

## ارزیابی سختی، مقاومت در برابر شیارشدگی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی پودرلاستیک و ساسوبیت

### مقاله علمی - پژوهشی

محمد کوهی\*، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران  
شاهین شعبانی، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران  
ابوالفضل باقرنیا، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاداسلامی،  
تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.koohhi@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۷ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۲

صفحه ۲۲۰-۱۹۷

### چکیده

یکی از راه‌حل‌های مهندسی برای کاهش میزان ضایعات لاستیکی، استفاده از پودرلاستیک در ساخت مخلوط‌های آسفالتی و بهبود عملکرد آنها است. با این حال دمای زیاد اختلاط پودرلاستیک و آسفالت نیازمند استفاده از راه‌حل‌هایی است که بتواند همزمان سبب کاهش انرژی لازم برای اختلاط و بهبود عملکرد آسفالت لاستیکی شود. یکی از راه‌حل‌هایی که پژوهشگران در سال‌های اخیر به آن پرداخته‌اند، استفاده از مخلوط آسفالت گرم است که دمای اختلاط ۱۰ تا ۳۰ درجه کمتر از مخلوط آسفالت داغ (HMA) نیاز دارد. از جمله موادی که می‌تواند دمای اختلاط آسفالت لاستیکی را کاهش دهد، ساسوبیت است. اگرچه پژوهشگران مخلوط‌های آسفالتی حاوی پودرلاستیک و ساسوبیت را مورد بررسی قرار داده‌اند، با این حال به صورت ویژه حساسیت رطوبتی این نوع مخلوط بررسی نشده است. بدین منظور پژوهش حاضر برای بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاوی پودرلاستیک و ساسوبیت از دو مقدار ۸ و ۱۶ درصد پودرلاستیک و ۱، ۲ و ۳ درصد ساسوبیت استفاده نموده است. در طرح اختلاط نمونه‌ها از دو دمای ۱۵۰ و ۱۳۰ درجه استفاده شده تا تفاوت بین مخلوط گرم و داغ مشاهده شود. بر روی نمونه‌ها، آزمایش‌های استحکام و روانی مارشال، مدول برجهندگی، خزش دینامیکی و حساسیت رطوبتی (کشش غیرمستقیم، نسبت مقاومت فشاری اشباع به مقاومت فشاری خشک و جوشان تگزاس) انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که از تکنولوژی آسفالت گرم می‌توان در آسفالت‌های لاستیکی استفاده نمود، اما با توجه به افزایش حساسیت رطوبتی مخلوط با افزایش درصد پودرلاستیک در دمای اختلاط پایین‌تر، نباید از درصد پودرلاستیک بالایی استفاده شود. با توجه به نتایج، در مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۸ و ۱۶ درصد پودرلاستیک می‌توان با اضافه کردن ۳ درصد ساسوبیت دمای اختلاط را به ۱۵۰ درجه کاهش داد اما کاهش دما به ۱۳۰ درجه به دلیل اینکه تأثیر شدیدی بر حساسیت رطوبتی دارد توصیه نمی‌شود.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی، پودرلاستیک، ساسوبیت، حساسیت رطوبتی

### ۱- مقدمه

در حال حاضر، قیر به دلیل عملکرد چسبندگی عالی خود، چسبنده متداول در روسازی آسفالتی است (Krba & Karahin, 2017; Peng et al., 2018; Zhang et al., 2019). با این حال، روسازی آسفالتی در محیط‌های دمای پایین دچار ترک‌خوردگی می‌شود که ناشی از افزایش شکنندگی و کاهش انعطاف‌پذیری قیر است (Guo et al., 2014; Hou

2019). با این حال، روسازی آسفالتی در محیط‌های دمای پایین دچار ترک‌خوردگی می‌شود که ناشی از افزایش شکنندگی و کاهش انعطاف‌پذیری قیر است (Guo et al., 2014; Hou

دورریز عمدتاً برای تولید بنزین استفاده می‌شوند. اگرچه روش تولید سوخت از لاستیک برای مدیریت لاستیک‌های دورریز سودمند است، اما مقادیر قابل توجهی از مواد شیمیایی مضر را منتشر می‌کند (Okonkwo et al., 2018). علاوه بر این، هنوز استفاده بسیار محدودی از لاستیک‌های دورریز با این روش وجود دارد که منجر به انباشت لاستیک‌های دورریز در محل‌های دفن زباله شده است. از آنجا که هر ساله مقادیر زیادی آسفالت برای ساخت راه‌ها تولید می‌شود، توسعه قیر اصلاح‌شده با لاستیک تنها بازار ایده‌آل با پتانسیل قابل توجه برای رسیدگی به مشکل آلودگی ناشی از لاستیک‌های کهنه است (Airey et al., 2003). از طرف دیگر، استفاده از آسفالت لاستیکی مزایای زیادی نسبت به آسفالت خالص دارد، از جمله مقاومت در برابر شیارشدگی، ترک‌های خستگی و آسیب رطوبتی (Natu & Tayebali, 2000; Tabatabaee & Tabatabaee, 2010; Hajikarimi et al., 2015; Zhang et al., 2016; Ziari et al., 2020) که همه این‌ها برای مقابله با چالش بار ترافیکی رو به رشد در اقلیم‌های مختلف ضروری است. اگرچه استفاده از آسفالت لاستیکی مزایای بیان شده فوق را به همراه خواهد داشت، با این حال پژوهشگران با بررسی عملکرد این نوع آسفالت پیشنهاد داده داده‌اند که از سایر افزودنی‌ها برای بهبود خصوصیات قیر لاستیکی استفاده شود (Bressi et al., 2019). از طرف دیگر، اگرچه مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی قادر به تحمل دماهای بالا و پایین و خستگی هستند (Chen et al., 2021)، با این حال تهیه آن نیاز به دماهای ساخت بالایی دارد که معایبی مانند جداسازی آسان، کارایی پایین و مصرف انرژی بالا را به همراه دارد (Sun et al., 2021; Yan et al., 2022). این موارد همچنین باعث آلودگی قابل توجهی به محیط زیست در فرآیند ساخت روسازی می‌شود. بنابراین، به شدت به اصلاح‌کننده‌های دوستدار محیط زیست و با مصرف انرژی پایین‌تر برای ساخت روسازی‌ها نیاز است. مخلوط آسفالت گرم توسط بسیاری از پژوهشگران (Behnood, 2020; Cheraghian et al., 2020) به عنوان نوعی مخلوط آسفالت دوستدار محیط زیست برای جایگزینی مخلوط آسفالت داغ توصیه شده است. دمای تولید مخلوط آسفالت گرم که حاوی افزودنی‌های مختلف مخلوط گرم است، ۱۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد پایین‌تر از دمای مخلوط

(et al., 2017). این موضوع بعد از پدیده پیرشدگی مشهودتر می‌شود؛ زیرا در این حالت، ترکیبات سبک فرار از دست می‌روند و بخش قطبی ماتریس افزایش می‌یابد (Wei et al., 2013; Zhang et al., 2009). بنابراین، بهبود عملکرد روسازی آسفالتی در دماهای پایین از طریق اصلاح آسفالت بسیار ضروری است (Brovelli et al., 2015; Yan et al., 2020; Yildirim, 2005). آسفالت به عنوان یک ماده ویسکوالاستیک حساس به دما (Ban et al., 2013; Liu et al., 2022; Wang et al., 2022) در برابر ترکیبی از دماهای بالا، بارهای سنگین و غیره، مستعد ناپایداری است که بر عملکرد و عمر روسازی آسفالتی تأثیر می‌گذارد (Liu et al., 2023). اخیراً، برخی مخلوط‌های آسفالتی که با افزودن یک اصلاح‌کننده تشکیل شده‌اند، به دلیل عملکرد عالی روسازی حاصل از آنها، به طور گسترده‌ای استفاده شده‌اند. یکی از مصالح اصلاح‌کننده که بطور گسترده در مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود ضایعات بازیافتی تایرها است. استفاده از این ماده از دهه ۱۹۶۰ شروع شد، یعنی زمانیکه تایرهای کهنه افزایش یافت و هشدارهای زیست محیطی بیشتر شد. طبق گزارش توماس و همکاران (Thomas et al., 2016) تقریباً یک میلیارد لاستیک هر سال به پایان عمر مفید خود می‌رسند و بیش از ۵۰ درصد لاستیک‌های کهنه بدون هیچگونه استفاده مناسب دور ریخته می‌شوند. تخمین زده می‌شود که تا سال ۲۰۳۰، تعداد کل لاستیک‌های کهنه به ۱٫۲ میلیارد خواهد رسید. تا به حال، دفن مستقیم و سوزاندن لاستیک‌های کهنه به عنوان روش‌های اصلی مدیریت آن‌ها به کار می‌رفت که منجر به آلودگی قابل توجهی در خاک و هوا شد. افزایش میزان لاستیک‌های دور ریخته شده مستقیماً به تعداد زیاد خودروها و لاستیک‌های تولید شده در هر سال مرتبط است. به عنوان مثال، بر اساس اطلاعات منتشر شده توسط شبکه اطلاعات صنعت چین (CIIN, 2023) در سال ۲۰۱۸، در مجموع ۱۴٫۵۸ میلیون تن لاستیک دورریز تولید شد که از این مقدار تنها ۵٫۶۹ میلیون تن برای استفاده به عنوان سوخت بازیافت شد که نشان‌دهنده نرخ بازیافت کمتر از ۴۰ درصد است. در ایالات متحده، حدود ۵۴٫۱ درصد از تولید سالانه لاستیک‌های دورریز در سال ۲۰۰۷ برای استفاده به عنوان سوخت بازیافت شد؛ این رقم در سال ۲۰۱۷ به ۴۳ درصد کاهش یافت (Machin et al., 2017). در برزیل، لاستیک‌های

با تمام مزایای بیان شده، افزودن ساسوبیت به مخلوط آسفالت می‌تواند شکل‌پذیری آن را کاهش دهد زیرا ترکیب اصلی ساسوبیت وکس سخت سنتزی است که در دماهای پایین، خاصیت تغییرشکل ضعیفی دارد و بدین ترتیب به شدت شکل‌پذیری قیر را تحت تأثیر قرار می‌دهد ( Edwards & Isacsson, 2005; Liu & Li, 2012; Zhang et al., 2015). به همین دلیل، اگرچه افزودن ساسوبیت به تنهایی می‌تواند به طور همزمان مقاومت در برابر پیری و ثبات در دماهای بالا را بهبود بخشد، اما آسیب جدی برای عملکرد در دماهای پایین را به همراه خواهد داشت. بنابراین، ضروری است که اصلاح‌کننده‌های دیگری همراه با استفاده شوند تا ضعف آن جبران شود. با توجه به مباحث بیان شده، همچنین مزایای استفاده همزمان از پودر لاستیک و ساسوبیت در مخلوط آسفالت مانند بهبود عملکرد در دمای بالا، مقاومت در برابر ترک خوردگی در دمای پایین و مقاومت در برابر خستگی در عین کاهش ویسکوزیته ( Gong et al., 2022; Pouranian et al., 2013; Rodríguez-Alloza et al., 2020) و با توجه به اینکه توافق واحدی از میزان استفاده از پودر لاستیک و ساسوبیت در بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی وجود ندارد، و نهایتاً اینکه بصورت ویژه حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاوی پودر لاستیک و ساسوبیت مورد بررسی قرار نگرفته است، پژوهش حاضر با بکارگیری مقدار متفاوت پودر لاستیک و ساسوبیت از مطالعات پیشین اما در محدوده قابل استفاده این دو افزودنی، ویژگی‌های سختی، مقاومت در برابر شیارشدگی و حساسیت رطوبتی خلوط آسفالتی حاوی پودر لاستیک و ساسوبیت را مورد بررسی قرار داده است.

## ۲- مصالح مورد استفاده

### ۲-۱- قیر و مشخصات آن

در این پژوهش از قیر ۷۰-۶۰ محصول شرکت پالایشگاه نفت پاسارگاد تهران به عنوان قیر خالص پایه استفاده شد. مشخصات کلاسیک این قیر که توسط شرکت سازنده ارائه شده و برخی نیز در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده‌است در جدول (۱) ارائه شده‌است.

