

## اثرات نانو اکسید مس، نانو لوله‌های کربنی و استایرن بوتادین استایرن بر روی خصوصیات شیمیایی، حرارتی و مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی گرم

### مقاله علمی - پژوهشی

ناهیدامینی، دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران  
پرهام حیاتی، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران  
علی عبدی کردانی\*، استاد، گروه برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)،  
قزوین، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [aliabdi@eng.ikiu.ac.ir](mailto:aliabdi@eng.ikiu.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۸ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵

صفحه ۲۰۸-۱۹۳

### چکیده

هدف از این مطالعه، افزایش بیش از حد دمای مخلوط آسفالتی باعث ایجاد پدیده شیارشدگی در روسازی آسفالتی می‌شود. ارزیابی اثر کاربرد PCM به عنوان افزودنی قیر جهت کنترل دمای مخلوط آسفالتی می‌باشد. برای این منظور از مواد رسانا (MWCNT یک ونیم درصد) نانو مواد (CUO چهاردرصد) و پلیمر (SBS پنج درصد) به صورت تفکیکی و ترکیبی در ۶ طرح مخلوط استفاده شده است. آزمایش‌های کلاسیک قیر شامل درجه نفوذ و نقطه نرمی جهت تعیین PI و آزمایش بازگشت الاستیک جهت تعیین خواص کشش پذیری قیر انجام شده است. آزمایش RV که جزء آزمایش‌های شارپ می‌باشد جهت تعیین ویسکوزیته قیر مورد بررسی قرار گرفت. برای تجزیه و تحلیل تغییرات در ترکیب شیمیایی قیر از FT-IR استفاده شد، DRS جهت تعیین میزان جذب انرژی در قیرها و آنالیز حرارتی قیرها با آزمایش DSC انجام شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد استفاده از PCM باعث بهبود Pi می‌شود و Pi قیر تا میزان ۲,۸۸ افزایش پیدا کرده است. بازگشت الاستیک قیر از ۲ درصد به ۸۱ درصد رسیده است. همچنین طبق نتایج FT-IR و DRS استفاده از Pcm می‌تواند گروه‌های عاملی مخرب در قیر را تقریباً از بین ببرد و میزان جذب انرژی قیر را تا بیش از ۹۰ درصد افزایش دهد، طبق نتایج از نمودارهای DSC استفاده از این مواد باعث افزایش ذخیره سازی انرژی در قیر و بهبود دمای تغییر فاز شده است.

واژه‌های کلیدی: مواد تغییر فاز دهنده، DSC, DRS، قیر، ذخیره انرژی

### ۱-مقدمه

تغییرات شدید آب و هوایی باعث بروز خرابی‌هایی از جمله شیارشدگی و ترک‌خوردگی حرارتی در روسازی‌های آسفالتی می‌شود (B. Ma et al, 2013). بروز ترک‌های دمای پایین در مخلوط آسفالتی ناشی از ضعف استقامت کششی مخلوط آسفالتی در برابر تنش کششی وارده ناشی از تغییرات دمایی می‌باشد (Mehling et al, 2010). این فرآیند، قیر را از

ظرفیت گرمای نهان ماده، بستگی دارد. مواد تغییر فاز دهنده در ۳ گروه ارگانیکها، غیرارگانیکها و یوتکتیکها تقسیم بندی می‌شوند هر یک از این گروهها دارای جوانب مثبت و منفی می‌باشد، بنابراین فرایند انتخاب نوع PCM به طور عمده وابسته به نیازهای نهایی آن است (G. Lane, 1983 et al). در این پژوهش از Cuo که یک ماده غیر ارگانیک می‌باشد به عنوان PCM استفاده شده است. مواد تغییر فاز دهنده هدایت حرارتی پایینی دارند و به همین دلیل گرمای جذب شده بر روی سطح آسفالت باقی می‌ماند و به لایه‌های پایین تر روسازی منتقل نمی‌شود، بر اساس تحقیقات انجام شده این موضوع باعث می‌شود که سطح روسازی ۶۰ درصد گرم‌تر از نمونه آسفالتی بدون ماده تغییر فاز دهنده شود به همین دلیل استفاده از یک ماده رسانا که بتواند حرارت را به لایه‌های پایین انتقال دهد از افزایش بیش از حد دمای سطح جلوگیری نموده و از بروز خرابی‌هایی که به دلیل اختلاف دمای سطح و کف روسازی به وجود می‌آید جلوگیری نموده و همچنین باعث افزایش ذخیره انرژی در آسفالت می‌شود (Liping. Li et al, 2016). در این پژوهش از نانولوله کربنی به عنوان ماده رسانا جهت جذب و انتقال حرارت استفاده شده است. از آنجایی که افزودن SBS در قیر بر ساختار فاز، خواص رئولوژیکی و پایداری حرارتی اثر می‌گذارد همچنین می‌تواند حساسیت حرارتی قیر را کاهش و مقاومت در برابر شیار شدگی را بهبود دهد از این ماده نیز به برای بهبود خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی استفاده شده است (Amini et al, 2016). از آنجایی که تعیین مقدار بهینه مواد افزودنی در قیر خارج از محدوده این پژوهش می‌باشد، تعیین درصد بهینه هر یک از مواد در قیر بر اساس پژوهش‌های پیشین انجام شده است. براساس پژوهش‌های پیشین که با افزودن ۰,۲ تا ۳ درصد MWCNT در قیر انجام شده است نتایج نشان می‌دهد خواص رئولوژیکی قیر، مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر خستگی، تراکم انرژی، ثبات مارشال، استحکام کششی غیر مستقیم و مقاومت در برابر ترک خوردگی در دمای پایین با افزایش درصد MWCNT در قیر بهبود پیدا می‌کند، ولی درصد بهینه MWCNT در قیر ۱,۵ درصد می‌باشد. در این

حالت ویسکو الاستیک به فاز الاستیک خطی برده که در پی آن موجب شکست قیر و ترک خوردگی مخلوط آسفالتی می‌گردد (Song et al, 2018). اگرچه وزن قیر به عنوان یک جزء تشکیل دهنده مخلوط‌های آسفالتی نسبت به سایر اجزا درصد پایینی است، اما اثر مهمی بر عملکرد بهینه، دوام و پایداری مخلوط‌های آسفالتی دارد. امروزه به منظور اصلاح قیرهای خالص و ارتقا عملکرد مخلوط‌های آسفالتی از مواد افزودنی اصلاح‌کننده قیر از جمله مواد پلیمری، نانو و ... استفاده می‌شود هرچند استفاده از بعضی از افزودنی‌ها غیر اقتصادی بوده و یا امکانات اجرایی را ندارند. یکی از اصلاح‌کننده‌های قیر که باعث بهبود خواص مکانیکی، بهبود خواص حرارتی و هوشمند سازی روسازی می‌گردد استفاده از مواد تغییر فاز دهنده است. مواد تغییر فاز دهنده با داشتن ویژگی‌های مطلوب جهت ذخیره سازی انرژی حرارتی و آزاد سازی آن به صورت کنترل شده، از روان شدن آسفالت و بروز خرابی‌های آبی ناشی از شیار شدگی در دماهای بالا جلوگیری می‌کند همچنین ترک‌های حرارتی در دماهای پایین و حساسیت دمایی را در مخلوط آسفالتی کنترل می‌کند (Laaouatni et al, 2017).

