

# ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر پلیمر SBS بر خواص عملکردی قیر و مخلوط آسفالتی حاوی نانورس و گیلسونایت

## مقاله علمی - پژوهشی

حامین چوبدار، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران  
امین فرج الهی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران  
علیرضا عاملی\*، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: amelii@gmail.com

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

صفحه ۴۴-۳۱

### چکیده

با توجه به مشکلات هزینه بالا، پردازش دشوار و پایداری ذخیره سازی نامطلوب قیر اصلاح شده با SBS تحقیقات زیادی بر روی قیر ترکیبی صورت گرفته است تا عملکردی برتر در روسازی را به دست آورد. در این مطالعه، مخلوط آسفالتی توسط نانوسیلیس، گیلسونایت و SBS تغییر یافته است. آزمایش‌های عملکرد اصلی قیر، آزمون‌های شیارشدگی، آزمون‌های خمش در دمای پایین، آزمایش‌های حساسیت به رطوبت، آزمایش‌های خستگی و آزمایش‌های دوام مخلوط آسفالتی اصلاح شده با SBS گیلسونایت، نانوسیلیس/گیلسونایت و نانوسیلیس/گیلسونایت/SBS انجام شد تا عملکرد سازه آنها ارزیابی شود. با مقایسه نتایج آزمایش‌های با خواص مخلوط آسفالتی اصلاح نشده، نانوسیلیس و گیلسونایت منجر به بهبود عملکرد سازه شدند. مخلوط آسفالتی تغییر یافته با نانوسیلیس/گیلسونایت/SBS دمای پایداری بالاتری، مقاومت در برابر ترک خوردگی در دمای پایین، حساسیت کمتر به رطوبت و دوام بیشتری نسبت به قیر اصلاح شده با ۵٪ SBS داشت.

واژه‌های کلیدی: قیر اصلاح شده، نانوسیلیس، خواص عملکردی، حساسیت رطوبتی، خواص مکانیکی، مخلوط آسفالتی

### ۱-مقدمه

با توجه به مشکلات فوق در قیر اصلاح شده با SBS، بسیاری از محققان تحقیقاتی را درباره قیر ترکیبی انجام دادند تا به دنبال یافتن تغییراتی با کارایی هزینه‌ای بیشتر باشند، مانند قیر حاوی گیلسونایت و نانومواد. دو و همکاران (Du, 2012) عملکرد مخلوط آسفالت ترکیبی با درصد کم SBS و گیلسونایت را ارزیابی کردند که می‌توانست خواص متناظر مخلوط آسفالت اصلاح شده با SBS را داشته باشد و نیازمندی‌ها را در تمام مناطق دما برآورده کند. تحقیقات هوآنگ و همکاران (Huang et al, 2015) مخلوط آسفالت اصلاح شده ترکیبی با استفاده از

با توجه به توسعه حمل و نقل، بارگذاری اضافی به شدت جدی تر شده‌اند. تعداد خرابی‌های روسازی جاده، از جمله شیارشدگی، چاله، تورم و ترک خوردگی، در حال افزایش است. انتخاب مواد در بهبود عملکرد روسازی جاده بسیار ضروری است. باینقر اصلاح شده با SBS دارای مزایای دمای بالا و پایین است و به تدریج به انتخاب اصلی در مهندسی در حال تبدیل می‌شود. در عین حال، دارای مشکلات هزینه اولیه بالا، فرایند تولید دشوار و پایداری ذخیره سازی نامطلوب نیز می‌باشد (Huang et al, 2009; Xiong et al, Yilmaz et al, )

همراه با گیلسونایت یا نانومواد را به تفصیل گزارش کرده بودند. با این حال، اطلاعات محدودی در مروری بر ادبیات وجود دارد که ویژگی‌های قیر اصلاح شده ترکیب‌نانوسیلیکا/گیلسونایت/پلیمر را توصیف کند. در مطالعات قبلی، چهار نانوماده انتخاب شد تا بهترین گزینه را برای تطابق با گیلسونایت و نانورس تشخیص داده شود. سپس تأثیر NS و گیلسونایت بر خواص رئولوژیکی قیر اصلاح شده مقایسه شد و درصد انتخابی ۱٪ NS و ۶٪ گیلسونایت تعیین شد. افزودنی‌های فوق هر دو تأثیر منفی کمی بر خواص دمایی پایین داشتند. هدف این مقاله بهبود عملکرد دمایی پایین قیر اصلاح شده با نانورس و گیلسونایت است. به قیر اصلاح شده ۱٪ نانورس، ۶٪ گیلسونایت ۱٪، ۲٪ و ۳٪ SBS اضافه شد.

## ۲- مواد و آماده سازی نمونه

### ۲-۱- مصالح سنگی و قیر

در این پژوهش از مصالح سنگی و فیلر آهکی استفاده شد. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده در جدول ۱ آمده است. قیر بکارگرفته شده در این پژوهش از نوع قیر خالص ۷۰-۶۰ بود که از شرکت نفت پاسارگاد تهیه شد و مشخصات فیزیکی آن در جدول ۲ آمده است. افزودنی به کاررفته نیز نانورس و گیلسونایت و پلیمر SBS می‌باشد که مشخصات آنها در جداول ۳ آورده شده است.

پودر لاستیک SBS/ و گیلسونایت را پیشنهاد کردند تا عمر خستگی بهتری نسبت به قیر اصلاح شده با SBS داشته باشد. علاوه بر این، کوک (kok et al, 2011) و یانگ (Yang et al, 2015) گیلسونیت و آسفالت دریاچه ترینیداد را به قیر اصلاح شده با SBS اضافه کردند که خواص دمایی بالای آن بهبود یافت. در خصوص تغییرات نانومواد، ترکیب مخلوط آسفالت اصلاح شده با نانومونتموریلونیت/لاتکس استایرن بیوتادین (SBR)<sup>۲</sup> و نانومونتموریلونیت/کوپلیمر استات اتیلن-وینیل توسط پولاکو (Sureshkumar et al, 2010) تهیه شده است تا عملکرد رئولوژیکی قیر را بهبود بخشند. مطالعه سانو همکاران (Sun et al, 2016) گزارش کرد که استفاده از نانوکربنات کلسیم در مخلوط آسفالت اصلاح شده با SBR امکان‌پذیر است. سان (Sun et al, 2017) خواص قیر اصلاح شده با ۵٪ SBS را با آسفالت ترکیبی تغییر یافته به وسیله ۵/۰٪ نانو سیلیکا<sup>۳</sup> + ۵٪ NS + ۱٪ SBR پلی اتیلن مقایسه کرد. قیر اصلاح شده پیشنهادی بهبود قابل ملاحظه‌ای در عملکرد دمایی بالا/پایین و مقاومت در برابر پیری داشت. مقاومت در برابر خرابی رطوبتی و پیری قیر اصلاح شده با استفاده از NS و SBS بر اساس نتایج تحقیقات یوسوف بهبود چشمگیری داشته است (Yosuf et al, 2014).

