

# بررسی عملکرد مخلوط آسفالتی اصلاح شده با الیاف دوستدار محیط زیست به عنوان یک ماده روسازی پایدار

## مقاله علمی - پژوهشی

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

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

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵

صفحه ۲۵۶-۲۴۳

### چکیده

این تحقیق جهت ارزیابی عملکرد مخلوط آسفالتی اصلاح شده با فیبر سولفات کلسیم دوستدار محیط زیست<sup>۱</sup> (CSWF) به عنوان یک ماده روسازی پایدار انجام شد. مخلوط آسفالت حاوی ۰.۲ وزنی، ۰.۴ وزنی، ۰.۶ درصد وزنی و ۰.۸ درصد وزنی CSWF با روش مارشال طراحی شد. مخلوط‌های آسفالتی بدون الیاف نیز به عنوان نمونه شاهد تهیه شد. تست مارشال، تست شیار جای چرخ، تست خمش در دمای پایین، تست حساسیت رطوبتی و تست خستگی برای ارزیابی عملکرد مخلوط آسفالت CSWF انجام شد و مکانیسم تقویت فیبر مورد بحث قرار گرفت. نتایج نشان داد که CSWF می‌تواند پایداری در دمای بالا و مقاومت در برابر ترک در دمای پایین مخلوط آسفالت را بهبود بخشد. مقاومت در برابر رطوبت مخلوط‌های آسفالتی در حضور CSWF نیز بهبود یافت. هنگامی که درصد CSWF ۰.۴ درصد وزنی کل مخلوط بود، عملکرد مخلوط آسفالت بهترین است. در مقایسه با مخلوط آسفالت معمولی، مخلوط آسفالت CSWF نه تنها از ضایعات نیروگاهی به طور موثر برای حفظ اکوسیستم‌ها استفاده کرد، بلکه عملکرد روسازی را نیز بهبود بخشید، که پیشنهاد می‌شود در ساخت و ساز و بازسازی روسازی پایدار استفاده شود.

کلمات کلیدی: الیاف، مخلوط آسفالتی، دوستدار محیط زیست، عملکرد، خستگی، قیر اصلاح شده

### ۱- مقدمه

و مواد شیمیایی، روسازی آسفالت به طور قابل توجهی شروع به خراب شدن می‌کند و پس از سه تا پنج سال خدمت نیاز به بازسازی دارد (Sun et al, 2018). بازسازی مکرر روسازی باعث تخریب محیط زیست نیز می‌شود. از این رو ساخت روسازی‌های پایدار ضروری است. طبق تعریف اداره بزرگراه فدرال (FHWA)<sup>۲</sup>، روسازی پایدار باید سه شرط را برآورده کند: رعایت استانداردهای عملکرد، استفاده مؤثر از منابع، و حفظ اکوسیستم (Anh et al, 2013). تعداد زیادی از مطالعات نشان

روسازی نقش بسزایی در شبکه حمل و نقل و توسعه اقتصادی و اجتماعی کشور دارد. در حال حاضر حدود میلیاردها کیلومتر روسازی در جهان وجود دارد. این روسازی‌ها سبب افزایش بهره‌وری اجتماعی و بهبود کیفیت زندگی مردم می‌شود. با این حال، ساخت و ساز روسازی و بازسازی، تعداد زیادی از مواد حاصل از منابع طبیعی تجدید ناپذیر را مصرف می‌کند که باعث تخریب محیط زیست می‌شود. در همین حال، به دلیل اثرات ترکیبی بارهای ترافیکی مکرر و تأثیرات محیطی مانند باران، نور خورشید

داده‌اند که افزودن الیاف دوستدار محیط زیست روشی موثر برای حفظ اکوسیستم‌ها و بهبود عملکرد طولانی مدت روسازی‌ها است (Tayfur et al, 2007). علاوه بر این، برخی از مطالعات نشان داده‌اند که فناوری‌های سبز نویدبخش توسعه روسازی‌های پایدارتر هستند. گوان و همکاران دریافتند که ترکیب ۰٫۴ درصد وزنی فیبر بروسیت تولید شده از باطله بروسیت می‌تواند به طور موثری استحکام و چقرمگی مخلوط آسفالت اصلاح شده با الیاف را بهبود بخشد (Guan et al, 2014). نسنگیوموا و همکاران دریافتند که افزودن فیبر پوسته ذرت نه تنها می‌تواند مقاومت به ترک خوردگی HMA<sup>۳</sup> را افزایش دهد، بلکه مقاومت ترک خوردگی آسفالت مخلوط سرد (CMA)<sup>۴</sup> را نیز بهبود می‌بخشد (Nsengiyumva et al, 2018). استمپیهار و همکاران دریافتند که بتن آسفالت اصلاح شده با الیاف می‌تواند به عنوان یک ماده روسازی پایدار برای فرودگاه‌ها استفاده شود (Stempihar et al, 2012).

به عنوان یک نوع جدید از الیاف دوستدار محیط زیست، الیاف سیبیل سولفات کلسیم از گچ گوگرد زدایی شده با گاز دودکش ساخته می‌شود که محصول جانبی تولید شده توسط گوگردزدایی گاز دودکش مرطوب سنگ آهک-گچ در نیروگاه‌های حرارتی است CSWF. به طور گسترده‌ای به عنوان یک ماده اصلاح شده استفاده می‌شود و همچنین معمولاً برای اصلاح سطح، مواد پلیمری، فناوری کاغذسازی، مواد اصطکاک و سایر جنبه‌ها استفاده می‌شود. یانگ و همکاران خواص مکانیکی ابروزل خاک رس را با درصد CSWF ارزیابی کرد، و کامپوزیت CSWF/aerogel خاک رس به طور موثر ساختار "لانه زنبوری" متراکم را تشکیل می‌دهد، مدول را افزایش می‌دهد و در نتیجه منجر به استحکام مکانیکی بالای مواد کامپوزیت می‌شود (Yang et al, 2018). وانگ و همکاران تاثیر CSWF بر اثر تقویت شده در کامپوزیت‌های لاستیک سیلیکونی را ارزیابی کرد و به این نتیجه رسید که CSWF برای توسعه استحکام کششی و ازدیاد طول کامپوزیت‌های لاستیک سیلیکونی CSWF/ولکانیزه شده در دمای اتاق مفید است (Wang et al, 2011). زینگ و همکاران اثر و مکانیسم سیبیل کربنات کلسیم را بر روی بایندر آسفالت مطالعه کرد و دریافت که افزودن ویسکر کربنات کلسیم می‌تواند نقطه نرم شدن آسفالت را بهبود بخشد و نفوذ و شکل

پذیری آن را کاهش دهد (Xing et al, 2019). از این تحقیقات، مشخص شد که به دلیل استحکام بالا، سطح ویژه بزرگ و مقاومت در برابر دمای بالا، CSWF می‌تواند عملکرد ماده ماتریس را به طور موثر بهبود بخشد. عملکرد مخلوط آسفالت ممکن است با افزودن CSWF بهبود یابد. با این حال، مطالعات کمی این را گزارش کردند. در دنیا، ذخایر گچ گوگرد زدایی گازهای دودکش تا میلیاردها تن و بیش از ۵۰ میلیون تن در سال است (Sun et al, 2016). برای استفاده موثر از ضایعات این نیروگاه و بهبود عملکرد روسازی، استفاده از CSWF در مخلوط آسفالت به عنوان یک ماده روسازی پایدار در روسازی آسفالت ممکن است یک راه امیدوارکننده باشد.

