پایداری در درصد ۷٪ برای سه نوع به دست آمده است.

نتایج نشان می‌دهد که افزایش درصد فیلر منجر به افزایش جریان برای هر دو نوع فیلر (پودر سنگ آهک و سیمان پرتلند) می‌شود، در حالی که مخلوط‌های پودر شیشه رفتار ناهمسانی دارند. مقادیر جریان برای مخلوط‌های آسفالت با هر دو نوع فیلر (سیمان پرتلند و غبار سنگ

کمتری از مخلوط SD دارند، این می‌تواند دلیل معقولی برای سختی بالاتر آنها نسبت به مخلوط SD باشد.

### ۲-۱-۳- تاثیر بر خستگی

در مقاله‌ای که توسط تقی پور و همکاران انجام شد (Taghipoor et al, 2020)، ویژگی‌های خستگی مرتبط با تجمع کرنش‌ها با تعداد چرخه‌های شکست برای مخلوط‌ها به ترتیب برای سطح تنش ۱، ۲ و ۳ در نمودارهای زیر ارائه شده‌اند. تمامی نمودارها نشان می‌دهند که افزودن شیشه به مخلوط‌ها عمر خستگی را بهبود می‌بخشد و کرنش جمعی را کاهش می‌دهد. مخلوط با محتوای ۲٪ دارای بیشترین عمر خستگی و در نتیجه مقدار کمتری کرنش است. نمودارها همچنین نشان می‌دهند که هرچه سطح تنش بیشتر باشد، عمر خستگی کمتر و کرنش جمعی بیشتر خواهد بود، در واقع این قابل درک و قابل پیش‌بینی است. در سطح تنش ۱ و ۲، عمر خستگی به ترتیب با افزودن ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵٪ پودر شیشه به ترتیب حدود ۲۸٪ (۱۸٪ برای سطح تنش ۲)، ۴۵، ۲۱ و ۱۰٪ افزایش می‌یابد، در حالی که در سطح تنش ۳، عمر خستگی به ترتیب با افزودن ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵٪ الیاف شیشه به ترتیب حدود ۲۴، ۲۴، ۷۹، ۴۵ و ۲۴٪ افزایش می‌یابد (شکل ۲). این احتمالاً به دلیل در جهت‌های مختلف ماتریس قیری توزیع می‌شوند و به خوبی مقاومت جابه‌جایی برشی را در ماتریس قیری ایجاد می‌کنند و به طور محکم از جابه‌جایی ذرات دانه‌های سنگی جلوگیری می‌کنند، بنابراین با تأخیر بهینه انتشار ترک یکبار ترک شکسته شده را افزایش می‌دهند. علاوه بر این، بهبود در عمر خستگی ناشی از افزودن پودر شیشه به مقدار بالا در سطح تنش بیشتر به مقایسه با سطح تنش کم معقولتر و مفیدتر است. این به این معناست که افزایش مخلوط قیری تقویت‌شده با پودر شیشه به عنوان موانع خستگی در جاده‌های پرتردد بسیار مهم و کارآمدتر است تا جاده‌های با ترافیک عادی. این امر خوب و عملی قابل قبول است زیرا جاده‌های با ترافیک عادی کمتر به خستگی مستعد هستند، بنابراین اگر تقویت در این مورد

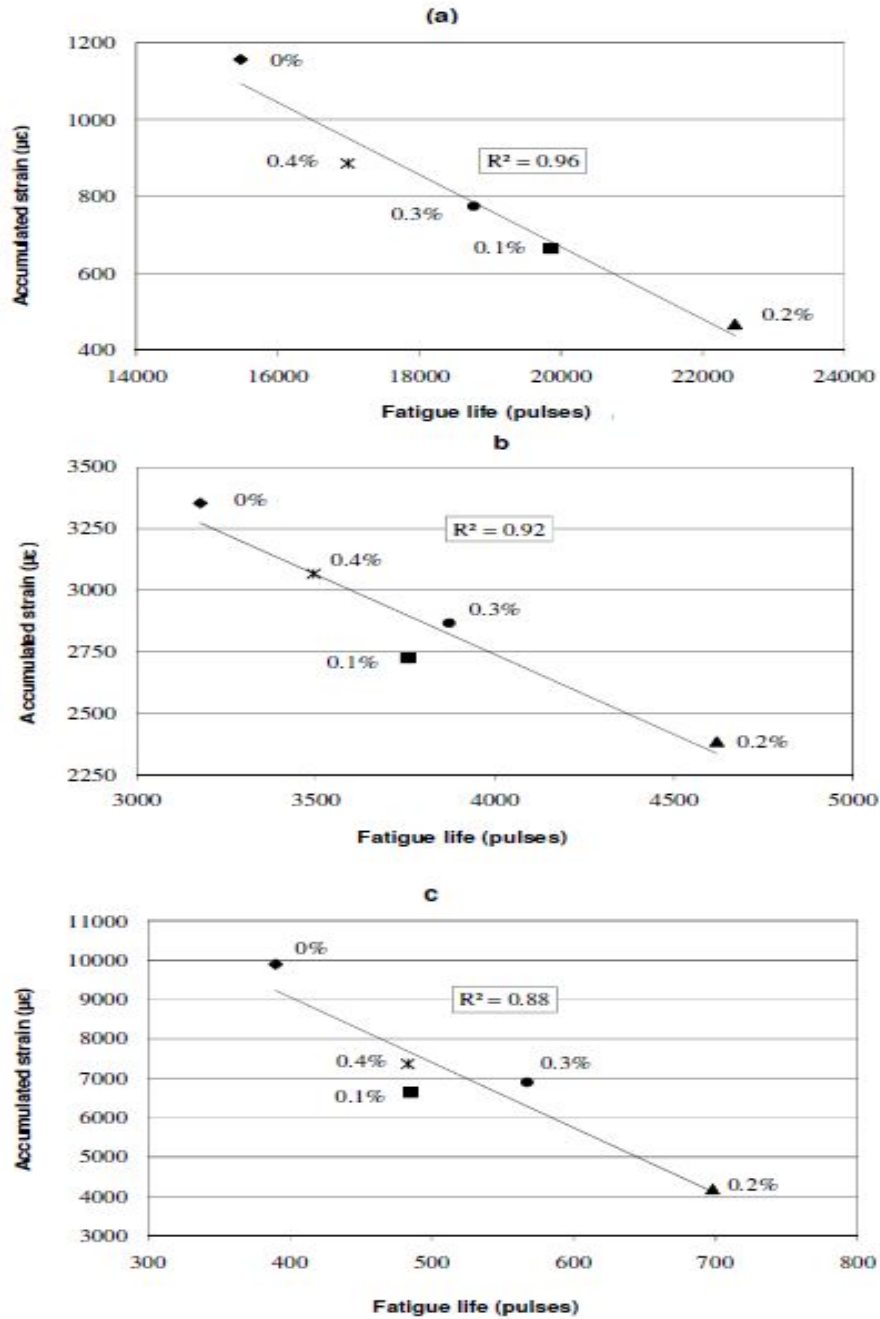
مخلوط‌های سیمان پرتلند و پودر سنگ آهک از ۲،۳۸ و ۲،۲۸ گرم/سانتی‌متر مکعب در ۴٪ به ۲،۴۶ و ۲،۳۳ گرم/سانتی‌متر مکعب در ۱۰٪ محتوا به ترتیب افزایش یافته است. در حالی که برای پودر شیشه از ۲،۳۱ گرم/سانتی‌متر مکعب در ۴٪ محتوا به ۲،۰۹ گرم/سانتی‌متر مکعب در ۱۰٪ محتوا کاهش یافته است که ممکن است به عملکرد لغزشی ذرات بازگردانده شود و ممکن است به چگالی خاص پرکننده‌ها وابسته باشد (Mahrez et al, 2010).