آسفالت داغ است، که می‌تواند به‌طور مؤثری میزان پیری کوتاه‌مدت قیر را کاهش دهد ( Oliveira et al., 2013; Roja et al., 2018; Zhang et al., 2015) و می‌تواند به‌طور قابل توجهی انتشارات و خطرات بهداشتی برای پرسنل ساخت را کاهش دهد ( Dinis-Almeida & Afonso, 2015). سه نوع عامل ساخت WMA مطابق با مکانیزم کاهش ویسکوزیته وجود دارد: افزودنی‌های آلی ( Gong et al., 2021)، آسفالت فومی (Hu et al., 2022) و آسفالت امولسیون (Adnan et al., 2020). یکی از مهمترین افزودنی‌های آلی ساسوبیت است، زیرا می‌تواند به طور مستقیم اضافه شوند تا دوام مخلوط‌های آسفالت را در دماهای بالا افزایش دهند در حالی که مزایای اقتصادی دارند ( Li et al., 2021). ساسوبیت به عنوان یک افزودنی آلی پرکاربرد، نه تنها می‌تواند دمای مخلوط آسفالت را به میزان حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد، بلکه به‌وضوح ثبات دماهای بالا قیر را نیز بهبود می‌بخشد ( Jamshidi et al., 2013; Qin et al., 2014). مطالعات نشان داده که WMA ساخته شده با ساسوبیت بهترین مقاومت در برابر شیارشدگی را نشان می‌دهد و به HMA نزدیک است ( Vaitkus et al., 2011; Xiao et al., 2010). لیو و همکاران دریافتند که با استفاده از ۳ درصد ساسوبیت، دمای تولید مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند به میزان ۲۰ تا ۳۰ درجه کاهش یابد بدون اینکه بر عملکرد آنها تأثیر بگذارد (Liu & Li, 2012). در فرآیند ساخت میدانی، WMA ساخته شده با ساسوبیت به‌طور قابل توجهی دمای ساخت را کاهش می‌دهد، عملکرد روسازی و مقاومت در برابر شیارشدگی را بهبود می‌بخشد. جمشیدی و همکاران نتیجه‌گیری کردند که ساسوبیت عملکرد روسازی را بهبود می‌بخشد و سبب حفاظت از محیط زیست و صرفه‌جویی در انرژی خواهد شد (Jamshidi et al., 2013). وو و همکاران دریافتند که WMA با ساسوبیت می‌تواند به‌طور قابل توجهی آلودگی هوای ناشی از ساخت راه در محل را کاهش دهد بدون اینکه بر مقاومت در برابر شیارشدگی در بلندمدت تأثیر بگذارد ( Wu et al., 2021). علاوه بر این، ارزیابی چرخه عمر (LCA) آسفالت WMA در طول ساخت نیز به صرفه‌جویی در انرژی و کاهش انتشار آلاینده کمک کرده است (Ma et al., 2019).

## ۲-۲- سنگدانه‌ها و فیلر

از تاثیرگذارترین متغیرهای طرح اختلاط آسفالت، دانه‌بندی مصالح سنگی آن است. یکی از اهداف اصلی این پژوهش بررسی خرابی شیارشدگی مخلوط آسفالتی است. خصوصیات لایه رویه روسازی نقشی اساسی در این خرابی دارد. بنابراین دانه‌بندی شماره ۴ آیین نامه روسازی آسفالتی ایران (نشریه ۲۳۴)، ملاک عمل قرار گرفت. منحنی دانه‌بندی انتخابی و معیارهای آیین‌نامه‌ای در شکل (۱) نشان داده شده است.

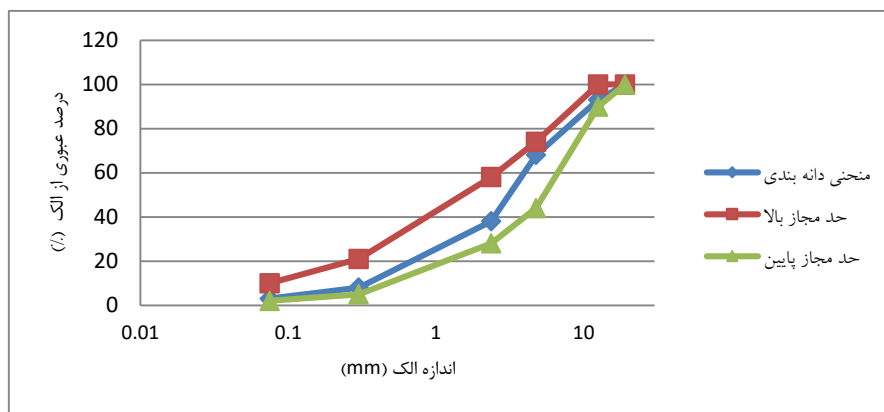
سنگدانه‌های به کاررفته در ساخت نمونه‌های آسفالتی از کارخانه آسفالت تلو، واقع در شهر تهران تهیه شده است. برای رسیدن به دانه‌بندی مورد استفاده در آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران و سایر دانه‌بندی‌های استفاده‌شده در این پژوهش، سنگدانه‌ها مجدداً الک شده و در اندازه‌های موردنیاز جمع‌آوری شدند. خصوصیات مصالح سنگی در این پژوهش به شرح جدول (۲) است.

جدول ۱. خصوصیات قیر ۶۰-۷۰ محصول شرکت نفت پاسارگاد

مقدار	بازه قابل قبول	استاندارد آزمایش	واحد	ویژگی
۶۸	۶۰ - ۷۰	ASTM D5	0.1mm	درجه نفوذ در ۲۵°C
۴۹	۴۹ - ۵۶	ASTM D36	°C	نقطه نرمی
۰,۲۹۷	۳ Pa.s >	ASTM D4402	Pa.s	گرانروی در ۱۳۵°C
+۱۰۰	۱۰۰ <	ASTM D113	cm	کشش پذیری در ۲۵°C
+۲۵۰	۲۳۲ <	ASTM D92	°C	درجه اشتعال
۱,۰۲	-	ASTM D70	gr.cm <sup>3</sup>	چگالی ویژه در ۲۵°C

جدول ۲. خصوصیات مصالح سنگی درشت و ریزدانه

مقدار	مقدار قابل قبول	استاندارد آزمایش	واحد	شرح
۱۶,۷	۲۵	ASTM C131	درصد	حداکثر سایش به روش لوس آنجلس
۲,۲	۲,۵	ASTM C127	درصد	حداکثر جذب آب مصالح سنگی درشت دانه
۲,۴	۲,۵	ASTM C128	درصد	حداکثر جذب آب مصالح سنگی ریزدانه
۱۲,۳	۱۵	ASTM D4791	درصد	حداکثر درصد سنگدانه‌های پهن و دراز
۲,۵۹	-	ASTM C127	gr.cm <sup>۳</sup>	وزن مخصوص واقعی مصالح سنگی درشت دانه
۲,۳۲	-	ASTM C128	gr.cm <sup>۳</sup>	وزن مخصوص واقعی مصالح سنگی ریز دانه



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی و حدود مجاز آیین‌نامه‌ای

### ۳-۲- پودرلاستیک و مشخصات آن

پودر لاستیک مصرفی در این پروژه محصول جانبی دستگاه خردکن لاستیک خودرو بوده که توسط شرکت سپیدان لاستیک تولید می‌شود. این محصول دارای مقادیر کمی نخ بوده که با چند بار غربال کردن، نخ‌ها جدا و دانه‌بندی دلخواه حاصل شده‌است. دانه‌بندی پودر لاستیک نهایی حاوی ۴۰ درصد عبوری از الک شماره ۳۰ و ۶۰ درصد عبوری از الک شماره ۵۰ است. در واقع تمامی ذرات ریزتر از ۰,۶ میلی‌متر بوده که دانه‌بندی مناسبی برای پودرلاستیک است. طبق گفته برسی و همکاران (Bressi et al., 2019) اکثر مطالعات مربوطه از اندازه ذرات پودرلاستیک ۰,۵ تا ۱ میلی‌متر استفاده کرده‌اند.

### ۴-۲- افزودنی نیمه‌گرم ساسوبیت

ساسوبیت استفاده شده در این پژوهش از شرکت دانش‌رویان یکتا ماندگار تهران تهیه شده است. مشخصات این افزودنی در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات ساسوبیت استفاده شده در این تحقیق

اجزای سازنده	هیدروکربن آلیفاتیک
حالت فیزیکی	گرانول
رنگ	سفید
بو	ندارد
چگالی حجمی	۶۲۲-۵۹۰ کیلوگرم بر متر مکعب
نقطه اشتعال	۲۹۰ درجه سانتیگراد
حلالیت در آب	غیر قابل حل

### ۳- طرح اختلاط مخلوط آسفالتی به روش

#### مارشال

برای ساخت مخلوط آسفالتی لازم است ابتدا طرح اختلاط مناسب انتخاب گردد. با توجه به امکانات آزمایشگاهی روش طرح اختلاط مارشال برای طراحی اختلاط انتخاب گردید. پس از انتخاب دانه‌بندی و دمای اختلاط مناسب از روی قیر خالص به روش گرانروی معادل با دما، از روش طرح اختلاط مارشال مطابق با استاندارد ASTM D1559 برای تعیین درصد قیر بهینه استفاده شد.

### ۳-۱- تعیین مقدار درصد قیر اولیه

طبق استاندارد ASTM D1559 بر اساس رابطه (۱) درصد قیر اولیه (Pb) برای تهیه نمونه‌های مارشال به دست آمد.

$$P_b = 0.035 \times a + 0.045 \times b + K \times c + F \quad (1)$$

که  $a$  درصد مصالح مانده روی الک شماره ۸،  $b$  درصد مصالح عبوری از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰،  $c$  درصد مصالح عبوری از الک شماره ۲۰،  $K$  ضریبی ثابت بر اساس مقدار  $c$  و  $F$  مقداری ثابت بین صفر تا ۲ درصد هستند. از آنجا که مقادیر فوق به ترتیب برابر ۶۲، ۳۵، ۳، ۲، ۰، ۷ است، قیر اولیه برابر ۵,۰۴۵ درصد به دست آمد و نهایتاً درصد قیرهای ۴,۵، ۵,۰، ۵,۵، ۶، ۶,۵ درصد برای ساخت نمونه استفاده شد.

پس از ساخت ۳ نمونه برای هر یک از درصدهای قیر فوق، و ۲ نمونه برای آزمایش‌های راپس، اندازه‌گیری پارامترهای حجمی-وزنی و وزن مخصوص‌های انبوهی و حداکثر و ...، درصد بهینه قیر خالص مورد استفاده به دست آمد. از شرح آزمایش‌های روش مارشال به علت رایج بودن خودداری می‌شود. درصد قیر بهینه برابر ۶ درصد وزنی مصالح سنگی به دست آمد. از آنجا که هدف از این پژوهش بررسی تأثیرات افزودنی‌های پودرلاستیک و ساسوبیت م باشد، برای قیرهای اصلاح شده درصد قیر بهینه محاسبه نمی‌شود و از همان مقدار قیر بهینه برای قیر خالص استفاده خواهد شد. علت این امر آن است که در صورت تغییرات در درصد قیرهای مورد استفاده در قیرهای مختلف، تحلیل نتایج دچار مشکل می‌شود. نسبت دادن تغییرات حاصل در مشخصات مخلوط‌ها به یک پارامتر ممکن نبوده و باید چندین پارامتر در نظر گرفته شود و این مسئله تعداد ساخت نمونه و آزمایش‌ها را به چندین برابر افزایش می‌داد که انجام این کار مقدر نبود. همچنین قبل از تعیین دقیق دمای اختلاط و تراکم، محاسبه صحیح درصد قیر بهینه برای قیرهای اصلاح شده امکان نداشت.

### ۴-۲- ساخت نمونه‌های قیرهای اصلاح شده

برسی و همکاران (Bressi et al., 2019) طی مرور مطالعات پیشین در خصوص استفاده از پودرلاستیک در آسفالت نتیجه گرفتند که اکثر مطالعات از قیر استاندارد با نفوذ  $dmm$  ۷۰-۵۰، مقدار ۵ تا ۲۰ درصد پودرلاستیک، اندازه ذرات لاستیک

ساخته شدند. پس از تعیین دمای اختلاط مناسب برای هر نوع قیر، شرایط برای ساخت نمونه‌های مارشالی مورد استفاده برای آزمایش‌های بعدی مهیاست. هدف از در نظر گرفتن دو دمای اختلاط برای ساخت نمونه‌ها، در نظر گرفتن تاثیر افزودنی‌ها بر دماهای اختلاط و تراکم و در نهایت دیده شدن اثرات تغییر دماهای اختلاط و تراکم بر خواص عملکردی مخلوط‌های آسفالتی است. بنابراین ۹ نوع قیر مصرفی و ۲ دمای اختلاط متفاوت و ۲ بار تکرار برای هر آزمایش در نظر گرفته شد.