در این تحقیق، عملکرد مخلوط آسفالت اصلاح شده با CSWF دوستدار محیط زیست به عنوان یک ماده روسازی پایدار مورد بررسی قرار گرفت. عملکرد مخلوط آسفالت CSWF توسط آزمون مارشال، تست شیار جای چرخ، تست خمش سه نقطه، تست خستگی و تست حساسیت رطوبتی در محیط سخت ارزیابی شد. با توجه به نتایج آزمایش بالا، درصد بهینه CSWF در مخلوط آسفالتی برای برآوردن عملکرد بهینه مخلوط آسفالت تعیین شد. در همین حال، مکانیسم مخلوط آسفالت اصلاح شده با CSWF نیز مورد بحث قرار گرفت.

## ۲- مواد و مصالح

### ۲-۱- قیر و افزودنی

در این مطالعه از آسفالت خالص ۱۰۰-۸۵ استفاده شد. خواص آن در جدول ۱ نشان داده شده است. خواص فیزیکی فیبر ویسکر سولفات کلسیم توسط سازنده ارائه شده است که در جدول ۲ نشان داده شده است. از جدول ۲ می‌توان دریافت که سیبیل سولفات کلسیم پایداری حرارتی و استحکام کششی بالایی دارد. CSWF یک ظاهر پودری کرکی سفید با لبه‌ها و گوشه‌های واضح روی سطح نشان می‌دهد که مقاومت مخلوط را در برابر چندین خرابی روسازی افزایش می‌دهد. در آزمایش از سولفات سدیم صنعتی (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) استفاده شد و درصد سولفات سدیم بیش از ۹۹ درصد بود. در این تحقیق سنگدانه درشت آن کانی بازالت خرد شده با چگالی ۲٫۸۶ گرم بر سانتی

متر مکعب است. سنگدانه‌های ریز از بازالت خرد شده و ماسه مکانیکی با چگالی ۲,۸۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب به دست آمد. پرکننده معدنی از نوع سنگ آهک با چگالی ۲,۷۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد و بیش از ۹۵٪ از اندازه پر کردن کمتر از ۷۵ میکرومتر است.

جدول ۱. خصوصیات قیر

نتایج	استاندارد	خصوصیات
۴۷	ASTM D36	نقطه نرمی
۱۸۲	ASTM D113	شکل پذیری در ۱۰ درجه
۸۶,۵	ASTM D5	درجه نفوذ
۳۰,۴	-	درجه اشتعال
۱,۰۳	-	وزن مخصوص
٪۱,۷۴	-	درصد واکس

جدول ۲. خصوصیات CSWF

نتایج	خصوصیت
۴-۲	قطر
۶۰-۴۰	طول
۱۶	نسبت طول به قطر
۲۰۵۰	مقاومت کششی
۱۴۵۰	دمای ذوب

### ۲-۲- آماده سازی نمونه‌ها

دانه‌بندی طراحی شده در جدول ۳ نشان داده شده است. نمونه‌هایی از مخلوط آسفالتی با درصد ۰٪، ۲٪، ۴٪، ۶٪، ۸٪ و ۱۰٪ CSWF تهیه شد. برای دستیابی به پراکندگی خوب الیاف، CSWF و سنگدانه در یک میکسر چرخشی در ۶۰۰ RPM5 به مدت ۹۰ ثانیه قبل از افزودن آسفالت و پرکننده معدنی مخلوط شدند.

جدول ۳. دانه بندی مصالح سنگی در مخلوط

اندازه الک (میلی‌متر)	۱۶	۱۲,۵	۹,۵	۴,۷۵	۲,۳۶	۱,۱۸	۰,۶	۰,۳	۰,۰۷۵
درصد عبوری برای فیلر ۵٪	۱۰۰	۹۶	۷۷	۵۰	۳۵	۲۵	۲۲	۱۴	۷

### ۳- برنامه آزمایشگاهی

#### ۳-۱- آزمایش مارشال

با توجه به درصد CSWFهای مختلف، درصد آسفالت بهینه (OAC)<sup>۱</sup>، وزن مخصوص توده، حجم فضای خالی هوا (VV)<sup>۲</sup> و حفره‌های موجود در سنگدانه‌های معدنی (VMA)<sup>۳</sup> و پایداری مارشال (MS)<sup>۴</sup> مخلوط‌های آسفالتی مختلف توسط مارشال به دست آمد. تست. همه تست‌ها بود.

#### ۳-۲- تست شیار جای چرخ

آزمایش‌های شیار جای چرخ برای ارزیابی پایداری مخلوط آسفالت متخلخل در دمای بالا انجام شد. تست شیار جای چرخ در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد بر روی نمونه‌های مستطیلی، با ابعاد ۵۰×۳۰×۳۰۰ میلی‌متر انجام شد. تکرارهای برای هر آزمایش استفاده می‌شود و داده‌های نهایی میانگین ارزش هر آزمایش است.

### ۳-۳- تست تیر خمشی در دمای پایین

آزمایش تیر خمشی دمای پایین برای ارزیابی مقاومت ترک خوردگی در دمای پایین مخلوط آسفالت متخلخل استفاده شد. نمونه‌هایی که تیرهای مستطیلی  $30 \times 35 \times 250$  میلی‌متر بودند، برای تعیین کرنش خمشی در دمای  $-10$  درجه سانتی‌گراد با نرخ بارگذاری  $50$  میلی‌متر در دقیقه تا شکست ترک، و بار و انحراف در مرکز آزمایش شدند. نمونه‌های تیر اندازه‌گیری شد. تکرارهای برای هر آزمایش استفاده می‌شود و داده‌های نهایی میانگین ارزش هر آزمایش است. کرنش خمشی طبق رابطه زیر محاسبه شد:

$$\epsilon_B = \frac{6hd}{L^2} \quad (1)$$

که در آن  $\epsilon_B$  حداکثر کرنش خمشی در هنگام شکست نمونه است،  $h$  ارتفاع مقطع نمونه،  $d$  انحراف سطح مقطع نمونه و  $L$  دهانه نمونه است.

### ۳-۴- تست خستگی تیرچه خمشی چهار نقطه‌ای

در این مطالعه، تست خستگی تیر خمشی چهار نقطه با استفاده از دستگاه تست 10UTM-25 انجام شد و از تیر مستطیلی به ابعاد  $50 \times 63 \times 380$  میلی‌متر استفاده شد. یک بارگذاری هارسین با فرکانس  $10$  هرتز در دمای  $15$  درجه سانتی‌گراد استفاده شد و آزمایش با حالت کرنش ثابت در سطوح کرنش‌های مختلف  $650$ ،  $850$  و  $1050$  میکرو کرنش انجام شد. تکرارهای برای هر آزمایش استفاده می‌شود و داده‌های نهایی مقدار متوسط هر آزمایش است.

### ۳-۵- آزمایش کشش غیر مستقیم

آزمایش کشش غیر مستقیم برای تعیین خواص کششی مخلوط آسفالتی در دما و نرخ بارگذاری مشخص استفاده می‌شود. دمای آزمون  $-25$  درجه سانتی‌گراد،  $-15$  درجه سانتی‌گراد،  $-5$  درجه سانتی‌گراد،  $5$  درجه سانتی‌گراد،  $15$  درجه سانتی‌گراد و  $25$  درجه سانتی‌گراد بود و سرعت بارگذاری  $50$  میلی‌متر در دقیقه بود.