## ۲- پیشینه تحقیق

مواد تغییر فاز دهنده که مواد ذخیره کننده‌ی گرمای نهان نیز نامیده می‌شوند موادی با توانایی ذخیره و رها سازی مقدار زیادی از انرژی به شکل گرمای نهان ( $\Delta H$ ) در حین تغییر فاز خود هستند، به طوری که دما به میزان کم و یا اصلاً تغییر نکند. از آنجایی که مواد تغییر فاز دهنده توانایی تغییر حالت خود در یک محدوده دمایی معین را دارند این اثر تنها در هنگام تغییر فاز (در محدوده‌ی دمایی تغییر فاز) مشاهده می‌شود و زمانی که تمام مواد هنگامی که مواد تغییر فاز دهنده گرما را جذب نموده و از حالت جامد به حالت مایع تبدیل می‌شوند یک فرآیند *endothermic* می‌باشد و زمانی که مواد تغییر فاز دهنده از حالت مایع به جامد تغییر فاز دهند مقداری انرژی آزاد می‌شود و یک فرآیند *exothermic* می‌باشد. میزان جذب یا آزاد سازی انرژی حرارتی به محدوده دمایی که ماده در آن دما ذوب می‌شود و

پژوهش نیز از مقدار ۱,۵ درصد استفاده شده است. (Thampi. V V et al, 2015). تحقیقات پیشین نشان می‌دهد قیر حالتی بهینه‌ای در این حالت دارد و بیشترین توزیع پلیمری را در قیر به عنوان فاز پیوسته نشان می‌دهد. (2019, Sherif Elbasuney et al). همچنین در سال ۲۰۱۴ قصادادهید با هدف افزایش جذب انرژی در آسفالت و ذوب سریع برف از روی سطح آسفالت از ۱ درصد تا ۴ درصد قیر از CUO استفاده نمود، که درصد بیشتر این ماده باعث افزایش جذب انرژی در روسازی می‌شود. در این پژوهش نیز از مقدار ۴ درصد استفاده کرده‌ایم. (Tengfei. Nian et al, 2018). براساس مطالعات گذشته درخصوص کاربردهای SBS و با توجه به ملاحظات هزینه‌ای و تامین مشخصات حداقلی درصد بهینه این ماده در محدوده ۴ تا ۵ درصد می‌باشد. در این پژوهش ۵ درصد SBS

در قیر افزوده شده است (S. Sagadevan et al, 2015). جدول ۱ بیانگر طرح اختلاطها و مقادیر افزودنی می‌باشد. حسن لطیفی و پرهام حیاتی در سال ۲۰۱۷ از نفت سفید به عنوان یکنواخت کننده مخلوط قیر با نانو لوله‌های کربنی در مخلوط‌های آسفالتی گرم استفاده گردید. در این پژوهش از دو روش اختلاط تر و ساده برای ساخت نمونه‌ها قیری و آسفالتی استفاده شد. روش اختلاط تر، روشی است که در آن نفت سفید به عنوان یکنواخت کننده در آن استفاده می‌شود. مخلوط‌های ساخته شده با این روش همگن تر هستند. در این پژوهش نیز از نفت سفید برای باز شدن نانو مواد از یکدیگر و پراکندگی همگن تر در قیر استفاده شد. (H.Latifi, P.Hayati, 2018)

جدول ۱. طرح اختلاطها و مخفف‌های آنها

مخفف	طرح اختلاط
N	قیر خالص
C	CuO %4 + قیر
M	MWCNT %1/5 + قیر
CS	SBS 5% + CuO %4 + قیر
MS	SBS 5% + MWCNT %1/5 + قیر
MCS	SBS 5% + CuO %4 + MWCNT %1/5 + قیر

جدول ۲. مشخصات و استانداردها

Properties	Penetration at 25°C	Softening Point	Elastic Recovery	Rotational Viscosity at 135°C	Rotational Viscosity at 160°C	Rotational Viscosity at 175°C
Standard	ASTM-D5	ASTM-D36	ASTM-D6084	ASTM-D4402	ASTM-D4402	ASTM-D4402
Unit	(mm×0.1)	(°C)	(%)	(Pa.s)	(Pa.s)	(Pa.s)
Specification	> 31	-	-	< 3	< 3	< 3
N	64	50	2	0.39	0.16	0.08
C	54	55	10	0.63	0.22	0.14
M	53	56	7	0.76	0.29	0.15
CS	42	67.2	70	1.24	0.45	0.28
MS	43	72	80	1.85	0.63	0.395
MCS	43	72.8	81	2.14	0.72	0.42

### ۳- روش تحقیق

نیمه هادی شناخته می شود این مواد در ذخیره سازی انرژی کاربرد بالقوه‌ای دارند همچنین این مواد به راحتی با پلیمرها مخلوط شده و از لحاظ فیزیکی و شیمیایی نسبتاً پایدار می‌باشند (Ameri, M et al, 2016). به دلیل انتقال حرارتی پایین CuO از Mwcnt به عنوان یک ماده رسانا و انتقال دهنده حرارت استفاده شده است. Mwcnt دارای نسبت سطح به حجم بالایی بوده و به دلیل ظرفیت بالا در سیستم‌ها و گروه‌های انرژی کاربرد دارد (Ziari, 2014, et al). در جدول ۱ حالات مختلف استفاده از مواد افزودنی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است ذکر شده است. در این پژوهش از قیر ۷۰/۶۰ که تولید شرکت قیر نفت جی می‌باشد. استفاده شده است، در جدول ۲ مشخصات قیر مصرفی و مواد ارائه شده است.