آزمایش مدول برجهندگی، غیرمخرب است و پس از این آزمایش می‌توان آزمایش دیگری مانند آزمایش خزش دینامیکی را انجام داد؛ لذا با یک نمونه ساخته شده با اندازه مارشالی، می‌توان هر دو آزمون مورد نظر را انجام داد. بنابراین برای این دو آزمون ۳۶ نمونه مارشالی ساخته شد. نمونه‌های جداگانه نیز برای آزمون حساسیت رطوبتی ساخته شد. ساخت ۴ نمونه برای هر نوع قیر اصلاحی در هر دمای اختلاط در نظر گرفته شده است. بنابراین ساخت ۷۲ نمونه مجزا نیز برای آزمون حساسیت رطوبتی مورد نیاز خواهد بود. در مجموع ۱۰۸ نمونه مارشالی برای این پژوهش در نظر گرفته شد. نمونه‌های تهیه شده به همراه نمادگذاری مربوطه (برای سهولت در ارائه نمودار نتایج) و دمای اختلاط مربوط به هر یک از آنها در جدول (۴) نشان داده شده است.

بین ۰٫۵ تا ۱ میلی‌متر (با میانگین ۰٫۵۶ میلی‌متر)، زمان و دمای اختلاط به ترتیب ۶۰ دقیقه و ۱۸۰ درجه سانتیگراد و مخلوط کن برش ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰ تا ۵۰۰۰ استفاده نموده‌اند. همچنین استفاده از سایر افزودنی‌ها برای بهبود خصوصیات قیر لاستیکی پیشنهاد شده است. علاوه بر این پودرلاستیک به دو روش «فرآیند تر» و «فرآیند خشک» در مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود. فرآیند تر به معنای افزودن پودرلاستیک به قیر و سپس استفاده از قیر اصلاح‌شده برای تولید آسفالت است؛ فرآیند خشک به معنای استفاده مستقیم از پودرلاستیک در مخلوط‌های آسفالت است (Picado-Santos et al., 2020). با توجه به این پیشینه، در این پژوهش با استفاده از روش تر ابتدا قیر پایه ۷۰-۶۰ به مدت ۶۰ دقیقه با پودرلاستیک در دمای ۱۸۰ درجه سانتیگراد و با مخلوط کن برش ۴۰۰۰ دور دقیقه مخلوط و سپس مخلوط حاصل با همین روش با ساسوبیت مخلوط شده و قیرهای اصلاحی به دست آمده است.

### ۳-۳- ساخت نمونه‌های مخلوط آسفالتی حاوی قیرهای

#### اصلاح‌شده به روش مارشال

تا این مرحله قیرهای اصلاح‌شده آماده شدند. در این مرحله با در نظر گرفتن دو دمای اختلاط ۱۳۰ و ۱۵۰ درجه که نماینده دمای آسفالت گرم و آسفالت داغ هستند، نمونه‌های مارشالی

جدول ۴: نامگذاری نمونه‌های قیر ساخته شده و دمای اختلاط آنها

کد نمونه	مقدار پودر لاستیک (درصد)	مقدار ساسوبیت (درصد)	دمای اختلاط (درجه سانتیگراد)
Neat	۰	۰	۱۵۰
C8S0	۸	۰	۱۸۰
C16S0	۱۶	۰	۱۸۰
C8S1	۸	۱	۱۵۰
C8S2	۸	۲	۱۵۰
C8S3	۸	۳	۱۵۰
C8S1	۸	۱	۱۳۰
C8S2	۸	۲	۱۳۰
C8S3	۸	۳	۱۳۰
C16S1	۱۶	۱	۱۵۰
C16S2	۱۶	۲	۱۵۰
C16S3	۱۶	۳	۱۵۰
C16S1	۱۶	۱	۱۳۰
C16S2	۱۶	۲	۱۳۰
C16S3	۱۶	۳	۱۳۰

C: پودرلاستیک

S: ساسوبیت

#### ۴- آزمایش های مخلوط آسفالتی

پس از ساخت نمونه‌ها، آزمایش‌های استحکام و روانی مارشال، مدول برجه‌نگی، آزمایش خزش دینامیکی (برای تعیین عدد روانی نمونه‌ها) و آزمایش‌های حساسیت رطوبتی (برای تعیین حساسیت مخلوط‌ها به رطوبت) به شرح زیر بر روی آنها انجام شد.

#### ۴-۱- آزمایش استحکام و روانی مارشال

به منظور انجام آزمایش مارشال روی نمونه‌های اصلی، از هر نوع مخلوط، سه نمونه با درصد قیر بهینه ساخته و میانگین مقادیر بدست آمده از آزمایش مارشال به عنوان استحکام مارشال و مقدار روانی برای هر نوع مخلوط، در درصد قیر بهینه در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۲- آزمایش مدول برجه‌نگی روی نمونه های

##### مارشالی

سختی مخلوط‌های آسفالتی پارامتری بسیار مهم و شاخصی از خصوصیات مکانیکی آنها است. به خاطر سهولت انجام و قابلیت کاربرد برای مغزه‌های تهیه شده از سطح راه، آزمایش مدول برجه‌نگی ( $M_r$ ) رایج ترین آزمایش به منظور محاسبه سختی مخلوط‌های آسفالتی است. همچنین در روش طرح و سازی آشتو از مدول برجه‌نگی برای طراحی ضخامت لایه و سازی استفاده می شود. بنابراین، آزمایش مدول برجه‌نگی در بسیاری از آزمایشگاه‌ها رواج دارد. برای محاسبه مدول برجه‌نگی، دستگاهی مشابه دستگاه مورد استفاده برای انجام آزمایش کشش غیرمستقیم، استفاده می شود. اما دستگاه مورد استفاده برای محاسبه کشش غیرمستقیم باید قابلیت بارگذاری به صورت تکراری را داشته باشد (Roberts et al., 1996). روش انجام آزمایش در استاندارد ASTM-D4123 شرح داده شده است. معادلات مورد استفاده برای محاسبه مقاومت کششی و کرنش منجر به شکست در آزمایش کشش غیر مستقیم، می‌تواند برای محاسبه تنش و کرنش در آزمایش مدول برجه‌نگی مورد استفاده قرار بگیرد، با این

تفاوت که در آزمایش مدول برجه‌نگی میزان بارگذاری به حدی نیست که نمونه گسیخته شود.

به منظور بدست آوردن مدول برجه‌نگی میزان بارگذاری در سطحی بین ۵ تا ۲۰ درصد مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه خواهد بود. بنابراین قبل از انجام آزمایش مدول برجه‌نگی، مقاومت کششی می‌بایست یا محاسبه یا تخمین زده شود. مدت زمان بارگذاری معمولاً ۰,۱ ثانیه بارگذاری و ۰,۹ ثانیه استراحت خواهد بود. بنابراین در مدت زمان ۱ ثانیه نمونه یک دوره بارگذاری را تجربه خواهد کرد. ضریب پواسون مورد نیاز جهت محاسبه مدول، برای نمونه‌های ۴ اینچی را می‌توان از معادله (۲) بدست آورد.

$$\mu = 3.59 \frac{H}{V} - 0.27 \quad (2)$$

که  $\mu$  ضریب پواسون،  $H$  تغییر مکان افقی (اینچ) و  $V$  تغییر مکان قائم (اینچ) است.

ضریب پواسون معمولاً ۰,۳۵ در نظر گرفته می‌شود، اما مقدار آن با تغییر دما، تغییر می‌کند. مقادیر رایج ۰,۲۵ برای دمای ۵ درجه سانتیگراد و ۰,۴ برای دمای ۴۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته می‌شود. در صورت در نظر گرفتن عدد ۰,۳۵ برای ضریب پواسون می‌توان از معادله (۳) برای محاسبه مدول برجه‌نگی نمونه‌های مخلوط آسفالتی با قطر ۴ اینچ استفاده کرد.

$$M_r = \frac{0.62P}{Ht} \quad (3)$$

که  $M_r$  مدول برجه‌نگی (Psi)،  $H$  تغییر مکان افقی (اینچ) و  $t$  ضخامت نمونه (اینچ) است. از آنجا که پیش‌بینی می‌شد خصوصیات دمای میانه و دمای بالای مخلوط‌های آسفالتی حاوی ساسویت دچار نوسان شود، تصمیم بر آن شد که مدول برجه‌نگی نمونه‌ها در دو دمای میانه و بالا اندازه‌گیری شود. در این پژوهش دو دمای انجام آزمایش، یکی ۲۵ درجه سانتی‌گراد با ضریب پواسون ۰,۳۵ و دیگری ۴۰ درجه سانتی‌گراد با ضریب پواسون ۰,۴ در نظر گرفته شد. مقدار بار اعمالی به نمونه‌ها ۲۰۰ نیوتن در دمای ۴۰ درجه و ۹۰۰ نیوتن در دمای ۲۵ درجه انتخاب شد. لازم به ذکر است این مقدار بارها بر اساس ۱۰ درصد مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک انتخاب شدند. استاندارد مورد استفاده ASTM D 4123 و زمان اعمال بار ۰,۲ ثانیه به

استاندارد BS-DD226 به منظور انجام آزمایش استفاده شد. طبق استاندارد مورد استفاده به منظور شبیه‌سازی جریان ترافیک از یک بار تکراری، به نحوی که ۴۰۰ کیلوپاسکال تنش در سطح نمونه ایجاد کند، استفاده می‌شود. همچنین نمونه به مدت ۱۲۰ ثانیه قبل از شروع آزمایش تحت تنش ۱۲ کیلوپاسکال پیش بارگذاری می‌شود. دمای انجام این آزمایش ۵۰ درجه سانتی‌گراد، بارگذاری مربعی و به صورت اثنایه بارگذاری و ۱ ثانیه استراحت است. پس از اعمال هر دوره بارگذاری، تغییر شکلی در نمونه ایجاد می‌شود که مقداری از تغییر شکل ایجاد شده در مدت زمان استراحت به حالت اولیه برگشته و مقداری از آن به صورت تغییر شکل دائم در نمونه خواهد ماند. در نهایت مقادیر کرنش تجمعی ایجاد شده در برابر دوره بارگذاری برای نمونه مورد آزمایش رسم می‌شود. به منظور مقایسه و تحلیل نتایج حاصل، از مدل پیشنهادی توسط ژو و همکاران (Zhou et al., 2004) استفاده گردید. ژو و همکاران به منظور مشخص نمودن رفتار مخلوط‌های آسفالتی در هر یک از مراحل آزمایش خزش دینامیک، از یک مدل ۳ بخشی، هر بخش برای یک مرحله، استفاده نمودند. آنها مرحله اول را با استفاده از یک تابع توانی، مرحله دوم را با استفاده از یک تابع خطی و مرحله سوم را با استفاده از یک تابع نمایی مدل کردند. روابط زیر نشان دهنده توابع مورد استفاده توسط آنها است.

$$\text{if } N \leq N_{ps}; \varepsilon_p = aN^b; \varepsilon_{ps} = aN_{ps}^b \quad (4)$$

$$\text{if } N_{ps} \leq N \leq N_{st}; \varepsilon_p = \varepsilon_{ps} + c(N - N_{ps}); \varepsilon_{st} = \varepsilon_{ps} + c(N_{st} - N_{ps}) \quad (5)$$

$$\text{if } N \geq N_{st}; \varepsilon_p = \varepsilon_{st} + d(e^{f(N-N_{st})} - 1) \quad (6)$$

شده در تحقیقات شارپ است. این روش آزمایش مطابق با استاندارد AASHTO T283 انجام می‌گیرد که در نشریه ۲۳۴ نیز به آن اشاره شده است. این آزمون به شکل آزمایش کششی غیر مستقیم صورت می‌گیرد. آزمایش دوم مربوط به روشی است که در بند (۶-۷-۹) آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) برای بررسی دوام مخلوط‌های آسفالتی در برابر آب مطرح شده است. آزمایش سوم آزمایش جوشان تگزاس مطابق با استاندارد ASTM 3625 است.

شکل نیمه سینوسی و مدت زمان استراحت ۰.۸ ثانیه انتخاب شد. همچنین از دستگاه UTM25 و نرم‌افزار UTS3 برای انجام آزمایش بهره گرفته شد. ۴۵ سیکل بارگذاری به عنوان پیش بارگذاری اعمال و با توجه به قابلیت‌های نرم‌افزار از سیکل ۴۶ تا ۵۰ به عنوان سیکل‌های نهایی در نظر گرفته شده و میانگین مدول حاصل از آن به عنوان مدول نهایی نمونه مخلوط آسفالتی در نظر گرفته شد. پس از آماده‌سازی نمونه درون دستگاه و رسیدن دمای نمونه به مقدار تنظیمی و ثابت شدن دمای آن، تنظیمات نرم‌افزاری انجام گرفته و آزمایش شروع می‌شود.