برای هر آزمون از چند تکرار استفاده شده است و داده‌های نهایی مقدار متوسط هستند.

$$ITS = \frac{2000P}{\pi Dt} \quad (2)$$

که در آن  $ITS$  <sup>۱۱</sup> مقاومت کششی غیرمستقیم، کیلوپاسکال،  $P$  اوج بار،  $N$ ،  $D$  قطر نمونه، میلی‌متر و  $t$  ضخامت نمونه، میلی‌متر است.  $TSR$  <sup>۱۲</sup> با معادله زیر تعیین شد.

$$TSR = \frac{ITS_{WET}}{ITS_{DRY}} \quad (3)$$

### ۳-۶- تست غوطه‌وری در خلاء

تست غوطه‌وری خلاء  $10\%$  (به وزن کل محلول) غلظت سولفات بهبود یافت. اثر حمله سولفات به مخلوط آسفالتی اصلاح شده با CSWF با خیساندن نمونه‌های مارشال در محلول سولفات سدیم  $10\%$  شبیه‌سازی شد. پایداری مارشال مخلوط آسفالت کنترل و مخلوط آسفالت اصلاح شده با CSWF مورد آزمایش قرار گرفت. نمونه‌ها به مدت  $15$  دقیقه در یک خشک کن خلاء با خلاء حدود  $97.3$  کیلو پاسکال قرار داده شدند. در اثر فشار منفی، محلول سولفات سدیم با کسر جرمی  $10$  درصد در خشک کن قرار داده شد و تمام نمونه‌ها در محلول سولفات سدیم غوطه‌ور شدند (ارتفاع غوطه‌وری کمتر از  $20$  میلی‌متر نبود). (پس از  $15$  دقیقه، فشار طبیعی بازیابی شد. نمونه‌های مارشال از مخلوط آسفالتی تقویت‌شده با CSWF و نمونه‌های مارشال از مخلوط آسفالت شاهد از نظر پایداری مارشال هر  $24$  ساعت پس از  $48$  ساعت غوطه‌وری در محلول سولفات سدیم آزمایش شدند. اثر حساسیت به آب مخلوط آسفالت اصلاح شده با CSWF تحت حمله سولفات مورد مطالعه قرار گرفت و امکان استفاده از مخلوط آسفالت اصلاح شده با CSWF در محیط سولفات مورد بحث قرار گرفت.

### ۳-۷- آزمایش سیکل ذوب و یخبندان در محیط سولفات

نمونه‌های مارشال ( $24$  نمونه) با تراکم ( $50$  بار برای هر طرف) با  $4$  درصد وزنی CSWF تشکیل شدند که به  $6$  گروه با  $4$  نمونه در هر گروه تقسیم شدند. با مراجعه به آزمون تقسیم

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- شاخص مارشال

شکل‌های ۱ تا ۵ پارامترهای مخلوط آسفالت تقویت‌شده با CSWF، از جمله درصد بهینه قیر (OAC)، وزن مخصوص توده‌ای، VV، VMA و پایداری مارشال (MS) هر مخلوط را نشان می‌دهند. با افزایش درصد CSWF، OAC از ۴,۶۱٪ به ۴,۸۵٪ افزایش یافت. دلیل اصلی این پدیده این بود که الیاف سطح ویژه داخلی را افزایش داد و بخشی از قیر آزاد را جذب کرد، بنابراین درصد قیر مخلوط افزایش یافت. شکل ۲ وزن مخصوص توده مخلوط آسفالت را با محتویات مختلف CSWF نشان می‌دهد. تمام مقادیر وزن مخصوص فله بین ۲,۴۸ و ۲,۵۶ بود. با افزایش درصد CSWF، وزن مخصوص عمده مخلوط آسفالت اصلاح شده با CSWF به تدریج کاهش یافت.

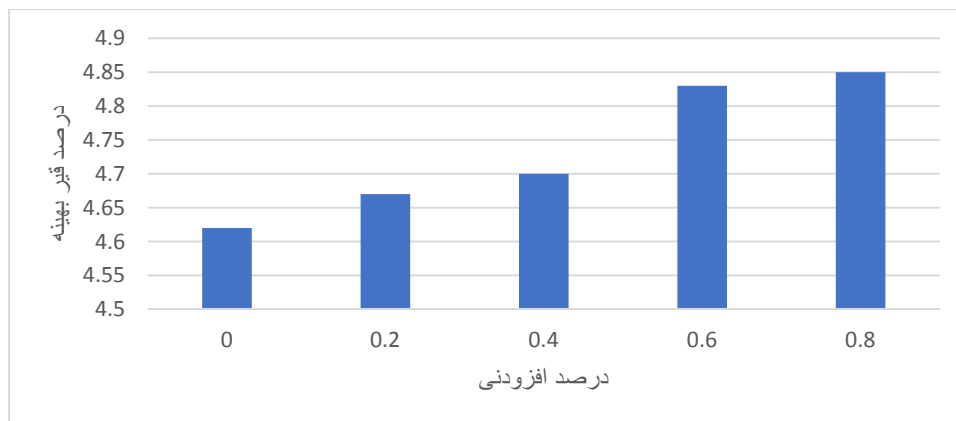
شکل ۳ نشان می‌دهد که مقدار VV با افزایش درصد CSWF افزایش می‌یابد. داده‌ها همبستگی مثبتی را بین درصد VV و CSWF نشان می‌دهد. این افزایش احتمالاً به دلیل افزایش سطح CSWF است که آسفالت آزاد بیشتری را جذب می‌کند. شکل ۴ نشان می‌دهد که برای مخلوط‌های آسفالتی مختلف، VMA نیز با افزایش درصد CSWF افزایش می‌یابد. نتایج MS در شکل ۵ نشان داده شده است. در مقایسه با نتایج گروه کنترل، نتایج MS گروه‌های آزمایش تقریباً ۷,۴٪، ۲۱,۷٪، ۱۶,۲٪ و ۸,۵٪ بهبود یافته است.

به طور کلی، MS یک شاخص برای ارزیابی توانایی ضد ترک است. مقدار MS بزرگتر به معنای توانایی بهتر ضد ترک است. حداکثر مقادیر MS زمانی که ۰,۴۰ درصد وزنی CSWF به دست آمد.

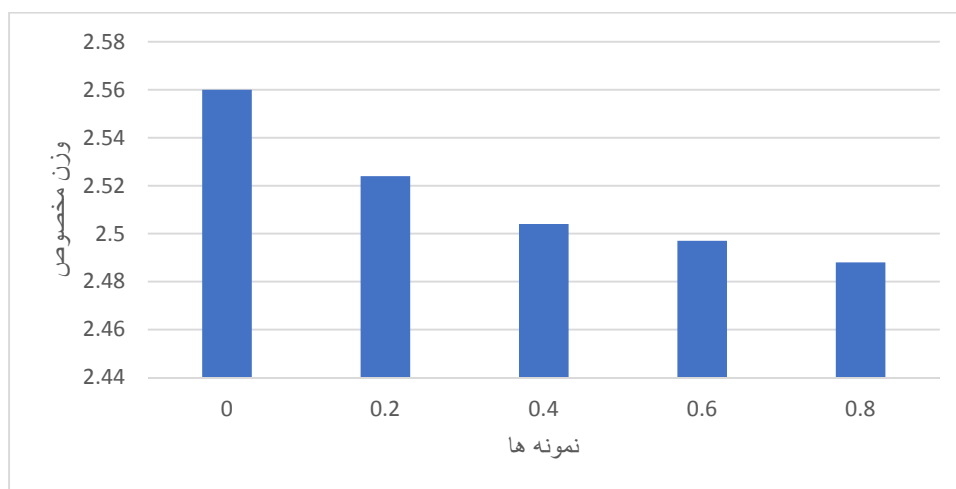
انجماد و ذوب، نمونه‌ها به مدت ۱۰ ساعت در سولفات سدیم ۱۰ درصد به جای آب خیس‌انده شدند. نمونه‌های مارشال بدون چرخه انجماد-ذوب برای شکافتن استحکام کششی پس از ۷۲ ساعت پخت مورد آزمایش قرار گرفتند. پنج گروه دیگر ابتدا در یک کیسه پلاستیکی حاوی محلول ۱۰ درصد سولفات سدیم قرار داده شدند و به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۱۸- درجه سانتیگراد نگهداری شدند. آنها از کیسه خارج شدند و به مدت ۶ ساعت در یک حمام آب در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد غوطه ور شدند. پنج گروه از نمونه‌ها و گروه کنترل به مدت ۲ ساعت در حمام آب در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد غوطه‌ور شدند و مورد آزمایش قرار گرفتند. ۲۴ نمونه مارشال به ترتیب تحت ۰-۵ چرخه انجماد-ذوب قرار گرفتند و تغییرات ظاهری نمونه‌ها پس از چرخه انجماد-ذوب مشاهده شد. با آزمایش‌های بالا، تأثیر جفت چرخه نمک-انجماد-ذوب بر روی پایداری آب مخلوط آسفالت رایج و مخلوط آسفالت تقویت‌شده با CSWF مورد مطالعه قرار گرفت.