همانطور که گفته شد در این پژوهش از مواد نانو (نانو اکسید مس)، رسانا (نانولوله کربنی) و مواد پلیمری (SBS) با اهداف مشخص استفاده شده است، NanoCuO که به عنوان PCM استفاده شده است، براساس مطالعات انجام گرفته مشخص گردید این ماده دارای ظرفیت گرمایی بالا، سرعت عملکرد بالا، پایدار بودن در برابر سیکل‌های ذخیره سازی و آزاد سازی انرژی، دارای مقاومت کم در برابر انتقال و ابرخازن می‌باشد. در تحقیقات نظری و ریاضی، CuO با مقادیر ۰ تا ۵ درصد وزنی سیمان جایگزین سیمان در بتن شد. نتایج نشان داد که اضافه کردن Nano-CuO آزاد شدن انرژی هیدراسیون را سرعت می‌بخشد. از طرفی Nano-CuO مقاومت فشاری نمونه‌ها را افزایش داد.

نانو ذرات اکسید مس به رنگ قهوه‌ای متمایل به سیاه ظاهر می‌شود، این ماده از اکسید فلزات بوده و به عنوان یک ماده




### ۴-تهیه‌ی آماده سازی نمونه‌ها

اختلاط با سرعت بالاتر می‌تواند موجب خرد شدن مواد نانو گردد. در انتها با دستگاه اختلاط کننده برش پایین در دمای حدوداً ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد فرآیند اختلاط را تا زمانی که حدود ۲ درصد نفت سفید در مخلوط باقی بماند ادامه می‌دهیم. در طرح اختلاط‌هایی که از استایرن بوتادین استایرن استفاده شده است ابتدا باید قیر با استفاده از همزن دور تند با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه و به ۴۵ دقیقه در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد مخلوط شود و بعد از آن افزودنی‌های دیگر اضافه شود. بعد از آماده سازی نمونه‌ها آزمایش کنترل کیفی توسط میکروسکوپ فلوروسنت انجام شد که نشان دهنده ترکیب هموزن قیر و مواد افزودنی بود. شکل ۳ مراحل آماده سازی قیر را نشان می‌دهد (R. Peymanfar et al, 2017). حسن لطیفی و پرهام حیاتی در سال ۲۰۱۷ صورت گرفت (H.Latifi, 2018). P.Hayati، از نفت سفید به‌عنوان یکتواخت کننده مخلوط قیر با نانو لوله‌های کربنی در مخلوط‌های آسفالتی گرم استفاده گردید. در این پژوهش از دو روش اختلاط‌تر و ساده برای ساخت نمونه‌ها قیری و آسفالتی استفاده شد. روش اختلاط تر روشی است که در آن از نفت سفید

جهت اختلاط همگن قیر و مواد افزودنی ابتدا مواد نانو را با دستگاه اولتراسونیک دیسپرس کرده و بعد با قیر ترکیب می‌نماییم. برای این کار مواد نانو با یک مایع حلال مخلوط کرده و در دستگاه اولتراسونیک قرار می‌دهیم، در این پژوهش از نفت سفید به دلیل درجه اشتعال مناسب (۶۵ درجه سانتی‌گراد) و قابلیت حل شدن در قیر به عنوان حلال استفاده شده است. اولتراسونیک کردن مواد نانو در چند مرحله انجام گرفت به این صورت که در هر مرحله مقدار ۱۰۰ گرم نفت سفید را با ۱۰ گرم مواد نانو ترکیب کرده و داخل دستگاه التراسونیک قرار داده تا به مدت ۲۰ دقیقه تحت اثر امواج قرار گرفته و دیسپرس شوند و بعد از دیسپرس شدن با قیر مخلوط می‌گردند. بعد از انجام اولتراسونیک، نفت موجود در ظرف را تا جای ممکن خالی کرده و مابقی آن را با ۱۰۰ گرم قیر در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد اضافه نموده و به صورت دستی هم می‌زنیم، تا یک مخلوط تقریباً همگن به دست آید، پس از آن ترکیب به دست آمده را در حجم قیر مورد نیاز اضافه کرده و با دستگاه اختلاط برش بالا به مدت ۵ دقیقه و با سرعت ۲۰۰۰ دور بر دقیقه ترکیب مخلوط می‌نماییم. توجه شود که

مخلوط آسفالتی گرم در برابر پدیده خستگی مخصوصاً در دماهای پایین را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهند (H.Latifi, P.Hayati, 2018). در این پژوهش نیز از نفت سفید برای باز شدن نانو مواد از یکدیگر و پراکندگی همگن‌تر آنها در قیر استفاده شد.

به عنوان یکنواخت کننده استفاده شده است. مخلوط‌های ساخته شده با روش اختلاط‌تر همگن‌تر هستند و نمونه قیرهای اصلاح شده با نانو لوله‌های کربنی که بوسیله روش اختلاط‌تر تهیه شده‌اند از مقادیر افزودن نانو لوله‌های کربنی به روش اختلاط‌تر مقاومت نمونه‌های

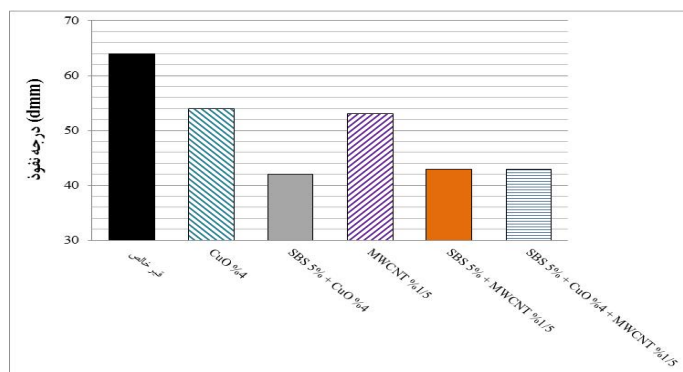
Description	temperature	Time (minutes)
STEP 1 → Ultrasonic of nanomaterial Cuo-Mwcnt	at ambient temperature	20
STEP 2 → Mix of 100gr bitumem with nanomaterial Cuo-Mwcnt → after ultrasonic.	120°c	almost combined
STEP 3 → Mix SBS and Bitumen with high shear mixer with 4000 round per minute	160°c	45
STEP 1 →  STEP 2 →  STEP 3 → 		
STEP 4 → Mix nanomaterial and Bitumen with high shear mixer with 2000 round per minute	120°c	5
STEP 5 → Mix nanomaterial and Bitumen with high shear mixer	120°c	until remain 2% petroleum