#### ۴-۳- آزمایش خزش دینامیکی روی نمونه‌های مارشالی

یکی از انواع خرابی در مخلوط‌های آسفالتی، ایجاد شیار در مسیر چرخ بر اثر عبور ترافیک (شیارشدهگی) است. یکی از آزمایش‌هایی که به منظور ارزیابی مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدهگی از آن استفاده می‌شود، آزمایش خزش دینامیکی است. در این آزمایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر تغییرشکل‌های دائم در شرایط دمایی و بارگذاری مختلف استفاده می‌شود. البته هدف اصلی از آزمایش خزش دینامیکی طبقه بندی مصالح و مقایسه آنها از لحاظ استعداد شیارشدهگی است، به عبارت دیگر با استفاده از آزمایش خزش دینامیکی نمی‌توان عمق شیار را پیش بینی نمود. در این تحقیق از

با برآزش (رگرسیون) غیرخطی مدل فوق برای نتایج آزمایش خزش دینامیکی، می‌توان مرز بین نواحی ۳ گانه و همچنین مقدار شیب ناحیه دوم و مقادیر کرنش تجمعی در انتهای هر ناحیه را محاسبه کرد. به منظور انجام این آزمایش از دستگاه UTM25 و نرم‌افزار UTS14 استفاده شد.

#### ۴-۴- آزمایش‌های حساسیت رطوبتی

در این پژوهش برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی از سه روش استفاده شده است. روش اول، دستور ارائه

#### ۴-۴-۱- آزمایش کشش غیرمستقیم (ITS)

آزمایش کشش غیرمستقیم اغلب برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود. مقادیر مقاومت کششی بالاتر نشان می‌دهد که مخلوط، عملکرد خوبی در برابر آسیب رطوبتی دارد. همچنین مخلوط‌هایی که قادر به تحمل کرنش بالا قبل از شکست هستند، نسبت به نمونه‌های با کرنش پایین، مقاومت ترک خوردگی بهتری دارند. روش استاندارد AASHTO T283 (مقاومت مخلوط آسفالتی متراکم در برابر آسیب رطوبتی) یکی از معمول‌ترین فرایندهای آزمایشی برای تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی است. این آزمون بر روی نمونه‌های متراکم شده با درصد هوای  $1 \pm 7$  انجام می‌شود. حداقل تعداد نمونه‌ها برای هر نوع مخلوط ۶ نمونه می‌باشد. نیمی از نمونه‌ها باید تحت شرایط استاندارد عمل‌آوری شوند که ابتدا نمونه‌ها برای رسیدن به سطح اشباع ۵۵ تا ۸۰ درصد زیر شرایط خلأ قرار می‌گیرند. نمونه‌های خلأ و اشباع‌شده، در فریزر در دمای  $-18$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۶ ساعت و سپس در حمام آب  $60$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت نگهداری می‌شوند. در نهایت نمونه‌های تحت شرایط قرار گرفته و دیگر نمونه‌ها به درجه حرارت ثابت  $25$  درجه سانتی‌گراد رسانده می‌شوند. هر دو گروه نمونه‌ها برای انجام مقاومت کششی غیرمستقیم تحت بارگذاری با نرخ ثابت ( $50$  میلی‌متر بر ثانیه) قرار گرفته و مقدار نیروی لازم برای شکستن نمونه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. مقاومت کششی غیرمستقیم از معادله (۷) محاسبه می‌شود.

$$ITS = \frac{2P}{\pi.t.D} \quad (7)$$

که ITS مقاومت کششی (کیلوپاسکال)،  $P$  حداکثر بار (نیوتون)،  $D$  قطر نمونه (میلیمتر) و  $t$  ضخامت نمونه (میلیمتر) هستند. بعد از آنکه مقاومت کششی نمونه‌های آسفالتی هر دو گروه خشک و مرطوب تعیین شدند، نسبت مقاومت کششی (TSR) با استفاده از معادله (۸) محاسبه می‌شود.

$$TSR = \frac{S_2}{S_1} \quad (8)$$

که  $S_2$  میانگین مقاومت کششی مرطوب و  $S_1$  میانگین مقاومت کششی خشک بر حسب پاوند بر اینچ مربع (psi) هستند.

طبق بند (۹-۷-۶) در نشریه ۲۳۴ با عنوان دوام مخلوط‌های آسفالتی در برابر آب، معیار حداقل ۸۰ درصد برای نسبت مقاومت کششی مطرح شده‌است که در آیین‌نامه‌های دیگر نیز تقریباً همین معیار مطرح شده‌است.

#### ۴-۴-۲- آزمایش نسبت مقاومت فشاری اشباع به مقاومت فشاری خشک

نام این آزمایش در استاندارد اشتهو، تأثیر آب بر چسبندگی مخلوط‌های آسفالتی متراکم شده است. این آزمایش مربوط به روشی است که در بند (۹-۷-۶) نشریه ۲۳۴ برای بررسی دوام مخلوط‌های آسفالتی در برابر آب مطرح شده‌است. برای این آزمایش از هر نوع نمونه ۶ نمونه با در صد فضای خالی حدود ۶ درصد ساخته می‌شود و به دو گروه سه‌تایی تقسیم‌بندی می‌شود. گروه اول ۳۰ تا ۴۰ دقیقه در آب  $60$  درجه قرار گرفته و سپس مقاومت (استحکام) نمونه‌های مارشال تعیین می‌شود. گروه دوم ۲۴ ساعت در آب  $60$  درجه قرار گرفته و سپس مقاومت (استحکام) نمونه‌های مارشال تعیین می‌شود. نسبت مقاومت نمونه‌های مارشال اول به دوم تعیین می‌گردد. طبق معیار آیین‌نامه، این نسبت نباید از ۷۵ درصد کمتر باشد.

#### ۴-۴-۳- آزمایش جوشان تگزاس

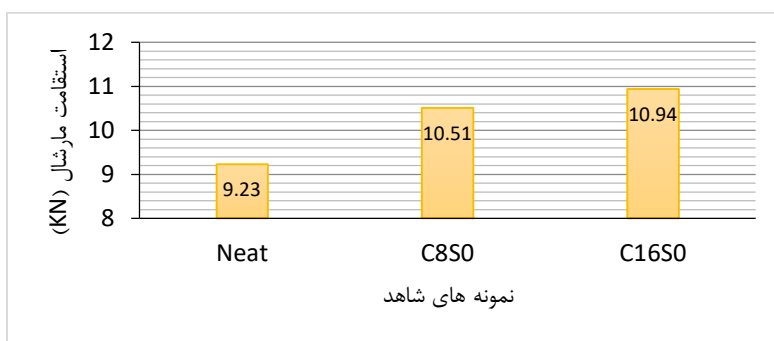
در این آزمایش که مطابق استاندارد ASTM3625 است، درجات مختلف عریان‌شدگی به صورت چشمی، پس از جوشاندن مخلوط آسفالتی متراکم نشده به مدت ۱۰ دقیقه تعیین می‌شود. در حدود ۵۰۰ گرم آب در ظرفی ریخته شده و به آن حرارت داده می‌شود تا به نقطه جوش برسد، سپس ۲۵۰ گرم از نمونه متراکم نشده، بین ۸۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۱۰ دقیقه درون آب جوش حرارت داده می‌شود، هر سه دقیقه یک بار محتویات درون ظرف، هم زده می‌شود و در انتها قیرهای روی سطح آب جدا شده تا باعث پوشش مجدد مصالح نگردد. پس از سرد شدن محتویات ظرف تا دمای اتاق، آب موجود در ظرف خالی شده و برای بررسی‌های بیشتر، مخلوط را روی یک سطح سفید قرار می‌دهند. معیار خرابی با مشاهدات چشمی مصالح عریان‌شده تعیین خواهد شد.

## ۵- نتایج

پس از ساخت نمونه‌های آسفالتی و انجام آزمون‌های گوناگون نتایج به شرح زیر ارائه به دست آمد.

### ۱-۵- آزمایش استحکام و روانی مارشال

شکل (۴) مقادیر استقامت مارشال نمونه‌های شاهد را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۲) با افزودن پودر لاستیک و افزایش درصد آن به مخلوط، مقاومت مارشال افزایش می‌یابد.



شکل ۲. استقامت مارشال نمونه‌های شاهد

ساسوبیت از ۱ به ۳ درصد، استقامت مارشال ۰٫۶۵ کیلونیوتن افزایش یافت. با کاهش دمای اختلاط از ۱۵۰ به ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد استقامت مارشال حدود ۲۰ درصد کاهش داشت. استقامت مارشال نمونه‌های حاوی ۸ درصد پودر لاستیک ساخته شده در دمای اختلاط ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد با افزایش درصد ساسوبیت افزایش داشته به نحوی که با افزایش درصد ساسوبیت از ۱ به ۳ درصد، استقامت مارشال ۰٫۷۷ کیلونیوتن افزایش یافت.

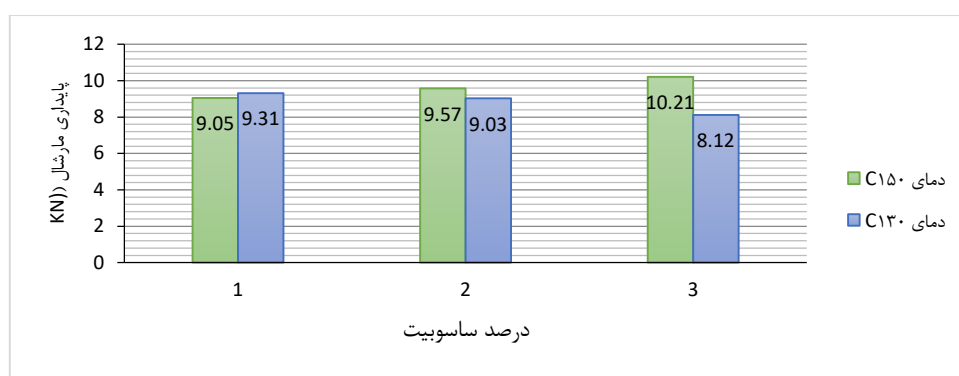
همان‌طور که قبلاً گفته شد برای نمونه‌های حاوی ساسوبیت دو سری نمونه ساخته شد که سری اول در دمای اختلاط ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد و سری دوم در دمای اختلاط ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد ساخته شدند، که در ادامه به ارائه نتایج استقامت مارشال آنها پرداخته می‌شود. شکل (۳) استقامت مارشال نمونه‌های حاوی ۸ درصد پودر لاستیک را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، استقامت مارشال نمونه‌های حاوی ۸ درصد پودر لاستیک ساخته شده در دمای اختلاط ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد با نمونه شاهد تفاوت قابل توجهی نداشت و با افزایش درصد



شکل ۳. استقامت مارشال نمونه‌های حاوی ساسوبیت و ۸ درصد پودر لاستیک

شکل (۴) استقامت مارشال نمونه‌های حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۶) استقامت مارشال نمونه‌های حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک ساخته شده در هر دو دما کمتر از نمونه شاهد بود. در نمونه‌های ساخته شده در دمای اختلاف ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد استقامت مارشال با افزایش درصد ساسوبیت افزایش یافت ولی در نمونه‌های ساخته شده در دمای اختلاف ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد استقامت مارشال با افزایش درصد

ساسوبیت کاهش داشت. استقامت مارشال تمام نمونه‌های ساخته شده در دمای اختلاف ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد از استقامت مارشال نمونه HMA بیشتر بود. جدول (۵) مقادیر روانی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تفاوت چندانی در مقادیر روانی نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود.