##### ۳-۸- تست چرخه سولفات-تر-خشک

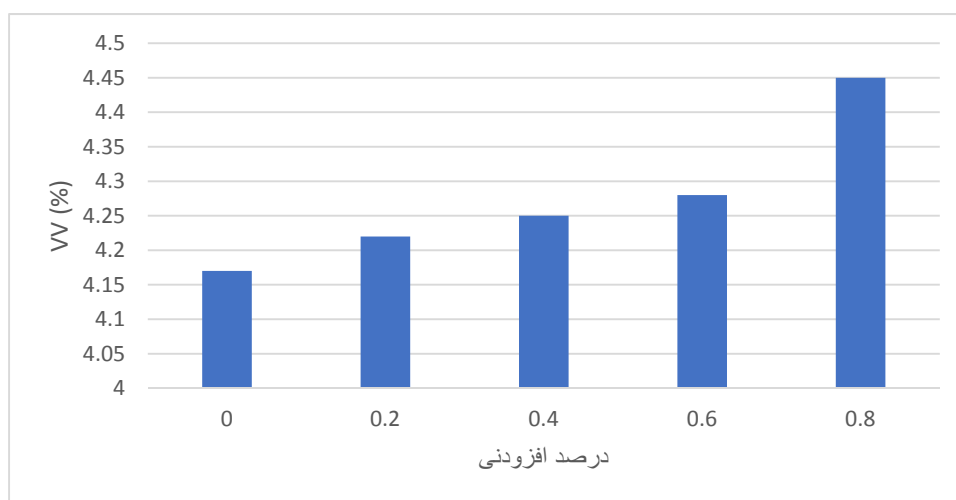
چرخه سولفات-تر-خشک شبیه به چرخه سولفات-انجماد-ذوب بود. نمونه‌های مارشال در محلول سولفات سدیم ۱۰ درصد غوطه‌ور شدند و به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد در آون خشک شدند. پس از هر چرخه سولفات-تر-خشک، چهار نمونه برای آزمایش قدرت شکافتن خارج شد و نتایج آزمایش مربوطه ثبت شد. با توجه به نتایج، دوام مخلوط آسفالتی تقویت‌شده با CSWF تحت سیکل‌های سولفات-تر-خشک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در این آزمون از نمونه‌های موازی ری استفاده شد.