شکل ۳. مراحل آماده سازی قیر

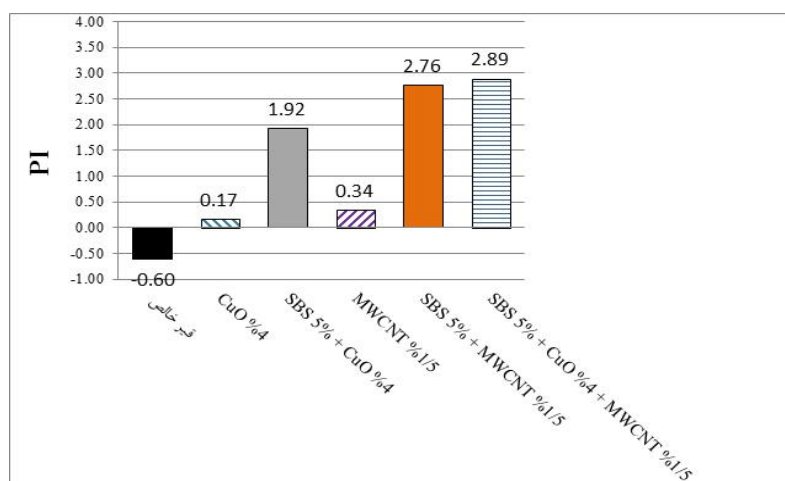
#### ۴- آزمایشات انجام شده بر روی نمونه‌های قیری

به درجه حرارت انجام می‌شود. نتایج حاصل از این آزمایش در نمودارها نشان داده شده است. با تعیین درجه نفوذ و نقطه نرمی هر یک از قیرها می‌توان شاخص نفوذ (PI) را بدست آورد، شاخص نفوذ معیاری جهت تعیین حساسیت قیرها در برابر حرارت می‌باشد. مقدار PI از ۳- برای قیرهای با حساسیت دمایی بالا تا حدود ۷+ برای قیرهای به شدت دمیده با حساسیت دمایی پایین می‌باشد. برای آسفالت‌های معمولی PI بهتر است بین ۱- تا ۱+ باشد، جهت تعیین PI از فرمول ۱ استفاده می‌شود (ASTM-D3418).

در این پژوهش آزمایش‌های کلاسیک قیر شامل درجه نفوذ (Selvi. N et al, 2018). نقطه نرمی (ASTM-D5) و بازگشت الاستیک قیر (ASTM-D36). طبق استانداردهای ASTM-D5، ASTM-D6084 و D36 انجام شده است، همچنین آزمایش RV که جز آزمایش‌های شارپ می‌باشد طبق استاندارد ASTM-D4402 جهت تعیین ویسکوزیته قیر انجام پذیرفت. آزمایش درجه نفوذ قیر برای تعیین سختی نسبی قیرها و آزمایش نقطه نرمی جهت مقایسه قیرها نسبت



شکل ۱. درجه نفوذ قیر خالص و اصلاح شده با مقادیر مختلف افزودنی



شکل ۲. PI نمونه‌های قیری به صورت اصلاح شده

بالا تا حدود ۷+ برای قیرهای به شدت دمیده با حساسیت دمایی پایین می‌باشد. برای آسفالت‌های معمولی PI بهتر است بین ۱- تا ۱+ باشد، جهت تعیین PI از فرمول زیر استفاده می‌شود (ASTM-D3418).

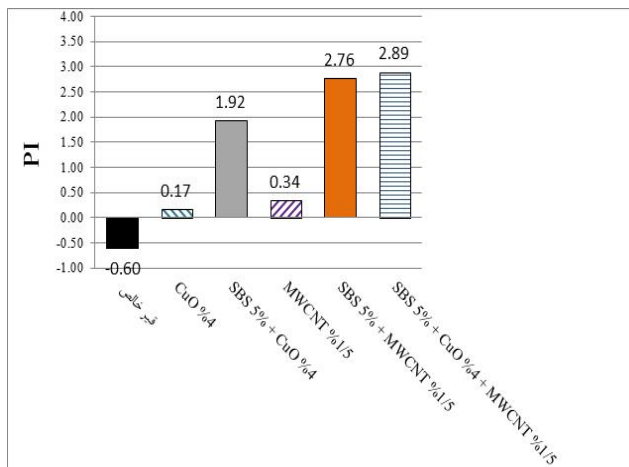
$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A}$$

که نشان‌دهنده کاهش حساسیت قیر در برابر حرارت می‌باشد.

با تعیین درجه نفوذ و نقطه نرمی هر یک از قیرها می‌توان شاخص نفوذ (PI) را بدست آورد، شاخص نفوذ معیاری جهت تعیین حساسیت قیرها در برابر حرارت می‌باشد. مقدار PI از ۳- برای قیرهای با حساسیت دمایی (۱)

$$A = \frac{\log 800 - \log P}{T - 25}$$

A, P و T به ترتیب حساسیت حرارتی، درجه نفوذ و دمای نقطه نرمی می‌باشد. طبق نمودار ۲ PI قیرخالص ۰,۶- است که در طرح اختلاط MCS به ۲,۸ می‌رسد

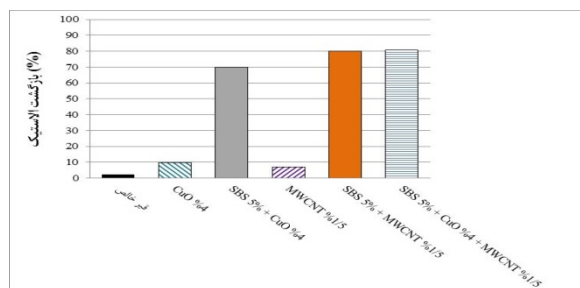


شکل ۲. PI نمونه‌های قیری به صورت اصلاح شده

### نتایج آزمایشات الاستیک

نمودار نشان داده شده است، براساس نمودار ۳ با افزودن مواد نانو و پلیمری کشش پذیری قیر تا ۸۱ درصد برای طرح اختلاط MCS افزایش یافته است که نشان دهنده بهبود خواص کشش‌پذیری قیر می‌باشد.