### ۲-۱-۲- تاثیر بر شیار شدگی

مخلوط‌های آسفالتی با ساختاری سفت‌تر انتظار می‌رود مقاومت برتری در برابر شیار شدگی داشته باشند و برعکس. به جز خاکستر پسته برنج (RHA) و گرد و غبار آجری (BD<sup>۴</sup>)، تمام مخلوط‌های تغییر یافته با فیلرها مقدار مدول مقاومت کمیابتری داشتند و انتظار می‌رود در مقاومت در برابر شیار شدگی عملکرد برتری داشته باشند. مخلوط‌های بازیافت پلاستیک حاوی گرد و غبار سنگ آهک (LD<sup>۵</sup>) و RHA مقدار بالاترین و پایین‌ترین مدول مقاومت را به ترتیب داشتند. ریزی مواد فیلر و همچنین کاهش مقدار حجم مخلوط‌های آسفالت ممکن است پارامترهای مسئول برای مقاومت بالاتر در برابر شیار شدگی مخلوط‌های آسفالت باشند. تعدادی از تحقیقات نشان داده‌اند که مخلوط‌های آسفالتی حاوی مواد پرکننده‌های ریزتر به دلیل تمایل این مواد به توزیع یکنواخت در مخلوط‌های آسفالتی، سختی بهتری دارند (Modarres et al, 2015; Choudhary et al, 2021). به همین ترتیب، برخی تحقیقات دیگر نیز مشاهده کرده‌اند که مقاومت در برابر شیار شدگی مخلوط‌های آسفالتی به تناسب معکوس با VMA<sup>۶</sup> آنها است (Choudhary et al, 2020). از آنجایی که بیشتر مواد پرکننده ریزتر از مخلوط حاوی گرد و غبار سنگ (SD<sup>۷</sup>) هستند و مخلوط‌های آنها هم VMA

ممکن است با کاهش هزینه‌های نگهداری و در عین حال افزایش عمر خدمت جاده، به‌طور مؤثرتر و مفیدتر باشد (Taghipoor et al, 2020).

بهبودی‌ای ارائه دهد اما در همان زمان هزینه را افزایش دهد، با این حال در جاده‌های پرتردد که به خستگی حساس‌تر هستند، تقویت با شیشه بهبودهای عظیمی در عمر خستگی ایجاد می‌کند و در نتیجه تقویت در اینجا



شکل ۲. عمر خستگی در برابر کرنش تجمعی در سطح تنش‌های مختلف

## ۲-۱-۴- حساسیت رطوبت

درصد هوا در نمونه‌های مارشال در طول تهیه نمونه‌ها برای آزمون پایداری بازمانده حفظ می‌شود. تمام نمونه‌ها با نرخ بارگذاری  $50 \pm 5$  میلی‌متر با استفاده از دستگاه مارشال آزمایش می‌شوند. مقدار RS با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود. مخلوط آسفالتی با مقدار RS بالاتر به معنای حساسیت کمتر به رطوبت است و برعکس (Huang et al, 2007).

$$RS(\%) = \frac{\text{avg. stability of conditioned set}}{\text{avg. stability of unconditioned set}} \times 100$$

خرده فولادی را تخریب می‌کند. مقدار بالاتر سیلیس در پودر شیشه علت اصلی این امر است. با این حال، SM-GP30 مقدار RS برابر با ۷۶٫۳۸٪ را تولید می‌کند، که بیشتر از مقدار حداقل مورد نیاز مطابق استانداردها است (Malik et al, 2023).

## ۲-۱-۵- کشش غیر مستقیم

مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی در دماهای پایین توسط آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم مورد بررسی قرار می‌گیرد. آزمون ITS<sup>۹</sup> در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بر روی مخلوط‌های کنترل و مخلوط‌های آسفالتی خرده فولادی انجام می‌شود، مطابق با استاندارد ASTM D6931 شش نمونه مارشال در OBC<sup>۱۰</sup> برای هر مورد مخلوط استفاده می‌شود. این نمونه‌ها به دو مجموعه به نام مجموعه بدون عمل آوری و مجموعه با عمل آوری تقسیم می‌شوند، به طوری که نمونه‌های بدون عمل آوری قبل از آزمایش در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت تحت تراکم قرار می‌گیرند. تمام نمونه‌ها به بارگذاری فشاری در طول صفحه قطری خود از طریق نوارهای با عرض ۱۲٫۷ میلی‌متر با نرخ تغییر مشخص (۵۱ میلی‌متر در دقیقه) تحت می‌شوند. مقدار بار حداکثر در شکست در معادله ۱ جایگزین می‌شود تا مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط آسفالتی تعیین شود. نسبت مقاومت کششی (TSR<sup>۱۱</sup>)

حساسیت به رطوبت مخلوط آسفالتی با استفاده از پایداری بازمانده (RS<sup>۸</sup>) بررسی می‌شود. برای هر مورد مخلوط، شش نمونه مارشال تهیه می‌شود. این نمونه‌ها به دو مجموعه تقسیم می‌شوند که به عنوان مجموعه تشکیل شده و مجموعه بدون شرایط نامگذاری می‌شوند. نمونه‌های تشکیل شده قبل از آزمایش در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت تحت تراکم قرار می‌گیرند.

برای رفع مشکل رطوبت، مخلوط باید حداقل مقدار RS ۷۵٪ را داشته باشد. مخلوط SM مقدار بالاتری از CM دارد. پایداری بالاتر و قدرت پیوند بهتر خرده فولادی اصلی‌ترین دلیل این موضوع است. با این حال، هم CM و هم SM مقادیر RS بیشتری از حداقل مقدار توصیه شده ۷۵٪ دارند. این به معنای این است که این مخلوط‌ها عملکرد خوبی در مقابل مقاومت در برابر ضرر رطوبت دارند. به علاوه، اضافه کردن خاکستر ذغال سنگ تفاوت‌های بین مقادیر پایداری بدون عمل آوری و پایداری با عمل آوری را کاهش می‌دهد. این موضوع باعث افزایش RS نسبت به مخلوط SM می‌شود، که نشان‌دهنده این است که استفاده از پودر ذغال سنگ (FA) مقاومت در برابر خرابی رطوبت را بهبود می‌بخشد. مقادیر RS برای CM و SM به ترتیب برابر با ۸۱٫۷۰٪ و ۸۷٫۷۵٪ است. مخلوط‌های دیگر مانند SM-FA20، SM-FA40 و SM-FA60 به ترتیب دارای مقادیر RS برابر با ۸۹٫۰۱٪، ۹۲٫۶۱٪ و ۹۴٫۵۳٪ هستند. مالیک و همکاران (۲۰۱۰) حساسیت رطوبتی مخلوط سنگ با استفاده از ماده پرکننده خاکستر ذغال سنگ را مورد مطالعه قرار دادند. افزودن خاکستر ذغال سنگ به مخلوط سنگ مقدار RS را به میزان ۶٫۴۴٪ افزایش داد. اما بر اساس مطالعه، افزودن خاکستر ذغال سنگ به مخلوط خرده فولادی باعث افزایش RS به میزان ۷٫۷۲٪ می‌شود. اضافه کردن پودر شیشه حساسیت رطوبتی مخلوط‌های



مقدار TSR با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود (Abdullah et al, 2021).

$$TS(kPa) = \frac{2000 \times P}{\pi \times t \times d}$$

(۲)

$$TSR(\%) = \frac{avg.ITSc}{avg.ITSus} \times 100$$

## ۲-۲- عملکرد بر روی قیر

آزمایشات مختلفی جهت ارزیابی تاثیر پودر شیشه بر عملکرد قیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ادامه به چند مورد از آنها اشاره می‌گردد.