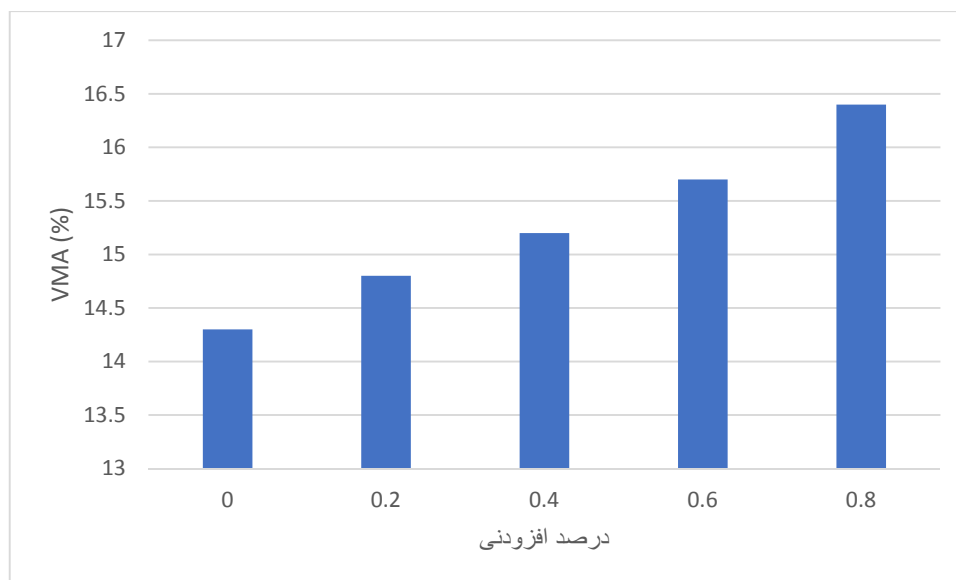
شکل ۱. درصد قیر بهینه نمونه‌ها



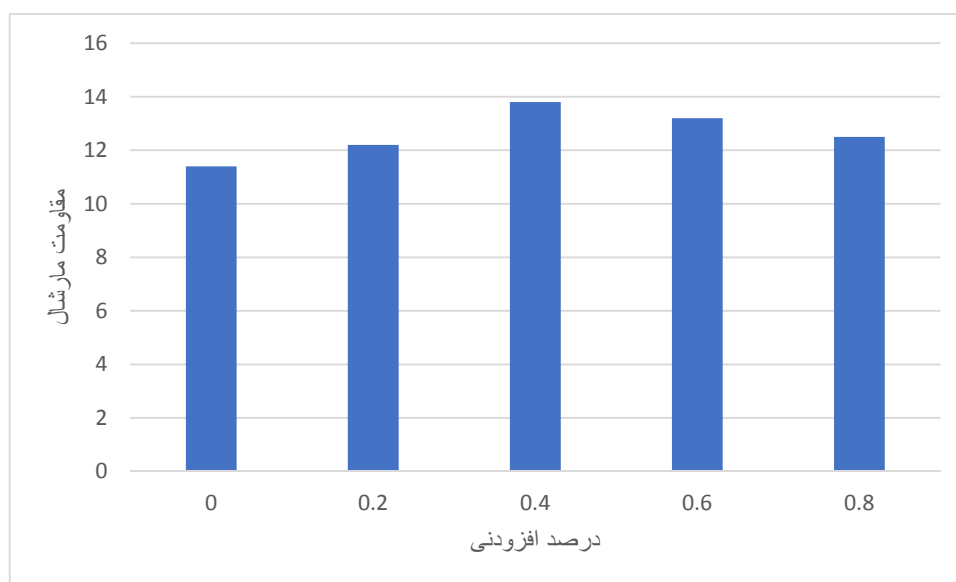
شکل ۲. وزن مخصوص نمونه‌ها



شکل ۳. نتایج VV



شکل ۴. نتایج VMA

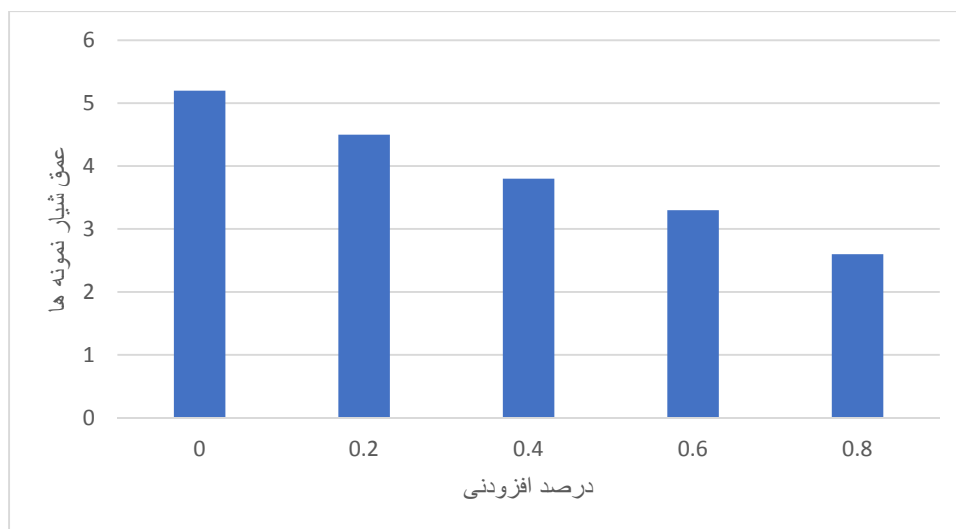


شکل ۵. مقاومت مارشال نمونه‌ها

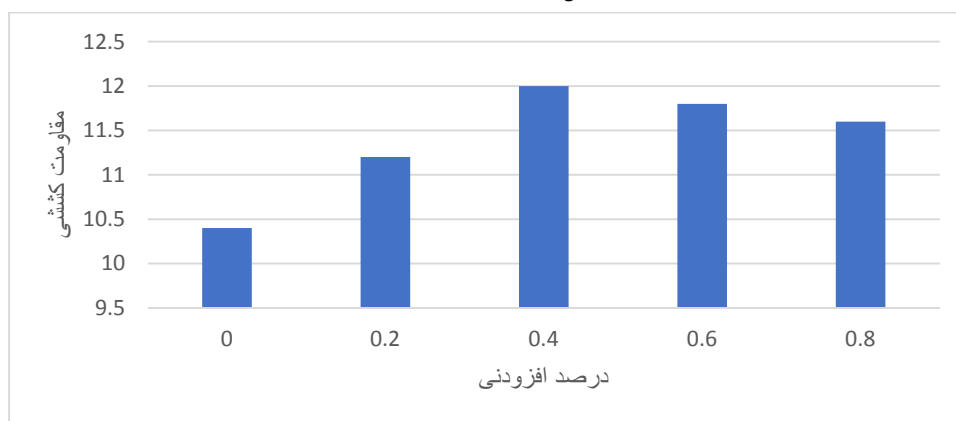
#### ۴-۲- خصوصیات دمای بالا

می‌شود که عمق شیار مخلوط آسفالتی با افزایش درصد CSWF کاهش می‌یابد. در مقایسه با مخلوط آسفالت غیرالیافی، عمق شیار درصد ۰٫۴ درصد وزنی مخلوط آسفالت تقویت‌شده با CSWF تا ۴۵٫۳ درصد کاهش یافت. از آنجایی که الیاف آسفالت را جذب می‌کند، درصد قیر آزاد کاهش یافته و استحکام باند افزایش می‌یابد.

شکل ۶ عمق شیار مخلوط آسفالت اصلاح شده با الیاف را با درصد‌های مختلف CSWF نشان می‌دهد. به طور معمول، یک مقدار عمق شیار کمتر به معنای عملکرد مطلوب در برابر شیارشدگی است. هنگامی که درصد CSWF کمتر از ۰٫۸ درصد وزنی باشد، عمق شیار مخلوط آسفالت با CSWF به طور قابل توجهی پایین می‌رود، که نشان می‌دهد که پایداری مخلوط آسفالتی در دمای بالا می‌تواند بهبود یابد. از شکل ۶ مشاهده



شکل ۶. عمق شیار نمونه‌ها

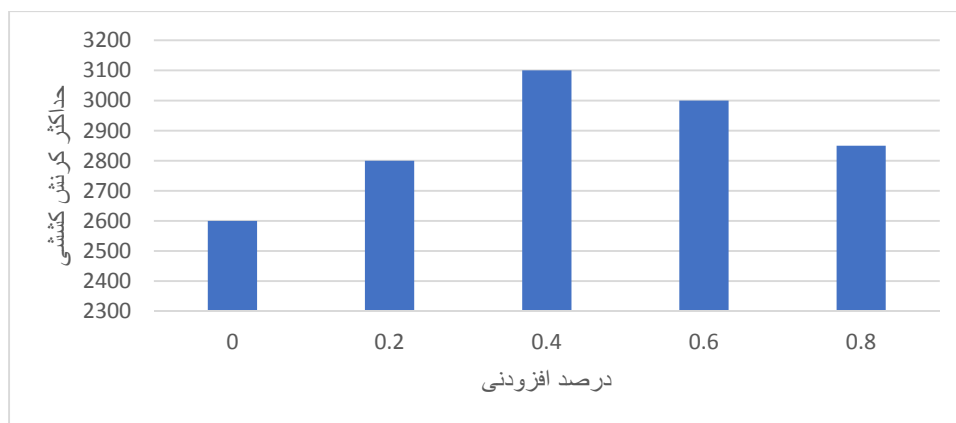


شکل ۷. مقاومت کشتی نمونه‌ها

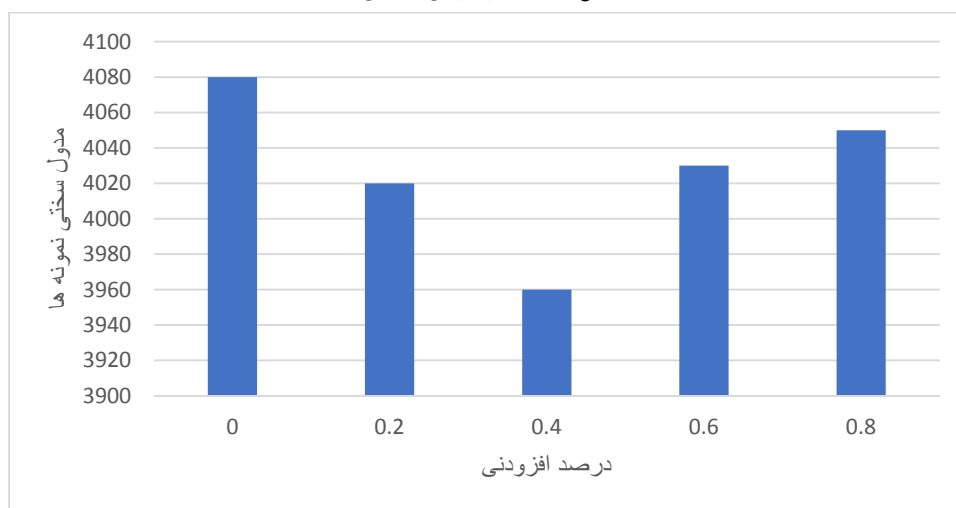
#### ۴-۳- تست خمش دمای پایین

تست خمش در دمای پایین در دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد انجام شد. نتیجه e در شکل های ۷-۹ توضیح داده شده است. از شکل‌های ۷-۹، می‌توان خلاصه کرد که برآزش منحنی سهموی خوبی در میان مخلوط‌های آسفالتی تقویت‌شده با الیاف با محتویات مختلف CSWF و مقاومت کشتی خمشی، حداکثر کرنش کشتی و مدول سختی خمشی وجود دارد. استحکام کشتی خمشی و کرنش کشتی ابتدا افزایش یافت و سپس با افزایش درصد CSWF پایین آمد. نشان داده شده است که درصد بیش از حد الیاف باعث پایداری ضعیف مخلوط آسفالت در دمای پایین به دلیل پراکندگی ناهموار آن می‌شود. بنابراین، هنگامی که درصد CSWF به یک رقم معین رسید، مقاومت مخلوط در برابر ترک در دمای پایین کاهش می‌یابد. علاوه بر این، استحکام کشتی خمشی و کرنش کشتی عملکرد خوبی در درصد ۰.۴ CSWF درصد وزنی نشان داد. کاهش مدول سختی