تحقیقات قبلی نتایج عملکرد قیر اصلاح شده با پلیمر

جدول ۱. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده

استاندارد آزمایش		حدود مجاز طبق نشریه ۲۳۴		نتایج آزمایش	شرح
ASTM	AASHTO	رویه	آستر		
-	T96	۳۰	۴۰	۲۲/۳	حداکثر سایش به روش لوس آنجلس (درصد)
-	-	۲۵	۳۰	۹	حداکثر ضریب تورق با روش BS812 (درصد)
D5821	-	۹۰	۸۰	۹۴	حداقل درصد شکستگی در دو وجه روی الک شماره ۴
-	T85	۲/۵	۲/۵	۲/۲	حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت دانه)
-	T84	۲/۵	۲/۸	۲/۴	حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)

جدول ۲. مشخصات فیزیکی قیر

نوع آزمایش	استاندارد	نتیجه آزمایش
نقطه نرمی	ASTM D36	۴۷ درجه سانتیگراد
درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه	ASTM D5	۶۷ دسی میلی متر
درجه اشتعال	ASTM D92	۳۰۴ درجه سانتی گراد
شکل پذیری در دمای ۲۵	ASTM D113	بیش از ۱۰۰ سانتی متر
چگالی	ASTM D70	۱/۰۴۵ گرم بر سانتی متر مکعب
افت حرارتی	ASTM D6	۰/۰۵ درصد
قابلیت حل	ASTM D4	۹۹/۵ درصد

جدول ۳. مشخصات فیزیکی نانورس

نوع آزمایش	مقادیر اندازه گیری شده
وزن مخصوص	۰/۰۴ گرم بر سانتی متر مکعب
شکل ظاهری	پودر سفید
درصد سیلیکا	٪ ۹۹/۸
متوسط اندازه دانه	۳۰ میلی متر
سطح مخصوص	۲۰۰ میلی متر مربع بر گرم

جدول ۴. مشخصات فیزیکی گلیسونایت

نوع آزمایش	مقادیر اندازه گیری شده
درصد قیر	٪ ۹۷/۶
درصد خاکستر	۰/۴۳
چگالی	۱/۱ گرم بر سانتی متر مکعب
دمای اشتعال	۲۶۰
افت وزنی در اثر حرارت	٪ ۰/۵۴۲
درصد رطوبت	٪ ۰/۳

جدول ۴. مشخصات فیزیکی SBS

نوع آزمایش	مقادیر اندازه گیری شده
شکل ظاهری	دانه ای
درصد خاکستر	۰/۲
درصد مواد فرار	٪ ۱/۱
سختی	۷۲
نسبت بوتادین به استایرن	۳۲/۶۸
وزن مخصوص	۹۷/۶ گرم بر سانتی متر مکعب

دارند. وقتی گیلسونایت و نانورس به قیر خالص اضافه می‌شود، بهبودی هم در نقطه نرمی و ویسکوزیته چرخشی رخ می‌دهد، با این حال، کاهش نفوذپذیری نشان می‌دهد که دو افزودنی سفتی و پایداری در دمای بالا آسفالت بهبود می‌بخشند. همچنین، ویژگی‌های مقاومت در برابر پیری نیز از نتایج آزمون<sup>۴</sup> RTFOT بهبود یافته‌اند. در عین حال، مقادیر خاصیت انگی در ۵ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابند که نشان‌دهنده تأثیرات منفی آنها بر قابلیت تغییر شکل در دمای پایین است. نسبت به قیر اصلاح شده با نانورس، قیر اصلاح شده با گیلسونایت و قیر اصلاح شده با گیلسونایت و نانورس، مقادیر بیشتری از نقطه نرمی، کشش، ویسکوزیته چرخشی و مقدار کمتری از نفوذپذیری دارد. اضافه کردن SBS باعث افزایش قابلیت تغییر شکل در دمای پایین و پایداری در دمای بالا می‌شود در نتیجه اصلاح قیر با SBS پارامترهای ویسکوالاستیک خطی قیر را در شرایط دمای مختلف بهبود می‌بخشد. از جدول ۶ همچنین مشاهده می‌شود که افزایش درصد SBS منجر به بهبود ویژگی‌های ضد پیرشدگی می‌گردد. تمامی سه افزودنی عملکرد ضد پیرشدگی قیر را به دلیل پخش مناسب نانورس در قیر و مولکول‌های قطبی گیلسونایت و خصوصیات ویسکوزیته SBS بهبود می‌بخشد.

به دلیل مساحت سطح ویژه بزرگ نانورس، دشوار است تا یک پراکندگی یکنواخت در قیر حاصل شود. بنابراین، عامل اتصال سیلان KH560 برای پوشش سطح استفاده شد. ابتدا، قیر خالص، نانورس، گیلسونایت و SBS در یک مخلوط‌کن گرم مخلوط شدند. سپس مخلوط کن دستی به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد حفظ شد و سپس تیغه با سرعت بالا (۵۰۰۰ دور در دقیقه) به مدت ۳۰ دقیقه ادامه یافت (Shi et al, 2018). تا زمانی که یک جرم یکنواخت به دست آمد، مخلوط کردن متوقف شد و به مدت ۲ ساعت ادامه یافت.

نتایج آزمایشی مربوط به مروری بر ادبیات (Shi et al, 2018) نشان داد که قیر اصلاح شده ترکیبی عملکرد قابل قبولی در دمای بالا دارد و در دمای پایین به آسانی ترک می‌خورد. علاوه بر این، ۱٪ نانورس و ۶٪ گیلسونایت به عنوان درصد انتخابی تعیین شد. هدف این مطالعه بررسی عملکرد روسازی جاده از مخلوط آسفالت پیشنهادی بود. برای بهبود مقاومت در برابر ترک خوردگی آن، به قیر اصلاح شده ترکیبی ۱٪، ۲٪ و ۳٪ SBS به قیر ترکیبی نانورس/گیلسونایت اضافه شد. از جدول ۶ مشخص است که قیر خالص بیشترین درجه نفوذ را دارد، در حالی که نقطه نرمی و ویسکوزیته چرخشی آن کمترین مقدار را