- تجزیه و تحلیل اندازه ذرات با فرآیند رسوب‌سنجی (Micrometrics SediGraph 5100) برای بخشی بین ۰.۵ تا ۱۰۰ میکرومتر و از طریق غربال‌بندی تراکمی برای بخشی بزرگتر از ۱۰۰ میکرومتر انجام می‌گردد.

- آزمون خلاء (EN 1097-4) برای تعیین حجم خلاء در فیلرهای خشک و تراکمی انجام شد. این تست بر این فرضیه مبنی است که دانسیته حداکثر مخلوط معمولاً با تراکم پودر خشک در یک قالب حاصل می‌شود.

- آزمون چگالی حجمی خاص (EN 1097-7) برای تعیین چگالی حجمی خاص فیلر با استفاده از پیکنومترهای استاندارد انجام شد.

- آزمون آبی متیلن (EN 933-9) برای تعیین مقدار متیلن آبی که توسط فیلر پذیرفته می‌شود انجام شد. نتیجه به عنوان یک مقدار متیلن آبی به واحدهای (mg) متیلن آبی پذیرفته شده در هر (g) پرکننده ریز گزارش می‌شود. ارزش متیلن آبی یک تابع از مقدار و ویژگی‌های معدن‌های رس موجود در نمونه است. مقادیر بالای متیلن آبی به نمایش افزایش پتانسیل عدم عملکرد ترکیب ذرات ریز یا پرکننده معدنی در ترکیبات مخلوط سنگ آهنی به دلیل وجود رس اشاره دارد.

- آزمون حساسیت به رطوبت (EN 1744-1) برای ارزیابی مقاومت حلالیت فیلر در برابر آب انجام شد.

- آزمون تغییرات نقطه نرمی (EN 13179-1) برای ارزیابی تأثیر افزودن فیلرهای معدنی در مخلوط‌های آسفالتی بر روی تثبیت ویژگی‌ها انجام شد.

مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر آسیب رطوبتی را نشان می‌دهد. مخلوط آسفالتی با TSR بالاتر به معنای داشتن مقاومت خوب در برابر آسیب رطوبتی است و برعکس.

(۱)

اضافه کردن خرده فولادی خشن به مخلوط آسفالتی مقاومت کششی CM را به طور کمی افزایش می‌دهد. در حالی که FA و GP هیچ تأثیر قابل توجهی بر روی مقاومت کششی ندارند. اما FA تفاوت میان مقادیر ITS با و بدون عمل آوری را نسبت به SM کاهش می‌دهد. در مقابل، GP تفاوت میان مقادیر ITS شرایط با و بدون عمل آوری را افزایش می‌دهد. این موضوع باعث افزایش مقادیر TSR در مخلوط‌های خرده فولادی تغییر یافته با FA و کاهش مقادیر TSR در مخلوط‌های خرده فولادی تغییر یافته با GP می‌شود. بر اساس دستورالعمل‌های MoRTH، مخلوط آسفالتی باید مقدار حداقلی نسبت مقاومت کششی (TSR) را برابر با ۸۰٪ داشته باشد تا نیازهای خرابی رطوبتی را برآورده کند. مشاهده می‌شود که هم CM و هم SM مقدار حداقلی مورد نیاز TSR را دارند. اضافه کردن FA مقدار TSR مخلوط SM را بهبود می‌بخشد. مخلوط SM-FA60 مقدار TSR برابر با ۹۶٫۴۱٪ را تولید می‌کند، که بسیار از مقدار حداقلی مورد نیاز دور است. شارما و همکاران (Sharma et al, 2017) مقاومت رطوبتی مخلوط کنترلی با استفاده از ماده فیلر FA را تجزیه و تحلیل کردند و نشان دادند که اضافه کردن FA به مخلوط کنترلی مقدار TSR را به میزان ۶٫۷۶٪ افزایش می‌دهد. اما بر اساس مطالعه حاضر، افزودن FA به مخلوط خرده فولادی مقدار TSR را به میزان ۱۲٫۰۳٪ افزایش می‌دهد. اضافه کردن GP مقدار TSR مخلوط SM را کاهش می‌دهد. مقادیر کمتر TSR در درصد بیشتر GP به دست می‌آید. تا ۲۰٪ از اضافه کردن GP، مقادیر TSR با مقدار حداقلی مورد نیاز تطابق دارند. نتایج مقادیر P را که بیشتر از مقدار SL انتخاب شده ۰٫۰۵ هستند، نشان می‌دهد که جایگزینی FA و GP تأثیر قابل توجهی در تغییر مقاومت کششی نداشته‌اند. با این حال، FA مقاومت در برابر خرابی رطوبتی را با کاهش مقاومت کششی بین نمونه‌های با و بدون عمل آوری بهبود می‌بخشد.



شکل ۳. تصویر قیر و آزمایشات قیر

### ۲-۱- خصوصیات فیزیکی قیر

آزمون خلاء اطلاعاتی در مورد مقدار پتانسیل قیر که فیلر می‌تواند جذب کند و در نتیجه نشان‌دهنده توان تثبیتی است که فیلر بر ماستیک قیر اعمال می‌کند (Sangiorgi et al, 2017)، فراهم می‌کند. به موجب استاندارد EN 13043، مقادیر خلاء ریگدن محدود به بازه ۲۸ تا ۵۵٪ هستند. با توجه به این استاندارد به عنوان مرجع، فیلر پودر شیشه بازیافتی این محدوده‌های تعیین شده را رعایت می‌کند. در مورد متیلن آبی، می‌توان گفت که حضور قسمت ریز در قیلر پودر شیشه بیشتر از سنگ آهنی است؛ با این حال، هر دو فیلر حدود مرزهای استاندارد را رعایت می‌کنند. استاندارد EN 13043 پیشنهاد می‌کند که مقدار حلالیت در آب ۱۰٪ باشد. حلالیت در آب برای فیلر پودر شیشه با مقدار حاصل از فیلر سنگ آهنی نزدیک است و مقادیر تغییرات نقطه نرمی نزدیک به ۱۰ درجه سانتیگراد امکان مطلوب برای کار کردن با مخلوط‌ها را تضمین می‌کند. در تحقیقی که توسط Dondi و همکاران (Dondi et al, 2016) انجام شد، از یک قیر تراکم‌پذیر با درجه ۷۰/۵۰ و یک قیر اصلاح‌شده با پلیمر (SBS 3%<sup>۱۲</sup> به وزن قیر) استفاده شد که هر دوی آنها در نمونه‌های مخلوط آسفالت و نمونه‌های ماستیک تولید شده است. ویژگی‌های قیر ارزیابی شد و در جدول ۱ نمایش داده شده‌اند.