خمشی نشان داد که CSWF می‌تواند چقرمگی و مقاومت در برابر ترک قوی مخلوط آسفالت را در دماهای پایین بهبود بخشد. در مقایسه با مخلوط آسفالت کنترل، توانایی ضد ترک در دمای پایین درصد ۰.۴ درصد وزنی مخلوط آسفالت تقویت‌شده با ۱۷.۰ CSWF درصد افزایش یافت. دلیل این پدیده نیز به اثر مورفولوژیکی CSWF با دانه‌های سوزنی مانند آن نسبت داده می‌شود. علاوه بر این، CSWF عملکرد اتصالات پل را دارد که باعث تقویت ناحیه ضعیف سطح مشترک بین سنگدانه و آسفالت می‌شود. دلیل اصلی پدیده فوق این است که CSWF ساختار لایه لایه خاصی را بین سنگدانه و آسفالت تشکیل می‌دهد که نقش کلیدی در اتصال پل ایفا می‌کند و اثر اتصال با سنگدانه‌ها را افزایش می‌دهد. تحت عمل الیاف، آسفالت بازیابی تنش و بازیابی شکل‌پذیری بالاتری دارد، به طوری که توانایی خود ترمیمی مخلوط آسفالت را بهبود می‌بخشد.



شکل ۸. حداکثر کرنش کششی

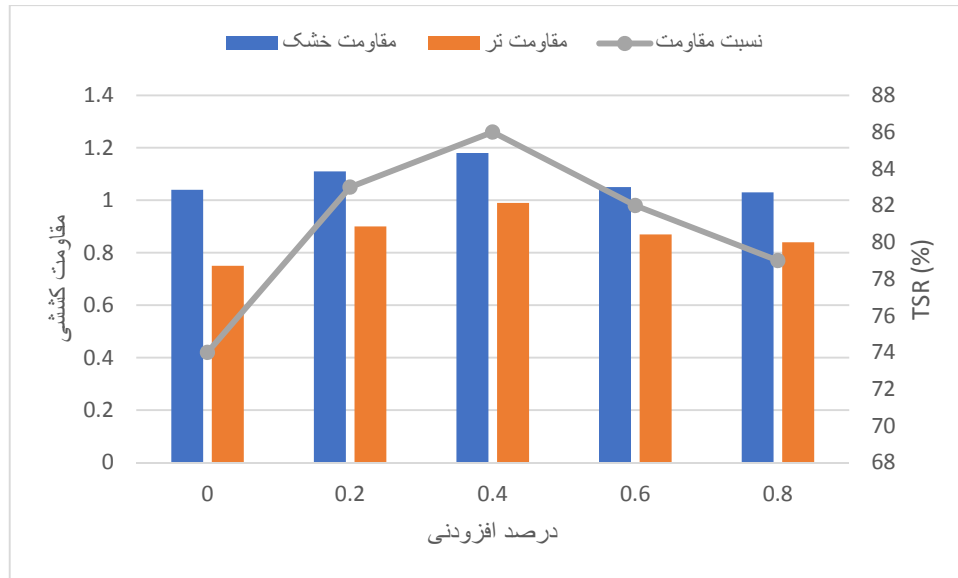


شکل ۹. مدول سختی نمونه ها

درصد بهینه ۰.۴ CSWF وزنی بود. در درصد بهینه، استحکام کششی تقسیم انجماد- ذوب مخلوط آسفالتی اصلاح شده با CSWF در مقایسه با مخلوط آسفالت کنترل و مخلوط آسفالتی بدون افزودن سبیل پس از چرخه های انجماد و ذوب، به ترتیب ۱۲ و ۲۸ درصد افزایش یافت.

دلیل اصلی این پدیده جذب و جذب فیبر روی قیر است. در طول چرخه انجماد و ذوب، CSWF زبری سطح مشترک را افزایش داد که باعث ضخیم شدن فیلم آسفالت شد و توانایی اتصال رابط را افزایش داد. به همین دلیل است که مخلوط آسفالت اصلاح شده با CSWF مقادیر بالاتری را برای TSR نشان می دهد و در برابر آسیب آب مقاومت خوبی دارد.

شکل ۱۰ نتایج حساسیت به آب را برای پنج نوع مختلف مخلوط آسفالتی نشان می دهد. همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، استحکام تقسیم یخ-ذوب مخلوط آسفالت اصلاح شده با CSWF از ۰.۲ درصد وزنی به ۰.۸ درصد وزنی در مقایسه با مخلوط آسفالت کنترل افزایش می یابد CSWF می تواند استحکام کششی و حساسیت به آب مخلوط آسفالت را قبل و بعد از چرخه یخ زدگی و ذوب بهبود بخشد. هنگامی که درصد CSWF کمتر از ۰.۴ درصد وزنی باشد، استحکام کششی شکاف به طور قابل توجهی افزایش یافت. از شکل ۱۰، واضح است که وقتی درصد حدود ۰.۴ درصد وزنی است، نسبت استحکام کششی تقسیم یخ-ذوب بالاترین است و سپس با افزایش درصد CSWF کاهش می یابد. نشان داده شده است که

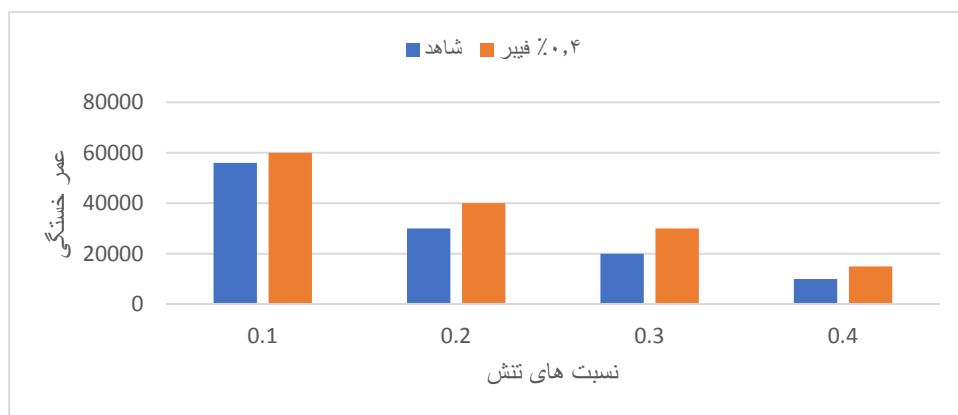


شکل ۱۰. نتایج حساسیت رطوبتی نمونه‌ها

#### ۴-۴- ارزیابی عملکرد خستگی

افزایش یافت. این داده‌ها نشان می‌دهند که اثر افزودن CSWF بر فرکانس خستگی مخلوط آسفالتی زمانی که سطح تنش پایین بود آشکار نبود. با افزایش نسبت تنش، CSWF مقاومت در برابر خستگی مخلوط آسفالتی را به طور قابل توجهی بهبود بخشید و عمر خستگی مخلوط آسفالت اصلاح شده با الیاف تا حد زیادی بهبود یافته بود. افزودن CSWF می‌تواند عمر خستگی مخلوط آسفالتی و مخلوط آسفالت اصلاح شده با الیاف را تحت شرایط تنش دائمی در حال تغییر بهبود بخشد و همچنین طول عمر مخلوط آسفالت را افزایش دهد.