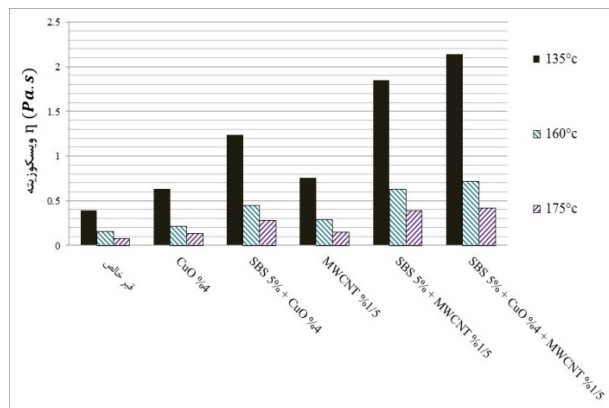
این آزمایش خواص کششی مواد قیری را بر اساس استاندارد ASTM D6084 بررسی کرده است، هرچه کشش پذیری قیر بیشتر شود شکست قیر در دماهای پایین کمتر می‌گردد. نتایج حاصل از این آزمایش در



شکل ۳. خاصیت برگشت پذیری قیر خالص و اصلاح شده

دمای ۱۳۵، ۱۶۰ و ۱۷۵ درجه سانتی گراد بدست آید. نمودار ۴ نتایج حاصل از آزمایش ویسکوزیته دورانی را در سه دمای ۱۳۵، ۱۶۰ و ۱۷۵ نمایش داده است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها RV را کمتر از ۳ پواز نشان داد.

برای آنکه چسبنده‌های قیری، به ویژه قیرهای اصلاح شده بتوانند در تجهیزات اختلاط گرم، به راحتی پمپاژ و جابه‌جا شوند و به راحتی در دمای اختلاط با مصالح سنگی مخلوط شوند، کندروانی پیرنشده‌ی آنها طبق مشخصات باید حداکثر سه پواز باشد و برای همه درجات قیر بایستی در



شکل ۴. ویسکوزیته ی قیر خالص و اصلاح شده

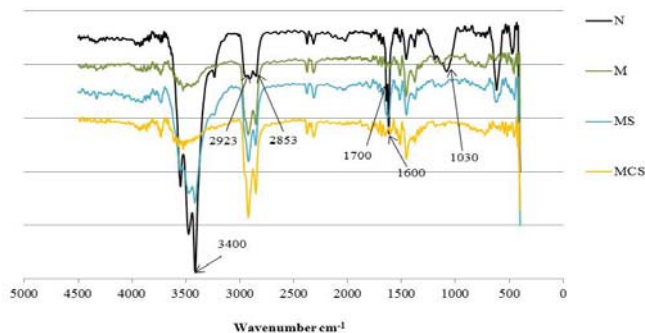
### بررسی آزمایشات انجام شده بر روی نمونه‌ها در زمینه آزمایشات شیمی (FTIR-DRS-DSC)

در  $1600^{-1}$  سانتی‌متر محتویات بند آروماتیک  $C=C$  است که با آزمایش FT-IR اندازه‌گیری می‌شود که این نشانه‌دهنده از ترکیبات آروماتیک فرار نفتین و ذرات سنگین‌تر است. به طور کلی ترکیبات آروماتیک قیر با افزایش عمر آزمایشگاهی و عمر بهره برداری تمایل به افزایش دارند. (Biao. Ma et al, 2016). طبق نمودارهای، ۵ و ۶ باند جذبی در ناحیه  $1076, 2$   $CM^{-1}$  مربوط به گروه عاملی  $S=O$  است، همانطور که گفته شد این گروه عاملی باعث پیرشدگی کوتاه مدت قیر می‌شود. این باند جذبی در طرح اختلاط MCS از بین رفته است. باند جذبی در ناحیه  $3415, 9$   $CM^{-1}$  و  $1618$   $CM^{-1}$  مربوط به ارتعاشات کششی  $O-H$  و  $C=O$  موجود در قیر می‌باشد که در طرح اختلاط‌های دیگر بی اثر شده است.

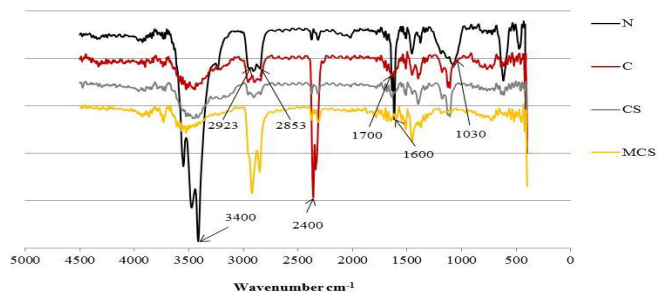
طیف سنجی (FTIR) مطابق استاندارد ASTM-D5477 برای بدست آوردن پیرشدگی قیر استفاده شده است. (Biao. Ma et al, 2016). با استفاده از طیف سنجی بازتابی (انعکاس) نور (DRS)، برای جذب انرژی در قیر انجام شده است، و با توجه به استاندارد، ASTM-D3418، آزمایش (DSC) برای تجزیه و تحلیل حرارتی قیرها مورد بررسی قرار گرفت. (ASTM-D5477).

### نتایج آزمایشات FTIR

برای تجزیه و تحلیل تغییرات در ترکیب شیمیایی قیر از FT-IR استفاده شد. باندهای  $S=O$  به از پیرشدگی کوتاه مدت قیر و باندهای  $C=O$  به نمایندگی از پیرشدگی بلندمدت قیر می‌باشد.