جدول ۶. پارامترهای قیر

شکل پذیر	درصد کاهش نسبت درجه نرمی	شکل پذیر	ویسکوزیته	درجه نفوذ	نقطه نرمی	نمونه قیر
۹.۲	۶۵	۲۰	۰.۵۱۵	۶۸	۶۰	قیر خالص
۲۱	۸۱	۳۹	۲.۴۸۶	۶۰	۷۳	قیر حاوی SBS
۶.۴	۷۳	۱۳	۰.۷۳۶	۶۶	۶۲	قیر حاوی ۱٪ نانورس
۴.۵	۷۶	۹	۰.۹۱۶	۶۲.۲	۶۵	قیر حاوی ۶٪ گیلسونایت
۵.۶	۷۷	۱۱	۱.۰۵	۶۱	۶۶	قیر حاوی ۱٪ نانورس+۶٪ گیلسوناست
۱۰	۸۰	۱۸	۱.۵۴۹	۵۹	۷۳	قیر حاوی ۱٪ نانورس+۶٪ گیلسوناست+۱٪ SBS
۱۴	۸۳	۲۵	۱.۸۰۵	۵۶	۷۶	قیر حاوی ۱٪ نانورس+۶٪ گیلسوناست+۲٪ SBS
۱۹	۸۸	۳۳	۲.۳۱۸	۵۲	۷۹	قیر حاوی ۱٪ نانورس+۶٪ گیلسوناست+۳٪ SBS

نمونه‌های مارشال برای هشت نوع مخلوط طرح اختلاط متراکم حداکثر نظری، درصد هوا (VA)°، فضای خالی مصالح سنگی شدند. حد وسط دانه‌بندی شماره ۴ انتخاب گردید. (جدول ۷) (VMA)<sup>۶</sup> و فضای خالی پر شده با قیر (VFA)<sup>۷</sup> از نمونه‌های جدول ۸ نتایج محاسبه شده درصد بهینه قیر، چگالی مخصوص متراکم شده نهایی را ارائه می‌دهد.

جدول ۷. دانه‌بندی مصالح سنگی

اندازه الک	بازه دانه بندی	حد وسط دانه بندی
19	100	100
16	90-100	95
13.2	76-92	84
9.5	60-80	70
4.75	34-62	48
2.36	20-48	34
1.18	13-36	25
0.6	26 - 9	17.5
0.3	18 - 7	12.5
0.15	14 - 4	9.5
0.075	4, 8	6

جدول ۸. خصوصیات مخلوط متراکم

نوع مخلوط	درصد قیر بهینه	وزن مخصوص حقیقی	VA %	VMA%	VFA%
قیر خالص	4.52	2.661	4.03	14.5	70
قیر حاوی SBS	4.71	2.676	4.12	14.6	73.6
قیر حاوی ۱٪ نانورس	4.52	2.648	3.97	14.3	71.7
قیر حاوی ۶٪ گیلسونایت	4.29	2.671	3.95	14.6	72.4
قیر حاوی ۱٪ نانورس+۶٪ گیلسوناست	4.43	2.665	4.05	14.2	71.3
قیر حاوی ۱٪ نانورس+۶٪ گیلسوناست+۱٪ SBS	4.57	2.643	4.09	14.6	71.3
قیر حاوی ۱٪ نانورس+۶٪ گیلسوناست+۲٪ SBS	4.57	2.662	4.04	15.1	73.2
قیر حاوی ۱٪ نانورس+۶٪ گیلسوناست+۳٪ SBS	4.74	2.673	3.98	14.9	71.9

### ۳-روش کار آزمایش

#### ۳-۱-آزمایش تیر خمشی دمای پایین

ویژگی‌های دمای پایین مخلوط پیشنهادی در ۱۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب شد. تیر با شکل هندسی ۲۵۰ میلی‌متر در ۳۰ میلی‌متر در ۳۵ میلی‌متر بارگذاری با سرعت ۵۰ میلی‌متر در دقیقه انجام شد. بار بالشتک PB و انحنای بخش میانی تیر (d) اندازه‌گیری شد.

برای ارزیابی عملکرد در دماهای پایین مخلوط آسفالت، تعداد زیادی آزمایش وجود دارد، مانند آزمون تیر خمشی، آزمون خزش خمشی، آزمون کشش غیرمستقیم و آزمون انقباض. بر اساس تجهیزات موجود در آزمایشگاه، آزمون خمش تیری (برای برآورد

مقاومت خمشی RB و کرنش خمشی eB برای مقایسه ویژگی‌های دمای پایین بین آسفالت‌های مختلف محاسبه شد.

### ۳-۴-آزمایش تیر خستگی چهار نقطه ای

مقاومت خستگی تیرها براساس آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای براساس آیین نامه AASHTO T321-07 ارزیابی شده است. هدف از این آزمایش تعیین عمر خستگی تیرها در سطوح کرنش مختلف می‌باشد. آزمایش خستگی می‌تواند هم در شرایط تنش ثابت و کرنش ثابت انجام شود. در حالت تنش ثابت، شکست نمونه بلافاصله بعد از شروع ترک تعریف می‌شود. در حالت کرنش ثابت، شکست نمونه زمانی که مدول سختی آن به نصف مدول اولیه آن می‌رسد، تعریف می‌گردد. این معیار براساس آیین نامه AASHTO-T321 استفاده شده است. تمامی نمونه‌ها در سطح کرنش ثابت ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ میکرو استرین با بارگذاری سینوسی مورد آزمایش قرار گرفته اند. آزمایش در دمای ثابت ۲۰ درجه سانتیگراد انجام شده است. نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت قبل از آزمایش در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد قرار گرفته‌اند تا به دمای مذکور برسند. فرکانس بارگذاری ۱۰ هرتز می‌باشد. مدول سختی براساس نیرو و جابه جایی اندازه‌گیری شده بعد از ۵۰ سیکل براساس معادلات زیر محاسبه شده است.

$$\varepsilon = \frac{12\delta h \times 10^6}{3(G_0^2 - 4G_1^2)} \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{G_0 P}{Bh^2} \quad (6)$$

$$S = \frac{1000\sigma}{\varepsilon} \quad (7)$$

P حداکثر نیرو (کیلو نیوتن)، B میانگین عرض تیر (میلی‌متر)، S مدول سختی تیر (مگاپاسکال). آزمایش خستگی تا زمانی که مدول سختی به نصف مقدار اولیه خود برسد، ادامه می‌یابد.

### ۳-۲-آزمایش حساسیت رطوبتی

این آزمایش براساس استاندارد AASHTO-T283 انجام می‌گیرد. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها بر طبق این استاندارد در شرایط اشباع و غیر اشباع باید بیش از ۰/۷۵ باشد. برای اشباع شدن، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب ۶۰ درجه قرار گرفتند.