آزمایش خستگی بر روی مخلوط آسفالت مخلوط با و بدون CSWF انجام شد. در همان نسبت تنش، فرکانس خستگی و افزایش دامنه مخلوط آسفالتی با CSWF محاسبه شد. داده‌های آزمایش و نتایج در شکل ۱۱ نشان داده شده است. از شکل ۱۱ می‌توان دید که، تحت بارگذاری نسبت تنش یکسان، زمان‌های خستگی مخلوط آسفالت با CSWF همگی بیشتر از زمان‌های بدون CSWF است. هنگامی که نسبت تنش ۰,۱ بود، عمر خستگی مخلوط آسفالت اصلاح شده با ۷,۲٪ CSWF افزایش یافت و زمانی که نسبت تنش ۰,۳ بود، عمر خستگی ۵۴,۲٪



شکل ۱۱. عمر خستگی نمونه‌ها

#### ۴-۵- حساسیت رطوبتی در محیط سولفات

چرخه یخ زدگی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که، تحت عمل یخ زدگی نمک-ذوب شده چرخه‌ها، مقاومت کششی ترک خوردگی یخ زدایی دو مخلوط به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. پس از ۵ چرخه یخ زدایی نمک، استحکام کششی شکاف یخ زدگی از مخلوط معمولی به ۰,۳۰ مگاپاسکال کاهش یافته است، و مقاومت کششی درصد ۰,۴ درصد وزنی از ترکیب آسفالت اصلاح شده CSWF نیز پیش رفت پایین به ۰,۴۷ مگاپاسکال. نسبت مقاومت کششی E به ترتیب ۲۷٪ و ۳۹,۸٪ بود. نشان داده شده است که افزودن CSWF می‌تواند به طور مؤثر مقاومت حمله سولفات و مقاومت چرخه یخ زدگی را از مخلوط آسفالت بهبود بخشد.

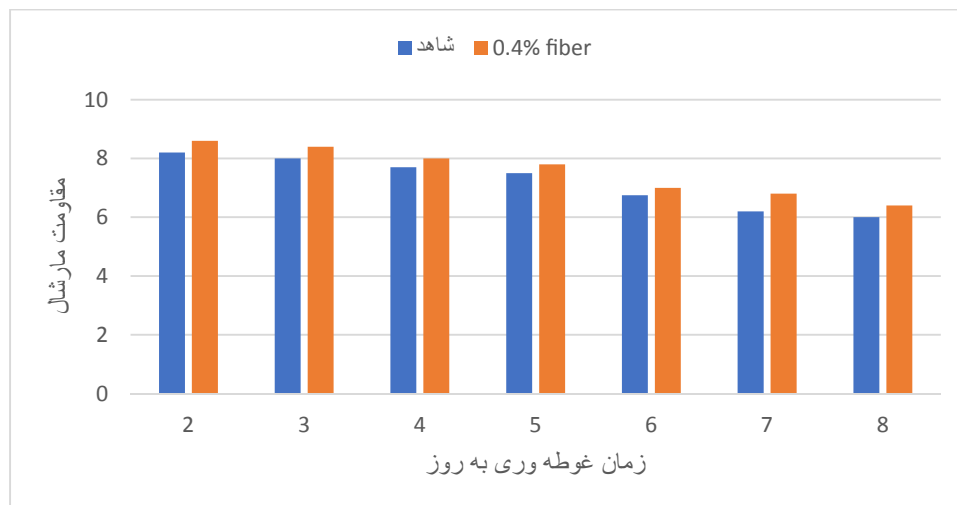
#### ۴-۷- حساسیت به آب در چرخه‌های خشک نمک

از شکل ۱۴ می‌توان مشاهده کرد که مقاومت شکست هر دو مخلوط تحت عمل مداوم چرخه خشک نمک کاهش می‌یابد. افزودن CSWF می‌تواند مقاومت حمله سولفات و مقاومت چرخه خشک مرطوب از مخلوط آسفالت را بهبود بخشد. شبیه به اتفاقاتی است که در چرخه نمک یخ زدگی رخ می‌دهد، اما به اندازه آن چرخه شدید نیست.

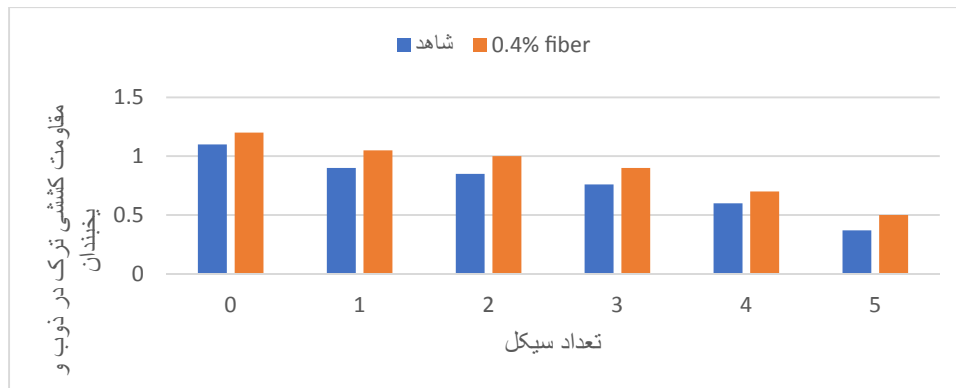
نتایج MS تست مخلوط‌های مختلف آسفالت پس از حمله سولفات در شکل ۱۲ نشان داده شده است. پس از ۴۸ ساعت غوطه وری در آزمایش مارشال، پایداری مارشال نمونه شاهد ۱۰,۴۷ کیلو نیوتن و مخلوط آسفالت اصلاح شده با CSWF ۱۰,۵۸ کیلو نیوتن بود. MS نمونه شاهد هنگام خیساندن در سولفات سدیم برای ۲ روز و ۸ روز در مقایسه با غوطه وری ۲ روزه در آب به ترتیب ۱۹,۵ و ۵۱,۶ درصد کاهش یافت. با این حال، MS مخلوط آسفالت اصلاح شده با CSWF در ۲ روز و ۸ روز تحت حمله سولفات در مقایسه با غوطه وری ۲ روزه در آب، به ترتیب ۱۷,۷٪ و ۴۰,۹٪ کاهش یافت. نشان داده شده است که عملکرد مخلوط آسفالت در محیط حمله نمک به طور جدی تری نسبت به محیط آب کاهش یافته است و CSWF اثر افزایش خاصی بر مقاومت در برابر حمله سولفات مخلوط آسفالت دارد و CSWF می‌تواند توانایی حمله ضد سولفات مخلوط آسفالت را افزایش دهد.