شکل ۴. استقامت مارشال نمونه‌های حاوی ساسوبیت و ۱۶ درصد پودر لاستیک

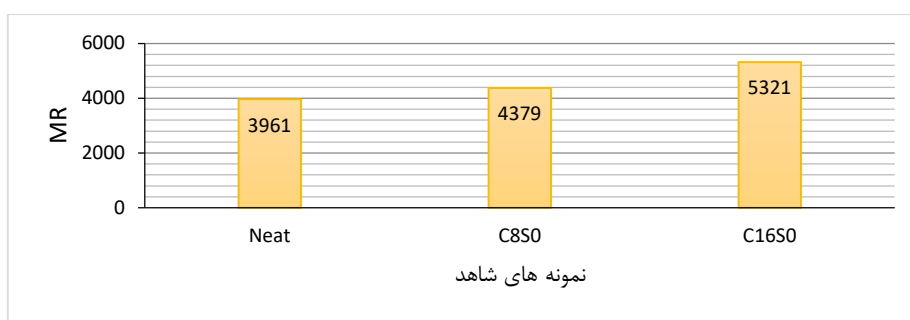
جدول ۵. نتایج روانی آزمایش مارشال

کد نمونه	مقدار پودر لاستیک (درصد)	مقدار ساسوبیت (درصد)	دمای اختلاف (درجه سانتیگراد)	استقامت مارشال (KN)	روانی مارشال (۰٫۲۵ میلی‌متر)
Neat	۰	۰	۱۵۰	۹٫۲۳	۴٫۶۲
C8S0	۸	۰	۱۸۰	۱۰٫۵۱	۴٫۵
C16S0	۱۶	۰	۱۸۰	۱۰٫۹۴	۴٫۴۱
C8S1	۸	۱	۱۵۰	۱۰٫۰۲	۴٫۳۶
C8S2	۸	۲	۱۵۰	۱۰٫۳۴	۴٫۲۱
C8S3	۸	۳	۱۵۰	۱۰٫۶۷	۴٫۷۸
C8S1	۸	۱	۱۳۰	۸٫۲۱	۳٫۸۷
C8S2	۸	۲	۱۳۰	۸٫۳۸	۴٫۲۹
C8S3	۸	۳	۱۳۰	۸٫۹۸	۴٫۰۲
C16S1	۱۶	۱	۱۵۰	۹٫۰۵	۴٫۵۳
C16S2	۱۶	۲	۱۵۰	۹٫۵۷	۴٫۸۶
C16S3	۱۶	۳	۱۵۰	۱۰٫۲۱	۴٫۸۳
C16S1	۱۶	۱	۱۳۰	۹٫۳۱	۴٫۵۷
C16S2	۱۶	۲	۱۳۰	۹٫۰۳	۴٫۶۳
C16S3	۱۶	۳	۱۳۰	۸٫۱۲	۴٫۶۶

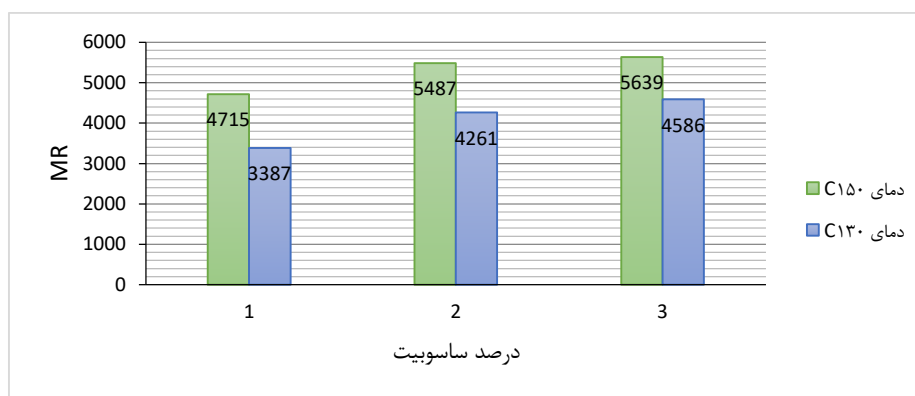
### ۱-۵- آزمایش مدول بر جهندگی

افزودن پودر لاستیک به مخلوط‌های آسفالتی، مدول بر جهندگی افزایش می‌یابد. به طور کلی با افزایش ساسوبیت مدول بر جهندگی نیز افزایش یافت، تنها استثنا در نمونه‌های حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک ساخته شده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد بود که با افزایش ساسوبیت از ۱ به ۲ درصد، مدول بر جهندگی کاهش یافت.

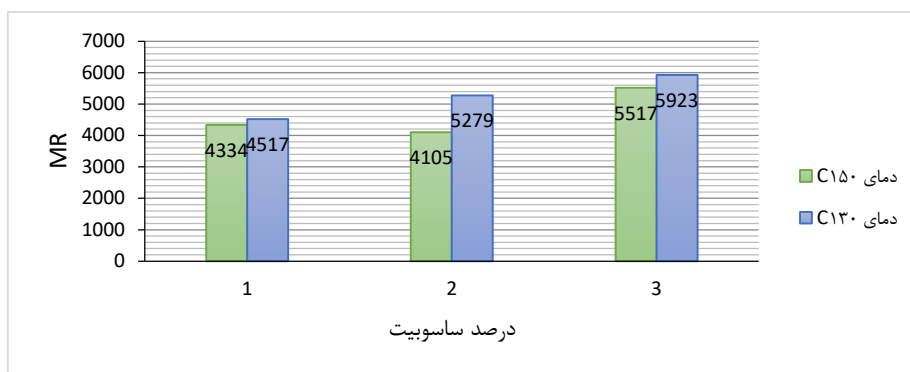
برای ارزیابی سختی و عملکرد مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده در برابر بار ترافیک از آزمایش مدول بر جهندگی استفاده شده‌است. برای انجام این آزمایش از هر نوع مخلوط تعداد ۲ نمونه ساخته شد. شکل‌های (۵-۷) تغییرات مدول بر جهندگی نمونه‌های مختلف را در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. براساس نتایج موجود در این شکل‌ها، مشخص می‌شود که با



شکل ۵. مدول بر جهندگی نمونه‌های HMA و آسفالت‌های لاستیکی بدون ساسوبیت



شکل ۶. مدول بر جهندگی نمونه‌های حاوی ۸ درصد ساسوبیت

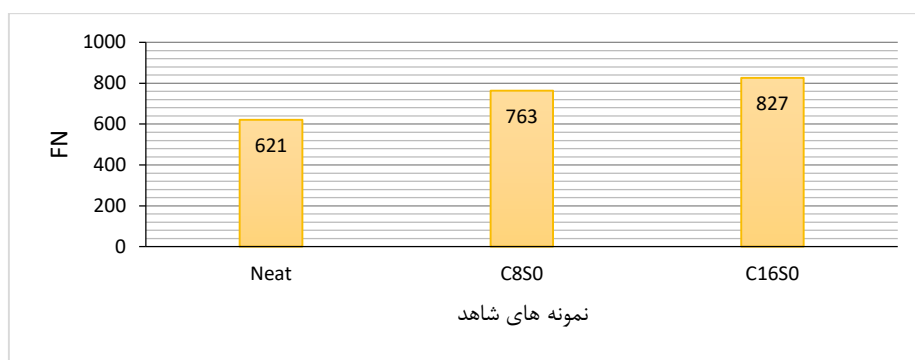


شکل ۷. مدول بر جهندگی نمونه‌های آسفالت‌های لاستیکی حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک

### ۳-۵- آزمایش خزش دینامیکی روی نمونه‌های مارشالی

در این تحقیق، عدد روانی بر اساس پیشنهاد NCHRP Project 09-33 برای ارزیابی مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گرفت. در این آزمایش از هر نوع مخلوط ۲ نمونه به مدت ۵ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند (۵ ساعت برای یکسان بودن دمای سطح نمونه و مغزه آن در نظر گرفته شد). و آزمایش در دمای ثابت ۵۰ درجه سانتی‌گراد و با تنش ثابت ۴۰۰ کیلو پاسکال، انجام گرفت.

در این پژوهش با توجه به منحنی سیکل - کرنش تجمعی که از آزمایش خزش دینامیکی بدست می‌آید و با بررسی سه ناحیه رفتاری در تغییر شکل‌های دائمی و در نهایت تعیین عدد روانی برای هر یک از نمونه‌های آزمایش شده، استحکام شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی ارزیابی شده‌است. شکل (۸) عدد روانی را برای مخلوط‌های آسفالتی شاهد نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش درصد پودر لاستیک در مخلوط‌های بدون افزودنی ساسویت، عدد روانی افزایش می‌یابد که نشان از افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی است.



شکل ۸ نتایج آزمایش خزش دینامیکی برای نمونه‌های شاهد

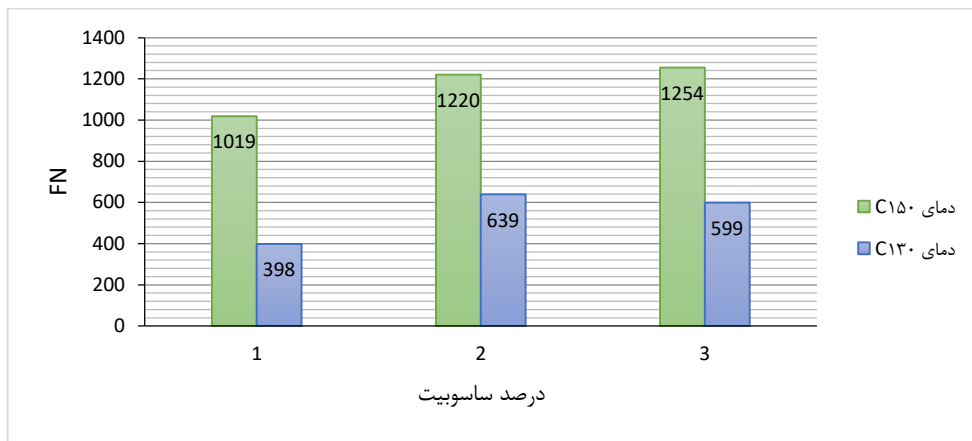
شکل (۱۰) اعداد روانی مخلوط‌های حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در این نوع مخلوط‌ها نیز در هر دو دما با افزایش درصد ساسویت، مقاومت شیارشدگی بهتر شده‌است. در دمای اختلاط ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به استثنای نمونه حاوی ۸ درصد ساسویت، سایر نمونه‌ها افزایش مقاومت شیارشدگی را نتیجه دادند. مخلوط حاوی ۸ درصد ساسویت ساخته شده در دمای اختلاط ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد عدد روانی کمتری نسبت به نمونه ۱۶ درصد پودر لاستیک داشت در صورتی که در حالت مشابه در مخلوط‌های حاوی ۸ درصد پودر لاستیک نمونه دارای ۸ درصد ساسویت مقاومت بیشتری نشان داده بود.

در دمای اختلاط ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد تمام نمونه‌ها مقاومت شیارشدگی کمتری نسبت به نمونه شاهدشان داشتند. با مقایسه اعداد روانی در دو دمای اختلاط مشاهده می‌شود که با کاهش دما از ۱۵۰ به ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد اعداد روانی به حدود سه

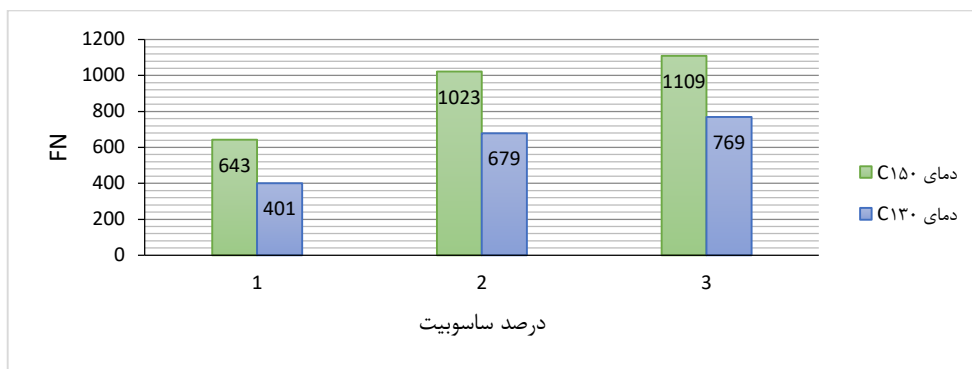
شکل (۹) اعداد روانی مخلوط‌های حاوی ۸ درصد پودر لاستیک را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، عدد روانی مخلوط‌های حاوی ۸ درصد پودر لاستیک و حاوی افزودنی ساسویت با افزایش دمای اختلاط به ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد نه تنها کاهش در مقاومت شیارشدگی نداشته بلکه عدد روانی آن افزایش یافته‌است که نشان از افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی است. در این دما با افزایش درصد ساسویت مقاومت شیارشدگی افزایش یافته‌است. اما با کاهش دمای اختلاط به ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت در برابر شیارشدگی کاهش یافته‌است و با وجود اینکه با افزایش درصد ساسویت مقاومت شیارشدگی بهتر شده‌است ولی عدد روانی آنها کمتر از مخلوط حاوی ۸ درصد پودر لاستیک بدون افزودنی ساسویت است. با مقایسه اعداد روانی در دو دمای اختلاط مشاهده می‌شود که با کاهش دما از ۱۵۰ به ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد اعداد روانی به حدود نصف اعداد روانی در دمای اختلاط ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته‌است.

این افزایش مقاومت برقرار نیست؛ در واقع با کاهش دمای اختلاط، افزایش درصد پودر لاستیک مقاومت شیارشدگی را کاهش می‌دهد. هرچند که افزودن ساسویت این کاهش مقاومت شیارشدگی را جبران می‌کند ولی این جبران حدی داشته و پس از آن ساسویت هم نمی‌تواند بهبودی صورت دهد.