### ۳-۳-شیار جای چرخ

این آزمایش توسط دستگاه شیار جای چرخ موجود در آزمایشگاه قیر و آسفالت دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شد. برای هر نوع مخلوط سه نمونه مارشال در دستگاه قرار می‌گیرد و توسط دو چرخ که حول مرکزشان دوران می‌کنند با فشار حدود ۱۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع مورد بارگذاری فرار می‌گیرند. فرکانس بارگذاری برای هر نمونه ۱ هرتز و دمای آزمایش ۵۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. در مجموع نمونه‌ها تحت ۸۰۰ سیکل بارگذاری قرار گرفتند و پس از آن ماکزیمم عمق شیار بوجود آمده در هر نمونه اندازه گیری و میانگین سه نمونه

که حداکثر کرنش اعمال شده بر تیر، تغییر شکل ماکزیمم در وسط تیر (میلی‌متر)، طول خارجی گیج (۳۵۵/۵ میلی‌متر)، طول داخلی گیج (۱۱۸/۵ میلی‌متر)، حداکثر تنش کششی (کیلوپاسکال)، بعد از آزمایش عمر خستگی تیرها، عمر خستگی مخلوط با معادله ۸ محاسبه گردیده است.

$$N_f = a\varepsilon^{-b} \quad (8)$$

## ۴-تحلیل نتایج آزمایشات

### ۴-۱-نتایج عمق شیار جای چرخ

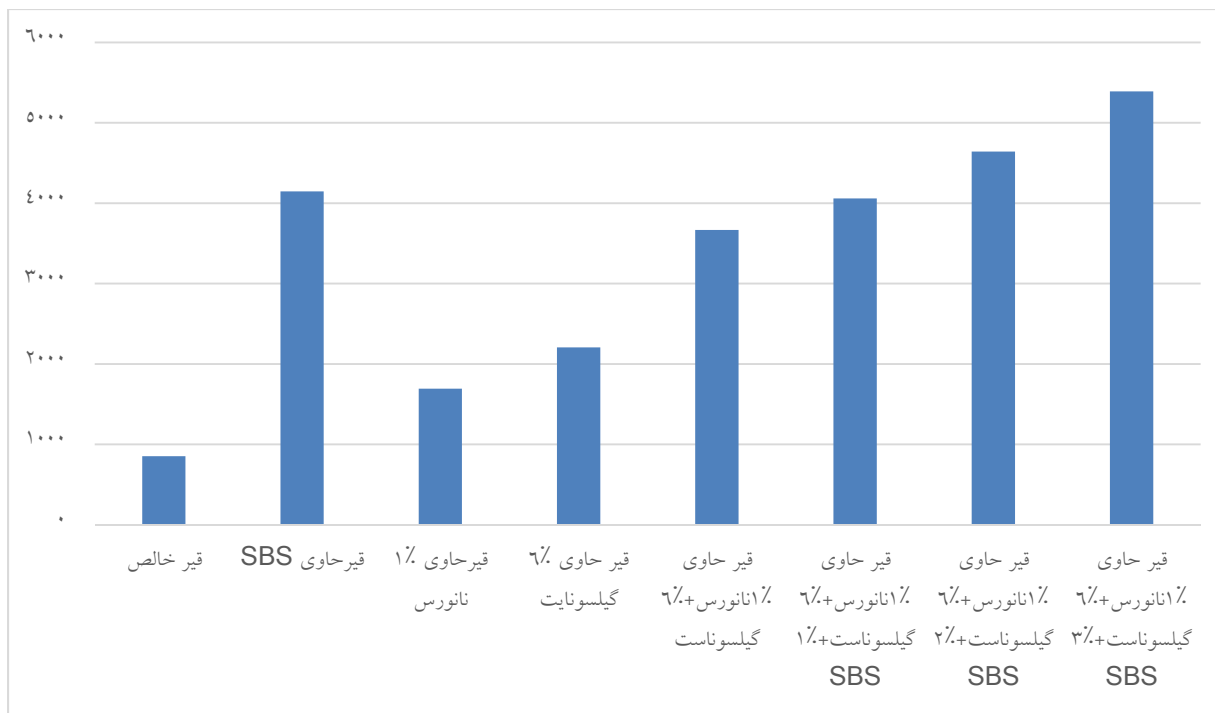
پایداری مخلوط آسفالت در دمای بالا تقویت می شود. همچنین از شکل ۱ و شکل ۲ مشخص است که خواص در دمای بالای مخلوط آسفالت حاوی ۱٪ نانورس و ۶٪ گیلسونایت و همچنین مخلوط ۱٪ نانورس و ۶٪ گیلسونایت و ۱٪ SBS کمی بدتر از مخلوط آسفالت SBS هستند. اما آسفالت اصلاح شده ترکیبی با ۱٪ ۶٪ گیلسونایت SBS 2% پایداری دینامیکی بیشتر و تغییرشکل کلی کمتری نسبت به آسفالت اصلاح شده با SBS دارد. با افزایش غلظت SBS، مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی در دمای بالا به طور مداوم بهبود می یابد.

شکل ۱ و شکل ۲ تغییرات مقاومت دینامیکی و تغییرشکل کلی مخلوط آسفالت را نشان می دهند. اضافه کردن نانورس، گیلسونایت و SBS باعث افزایش پایداری دینامیکی و کاهش تغییرشکل کلی می شود. گیلسونایت جزئی سبک قیر را جذب کرده و قیر را از نوع ژل قابل حل به نوع ژل تغییر می دهد. علاوه بر این، گیلسونایت لزوماً ویسکوزیته قیر را افزایش داده و مطابقت خوبی با قیر خالص دارد، توانایی تهیه مخلوط یکنواخت را دارد. نانورس به عنوان یک پرکننده کوچک تر عمل کرده و چسبندگی بین قیر و سنگدانه را بهبود می بخشد. بنابراین، خواص