#### ۴-۶- حساسیت به آب در چرخه های یخ

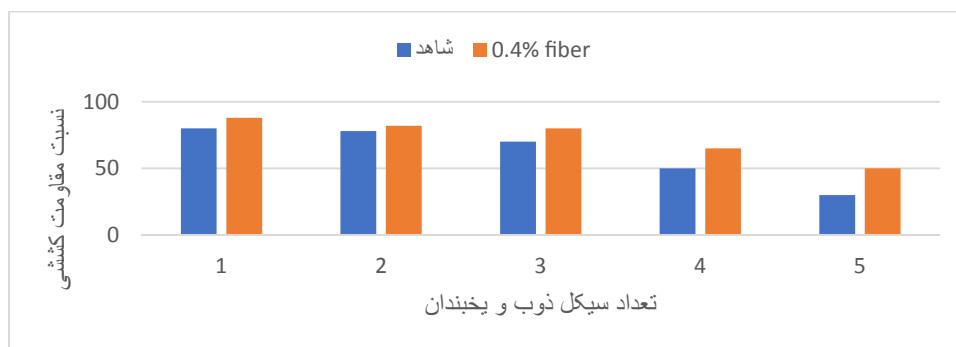
داده‌های آزمایشی از استحکام کششی شکاف یخبندان و یخچال و فریزر آنکه نسبت مقاومت کششی بدون چرخه یخ زدگی و هر



شکل ۱۲. نتایج مقاومت مارشال نمونه‌ها

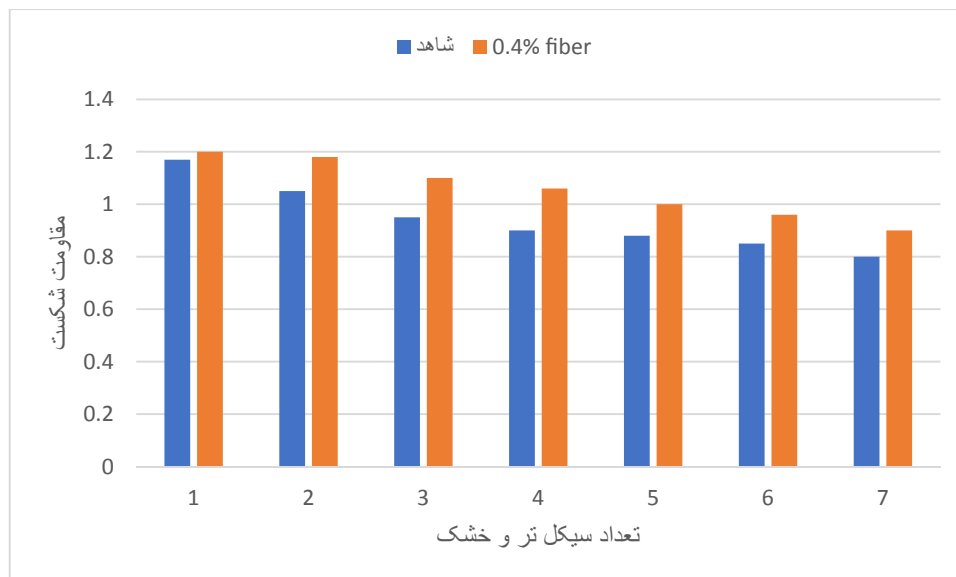


(الف)



(ب)

شکل ۱۳. مقاومت کششی نمونه‌ها: (الف) مقاومت کششی ترک (ب) نسبت مقاومت کششی



شکل ۱۴. مقاومت شکست نمونه‌ها

## ۵- نتیجه گیری

CSWF مقاومت در برابر شیار، خمش خمشی و TSR به ترتیب ۴۴,۶٪، ۱۷,۰٪ و ۱۷,۴٪ در مقایسه با نمونه‌های شاهد افزایش یافته است.

-خرابی دوام مخلوط آسفالت در اثر نفوذ و فشار انبساط ایجاد شده در فرآیند تبلور سولفات ایجاد می‌شود. مخلوط آسفالت اصلاح شده CSWF دارای اطمینان بهتری نسبت به ترک خوردگی استحکام تحت عمل کولپینگ چرخه‌های یخ‌زدگی نمک و چرخه‌های مرطوب و خشک نمک دارد.

مطالعه مورد بررسی عملکرد آسفالت اصلاح شده با فیبر ویسر سولفات کلسیم اکوفری، به عنوان یک ماده آسفالت پایدار است. نتیجه‌گیری به شرح زیر خلاصه شد:

-با افزایش درصد CSWF، عملکرد شیارشدگی، مقاومت در برابر ترک درجه حرارت پایین و دوام مخلوط آسفالت به طور قابل توجهی بهبود یافته است.

-با توجه به تجزیه و تحلیل نتایج عملکرد روسازی، درصد بهینه CSWF ۰.۴ درصد وزنی قیر است. تحت درصد ۰.۴ wt.٪

## ۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Calcium Sulfate Whisker Fiber
- 2- Federal Highway Administration
- 3- Hot Mix Asphalt
- 4- Cold Mix Asphalt
- 5- Round Per Minute
- 6- Optimum Asphalt Content
- 7- Void Volume
- 8- Void In Mineral Aggregate
- 9- Marshall Stability
- 10- Universal Testing Machine
- 11- Indirect Tensile Strength
- 12- Tensile Strength Ratio

## ۷- مراجع

- Sun. W. J., G. Lu, C. Ye et al., (2018). Estate of the art: application of green technology in sustainable pavement,” *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2018, Article ID 9760464, 1-19.
- Tayfur. S., H. Ozen, and A. Aksoy (2007). Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers. *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 2, 328-337.
- Wang. J. C., X. C. Pan, Y. Xue, and S. J. Cang (2011). Studies on the application properties of calcium sulfate whisker in silicone rubber composites. *Journal of Elastomers & Plastics*, Vol. 44, No. 1, 55-66.
- Xing. X. Y., J. Pei, R. Li, and X. Tan (2019). Effect and mechanism of calcium carbonate whisker on asphalt binder Materials. *Research Express*, Vol. 6, No. 5, Article ID 055306.
- Yang. L., Y. Lu, F. He, H. Wu, T. Xu, and M. Xiao (2018). Preparation and characterization of clay aerogel composites reinforced by calcium sulfate whisker. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 18, No. 11, 7896-7901.

- Anh. D. V. and C. P. Feng (2013). Study on Marshall and Rutting test of SMA at abnormally high temperature. *Construction and Building Materials*, Vol. 47, 1337-1341, 2013.
- Guan. B. W., R. Xiong, R. He, S. Chen, and D. Ding (2014). In Vestigation of usability of brucite fiber in asphalt mixture. *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 7, No. 3, 193-202.
- Nsengiyumva. G. M. Nsengiyumva, K. Santosh, Y. R. Kim, H. Xu, and Y. Yang, (2018). New Mixture Additives for Sustainable Bituminous Pavements, *Nebraska Transportation Center*, Lincoln, NE, USA.
- Sun. H. J., D. Tan, T. Peng, and Y. Liang (2016). Preparation of calcium sulfate whisker by atmospheric acidification method from flue gas desulfurization gypsum. *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 31, 621-626.
- Stempihar. J. J., M. I. Souliman, and K. E. Kaloush (2012). Fiber-reinforced asphalt concrete as sustainable paving material for airfields transportation research record. *Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2266, No. 1, 60-68.

# Investigating the Performance of Asphalt Mixture Modified with Environmentally Friendly Fibers as a Sustainable Pavement Material

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

*E-mail: Chitsazan.az@gmail.com*

Received: February 2024- Accepted: June 2024

## **ABSTRACT**

This research was conducted to evaluate the performance of asphalt mixture modified with environmentally friendly calcium sulfate fiber 1 (CSWF) as a sustainable pavement material. The asphalt mixture containing 0.2% by weight, 0.4% by weight, 0.6% by weight and 0.8% by weight of CSWF was designed by Marshall's method. Asphalt mixtures without fibers were also prepared as control samples. Marshall test, wheel rut test, low temperature bending test, moisture sensitivity test and fatigue test were conducted to evaluate the performance of CSWF asphalt mixture and the fiber reinforcement mechanism was discussed. The results showed that CSWF can improve high temperature stability and low temperature cracking resistance of asphalt mixture. Moisture resistance of asphalt mixtures was also improved in the presence of CSWF. When the percentage of CSWF was 0.4% by weight of the total mixture, the asphalt mixture performance is the best. Compared with conventional asphalt mixture, CSWF asphalt mixture not only used power plant waste effectively to preserve ecosystems, but also improved pavement performance, which is suggested to be used in sustainable pavement construction and rehabilitation.

**Keywords:** Fibers, Asphalt Mixture, Environment, Performance, Fatigue, Modified Bitumen