چهارم اعداد روانی در دمای اختلاط ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته‌است. ملاحظه شد که مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۸ و ۱۶ درصد پودر لاستیک، در مقایسه با HMA مقاومت شیارشدگی بهتری داشتند. اما در ادامه و با کاهش دمای اختلاط،



شکل ۹. اعداد روانی برای مخلوط‌های حاوی ساسویت و ۸ درصد پودر لاستیک



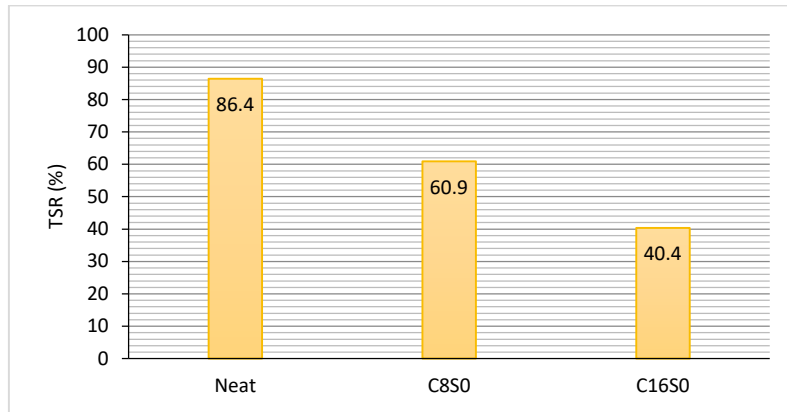
شکل ۱۰. اعداد روانی برای مخلوط‌های حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک

نتایج آزمایش نشان داد که با افزایش درصد پودر لاستیک مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک افزایش و در حالت تر روند کاهشی دارد. در نتیجه مطابق شکل (۱۱) که نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های شاهد را نشان می‌دهد، نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم با افزایش درصد پودر لاستیک کاهش می‌یابد (در واقع حساسیت رطوبتی افزایش می‌یابد).

#### ۵-۴- نتایج آزمایشات حساسیت رطوبتی

##### ۵-۴-۱- نتایج آزمایش کششی غیرمستقیم

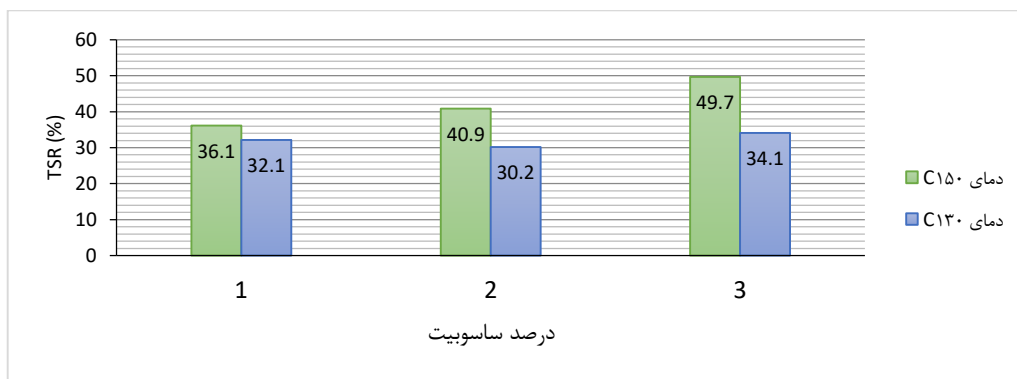
انجام این آزمایش بر اساس استاندارد AASHTO T283 و توسط دستگاه کششی غیرمستقیم صورت گرفته‌است. برای هر یک از مخلوط‌ها تعداد شش نمونه آماده گردید که سه عدد از نمونه‌ها برای آزمایش تحت شرایط خشک و سه عدد برای آزمایش تحت شرایط اشباع استفاده گردید.



شکل ۱۱. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) نمونه‌های شاهد

دمای اختلاط از ۱۵۰ به ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت کششی غیرمستقیم در هر دو حالت تر و خشک کاهش زیادی داشته است. با توجه به شکل (۱۴) مشاهده می‌شود که با کاهش دمای اختلاط نسبت مقاومت کششی برای تمام نمونه‌ها کمتر از نمونه شاهد است. در هر دو دما مشاهده شد که با افزایش درصد ساسویت نسبت مقاومت کششی افزایش یافت با این وجود تفاوت زیادی با نمونه شاهد داشتند.

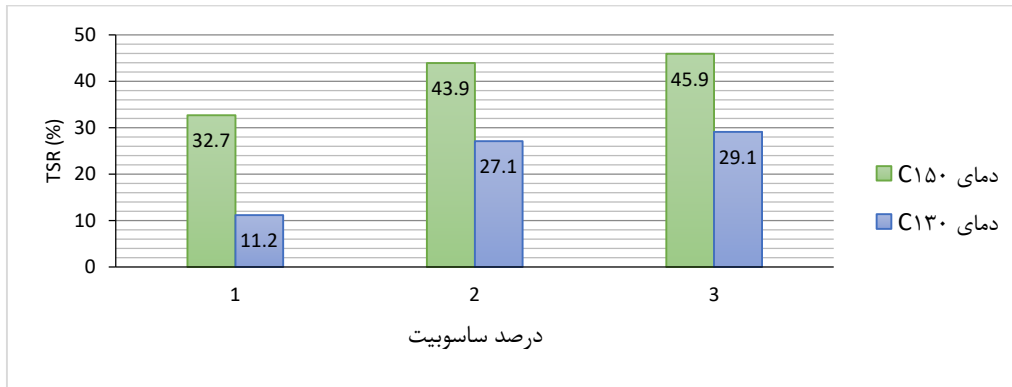
شکل (۱۲) نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های حاوی ۸ درصد پودر لاستیک را نشان می‌دهد. مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک نمونه‌های ساخته‌شده در دمای اختلاط ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته‌است و با افزایش درصد ساسویت مقاومت کششی غیرمستقیم نیز افزایش می‌یابد، اما مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت تر نسبت به نمونه شاهد کاهش داشته است. با کاهش



شکل ۱۲. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک و اشباع نمونه‌های حاوی ۸ درصد پودر لاستیک

نمونه شاهد حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک نیز بیشتر بود. مشاهده شد که با افزایش درصد ساسویت نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم افزایش یافته است. در نمونه‌های حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک نیز با کاهش دمای اختلاط از ۱۵۰ به ۱۳۰ درجه مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک و تر کاهش داشتند.

شکل (۱۳) نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک را نشان می‌دهد. در مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک و اشباع نمونه‌های حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک ساخته شده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد روند خاصی مشاهده نشد. در این دما مخلوط حاوی ۲ درصد ساسویت بیشترین مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک و اشباع را داشت و نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم آن از



شکل ۱۳. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک و اشباع نمونه‌های حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک

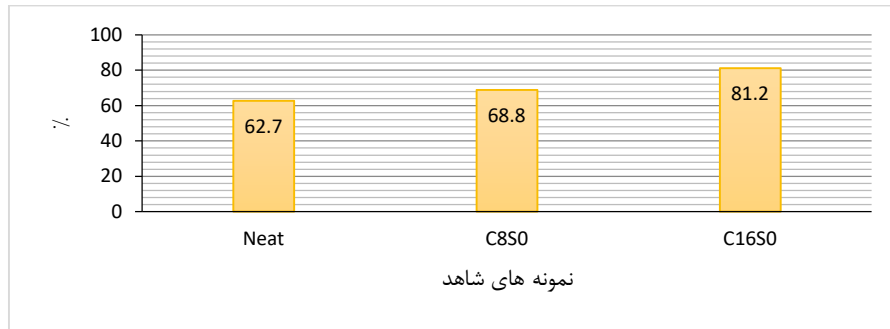
حساسیت رطوبتی افزایش می‌یابد و با افزایش درصد ساسوبیت، حساسیت رطوبتی کاهش می‌یابد. ملاحظه می‌شود که تمام مخلوط‌های WMA دارای مقدار TSR کمتر از مقدار مجاز می‌باشند، لذا، استفاده از آنها با توجه به شرایط موجود و بدون اصلاح مخلوط منطقی به نظر نمی‌رسد.

#### ۵-۴-۲- آزمایش نسبت مقاومت مارشال اشباع به مقاومت مارشال خشک

این آزمایش برای نمونه‌های آسفالتی با قیرهای لاستیکی ۸ و ۱۶ درصد و با درصدهای مختلفی از ساسوبیت (۳، ۲، ۱ درصد) انجام گردید. برای هر نوع قیر، ۶ نمونه‌ی آسفالتی مارشال ساخته شد و ۳ نمونه به صورت خشک و ۳ نمونه تحت شرایط غرقاب، مورد آزمایش تعیین استحکام (مقاومت مارشال) قرار گرفتند و سپس نسبت مقاومت مارشال برای نمونه‌های خشک به مقاومت مارشال نمونه‌های غرقاب محاسبه گردید. طبق معیار نشریه ۲۳۴ این نسبت نباید از ۷۵ درصد کمتر باشد.

شکل (۱۴) نتایج این آزمایش را برای نمونه‌های HMA و مخلوط‌های آسفالت لاستیکی بدون افزودنی ساسوبیت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش درصد پودر لاستیک نسبت مقاومت مارشال افزایش یافته است. طبق معیار نشریه ۲۳۴ این نسبت نباید از ۷۵ درصد کمتر باشد اما فقط مخلوط‌های آسفالت لاستیکی حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک این معیار را تأمین کرده و مخلوط‌های HMA و مخلوط‌های آسفالت لاستیکی حاوی ۸ درصد پودر لاستیک نسبت مقاومت مارشال آنها کمتر از ۷۵ درصد است.

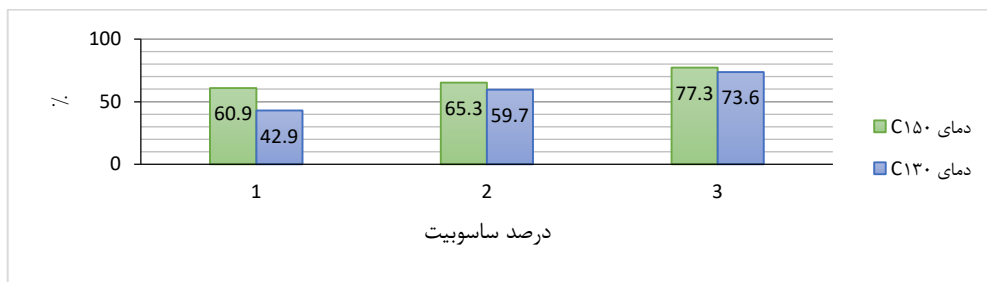
مخلوط‌های WMA در مقایسه با HMA از حساسیت رطوبتی بالاتری برخوردار هستند (به عبارت دیگر مقدار TSR آن کمتر از HMA است). همان‌طور که ملاحظه شد، با افزایش درصد افزودنی ساسوبیت، کاهش شدیدی در مقدار TSR برای مخلوط‌هایی که در دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد ساخته شده بودند، رخ داد. علت وقوع این پدیده را می‌توان به دو صورت توجیه کرد. اول این که، کاهش درجه حرارت اختلاط و تراکم برای مخلوط WMA در مقایسه با HMA باعث می‌شود قسمتی از رطوبت موجود در سنگدانه‌ها تبخیر نشده و در نهایت این مقدار رطوبت، سبب کاهش میزان چسبندگی قیر به مصالح خواهد شد (مکانیزم ضعف چسبندگی). دوم اینکه کاهش درجه حرارت اختلاط و تراکم در WMA در مقایسه با HMA باعث می‌شود میزان اکسیداسیون در قیر و در نتیجه سختی قیر کاهش یابد (مکانیزم ضعف پیوستگی). با کاهش دمای اختلاط از ۱۵۰ به ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد کاهش شدیدتری در مقادیر TSR رخ داد که نشان از افزایش حساسیت رطوبتی است. علت وقوع این پدیده را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که کاهش دما از ۱۵۰ به ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد باعث می‌شود که رطوبت بیشتری در مخلوط باقی‌مانده و تبخیر نشود و در نهایت این مقدار رطوبت، سبب کاهش شدیدتر میزان چسبندگی قیر به مصالح شده (مکانیزم ضعف چسبندگی) و از طرفی دیگر درجه حرارت پایین‌تر باعث کاهش میزان اکسیداسیون در قیر خواهد شد (مکانیزم ضعف پیوستگی). به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که با افزودن پودر لاستیک و کاهش دمای اختلاط،



شکل ۱۴. نسبت مقاومت مارشال برای نمونه های HMA و مخلوط های آسفالت لاستیکی بدون افزودنی ساسویت

با افزایش درصد ساسویت به ۲ و ۳ درصد این نسبت نیز افزایش یافته و در ۲ درصد ساسویت تنها حدود ۳ درصد با نمونه شاهد تفاوت داشته و در ۳ درصد ساسویت افزایش چشم گیری در نسبت مقاومت مارشال مشاهده می شود یعنی برابر ۷۷,۳ درصد شده که نسبت به نمونه شاهد حدود ۸,۵ درصد افزایش نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود در دمای اختلاط ۱۳۰ درجه سانتی گراد نیز نسبت مقاومت مارشال ابتدا کاهش را نشان می دهد ولی با افزایش درصد ساسویت این نسبت نیز افزایش یافته و بهبود می یابد. در بین نمونه های حاوی ۸ درصد پودر لاستیک فقط نمونه حاوی ۳ درصد ساسویت که در دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد ساخته شده بود، معیار ۷۵ درصد را داشت.