### ۲-۲- مقاومت و خستگی قیر

#### بررسی ویژگی‌های رئولوژیکی ماستیک

جهت ارزیابی خصوصیات رئولوژیکی قیر، آزمایشات مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در زیر به چند مورد از آنها اشاره می‌گردد.

#### -آزمون دامنه جاروب (تغییرات شدت)

آزمون‌های دامنه جاروب بر اساس استاندارد EN 14470 ابتدا به منظور بررسی منطقه ویسکوالاستیک در دمای ۱۰ درجه سلسیوس با فرکانس ثابت ۱۰ راد بر ثانیه (۱،۵۹ هرتز) انجام شد.

#### -آزمون جاروب فرکانسی

به منظور نمایش مدول مختلط ( $G^*$ ) و زاویه فاز ( $\delta$ ) ماستیک‌های آسفالت، آزمون پراش فرکانسی به موجب استاندارد EN 14470 انجام شد. منحنی‌های اصلی از آزمون‌ها محاسبه شدند، تا ارتباط بین فرکانس‌های بار و مدول مختلط  $G^*$  و زاویه فاز  $\delta$  بیابیم. دمای مرجع برای منحنی‌های اصلی ۲۰ درجه سلسیوس بود. مدل Williams-Landel-Ferry برای دست آوردن عوامل تغییر دما استفاده شد. محدوده فرکانس بین ۰،۰۱ تا ۱۰ هرتز از ۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس بود.

### آزمون خزش و بازیابی تنش چندگانه

آزمون خزش و بازیابی تنش چندگانه (MSCR)

به موجب استاندارد AASHTO TP 70-07

" (2013) روش استاندارد برای خزش و بازیابی تنش چندگانه (MSCR) برای قیر با استفاده از ژئومتر برش دینامیکی انجام شد. طبق این استاندارد، نمونه ماستیک به مدت ۱ ثانیه با تنش خزشی ثابت بارگذاری می‌شود، سپس بازیابی تنش صفر برای ۹ ثانیه انجام می‌شود. ده چرخه خزش و بازیابی با تنش کریپ ۰٫۱ کیلوپاسکال، دنبال شده توسط ۱۰ چرخه با تنش خزش ۳٫۲ کیلوپاسکال، اجرا می‌شوند. تطابق تنش نامحدود (Jnr) و درصد بازیابی پس از ۱۰ چرخه با تنش ۰٫۱ و ۳٫۲ کیلوپاسکال مورد مطالعه قرار گرفت. ارزش Jnr به عنوان نسبت بین وقتانی بی‌خلوص نامحدود برای ۱۰ چرخه کریپ و بازیابی میانگین و تنش مورد استفاده برای آن چرخه‌ها محاسبه شد. دمای آزمون ۴۶ درجه سلسیوس انتخاب شد.

### ویژگی‌های حجمی

نمونه‌های با قطر ۱۵۰ میلی‌متر با استفاده از یک مهره ژیراتوری تحت فشار ثابت ۶۰۰ کیلوپاسکال و زاویه خارجی ۱٫۲۵ درجه سلسیوس برای ۱۰۰ ژیراسیون در دمای ۱۵۵ درجه سلسیوس متراکم شدند. ویژگی‌های حجمی به موجب استاندارد EN 12697-8 تعیین شدند. علاوه بر تراکم، منحنی‌ها برای بررسی نرخ قابلیت کارایی مختلف مخلوط‌ها تجزیه و تحلیل شدند.

### مقاومت کشش غیرمستقیم

مدول سختی کشش غیرمستقیم آزمون به موجب استاندارد EN 12697-26 در دماهای ۵، ۲۰ و ۳۵ درجه سلسیوس انجام شد.

این آزمون با در نظر گرفتن هدف ۵ میکرومتر تغییر شکل مجاز با زمان افزایش استاندارد توصیه شده  $124 \pm 4$  میلی‌ثانیه انجام شد.

### آزمون محوری تکراری بار

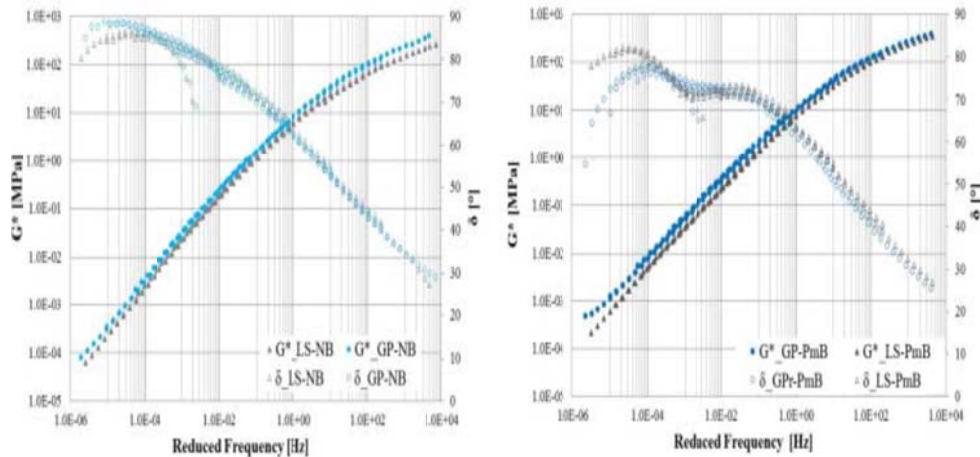
آزمون بر اساس استاندارد EN 12697-25 در دمای ۴۰ درجه سلسیوس تحت سطح تنش ۱۰۰ کیلوپاسکال انجام شد و تمام نمونه‌ها به بارگذاری پیش‌آزمونی به مدت ۱۰ دقیقه تحت عملکرد بودند.

### ۳- تأثیر پودر شیشه بر مقاومت و خستگی ماستیک

میدان الاستو-الاستیک خطی (LVE  $10^7$ ) نمونه‌های ماستیک برای قیر اصلاح نشده و قیر اصلاح شده با SBS به ترتیب ۰٫۷۵٪ و ۰٫۵٪ است، بدون توجه به نوع فیلر. ویژگی‌های قیر تأثیر قابل توجهی بر روی محدوده LVE دارند، به عنوان مثال میزان تغییر شکل حد LVE برای قیر پایه ۵۰٪ بیشتر از قیر متراکم شده با SBS است (Airey, 1997). از مقایسه منحنی‌های اصلی ماستیک‌های LS-NB و GP-NB می‌توان مشاهده کرد که حضور GP تمایل به افزایش سختی ماستیک در تمام محدوده فرکانس دارد.