شکل ۵. نتایج آزمایش FTIR با ترکیبات نانو لوله کربنی

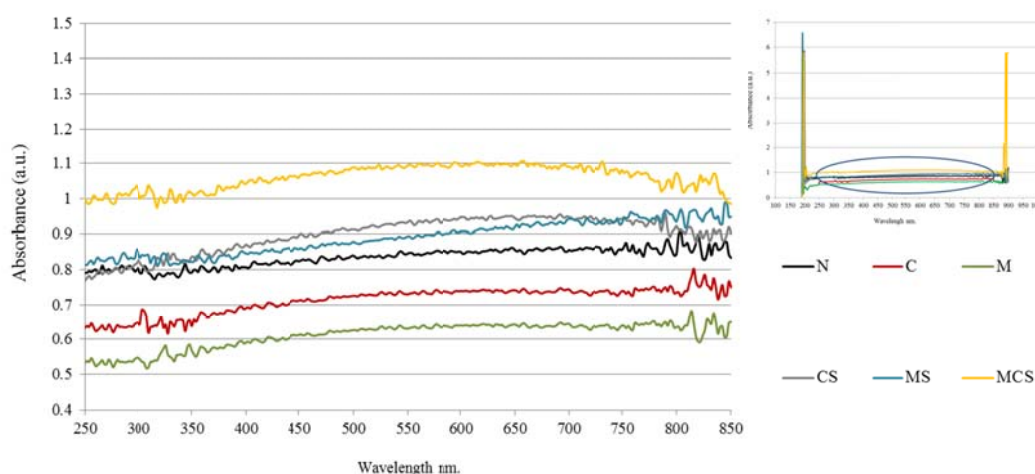


شکل ۶. نتایج آزمایش FTIR با ترکیبات نانواکسید مس

### نتایج آزمایشات DRS

آزمایش در ابتدا و انتهای آن در محدوده طول موج ۲۵۰ تا ۸۵۰ نانو متر، تحلیل این آزمایش بر اساس این نمودار صورت پذیرفت. همانطور که در شکل مشخص است میزان جذب انرژی نمونه حاوی افزودنی‌ها نسبت به سایر نمونه‌ها جذب انرژی بیشتری دارد و نمونه‌هایی که دارای ماده نانو لوله کربنی و یا اکسید مس می‌باشد جذب انرژی کمتر و یا حتی جذب انرژی آن‌ها نسبت به قیر خالص نیز کمتر است. همانطور که در شکل (۷) مشخص است، نمونه‌هایی از قیر که با نانو لوله کربنی اصلاح شده‌اند. انتقال گرمایی (حرارتی) نانولوله‌های کربنی بسیار بالاست به عبارت دیگر نانولوله کربنی رسانایی گرمایی بالایی دارد و ما در این پژوهش به همین دلیل از نانولوله کربنی در این طرح‌های اختلاط استفاده کرده‌ایم. زیرا اکسید مس در این پژوهش به عنوان PCM (ماده تغییر فاز دهنده) استفاده شده است. مواد تغییر فاز دهنده هدایت حرارتی پایینی دارند و به همین دلیل گرمای جذب شده بر روی سطح آسفالت باقی می‌ماند و به لایه‌های پایین‌تر روسازی منتقل نمی‌شود.

آزمایش DRS بر اساس تاباندن نور به سطح یک ماده و اندازه‌گیری میزان بازتاب-عبور پخش و مقایسه با یک نمونه استاندارد عمل می‌کند. همچنین این دستگاه دارای قابلیت طیف‌گیری از نمونه‌های جامد به روش انعکاسی می‌باشد. با انجام این آزمایش می‌توان میزان جذب انرژی هر یک از قیرها را مورد بررسی قرار دهیم (Pfeiffer. J.H et al, 1936). نانولوله کربنی به دلیل رسانایی بالا و ساختار تو خالی گزینه مناسبی برای جذب انرژی و هدایت آن می‌باشد (Mikhailenko. P et al, 2015). نانولوله کربنی به دلیل انتقال و هدایت حرارتی بالا و همچنین میزان جذب گرما و رسانای بالایی که دارد و توانایی رهاسازی انرژی به محیط را دارد (Yang. H et al, 2015). شکل شماره ۷ نتایج این آزمایش را در ۲ حالت مختلف نشان می‌دهد. امواج تابیده شده بر روی نمونه‌ها در محدوده ۱۹۰ تا ۹۰۰ نانومتر می‌باشد که در شکل نشان داده شده است ولی به دلیل داشتن خطا در ابتدا و انتهای آزمایش نمی‌توان نمودارها را به صورت دقیق مورد تحلیل قرار داد. به همین دلیل با حذف خطای



شکل ۷. نتایج آزمایش DRS در طول موج ۲۵۰ تا ۸۵۰ نانومتر

### نتایج آزمایشات DSC

تحمل دمایی خیلی بالایی دارد. اما رسانای خوبی نیست. و به عبارتی پلیمرها SBS جذب گرمایی پایینی دارند و ظرفیت گرمایی پایین را نیز دارا می‌باشند. به طور کلی در طرح اختلاط‌های این پژوهش CuO کمک می‌کند که SBS و CNT بهتر شوند. در آزمایش DSC نیز همانند سایر آزمایش‌های شیمی انجام گرفته در این پژوهش ترکیب MCS نتیجه مطلوب‌تری را نشان می‌دهد و احتمال بروز پدیده شیارشدگی را کاهش می‌دهد. با تحلیل نمودار DSC مواد تغییر فاز دهنده موجب ذخیره انرژی در قیر می‌شود این انرژی در دمای تغییر فاز قیر آزاد می‌شود (Abdullah. N et, 2017). با تحلیل نمودار DSC متوجه شدیم که مواد تغییر فاز دهنده موجب ذخیره انرژی در قیر می‌شود این انرژی در دمای تغییر فاز قیر آزاد می‌شود (Kumaresan, , 2011). (G et al

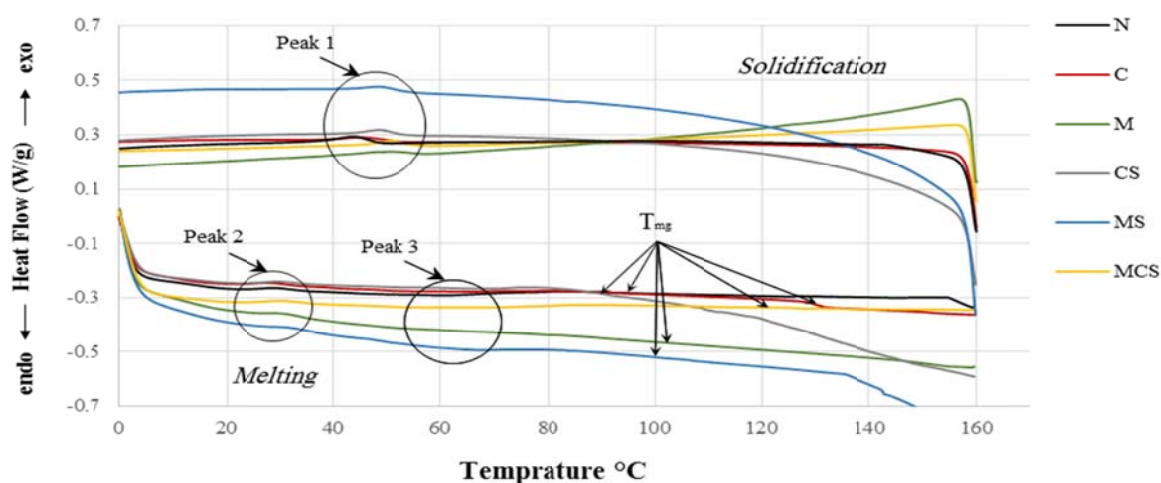
با مقایسه نمودار MS و MCS استنباط می‌کنیم که CuO کمک می‌کند SBS در قیر بهتر شوند. ترکیب MCS نتیجه مطلوبی را نشان می‌دهد و احتمال بروز پدیده شیارشدگی را کاهش می‌دهد. همان طور که انتظار داشته‌ایم، نانولوله‌های کربنی هم انتقال دهنده گرمای خیلی خوبی دارند و ظرفیت گرمایی بالایی را نیز دارا می‌باشند. این در حالی است که اکسید مس ذخیره سازی و