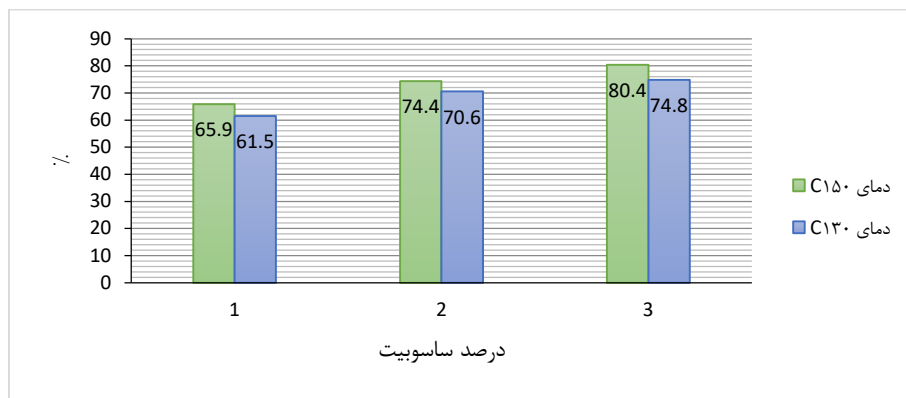
شکل (۱۵) نسبت مقاومت مارشال برای نمونه های مخلوط های آسفالت لاستیکی حاوی ۸ درصد پودر لاستیک با درصدهای مختلف ساسویت که در دماهای اختلاط ۱۵۰ و ۱۳۰ درجه سانتی گراد ساخته شده اند را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش درصد ساسویت نسبت مقاومت مارشال افزایش می یابد که این نشان از بهبود مقاومت نمونه ها در برابر حساسیت رطوبتی است. با مقایسه نمونه های ساخته شده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد با نمونه مخلوط آسفالت لاستیکی حاوی ۸ درصد پودر لاستیک بدون افزودنی، مشاهده می کنیم که با افزودن ساسویت به آن و کاهش دمای اختلاط نسبت مقاومت مارشال کاهش می یابد، بطوریکه برای نمونه های حاوی ۱ درصد ساسویت، نسبت مقاومت مارشال برابر ۶۰,۹ درصد می شود ولی



شکل ۱۵. نسبت مقاومت مارشال برای نمونه های مخلوط های حاوی ۸ درصد پودر لاستیک

کاهش و با افزایش درصد ساسویت نسبت مقاومت مارشال افزایش یافت. در بین نمونه های حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک نمونه های دارای ۲ و ۳ درصد ساسویت که در دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد ساخته شده بودند، معیار ۷۵ درصد را داشتند. به طور کلی با افزایش درصد پودر لاستیک و ساسویت نسبت مقاومت مارشال افزایش داشت و با کاهش دماهای اختلاط نسبت مقاومت مارشال کاهش یافت.

شکل (۱۶) نسبت مقاومت مارشال برای نمونه های مخلوط های حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک با درصدهای مختلف ساسویت را که در دماهای اختلاط ۱۳۰ و ۱۵۰ درجه سانتی گراد ساخته شده اند را نشان می دهد. نمونه های ساخته شده با ۱۶ درصد پودر لاستیک و درصدهای مختلفی از ساسویت نیز مشابه با روند حاکم بر نمونه های حاوی ۸ درصد پودر لاستیک عمل نمودند. به طوری که با کاهش دمای اختلاط نسبت مقاومت مارشال



شکل ۱۶. نسبت مقاومت مارشال نمونه‌های مخلوط‌های حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک

ارزیابی چشمی روی نمونه‌ها تحت تأثیر آب جوشان نشان داد با کاهش دمای اختلاط و افزایش درصد پودر لاستیک در مخلوط‌های آسفالتی مقدار عریان‌شدگی در نمونه‌های یکسان، افزایش پیدا می‌کند و با افزایش درصد ساسوبیت بهبود در عریان‌شدگی مشاهده می‌شود. نتایج حاصل از این آزمایش هماهنگی خوبی با نتایج حاصل از آزمایش حساسیت رطوبتی AASHTO T283 دارد که نشانگر دقت و کارایی این آزمایش ساده و کم هزینه است. شکل (۱۷) یک نمونه قبل و بعد از جوشاندن را نشان می‌دهد.

### ۵-۴-۳- آزمایش جوشان تگزاس ASTM D3625

این آزمایش تحت استاندارد ASTM D3625 برای تعیین کاهش چسبندگی در مخلوط متراکم نشده، تحت تأثیر آب جوش استفاده می‌گردد. در این روش نمونه مخلوط آسفالتی، به مدت ۱۰ دقیقه در ظرفی از آب جوش قرار داده می‌شود و پس از خنک شدن، مشاهدات چشمی برای تعیین میزان پوشش قیر باقی مانده روی مصالح انجام می‌شود. این آزمایش به عنوان یک شاخص جهت تعیین حساسیت نسبی مصالح پوشیده شده با قیر نسبت به آب می‌باشد.



شکل ۱۷. نمونه قبل و بعد از جوشاندن

(HMA) ساخته شد و آزمایش‌های مارشال، کشش غیرمستقیم، نسبت مقاومت تر به خشک مارشال، خزش دینامیکی و مدول برجهنگی روی نمونه‌های آسفالتی انجام شد. مهمترین نتایج این پژوهش بصورت زیر است:

با افزودن پودرلاستیک به مخلوط، مقاومت مارشال افزایش می‌یابد و با افزایش درصد ساسوبیت مقاومت مارشال نیز افزایش می‌یابد. استقامت مارشال و روانی نمونه‌های حاوی ۸ درصد

### ۶- نتیجه گیری

این پژوهش به منظور ارزیابی سختی، مقاومت در برابر شیاردهی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی پودرلاستیک و ساسوبیت انجام شد. بدین منظور نمونه‌هایی حاوی ۸ و ۱۶ درصد پودرلاستیک و ۱، ۲، ۳ درصد ساسوبیت در دو دمای اختلاط ۱۳۰ درجه سانتیگراد (WMA) و ۱۵۰ درجه سانتیگراد

در این دما مقاومت در برابر شیارشدگی برای نمونه‌های حاوی ۳ درصد ساسویت در مخلوط‌های آسفالت لاستیکی حاوی ۸ درصد پودر لاستیک ۶۴ درصد و در مخلوط‌های آسفالت لاستیکی حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک ۳۴ درصد افزایش نشان داد.

-با مقایسه اعداد روانی در دو دمای اختلاط می بینیم که کاهش دما از ۱۵۰ به ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد اعداد روانی مخلوط‌های آسفالت لاستیکی حاوی ۸ درصد پودر لاستیک ۵۰ درصد و اعداد روانی مخلوط‌های آسفالت لاستیکی حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک به حدود سه چهارم کاهش یافته‌است.

-در دمای اختلاط ۱۳۰ درجه مقاومت شیارشدگی کمتر از نمونه‌های شاهد حاوی پودر لاستیک بود ولی نمونه‌های آسفالت لاستیکی حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک با ۲ و ۳ درصد ساسویت مقاومت شیارشدگی بهتری از نمونه‌های شاهد HMA داشتند.

به طور کلی می‌توان گفت که کاهش دما مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی را کاهش می‌دهد و با افزودن ساسویت مقاومت شیارشدگی بهتر می‌شود به طوری که در دمای اختلاط ۱۵۰ دیده شد که در مخلوط‌های حاوی ۸ درصد پودر لاستیک مقاومت شیارشدگی خوبی از خود نشان دادند.

-با افزودن پودر لاستیک به مخلوط‌های آسفالتی، مدول برجهنگی افزایش می‌یابد. به طور کلی با افزایش ساسویت مدول برجهنگی نیز افزایش یافت؛ فقط در نمونه‌های حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک ساخته شده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد با افزایش ساسویت از ۱ به ۲ درصد مدول بر جهنگی کاهش و با افزایش ساسویت از ۲ به ۳ درصد، مدول برجهنگی افزایش یافت.

## ۷-مراجع

- Adnan, A.M., Luo, X., Lu, C., Wang, J., Huang, Z., (2020). Improving mechanics behavior of hot mix asphalt using graphene-oxide. *Construct. Build. Mater.* 254.
- Airey, G.D., Rahman, M.M., Collop, A.C., (2003). Absorption of bitumen into crumb rubber using the basket drainage method, *Int. J. Pavement Eng.* 4 (2), 105-119.

پودر لاستیک ساخته شده در دمای اختلاط ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد با نمونه شاهد تفاوت قابل توجهی نداشت. با کاهش دمای اختلاط از ۱۵۰ به ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد استقامت مارشال حدود ۲۰ درصد کاهش داشت.

-استقامت مارشال نمونه‌های حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک ساخته شده در هر دو دما کمتر از نمونه شاهد بود، البته برای نمونه حاوی ۳ درصد ساسویت ساخته شده در دمای اختلاط ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، استقامت مارشال کمی کمتر از نمونه شاهد بود.

-در هر دو دما مشاهده شده که با افزایش درصد ساسویت در مخلوط آسفالت لاستیکی استقامت مارشال افزایش یافت، بجز استقامت مارشال نمونه‌های حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک در دمای اختلاط ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد که با افزایش درصد ساسویت کاهش داشت.

-استقامت مارشال تمام نمونه‌های WMA از استقامت مارشال نمونه‌های HMA بیشتر بود.

-مقادیر روانی آزمایش مارشال برای تمام نمونه‌ها تقریباً با یکدیگر یکسان بودند.

-نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم نشان داد که حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالت لاستیکی با افزایش درصد پودر لاستیک افزایش می‌یابد.

-با افزودن پودر لاستیک و کاهش دمای اختلاط حساسیت رطوبتی افزایش می‌یابد که این ممکن است به دلیل باقی ماندن آب در سنگدانه‌ها باشد و با افزایش درصد ساسویت، حساسیت رطوبتی کاهش می‌یابد.

-نتایج آزمایش نسبت مقاومت مارشال نشان داد که با افزایش درصد پودر لاستیک، نسبت مقاومت مارشال افزایش می‌یابد. در هر دو دما مشاهده شد که با کاهش دما نسبت مقاومت مارشال کاهش یافت ولی با افزایش درصد ساسویت این نسبت نیز افزایش یافت و در درصد ساسویت ۳ درصد در هر دو دما نسبت مقاومت مارشال به نسبت مقاومت مارشال نمونه‌های شاهد نزدیک شد.

-مقاومت در برابر شیارشدگی با افزایش درصد پودر لاستیک در مخلوط‌های آسفالت لاستیکی افزایش می‌یابد. در دمای اختلاط ۱۵۰ درجه مقاومت شیارشدگی بهتر از نمونه‌های شاهد بود و با افزایش درصد ساسویت مقاومت شیارشدگی افزایش یافت.