جدول ۱. نتایج آزمایشات فیزیکی قیر

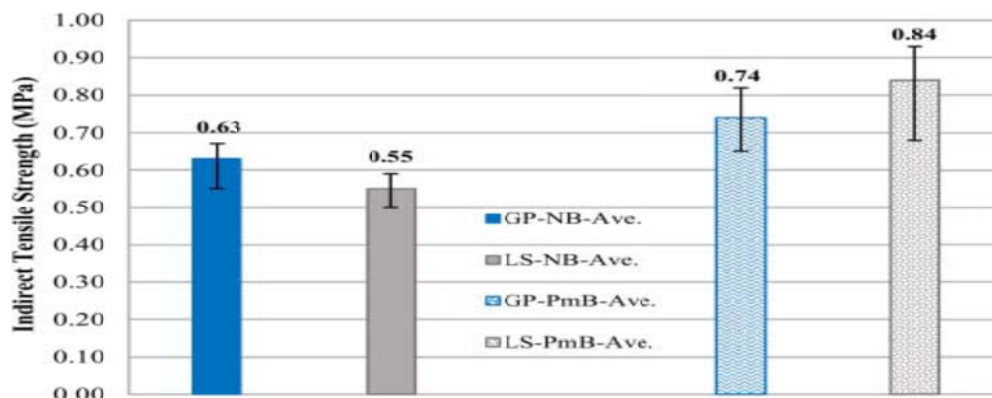
Property	Unit	Bitumen type		Standard
		Pen grade 50/70	PmB (SBS)	
Penetration @ 25°C	dmm	50	55	EN 1426
Softening Point	°C	50	70	EN 1427
Force Ductility test @10°C	J/cm <sup>3</sup>	—	3	EN 13589
Dynamic Viscosity @160°C	Pa s	0.5	0.7	EN 12596
Elastic Recovery @25°C	%	—	80	EN 13398



شکل ۴. نتایج مدول مختلط نمونه‌های مختلف

شیشه تأثیر منفی بر نرخ فشردگی مخلوط ندارد. علاوه بر این، مخلوط حاوی فیلر پودر شیشه دارای کمترین فضای خالی هوا نسبت به مخلوط‌های حاوی فیلر سنگ آهک معمولی است که نتایج حاصل از آزمون Rigden را نشان می‌دهد. در مخلوط‌های آسفالت، اسکلت معدنی (سنگدانه‌ها) مقاومت فشاری را فراهم می‌کند، و همچنین همگامی قیر و ماستیک را ارائه می‌دهند (علاوه بر انسجام قیر/سنگدانه‌ها) (Martin et al, 2013). با توجه به اینکه ویژگی‌های کششی مخلوط‌های آسفالت نشان‌دهنده توانایی ترک‌ها هستند، این به عنوان یک پارامتر اساسی خمش (Khosla & Harikrishnan, 2016)، مقاومت در برابر ترک خوردگی حرارتی و خستگی در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، مقادیر مقاومت غیرمستقیم به طور مستقیم به سطح همگامی سنگدانه/پرکننده و قیر وابسته است (Dondi et al., 2014)؛ بنابراین، مقدار ITS به عنوان یک پارامتر تطبیقی قابل اعتماد در نظر گرفته می‌شود. شکل ۵ میانگین مقادیر آزمون ITS را نشان می‌دهد.

به‌خصوص، این رفتار در فرکانس‌های بالا و پایین تقویت می‌شود. رفتار زاویه فاز ماستیک‌ها مانند قیر پایه است؛ هر دو فیلر تغییری در پاسخ الاستوپلاستیکی قیر نشان نمی‌دهند، که نمایانگر یک پاسخ کاملاً ویسکوز در دمای بالا و پاسخ الاستیک غالب در دماهای پایین است. حضور SBS در هر دو ماستیک توسط افزایش مدول مختلط و کاهش زاویه فاز در دماهای بالا تأیید می‌شود (Airey, 1997). با این حال، در این مورد، ماستیک GP-PmB که شامل GP است، مقادیر مدول بالاتری نسبت به ماستیک حاوی فیلر سنگ آهک در فرکانس‌های پایین دارد، که در مقابل فرکانس‌های پایین نشانگر خط مستقیم در مطابقت با فرکانس‌های پایین است. حضور GP مقاومت تغییر شکل دائمی ماستیک را در دماهای بالا افزایش می‌دهد و اثرات پلیمر را در مقاومت در برابر تنش برشی تقویت می‌کند. علاوه بر این، با تحلیل روند زاویه فاز می‌توان مشاهده کرد که مقادیر زاویه فاز ماستیک GP-PmB در دماهای بالا نسبت به LS-PmB کمتر است. اثرات SBS را در پاسخ الاستیکی قسمت قیر تقویت می‌کند. از نتایج می‌توان نتیجه گرفت که فیلر پودر



شکل ۵. نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم

توانایی مخلوط در تحمل بارهای ترافیکی دارد (Nassar et al, 2016). مقادیر ITS به شدت به دمای آزمون وابسته هستند و نتایج اغلب برای تجزیه و تحلیل حساسیت حرارتی مخلوطهای آسفالت (Sangiorgi et al, 2016) در نظر گرفته می‌شوند. از نتایج نشان داده شده میتوان دانست که در دماهای متوسط تفاوت قابل توجهی وجود ندارد، همانطور که از نتایج آزمون دامنه فرکانس مشاهده می‌شود، تفاوتی قابل بحث در دماهای پایین ظاهر می‌شود که به ویژه در حضور قیر اصلاح نشده، مقادیر بالاتر ITS برای مخلوط حاوی فیلر پودر شیشه و قیر اصلاح نشده، نتایج رئولوژی ماستیک را تأیید می‌کند. پودر شیشه مخلوطهای آسفالتی را سفت می‌کند و توانایی تحمل بار را افزایش می‌دهد.

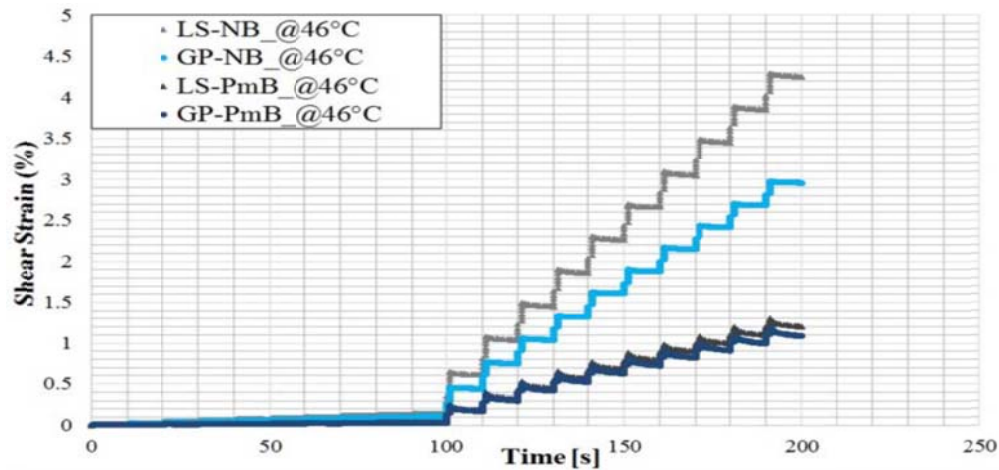
#### شیار شدگی قیر

برای بررسی مقاومت به شیار شدگی در ماستیک‌ها و مخلوطهای آسفالتی، خواص تغییر شکل دائمی با استفاده از آزمون (MSCR) در دمای ۴۶ درجه سانتیگراد و آزمون محوری تکراری با بار محوری در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد انجام شدند، به منظور ارزیابی تأثیر احتمالی درصد فیلر پودر شیشه دمای استاندارد انتخاب شده بود تا بتوان این نتایج را با نتایج RLAT روی مخلوط آسفالت مقایسه کرد. شکل زیر منحنی‌های MSCR را در پایان چرخه‌های سطح تنش برابر با ۳،۲ کیلوپاسکال نشان می‌دهد.