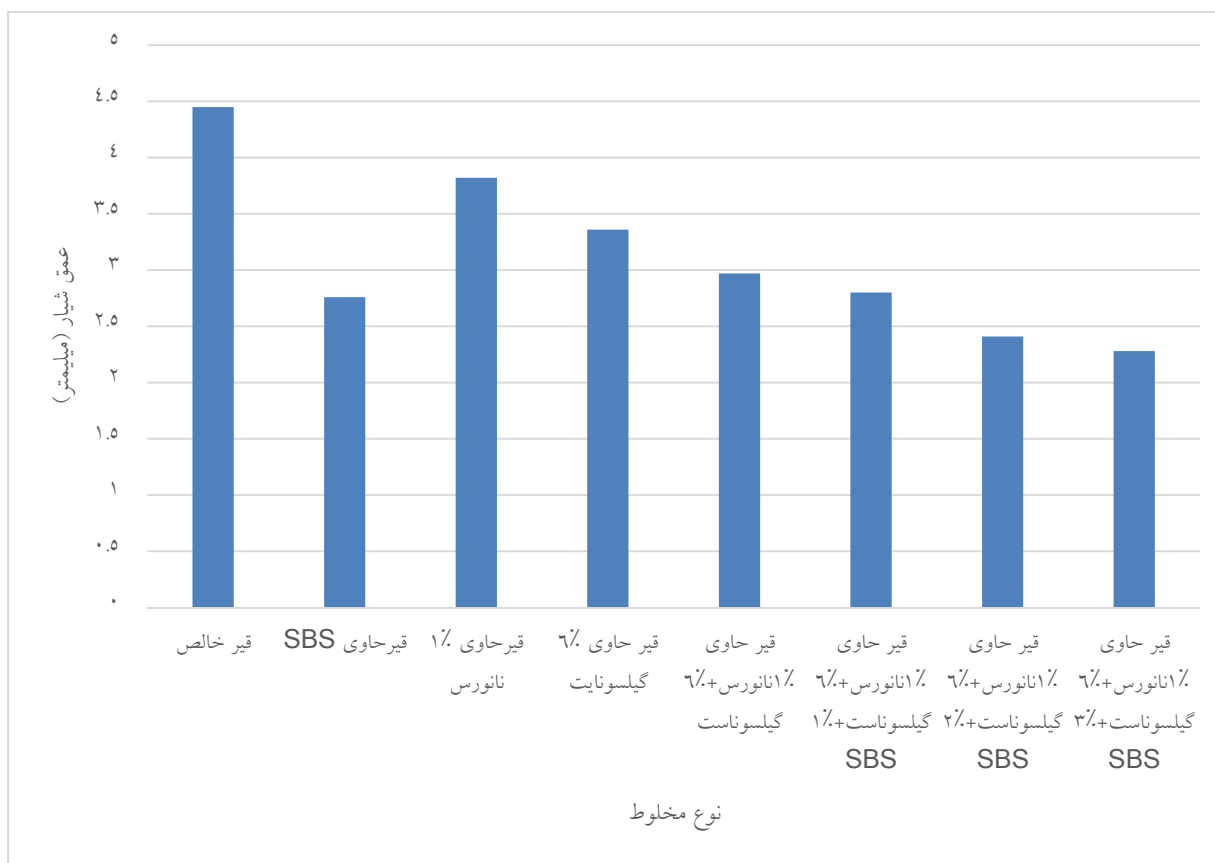
### ۴-۲-نتایج آزمایش تیرخمش دمای پایین

بهبود می یابد. باید توجه داشت که آسفالت اصلاح شده حاوی ۱٪ نانورس و ۶٪ گیلسونایت و ۲٪ SBS مقاومت کششی خمشی و کرنش خمشی بیشتری نسبت به آسفالت اصلاح شده با ۵٪ SBS دارد. با افزایش درصد SBS، عملکرد در دمای پایین بهبود می یابد، همانطور که نتایج شکل پذیری در دمای ۵ درجه سانتیگراد نشان می دهد. با این حال، آسفالت اصلاح شده با SBS شکل پذیری بیشتری نسبت به آسفالت ترکیبی دارد. دلیل آن این است که نانورس و گیلسونایت شامل ذراتی هستند که می توانند در فرآیند کشش تمرکز تنش ایجاد کنند.

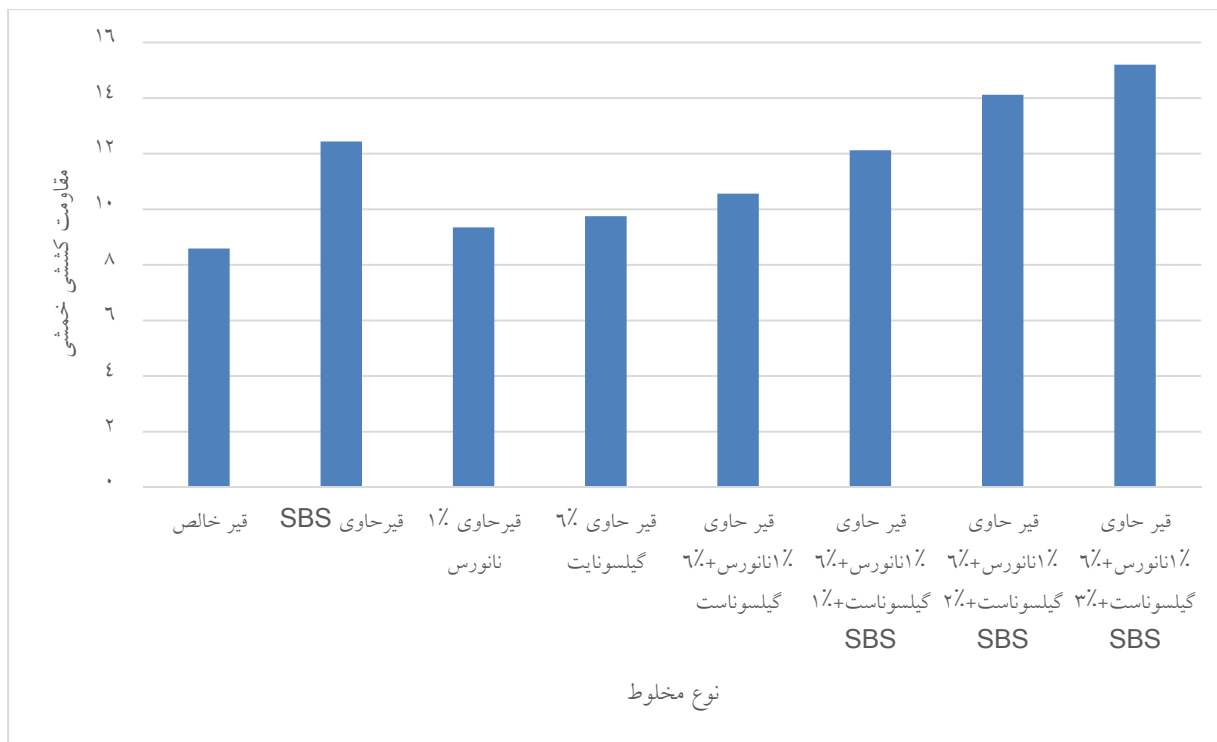
همانطور که در شکل ۳ و ۴ مشاهده می شود، مخلوط آسفالت اصلاح نشده کمترین مقاومت کششی خمشی و کرنش خمشی را دارد، در حالی که مخلوط آسفالت حاوی ۱٪ نانورس و ۶٪ گیلسونایت و ۳٪ SBS بیشترین مقدار را دارد. هنگامی که گیلسونایت و نانورس به آسفالت اضافه می شوند، چسبندگی با سنگدانه ها افزایش می یابد. نیروی چسبندگی و مقاومت کششی خمشی افزایش می یابد. علاوه بر این، نارس در فضای مخلوط پراکنده شده و یک سیستم ساختاری پایدارتر برقرار می کند، عملکرد کمترین پرکننده برای افزودن مقدار آسفالت چارچوبی را دارد. بنابراین، توانایی مقاومت در برابر تغییر شکل در دمای پایین