تجزیه و تحلیل حرارتی از قیرها با DSC انجام شد، روند کاهش و افزایش دما با سرعت ۱۰ سانتی‌گراد بر ثانیه انجام شد. میزان انرژی ذخیره شده در قیرها به محتوی PCM و آنتالپی ذوب آن بستگی دارد. در این آزمایش فرآیند ذوب و جامد شدن به ترتیب گرماگیر و گرماده نامیده می‌شوند. فرآیند گرماگیری و گرمادهی به ترتیب نشانگر آغاز فرآیند ذوب و انجماد است. این فرآیند را می‌توان با محاسبه سطح زیر منحنی‌های اوج تعیین کرد. شکل ۸ نتایج را نشان می‌دهد (Andreatta, A et al, 1988).

در مقایسه CS و MS می‌توان مشاهده کرد که MS از همان ابتدا و در دماهای پایین دچار افت وزنی شده است. این در حالی است که CS تا دمای تقریباً ۹۰ درجه سانتی‌گراد افت وزنی چندانی نداشته است. این مهم نشان دهنده این است که اکسید مس تحمل دمایی بالاتری دارد که تأیید کننده نقش این ماده به عنوان PCM در طرح اختلاط‌های این پژوهش می‌باشد. همان طور که انتظار داشته‌ایم، نانولوله‌های کربنی هم انتقال دهنده گرمای خیلی خوبی دارند و ظرفیت گرمایی بالایی را نیز دارا می‌باشند. این در حالی است که اکسید مس ذخیره سازی و

نداشته است. این مهم نشان دهنده این است که اکسید مس تحمل دمایی بالاتری دارد که تأییدکننده نقش این ماده به عنوان PCM در طرح اختلاط‌های این پژوهش می‌باشد. با تحلیل نمودار DSC که مواد تغییر فاز دهنده موجب ذخیره انرژی در قیر می‌شود این انرژی در دمای تغییر فاز قیر آزاد می‌شود. به عبارت دیگر میزان ذخیره سازی انرژی حرارتی در آسفالت حاوی مواد تغییر فاز دهنده افزایش می‌یابد و دمای تغییر فاز نیز بهبود می‌یابد. در این آزمایش نیز ترکیب MCS نتیجه مطلوب‌تری را نشان می‌دهد.

خوبی دارند و ظرفیت گرمایی بالایی را نیز دارا می‌باشند. این در حالی است که اکسید مس ذخیره سازی و تحمل دمایی خیلی بالایی دارد. اما رسانای خوبی نیست. SBS و به عبارتی پلیمرها جذب گرمایی پایینی دارند و ظرفیت گرمایی پایین را نیز دارا می‌باشند. با مقایسه  $T_g$  (glass transition temperature) یا همان دمای مرحله تغییر (Abdullah. N et al,2017). MS و CS می‌توان مشاهده کرد که MS از همان ابتدا و در دماهای پایین دچار تغییر حالت شده است. این در حالی است که CS تا دمای تقریباً ۹۰ درجه سانتی‌گراد تغییر حالت



شکل ۸. نتایج آزمایش DSC

جدول ۴. خلاصه نتایج آزمایش DSC ذوب و سفت‌سازی

طرح اختلاط	سطح زیر پیک ۱ (mJ) میلی ژول	وزن نمونه (mg) میلی گرم	گرمای انجماد (J/g) گرم/ژول	سطح زیر پیک (mJ) میلی ژول	گرمای ذوب (J/g) گرم/ژول	ظرفیت گرمایی ویژه (Cp) (mJ/g×k)
N	۱۳,۰۵	۱۰,۹۲	۱,۲	۴,۶۱	۰,۴۲	۰,۴۹۲
C	۸,۰۶	۱۰,۸۴	۰,۷۴	۴,۷۷	۰,۴۴	۹۲,۶
M	۱۰,۱۹	۱۱,۰۳	۰,۹۲	۳,۸۲	۰,۳۵	۳۱,۳
CS	۱۰,۸۹	۱۰,۶۵	۱,۰۲	۴,۷۷	۰,۴۵	۲۰,۵
MS	۷,۹۷	۱۰,۵۵	۰,۷۶	۳,۹۱	۰,۳۷	۶,۰۴۷
MCS	۹,۱۷	۱۰,۷۰	۰,۸۶	۴,۷۵	۰,۴۴	۵۶,۴

## ۵- نتیجه گیری

و در این پژوهش به همین دلیل از نانولوله کربنی در طرح‌های اختلاط استفاده شده است. تا انرژی ذخیره شده توسط اکسید مس (ماده تغییر فاز دهنده) به لایه‌های پایین‌تر روسازی منتقل کند. میزان جذب انرژی نمونه حاوی سه افزودنی (MCS) نسبت به سایر نمونه‌ها جذب انرژی بیشتری دارد. به عنوان یک نتیجه کلی دیگر مطابق آزمایش DRS استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در قیر موجب افزایش میزان جذب انرژی در قیر می‌شود.

به عبارت دیگر مواد تغییر فاز دهنده از کاهش و افزایش بیش از حد دمای آسفالت نیز جلوگیری می‌نماید.

-مطابق نتایج آزمایش DSC، نشان داد که اکسید مس تحمل گرمایی و دمای تغییر فاز بالاتری دارد که تأیید کننده نقش این ماده به عنوان PCM در طرح اختلاط‌های این پژوهش می‌باشد. همان‌طور که انتظار داشته‌ایم، نانولوله‌های کربنی انتقال دهنده گرمای خیلی خوبی است و اکسید مس ذخیره سازی و تحمل دمایی خیلی بالایی دارد. همچنین با تحلیل نمودار DSC به این نتیجه رسیدیم که مواد تغییر فاز دهنده موجب ذخیره انرژی در قیر می‌شود این انرژی در دمای تغییر فاز قیر آزاد می‌شود.