همانطور که مورد انتظار است، مقادیر ITS برای مخلوطهای حاوی PmB بیشتر از مخلوطهای حاوی قیر اصلاح نشده است. می‌توان دید که نتایج آزمون مخلوطهای حاوی فیلر پودر شیشه با مخلوطهای حاوی فیلر سنگ آهک مقایسه‌پذیر هستند (شکل ۵). به تفصیل، از تجزیه و تحلیل نتایج مخلوطهای ساخته شده با قیر پایه، مشاهده می‌شود که حضور پرکننده پودر شیشه مقاومت مخلوط را افزایش می‌دهد. ویسکوزیته پایین قیر اصلاح نشده منجر به جذب بهتر پودر شیشه به قیر می‌شود. از سوی دیگر، برای مخلوطهای حاوی PmB، مقادیر ITS برای مخلوط کنترلی بیشتر از مخلوطهای حاوی فیلر پودر شیشه است. همانطور که در مطالعات قبلی (Marandi & Ghasemi, 2013) یافت شده، ویژگی‌های جذب قیر کمی فیلر شیشه با افزایش ویسکوزیته بیشتر قیر افزایش می‌یابد، که منجر به کاهش ویژگی‌های چسبندگی می‌شود.

#### ۴- خصوصیات دمای پایین قیر

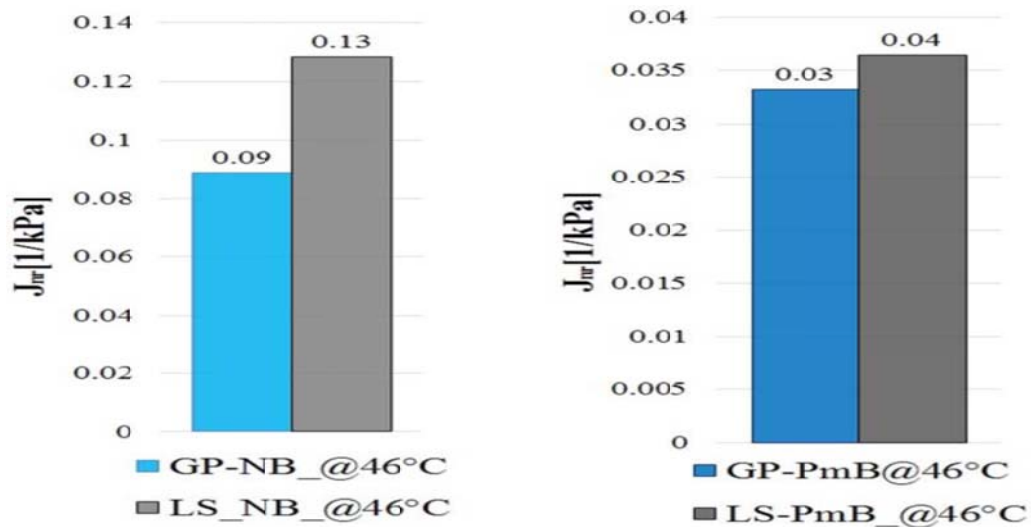
در سرعت‌های جریان ترافیکی معمول و دماهای روسازی، مخلوطهای آسفالت تقریباً به صورت کمی انعطاف‌پذیر عمل می‌کنند؛ بنابراین، مدول مقاومت سفنی غیرمستقیم (ITS<sup>f</sup>) اندازه‌گیری میزان مقاومت آن به انعطاف و به طور نسبی توانایی توزیع بارهای آن را نشان می‌دهد (Nunn & Smith, 1996). از نتایج مقدار ITS<sup>f</sup> همچنین به عنوان یک نشانگر برای خواص سازه‌ای مخلوطها در نظر گرفته می‌شود، زیرا ارتباطی با



شکل ۶. کرنش برشی نمونه‌های مختلف

تخلیه داشتند. ماستیک‌های آسفالتی تغییر یافته دارای ظرفیت به مراتب بالاتری از تنش بازیابی پذیر هستند و همانطور که توسط تجزیه و تحلیل آزمایش تأیید شده است، حضور پودر شیشه این ویژگی را بهبود می‌بخشد. در دو سطح تنش برشی، GP-PmB مقادیر کمتری از تغییر شکل انباشته نسبت به ماستیک حاوی پرکننده سنگ آهک دارد (شکل ۶). در شکل ۷ نتایج منحنی‌های MSCR با مطالعه ارزش‌های تطابق غیرقابل بازیابی تأیید شده‌اند.

ماستیک‌های حاوی پودر شیشه رفتار مقاوم‌تری را از خود نشان می‌دهند و در پایان آزمایش تغییر شکل انباشته کمتری دارند. ویژگی‌های آسفالت ماستیک‌های مورد مطالعه پاسخی به مراتب متفاوت دارند که تأثیرات پودر شیشه‌ای را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در ماستیک‌های ساخته شده با قیر بدون تغییر، فیلر پودر شیشه مقاومت به تغییر شکل در مرحله خمش را افزایش داد، اما این ماستیک در مرحله بازیابی به طور کمی بهبودی داشت. بالعکس، قیرهای الاستومری تغییرات بیشتری در مرحله



شکل ۷. نتایج شیارشدگی قیر

پایداری مارشال برای تمام مخلوط‌ها را نسبت به پرکننده‌های سیمان پرتلند یا پودر سنگ آهک بهبود می‌بخشد. درصد افزایش در بازه ۶٪ تا ۳۶٪ وابسته به درصد پرکننده متغیر می‌شود.

-مقدار میانگین روانی مارشال کمتر از نتایج حاصل از مخلوط‌های با فیلرهای سیمان پرتلند معمولی یا پودر سنگ آهک است و استفاده از پرکننده پودر شیشه در مخلوط‌های آسفالت گرم موجب تولید مخلوط‌هایی با وزن کمتر و تقریباً با درصد بالاتری از جاذبه‌ها نسبت به مخلوط‌های مرتبط حاوی سیمان پرتلند معمولی یا پودر سنگ آهک می‌شود. حداکثر کاهش به میزان ۱۵٪ در درصد ۱۰٪ جایگزینی نسبت به مخلوط مرتبط حاوی سیمان پرتلند معمولی بدست آمده است.

-نتایج نشان داد پودر شیشه از مقاومت مخلوط در برابر رطوبت می‌کاهد.

-همچنین فیلر پودر شیشه به‌عنوان مواد مناسب برای ساخت روسازی جاده بوده است که جایگزین فیلر سنگ آهک سنتی می‌شود.