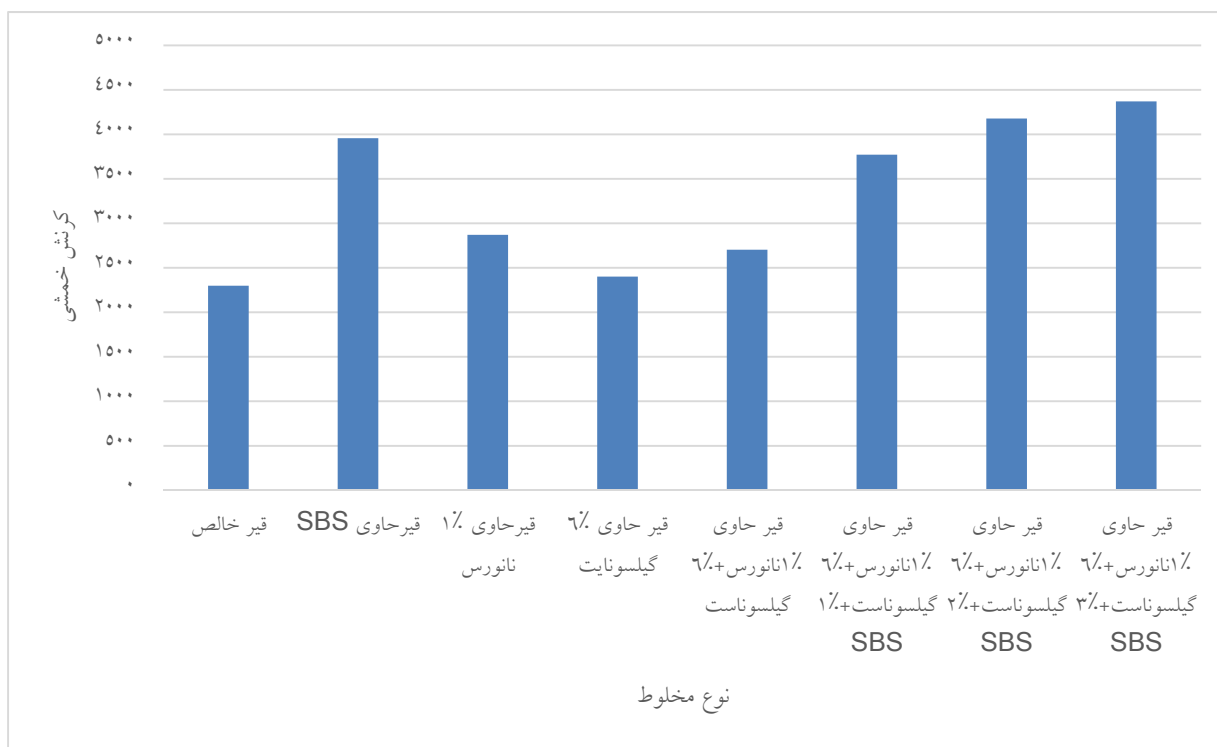
شکل ۱. پایداری دینامیکی نمونه‌های مختلف



شکل ۲. عمق شیار نمونه‌ها



شکل ۳. نتایج مقاومت کششی خمشی

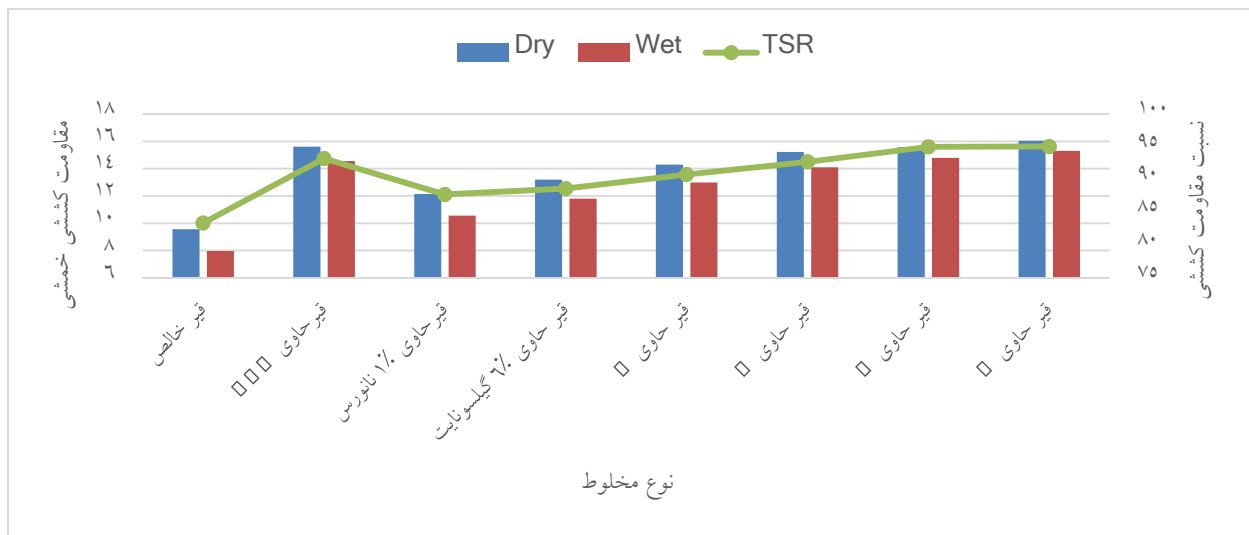


شکل ۴. کرنش خمشی نمونه‌ها

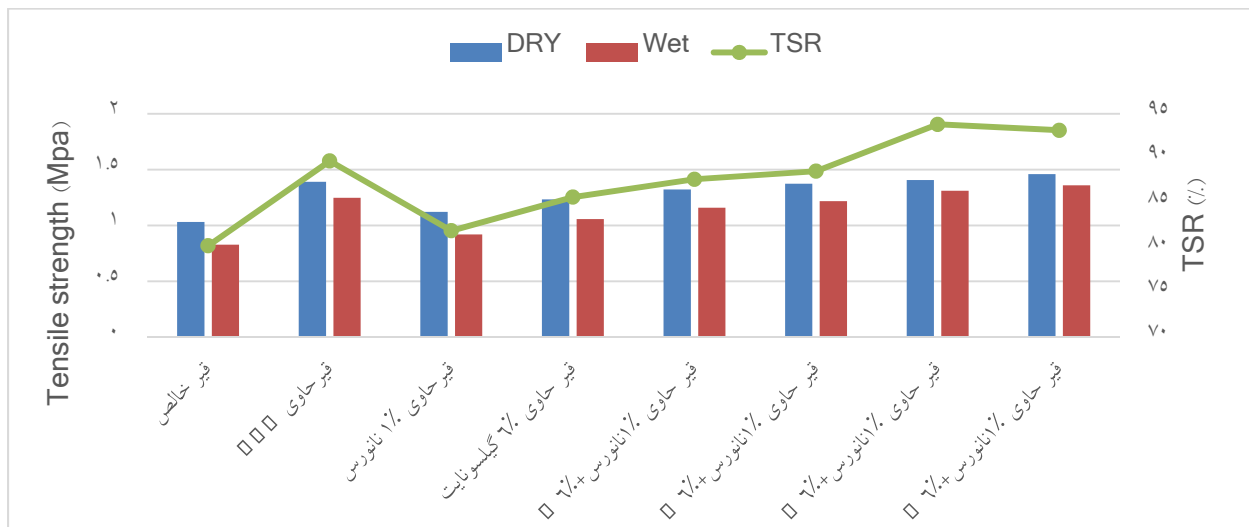
### ۳-۴- نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی

به شدت کاهش می‌یابد. همچنین از شکل‌های ۵ و ۶ مشخص است که مخلوط آسفالت اصلاح شده حاوی نانورس و گیلسونایت که به ترتیب شامل ۲٪ و ۳٪ SBS هستند، مقاومت کششی بالاتر و نسبت مقاومت کششی بالاتری نسبت به مخلوط آسفالت اصلاح شده با ۵٪ SBS دارند. این مقادیر همگی نزدیک به ۹۵٪ هستند که نشان دهنده مقاومت بالاتر در برابر حساسیت رطوبتی است.

شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهند که مقاومت در برابر رطوبت - مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانورس و گیلسونایت و پلیمر همگی بالاتر از مخلوط آسفالت اصلاح نشده است. نانورس دارای اندازه ذرات کوچک و مساحت سطحی ویژه بزرگ است که می‌تواند قیر آزاد بیشتری را جذب کند و مقدار قیر سازه‌ای را افزایش دهد. با همکاری با گروه عاملی قطبی در گیلسونایت، حساسیت به رطوبت در مخلوط آسفالت ترکیبی اصلاح شده



شکل ۵. نتایج آزمون غوطه‌وری مارشال



شکل ۶. نتایج مقاومت کششی نمونه‌ها

#### ۴-۴- نتایج عملکرد خستگی

و ۲٪ SBS، مخلوط آسفالت حاوی نانورس و گیلسونایت و ۳٪ به ترتیب به مقدار ۰.۹۷٪، ۱.۳۶٪، ۲.۲۵٪، ۲.۹۸٪، ۳.۷۶٪ و ۴.۲۶٪ افزایش یافته است. در گیلسونایت، گروه‌های عملکردی قطبی زیادی وجود دارند، مانند گروه هیدروکسیل و گروه کربوکسیل، که می‌توانند نیروی اتصال را با سنگدانه‌ها به شدت افزایش دهند. نانورس به عنوان پرکننده کوچک عمل می‌کند و همچنین مقاومت چسبندگی با سنگدانه‌ها را بهبود می‌بخشد. تمامی عوامل فوق عملکرد خستگی مخلوط را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، مخلوط آسفالت حاوی گیلسونایت و نانورس و ۲٪ SBS تقریباً با مقدار عمر خستگی مخلوط آسفالت اصلاح شده با ۵٪ SBS برابر است. خواص خستگی به طور پیوسته با افزایش SBS افزایش می‌یابد.