- Properties of Crumb Rubber Composite Modified Asphalt. *Sustainability*, 14, 8999.
- Gong, J., Liu, Y., Jiang, Y., Wang, Q., Xi, Z., Cai, J., Xie, H., (2021). Performance of epoxy asphalt binder containing warm-mix asphalt additive. *Int. J. Pavement Eng.* 22 (2), 223–232.
- Guo, Q.L., Li, L., Cheng, Y.C., Jiao, Y.B., Xu, C., (2014). Laboratory evaluation on performance of diatomite and glass fiber compound modified asphalt mixture. *Mater. Des.* 66, 51–59.
- Hajikarimi, P., Rahi, M., Nejad, F.M., (2015). Comparing different rutting specification parameters using high temperature characteristics of rubber-modified asphalt binders, *Road Mater. Pavement Des.* (4), 751–766.
- Hou, Y., Wang, L.B., Wang, D.W., Guo, M., Liu, P.F., Yu, J.X., (2017). Characterization of bitumen micro-mechanical behaviors using AFM, phase dynamics theory and MD simulation. *Materials*, 10 (2), 208.
- Hu, J., Ma, T., Yin, T., Zhou, Y., (2022). Foamed warm mix asphalt mixture containing crumb rubber: foaming optimization and performance evaluation. *J. Clean. Prod.* 333.
- Jamshidi, A., Hamzah, M.O., You, Z., 2013. Performance of warm mix asphalt containing sasobit (R): state-of-the-art. *Construct. Build. Mater.* 38, 530–553.
- Jamshidi, A., Hamzah, M.O., You, Z.P., (2013). Performance of warm mix asphalt containing Sasobit: state-of-the-art. *Construct. Build. Mater.* 38, 530–553.
- Krba, U., Karaahin, M., (2017). Estimating PCI using vibration data for asphalt concrete pavements. In: *Proceedings of the 2nd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering*, p. ICTE 114.
- Li, Q. Zhang, H. Shi, C. Chen, Z. (2021). A novel warm-mix additive for SBR modified asphalt binder: Effects of Sasobit/epoxidized soybean oil compound on binder rheological and long-term aging performance, *Journal of Cleaner Production*, 326, 129405.
- Liu, J., Li, P., 2012. Low temperature performance of sasobit-modified warm-mix asphalt. *J. Mater. Civ. Eng.* 24 (1), 57–63.
- Liu, J.Y., Li, P., 2012. Low temperature performance of Sasobit-modified warm-mix asphalt. *J. Mater. Civ. Eng.* 24 (1), 57–63.
- Liu, Z., Gu, X., Dong, X., Cui, B., Hu, D., (2023). Mechanism and performance of
- Ban, H., Im, S., Kim, Y. R., (2013). Nonlinear viscoelastic approach to model damage-associated performance behavior of asphaltic mixture and pavement structure. *Can. J. Civ. Eng.* 40.
- Behnood, A., (2020). A review of the warm mix asphalt (WMA) technologies: effects on thermo-mechanical and rheological properties. *J. Clean. Prod.* 259.
- Bressi, S., Fiorentini, N., Huang, J., and Losa, M., (2019). Crumb Rubber Modifier in Road Asphalt Pavements: State of the Art and Statistics. *Coatings*, 9, 384.
- Brovelli, C., Crispino, M., Pais, J., Pereira, P., (2015). Using polymers to improve the rutting resistance of asphalt concrete. *Construct. Build. Mater.* 77, 117–123.
- Brown, E.R., Kandhal, P.S., Roberts, F.L., Kim, Y.R., Lee, D.Y., Kennedy, T.W., (2009). Hot mix asphalt materials, mixture design and construction, *Third Edition, National Asphalt Pavement Association*, ISBN: 0914313029, 9780914313021.
- Chen, M., Geng, J., Xia, C., He, L., Liu, Z., (2021a). A review of phase structure of SBS modified asphalt: affecting factors, analytical methods, phase models and improvements. *Construct. Build. Mater.* 294.
- Cheraghian, G., Falchetto, A.C., You, Z., Chen, S., Kim, Y.S., Westerhoff, J., Moon, K.H., Wistuba, M.P., (2020). Warm mix asphalt technology: an up to date review. *J. Clean. Prod.* 268.
- CIIN, China Industry Information Network. (2023). Evaluation report on the market trends and investment prospects of China's waste tires in 2018-2024. *Intell. Res. Consult.*
- Dinis-Almeida, M., Afonso, M.L., (2015). Warm mix recycled asphalt – a sustainable solution. *J. Clean. Prod.* 107, 310–316.
- Edwards, Y., Isacson, U., 2005. Wax in bitumen. *Road. Mater. Pavement*, 6 (3), 439–468.
- Feng, Z.G., Cai, F.J., Yao, D.D., Li, X.J., (2021). Aging properties of ultraviolet absorber/ SBS modified bitumen based on FTIR analysis. *Construct. Build. Mater.* 273, 121713.
- Gong, F. Lin, W. Chen, Z. Shen, T. Hu, C. (2022). High-Temperature Rheological

- Rodríguez-Alloza, A.M.; Gallego, J.; Pérez, I. (2013). Study of the effect of four warm mix asphalt additives on bitumen modified with 15% crumb rubber. *Constr. Build. Mater.*, 43, 300–308.
- Rojas, K.L., Padmarekha, A., Krishnan, J.M., (2018). Rheological investigations on warmmix asphalt binders at high and intermediate temperature ranges. *J. Mater. Civ. Eng.* 30 (4), 04018038.
- Sun, L., Wen, Y., Liu, Q., Li, D., Lyu, L., Pei, J., Zhang, J., Li, R., (2021). A laboratory investigation into the effect of waste non-tire rubber particles on the performance properties of terminal blend rubberized asphalt binders. *Construct. Build. Mater.* 313.
- Tabatabaee, N., Tabatabaee, H.A., (2010). Multiple stress creep and recovery and time sweep fatigue tests: crumb rubber modified binder and mixture performance, *Transport. Res. Rec.* 2180 (1), 67–74.
- Thomas, B.S., Gupta, R.C., Panicker, V.J., (2016). Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance, *J. Clean. Prod.* 112, 504–513.
- Vaitkus, A., Kilas, M., Tuminiene, F., Perveneckas, Z., (2011). Experience of use of warm mix asphalt in Lithuania. In: *8th International Conference Environmental Engineering*. Vilnius, LITHUANIA, 1227.
- Wang, D., Liu, Z., Gu, X., Wu, W., Chen, Y., Wang, L., (2022). Automatic detection of pothole distress in asphalt pavement using improved convolutional neural networks. *Remote Sens.* 14, 3892.
- Wei, J.M., Liu, Z.Y., Zhang, Y.Z., (2013). Rheological properties of amorphous poly alpha olefin (APAO) modified asphalt binders. *Construct. Build. Mater.* 48, 533–539.
- Wu, S., Tahri, O., Shen, S., Zhang, W., Muhunthan, B., (2021). Environmental impact evaluation and long-term rutting resistance performance of warm mix asphalt technologies. *J. Clean. Prod.* 278.
- Xiao, F., Amirhanian, S.N., Putman, B.J., (2010). Evaluation of rutting resistance in warm-mix asphalts containing moist aggregate. *Transport. Res. Rec.* 2180, 75–84.
- Yan, K.Z., Chen, J.H., You, L.Y., Tian, S., (2020). Characteristics of compound asphalt modified by waste tire rubber (WTR) and ethylene vinyl acetate (EVA): conventional, graphene modified asphalt: an experimental approach combined with molecular dynamic simulations. *Case Stud. Constr. Mater.* 18, e01749.
- Liu, Z., Gu, X.Y., Wu, C.Y., Ren, H., Zhou, Z., Tang, S., (2022). Studies on the validity of strain sensors for pavement monitoring: a case study for a fiber Bragg grating sensor and resistive sensor. *Construct. Build. Mater.* 321.
- Ma, H., Zhang, Z., Zhao, X., Wu, S., (2019). A comparative life cycle assessment (LCA) of warm mix asphalt (WMA) and hot mix asphalt (HMA) pavement: a case study in China. *Adv. Civ. Eng.* 8.
- Machin, E.B., Pedroso, D.T., Carvalho, J.A., (2017). Energetic valorization of waste tires, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 68, 306–315.
- Natu, G.S., Tayebali, A.A., (2000). Viscoelastic behavior of crumb rubber modified asphalt binders, *Road Mater. Pavement Des.* 1, (1–2), 119–129.
- Okonkwo, F.O., Njan, A.A., Ejike, C.E., Nwodo, U.U., Onwurah, I.N., (2018). Health implications of occupational exposure of butchers to emissions from burning tyres, *Annals of Global Health* 84 (3), 387–388.
- Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D., Abreu, L.P.F., Fernandes, S.R.M., (2013). Use of a warm mix asphalt additive to reduce the production temperatures and to improve the performance of asphalt rubber mixtures. *J. Clean. Prod.* 41, 15–22.
- Peng, C., Zhang, H., You, Z.P., Xu, F., Jiang, G.S., Lv, S.T., Zhang, R., Yang, H., (2018). Preparation and anti-icing properties of a superhydrophobic silicone coating on asphalt mixture. *Construct. Build. Mater.* 189, 227–235.
- Picado-Santos, L.G., Capitão, S.D., Neves, J.M.C., (2020). Crumb rubber asphalt mixtures: a literature review. *Construct. Build. Mater.* 247, 118577.
- Pouranian, M.R.; Notani, M.A.; Tabesh, M.T.; Nazeri, B.; Shishehbor, M. (2020). Rheological and environmental characteristics of crumb rubber asphalt binders containing non-foaming warm mix asphalt additives. *Constr. Build. Mater.* 238, 117707.
- Qin, Q., Farrar, M.J., Pauli, A.T., Adams, J.J., (2014). Morphology, thermal analysis and rheology of Sasobit modified warm mix asphalt binders. *Fuel*, 115 (1), 416–425.

characterize high temperature performance of different rubber modified asphalt, *Construct. Build. Mater.* 127, 466–474.

-Zhang, S.S., Li, R., Pei, J.Z., (2019). Evaluation methods and indexes of morphological characteristics of coarse aggregates for road materials: a comprehensive review. *J. Traffic Transport. Eng. (Engl. Ed.)* 6 (3), 256–272.

-Zhou, F., Scullion, T., Sun, L., (2004). Verification and Modeling of Three-Stage Permanent Deformation behavior of asphalt mixes, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 130, No. 4, 486-494.

-Ziari, H., Amini, A., Goli, A., (2020). Investigation of blending conditions effect on GTR dissolution and rheological properties of rubberized binders, *Construct. Build. Mater.* 242, 117828.

rheological, and microstructural properties. *J. Clean. Prod.* 258, 120732.

-Yan, S., Dong, Q., Chen, X., Zhou, C., Dong, S., Gu., X., (2022). Application of waste oil in asphalt rejuvenation and modification: a comprehensive review. *Construct. Build. Mater.* 340.

-Yildirim, Y., 2005. Polymer modified asphalt binders. *Construct. Build. Mater.* 21 (1), 66–72.

-Zhang, B.C., Xi, M., Zhang, D.W., Zhang, H.X., Zhang, B.Y., 2009. The effect of styrenebutadiene-rubber/montmorillonite modification on the characteristics and properties of asphalt. *Construct. Build. Mater.* 23 (10), 3112–3117.

-Zhang, J.P., Yang, F.H., Pei, J.Z., Xu, S.C., An., F.W., (2015). Viscosity-temperature characteristics of warm mix asphalt binder with Sasobit. *Construct. Build. Mater.* 78, 34–39.

-Zhang, L., Xing, C., Gao, F., Li, T.S., Tan, Y.Q., (2016). Using DSR and MSCR tests to

# Evaluation of Hardness, Rutting Resistance, and Moisture Sensitivity of Asphalt Mixtures Containing Rubber Powder and Sasobit

*Mohammad Koohi, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran.*

*Shahin Shabani, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran.*

*Abulfazl Baghernia, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

*E-mail: m.koohhi@gmail.com*

Received: April 2025- Accepted: November 2025

## **ABSTRACT**

One engineering solution to reduce the amount of rubber waste is the use of rubber powder in the production of asphalt mixtures to enhance their performance. However, the high mixing temperature of rubber powder and asphalt necessitates the implementation of solutions that can simultaneously reduce the energy required for mixing and improve the performance of rubberized asphalt. One approach that researchers have explored in recent years is the use of Warm Mix Asphalt (WMA), which requires mixing temperatures that are 10 to 30 degrees lower than those of Hot Mix Asphalt (HMA). Among the materials that can lower the mixing temperature of rubberized asphalt is Sasobit. Although researchers have examined asphalt mixtures containing rubber powder and Sasobit, the moisture sensitivity of this type of mixture has not been specifically investigated. This study aims to assess the moisture sensitivity of asphalt mixtures containing rubber powder and Sasobit using two amounts of 8% and 16% rubber powder and 1%, 2%, and 3% Sasobit. Two mixing temperatures of 150 and 130 degrees Celsius were employed to observe the differences between warm and hot mixtures. The samples underwent Marshall Stability and flow tests, resilient modulus, dynamic creep, and moisture sensitivity tests (indirect tensile strength, saturated to dry compressive strength ratio, and Texas boiling test). The results indicate that Warm Mix Asphalt technology can be utilized in rubberized asphalts; however, due to the increased moisture sensitivity of the mixture with higher percentages of rubber powder at lower mixing temperatures, high percentages of rubber powder should be avoided. According to the findings, in rubberized asphalt mixtures containing 8% and 16% rubber powder, the mixing temperature can be reduced to 150 degrees Celsius by adding 3% Sasobit, but lowering the temperature to 130 degrees is not recommended due to its significant impact on moisture sensitivity.

**Keywords:** Asphalt Mixture, Rubber Powder, Sasobit, Moisture Sensitivity