-نتایج به‌دست‌آمده از توصیف‌سنجی‌های فیزیکی، مناسب بودن پودر شیشه به‌عنوان پرکننده را تأیید کرد. از نظر تعامل بین قیرهای اصلاح‌نیافته و اصلاح یافته با پودر شیشه، خواص رئولوژیکی ماستیک‌ها مورد مطالعه قرار گرفتند. از نتایج به‌دست‌آمده از آزمون‌های FS و MSCR، مشخص شد که فیلر پودر شیشه سختی ماستیک را افزایش می‌دهد و در عین حال واکنش تنش الاستیک SBS را تقویت می‌کند.

از منظر مخلوط، نتایج ITSM و RLAT نشان‌دهنده این موضوع بوده‌اند که فیلر پودر شیشه می‌تواند بهبود عملکرد مخلوط‌ها را از نظر توان تحمل و مقاومت در برابر تغییرات دائمی فراهم کند. به طور کلی، مخلوط آسفالت با استفاده از پودر شیشه اثرات بهتری در صرفه‌جویی منابع، دوست‌داری به محیط زیست، مقاومت و صرفه اقتصادی دارد که استفاده از آن به‌عنوان جایگزین کارآمد در ساخت جاده می‌باشد.

مقادیر Jnr برای چهار ماستیک تحت تنش‌های برشی ۳،۲ کیلوپاسکال در دمای ۴۶ درجه سانتیگراد محاسبه شدند. ماستیک‌های حاوی GP، به‌دست‌آمده با هر دو بیتومن تغییر نیافته و بیتومن تغییر یافته، مقادیر کمتری از Jnr در ۳،۲ کیلوپاسکال دارند، نشان دهنده حساسیت کمتر به تغییرات دائمی هستند. پس از اجرای تنظیمات فشار یک محوره چرخشی مستقیم، که به خواص تغییر شکل دائمی نامیده می‌شود، با اجرای آزمون RLAT پی‌گرفته شد.

با توجه به نتایج مشخص است که مخلوط‌های حاوی فیلر پودر شیشه مقادیر کمتری از تغییر شکل انباشته و مدول‌های سفتی خمش بالاتری دارند، اگر با مخلوط‌های حاوی فیلر سنگ آهک سنتی مقایسه شوند. از نتایج آزمون RLAT، مطابق با مطالعات انجام‌شده توسط (Khosla & Harikrishnan et al, 2007)، مشخص شد که فیلر پودر شیشه مقاومت لایه سطحی به تغییرات دائمی را افزایش می‌دهد. این تجزیه و تحلیل به طور جامع بررسی شده و واکنش مخلوط به بار RLAT را با آنچه در طول آزمون MSCR برای ماستیک به‌دست‌آمده است، مقایسه کرده است. بر اساس همبستگی بین پارامتر خمیر ALF و Jnr که توسط (D'Angelo et al, 2007) استخراج شده است، تطابقی بین تغییر شکل انباشته و Jnr استخراج شده از آن به دست آمده است. همانطور که در مطالعات مذکور نیز مشاهده شده است، در این مورد نیز ضریب تعیین بیش از ۰٫۸ است که نشان می‌دهد نتایج رئولوژیکی، به‌دست‌آمده از آزمون MSCR، می‌توانند با عملکرد مخلوط مرتبط باشند. از ارزیابی تغییر شکل دائمی، روشن است که افزایش سفتی به وسیله پرکننده پودر شیشه بر مقاومت در برابر پدیده پخش شدگی تأثیر می‌گذارد.

## ۵- نتیجه‌گیری

-نتایج نشان داد اضافه نمودن پودر شیشه سبب پایداری مخلوط می‌گردد، زیرا استفاده از فیلر پودر شیشه مقادیر

A review. *Construction and Building Materials*, 234 117271.

-Dondi, G., Mazzotta, F., Simone, A., Vignali, V., Sangiorgi, C., & Lantieri, C. (2016). Evaluation of different short term aging procedures with neat, warm and modified binders. *Construction and Building Materials*. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.122.

-Enieb, Mahmoud, Aboelkasim Diab, and Xu Yang. (2020). Short-and long-term properties of glass fiber reinforced asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering* 22, No. 1, 64-76.

-Ge, Zhesheng, Hao Wang, Qingshan Zhang, and Chunlong Xiong. (2015). Glass fiber reinforced asphalt membrane for interlayer bonding between asphalt overlay and concrete pavement. *Construction and Building Materials* 101, 918-925.

-Guo, Qinglin, Lili Li, Yongchun Cheng, Yubo Jiao, and Chun Xu. (2015). Laboratory evaluation on performance of diatomite and glass fiber compound modified asphalt mixture." *Materials & Design (1980-2015)* 66, 51-59.

-Huang, Yue, Roger N. Bird, and Oliver Heidrich (2007). A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources, conservation and recycling* 52, No. 1 58-73.

-Issa, Y. (2016). Effect of adding crushed glass to asphalt mix." *Archives of Civil Engineering* 62, No. 2, 35-44.

-Jin, Dongzhao, Jiaqing Wang, Lingyun You, Dongdong Ge, Chaochao Liu, Hongfu Liu, and Zhanping You (2021). Waste cathode-ray-tube glass powder modified asphalt materials: Preparation and characterization. *Journal of Cleaner Production* 314 127949.

-Jony, Hassan H., Mays F. Al-Rubaie, and Israa Y. Jahad (2011). The effect of using glass powder filler on hot asphalt concrete mixtures properties. *Eng. Technol. J.* 29, No. 1, 44-57.

-Kang, Yang, Dunhong Zhou, Qiang Wu, Rui Liang, Shaoxin Shanguan, Zhiwei Liao, and Ning Wei. (2019). Molecular dynamics study on the glass forming process of asphalt. *Construction and Building materials* 214 430-440.

-Khosla, N., & Harikrishnan, K. I. (2007). Tensile strength – A design and evaluation tool for Superpave mixtures. *FHWA/NC/2006-24 Final report*.

-Khosla, N. Paul, and Haritha Y. Musty. (2016). Impact of Binders from Waste Materials on Performance of Surface Mixtures.

-Marandi, Seyed Morteza, and Mojtaba Ghasemi. (2013). Laboratory studies of the

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Stone Matrix Asphalt
- 2- Voids In Total Mix
- 3- Rice Husk Ash
- 4- Brick Dust
- 5- Lime Dust
- 6- Voids In Mineral Aggregate
- 7- Stone Dust
- 8- Retained Stability
- 9- Indirect Tensile Strength
- 10- Optimum Bitumen Content
- 11- Tensile Strength Ratio
- 12- Styrene Butadiene Styrene
- 13- Multiple Stress Creep Recovery
- 14- Repeated Load Axial Test
- 15- Linear Viscoelastic
- 16- Indirect Tensile Strength Modulus

۷-مراجع

-Androjić, Ivica, and Gordana Kaluder. (2017). Influence of recycled filler on asphalt mix properties. *Građevinar* 69, No. 03. 207-214.

-Abdullah, Baqadeem Abdullah Omar, F. M. Jakarni, A. K. S. Al-Shakhrit, and Khairil Azman Masri. (2021). The usage of recycled glass in hot mix asphalt: a review. *Construction* 1, No. 1, 29-34.

-Arabani, M. (2011). Effect of glass cullet on the improvement of the dynamic behaviour of asphalt concrete." *Construction and Building Materials* 25, No. 3, 1181-1185.