تغییرات عملکرد خستگی در جدول ۹ نشان شده است. با تحلیل داده‌ها در جدول ۹، مشخص شد که مخلوط آسفالت حاوی نانورس و گیلسونایت و ۳٪ SBS دارای بیشترین عمر خستگی است و بعد از آن مخلوط آسفالت اصلاح شده با SBS، مخلوط آسفالت حاوی نانورس و گیلسونایت و ۲٪ SBS، مخلوط آسفالت حاوی نانورس و گیلسونایت و ۱٪ SBS، مخلوط آسفالت حاوی نانورس و گیلسونایت، مخلوط آسفالت حاوی گیلسونایت، مخلوط آسفالت حاوی نانورس، در حالی که مخلوط آسفالت اصلاح نشده دارای کمترین عمر خستگی است. در مقایسه با مخلوط آسفالت اصلاح نشده، عمر خستگی مخلوط آسفالت حاوی نانورس، مخلوط آسفالت حاوی گیلسونایت، حاوی نانورس و گیلسونایت، مخلوط آسفالت نانورس و گیلسونایت و ۱٪، مخلوط آسفالت حاوی نانورس و گیلسونایت

جدول ۹. نتایج عمر خستگی نمونه‌ها

عمر خستگی	مدول اولیه	درصد قیر	نمونه
۲۷۳۷۰	۴۰۲۱	۴,۵	قیر خالص
۱۴۰۲۴۵	۴۹۶۹	۴,۷	قیر حاوی SBS
۵۳۳۹۰	۴۶۰۴	۴,۵	قیر حاوی ۱٪ نانورس
۶۴۵۷۰	۵۰۷۶	۴,۲	قیر حاوی ۶٪ گیلسونایت
۸۹۰۲۰	۵۲۳۰	۴,۴	قیر حاوی ۱٪ نانورس + ۶٪ گیلسوناست
۱۰۸۹۴۰	۵۳۹۱	۴,۵	قیر حاوی ۱٪ نانورس + ۶٪ گیلسوناست + ۱٪ SBS
۱۳۹۲۸۵	۵۵۴۸	۴,۵	قیر حاوی ۱٪ نانورس + ۶٪ گیلسوناست + ۲٪ SBS
۱۴۵۹۷۵	۵۷۹۲	۴,۷	قیر حاوی ۱٪ نانورس + ۶٪ گیلسوناست + ۳٪ SBS

#### ۵- نتیجه گیری

انعطاف پذیری و ویسکوزیته دورانی است. - افزودن SBS امکان تغییر شکل، حساسیت دمایی و خصوصیات ضد پیری قیر اصلاح شده را افزایش می‌دهد. بر اساس نتایج آزمایش شیارشده‌گی، تمامی سه ماده اصلاحی نانورس، گیلسونایت و SBS می‌توانند مقاومت در برابر شیارشده‌گی مخلوط آسفالت را افزایش دهند. جالب است که