-Airey, Gordon D., Andrew C. Collop, and Nicholas H. Thom. (2004). Mechanical performance of asphalt mixtures incorporating slag and glass secondary aggregates. In *Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04), South Africa*, Vol. 12, 16.

-Airey, Gordon Dan. (1997). Rheological Characteristics.

-Barraj, Firas, Sarah Mahfouz, Hussein Kassem, Jamal Khatib, Dimitrios Goulias, and Adel Elkordi (2023). Investigation of Using Crushed Glass Waste as Filler Replacement in Hot Asphalt Mixtures. *Sustainability* 15, No. 3 2241.

-Choudhary, Jayvant, Brind Kumar, and Ankit Gupta. (2023). Evaluation of engineering, economic and environmental suitability of waste filler incorporated asphalt mixes and pavements. *Road Materials and Pavement Design* 22, No. sup1. S624-S640.

-Choudhary, Jayvant, Brind Kumar, and Ankit Gupta. (2020). Utilization of solid waste materials as alternative fillers in asphalt mixes:



- Su, Nan, and J. S. Chen. (2002). Engineering properties of asphalt concrete made with recycled glass. *Resources, Conservation and Recycling* 35, No. 4, 259-274.
- Salem, Zaydoun T. Abu, Taisir S. Khedawi, Musa Bani Baker, and Raed Abende. (2017). Effect of waste glass on properties of asphalt concrete mixtures. *Jordan Journal of Civil Engineering* 11, No. 1.
- Shafabakhsh, G. H., and Yousef Sajed. (2002). Investigation of dynamic behavior of hot mix asphalt containing waste materials; case study: Glass cullet. *Case Studies in Construction Materials* 1, 96-103.
- Sharma, Rachit. (2002). Compressive strength of concrete using construction demolition waste, glass waste, superplasticizer and fiber. *Jordan Journal of Civil Engineering* 11, No. 3.
- Sangiorgi, Cesare, Piergiorgio Tataranni, Francesco Mazzotta, Andrea Simone, Valeria Vignali, and Claudio Lantieri (2017). Alternative fillers for the production of bituminous mixtures: A screening investigation on waste powders. *Coatings* 7, No. 6 76.
- Sangiorgi, C., Eskandarsefat, S., Tataranni, P., Simone, A., Vignali, V., Lantieri, C., & Dondi, G. (2016a). A complete laboratory assessment of crumb rubber porous asphalt. *Construction and Building Materials*.  
**doi: 10.1016/j.conbuildmat. 12.016**
- Sangiorgi, C., Tataranni, P., Mazzotta, F., Simone, A., Vignali, V., & Lantieri, C. (2017). Alternative fillers for the production of bituminous mixtures: A screening investigation on waste powders. *MDPI Coatings*, 7(6), 76.  
**doi: 10.3390/coatings7060076.**
- Taghipoor, Mohammad, Amid Tahami, and Masoud Forsat. (2017). Numerical and laboratory investigation of fatigue prediction models of asphalt containing glass wastes. *International Journal of Fatigue* 140, 105819.
- Ziari, Hassan, M. R. M. Aliha, Ali Moniri, and Yasha Saghafi (2020). Crack resistance of hot mix asphalt containing different percentages of reclaimed asphalt pavement and glass fiber. *Construction and Building Materials* 230 117015.140/96, Uk.
- effect of recycled glass powder additive on the properties of polymer modified asphalt binders. *International Journal of Engineering* 26, No. 10 1183-1190.
- Nassar, A. I., Khashaa Mohammed, M., Thom, N., & Parry, T. (2016). Characterization of high-performance cold bitumen emulsion mixtures for surface courses. *International Journal of Pavement Engineering*.  
doi: 10.1080/10298436.2016.1176165.
- Mahrez, Abdelaziz, and Mohamed Rehan Karim. (2013). Fatigue characteristics of stone mastic asphalt mix reinforced with fiber glass. *International Journal of the Physical Sciences* 5, No. 12, 1840-1847.
- Modarres, Amir, Morteza Rahmanzadeh, and Pooyan Ayar. (2015). Effect of coal waste powder in hot mix asphalt compared to conventional fillers: mix mechanical properties and environmental impacts. *Journal of Cleaner Production* 91 262-268.
- Malik, Mohammad Iqbal, Mohammad Shafi Mir, and Mehnaza Akhter. (2023). A synthesis on utilization of waste glass and fly ash in cold bitumen emulsion mixtures." *Environmental Science and Pollution Research* 30, No. 7, 17094-17107.
- Martín-Morales, M., M. Zamorano, I. Valverde-Palacios, G. M. Cuenca-Moyano, and Z. Sánchez-Roldán. (2013). Quality control of recycled aggregates (RAs) from construction and demolition waste (CDW). Handbook of recycled concrete and demolition waste, 270-303. *Woodhead Publishing*.
- Martín, J., J. Rodríguez Montero, F. Moreno, JL Piqueras Sala, and M. C. Rubio. (2013). Feasibility analysis of the reuse of waste filler of bituminous mixtures for the production of self-compacting concrete. *Materials & Design (1980-2015)* 46. 372-380.
- Nunn M. E., & Smith, T. M. (1996). The indirect tensile stiffness modulus test: Assessment of suitability of an asphalt performance test. *TRL Proj. Rep. CE*.
- Paul, Dibyendu, Machavarapu Suresh, and Manish Pal. (2021). Utilization of fly ash and glass powder as fillers in steel slag asphalt mixtures. *Case Studies in Construction Materials* 15 e00672.
- Simone, Andrea, Francesco Mazzotta, Shahin Eskandarsefat, Cesare Sangiorgi, Valeria Vignali, Claudio Lantieri, and Giulio Dondi. (2019). Experimental application of waste glass powder filler in recycled dense-graded asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design* 20, No. 3 592-607.

# Investigating the Effect of Glass Waste Powder on Asphalt Mixture Performance

*Rezvan Babagoli, Assistant Professor, Department of Civil Engineering,  
University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran.  
Mohammadreza Khomade, B.Sc., Student, Department of Civil Engineering,  
University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran.*

*E-mail: Rezvan\_Babagoli@yahoo.com*

Received: June 2023- Accepted: November 2023

## **ABSTRACT**

In this research, by reviewing the researches and articles, waste glass powder is investigated on the performance of asphalt mixture. In the last decade, these researchers have been using crushed glass in construction programs to prevent waste glass from being used as protective supplements and reducing the environment in construction. Crushed glass has been studied for use as materials in base and sub-base pavement layers, as well as concrete. Glass is the only material that can be completely recycled. This material is prepared by melting quartz sand, soda and lime, and also glass pieces. The glass game is collected as one of the recycled components. It is non-metallic and neither can nor does it burn, so its recovery is possible. Therefore, it is used in road construction as a substitute for stone materials in asphalt pavement with warm asphalt mixture. It showed that the addition of glass powder increases the stability of the mixture, because the glass powder filler improves the Marshall Stability results for all mixtures compared to Portland cement or limestone powder fillers. The results showed that the powder from the mixture decreases against the glass. Also, the obtained results investigated the suitability of glass as filler.

**Keywords:** Glass Powder, Asphalt Mixture, Rutting, Fatigue, Modulus of Elasticity