در این مطالعه، عملکرد روسازی مخلوط آسفالت ترکیبی اصلاح شده (اصلاح شده با نانورس، گیلسونایت و SBS بررسی شد. نتیجه گیری‌های زیر از مقایسه پژوهش قابل استنباط است: - نتایج آزمایش عملکردی قیر نشان می‌دهد که نانورس/گیلسونایت/پلیمر دارای مقادیر بالاتری از نقطه نرمی،

در برابر ترک خوردگی در دمای پایین و پایداری در برابر آب نسبت به مخلوط آسفالت اصلاح شده با ۵٪ SBS نشان می‌دهد. افزودن نانورس، گلیسونایت و SBS همگی می‌توانند عملکرد خستگی مخلوط آسفالت را بهبود بخشند. مخلوط حاوی نانورس/گلیسونایت و ۳٪ SBS بهترین عمر خستگی را نشان می‌دهد و بعد از آن مخلوط آسفالت اصلاح شده با ۲٪ SBS و ۱٪ SBS و مخلوط آسفالت اصلاح نشده قرار می‌گیرند. پراکنندگی یکنواخت نانورس، گروه عملکردی قطبی گلیسونایت و خصوصیات ویسکوزیته SBS مقاومت در برابر پیری مخلوط آسفالت را بهبود می‌بخشند.

مخلوط نانورس، گلیسونایت و ۲٪ SBS ۳٪ SBS دارای پایداری دینامیکی بیشتر و کاهش تغییر شکل کلی بیشتری نسبت به مخلوط آسفالت اصلاح شده با ۵٪ SBS هستند. مخلوط آسفالت ترکیبی اصلاح شده عملکرد دمای بالا قابل قبول تری نسبت به مخلوط آسفالت اصلاح شده با SBS دارد. از نتیجه آزمایش تیر خمشی و آزمایش حساسیت به رطوبت، مخلوط دارای نانورس/گلیسونایت و ۳٪ SBS دارای بیشترین مقاومت کششی انعطافی، کرنش انعطافی، پایداری و نسبت مقاومت کششی است، در حالی که مخلوط آسفالت اصلاح نشده دارای کمترین مقدار است. هنگامی که میزان استفاده از SBS بیشتر از ۲٪ است، مخلوط آسفالت ترکیبی اصلاح شده مقاومت بالاتری

## ۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Styrene-Butadiene-Styrene
- 2- Styrene Butadiene Rubber
- 3- Nano Silica
- 4- Rolling Thin-Film Oven
- 5- Air Void
- 6- Voids In Mineral Aggregate
- 7- Voids Filled With Asphalt

## ۷- مراجع

CaCO<sub>3</sub>/SBS modified asphalt mixture, *Mater. Rev.* 30 (4), 122–126.

-Sun, L., X.T. Xin, J.L. Ren, (2017). Asphalt modification using nano-materials and polymers composite considering high and low temperature performance, *Constr. Build. Mater.* 133, 358–366.

-Xiong, P., P.W. Hao, C.M. Gao, (2005), Pavement performance of SBS modified asphalt, *J. Chang'an Univ. (Nat. Sci. Ed.)* 25 (1), 10–19.

-Yang, K., D. Liu, (2015). Research on Performance of Trinidad Lake Asphalt Added with SBS-modified Asphalt Mixture, *J. Highway Trans. Res. Dev.* 33 (7) 28–32.

-Yusoff, N.I.M., A.A.S. Breem, H.N.M. Alattug, A. Hamim, J. Ahmad, (2017). The effects of moisture susceptibility and ageing conditions on nano-silica/polymer modified asphalt mixtures, *Constr. Build. Mater.* 72, 139–147.

-Yilmaz, M., M.E. (2013). Çelog lu, Effects of SBS and different natural asphalts on the properties of bituminous binders and mixtures, *Constr. Build. Mater.* 44, 533–540.

-Du, S.W., (2012). Performance and mechanism of BRA-SBS polymer composite modified asphalt mixture, *J. Build. Mater.* 15 (6), 871–874.

-Huang, W.D., M. Zheng, M. Huang, (2015). Fatigue performance comparison of various kind of asphalt mixture, *J. Build. Mater.* 18 (6), 1089–1094.

-Huang, W.R., (2009), Experimental study on pavement performance of nanometer layered silicate modified asphalt, *J. Chongqing Jiaotong Univ.* 28 (2) 231–235.

-Kök, B.V., M. Yilmaz, M. Guler, (2011). Evaluation of high temperature performance of SBS + Gilsonite modified binder, *Fuel* 90, 3093–3099.

-Polacco, G., P. Kriz, S. Filippi, L. Zanzotto, (2008). Rheological Properties of Asphalt/SBS/ Clay Blends, *Eur. Polymer J.* 44 (11), 3512–3521.

-Sureshkumar, M.S., S. Filippi, G. Polacco, I. Kazatchkov, J. Stastna, L. Zanzotto, (2010), Internal structure and linear viscoelastic properties of eva/asphalt nano composites, *Eur. Polymer J.* 46 (4), 621–633.

-Sun, P., S. Han, H.L. Zhang, Z.Y. Wang, O.M. Xu, (2016). High-temperature performance of nano-

# Laboratory Evaluation of the Effect of SBS Polymer on the Performance Properties of Bitumen and Asphalt Mixture Containing Nano Silica and Gilsonite

*Hamin Chobdar, Department of Civil Engineering, Malard Branch,  
Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Amin Farajollahi, Department of Civil Engineering, Malard Branch,  
Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Alireza Ameli, Department of Civil Engineering, Malard Branch,  
Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*E-mail: ameli@gmail.com*

Received: June 2023- Accepted: November 2023

## **ABSTRACT**

Due to the problems of high cost, difficult processing and unfavorable storage stability of bitumen modified with 1SBS, a lot of research has been done on composite bitumen to achieve superior pavement performance. In this study, the asphalt mixture was modified by nanosilica, gilsonite and SBS. Asphalt binder main performance tests, rutting tests, low temperature bending tests, moisture sensitivity tests, fatigue tests, and durability tests of asphalt mixture modified with SBS, gilsonite, nanosilica/rock asphalt, and nanosilica/gilsonite/SBS were conducted to determine the performance. Their structure should be evaluated. By comparing the results of the tests with the properties of the unmodified asphalt mixture, nano-silica and stone asphalt led to the improvement of the structure performance. The modified asphalt mixture with nanosilica/gilsonite/SBS had higher stability temperature, low temperature cracking resistance, lower moisture sensitivity, and longer durability than asphalt binder modified with 5% SBS, except for similar fatigue life.

**Keywords:** Modified Asphalt Binder, Nano Silica, Performance Characteristics, Moisture Susceptibility, Mechanical Properties, Asphalt Mixture