به عبارت دیگر میزان ذخیره سازی انرژی حرارتی در آسفالت حاوی مواد تغییر فاز دهنده افزایش می‌یابد و دمای تغییر فاز نیز بهبود می‌یابد. در این آزمایش نیز ترکیب MCS نتیجه مطلوب‌تری را نشان می‌دهد.

-در قیر اصلاح شده توده‌های اکسید مس، نانولوله‌های کربنی و SBS در سراسر فضای قیر پراکنده گردیده است. در واقع ابتدا توسط عملیات اولتراسونیک مواد افزودنی از یکدیگر جدا شدند و سپس توسط عملیات هایشیر به صورت همگن و بدون آسیب رسیدن به آن‌ها در قیر پراکنده گردیدند. در بررسی انجام شده از ترکیب MCS حاکی از مطلوب بودن و توزیع همگن هر سه ماده افزودنی با هم در قیر می‌باشد.

-افزودنی‌های این پژوهش در همه ترکیبات موجب افزایش مقاومت کششی آسفالت به نسبت قیر خالص شده است.

هدف از این پژوهش اصلاح خواص قیر با استفاده از افزودنی‌های نانولوله‌های کربنی، SBS و نانو اکسید مس به عنوان ماده تغییر فاز دهنده، به منظور بهبود خصوصیات عملکردی آسفالت و کنترل انرژی گرمایی آسفالت در جهت دلخواه می‌باشد. پس از تعیین فرآیند اختلاط افزودنی‌ها در قیر و ساخت نمونه‌های قیری، آزمایش‌های دسته شیمی و آزمایش‌های رایج قیر بر روی آنها انجام پذیرفت.

-قیرهای اصلاح شده با هر سه ماده افزودنی MCS، در آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی، کشش‌پذیری و ویسکوزیته، بهبود خصوصیات رئولوژیکی بیشتری را موجب شدند. به عنوان یک نتیجه کلی از آزمایش بازگشت الاستیک، بازگشت الاستیک قیر حاوی مواد تغییر فاز دهنده، مخصوصاً طرح‌های اختلاط حاوی پلیمر SBS افزایش یافته است.

-SBS باعث افزایش  $G^*$  و کاهش  $\delta$  شده است. و از این طریق مقاومت در برابر شیارشدگی را افزایش داده است. ترکیب MCS بهبود خواص رئولوژیکی بهتری را نشان می‌دهد.

-از آزمایش رئومتر تیر خمشی (BBR) که به منظور ارزیابی ترک خوردگی حرارتی در دماهای پایین انجام میشود، نیز می‌توان استفاده کرد.

-به عنوان یک نتیجه کلی از آزمایش FTIR، PCMs می‌توانند گروه‌های عاملی مخرب که باعث پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت در قیر می‌شود را جذب کنند و میزان جذب انرژی قیر را تا بیش از ۹۰ درصد افزایش دهد. با توجه نتایج آزمایش FTIR، یکی از اهداف این پژوهش که واکنش بین مواد نانو و ایجاد مواد تغییر فاز دهنده به صورت کامپوزیت می‌باشد، محقق شده است. ترکیب MCS به عنوان ترکیب منتخب قابل ارائه می‌باشد.

-بر اساس نتایج آزمایش DRS، نمونه‌هایی از قیر که با نانولوله کربنی اصلاح شده‌اند. جذب انرژی کمتری دارند. به عبارت دیگر نانولوله کربنی رسانایی گرمایی بالایی دارد

می‌توان MCS را به عنوان ترکیب منتخب این پژوهش در نظر گرفت. ترکیبی که در آن SBS خواص رئولوژیکی آسفالت را بسیار بهبود می‌بخشد و حساسیت رطوبتی آن را کاهش می‌دهد. نانو اکسید مس با جذب انرژی و ذخیره سازی آن از طرفی از کاهش بیش از حد دمای آسفالت جلوگیری می‌کند و از طرف دیگر با بالا بردن ظرفیت گرمایی آسفالت مانع از ایجاد پدیده شیارشدگی در روسازی می‌شود و یا لافل آن را به تأخیر می‌اندازد. نانو لوله کربنی نیز به عنوان یک رسانای گرمایی خوب، انرژی ذخیره شده توسط ماده تغییر فاز دهنده اکسید مس را به تدریج به لایه‌های پایین‌تر روسازی انتقال می‌دهد.

بیشترین افزایش مقاومت کششی در MCS صورت گرفته است. پس از آن MS سپس CS بیشترین افزایش در مقاومت کششی را داشته‌اند. در هر سه ترکیب اختلاط مذکور SBS وجود دارد. بنابراین همان‌طور که انتظار می‌رفت SBS خواص رئولوژیکی را به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد.

-در نمونه‌های مذکور مخصوصاً MCS بهبود قابل توجه در حساسیت رطوبتی آسفالت را نسبت به آسفالت سنتی نشان می‌دهد. بنابراین از نظر حساسیت رطوبتی نیز می‌توان MCS را به عنوان ترکیب مطلوب‌تر انتخاب کرد..  
-MCS تقریباً در همه آزمایش‌ها دارای نرخ و میزان بهبودی بیشتری نسبت سایر ترکیبات بوده است. در نتیجه

## ۶- مراجع

*Engineering*. Vol. 4, No. 3, 192-198.  
-Amirkhanian. A.N, Xiao. F, Amirkhanian. S.N, (2011). Characterization of unaged asphalt binder modified with carbon nanoparticles, *Int J of Pavement Res Technol*. 5 (4), 281-286.  
-Amirkhanian. A.N, Xiao. F, Amirkhanian. S.N, (2011). Evaluation of high temperature rheological characteristics of asphalt binders with carbon nano particles, *J. Test. Evaluat*. 39 (4), 1-9.  
-Anna .Sambale et al. (2019). Determination of moisture gradients in polyamide 6 using StepScan DSC. *Thermochimica Acta* 672, 150-156.  
-ASTM D3418 – 15. Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies  
-ASTM D5477. Standard Practice for Identification of Polymer Layers or Inclusions by Fourier Transform Infrared Microspectroscopy (FT-IR).  
-ASTM D6648-08 Standard test method for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the Bending Beam Rheometer (BBR), (2016).  
-B. Golestani, B. H.Nam, F. Moghadas Nejad, S. Fallah, (2015). Nanoclay application to asphalt concrete:

-A. Ghavibazoo, M. Abdelrahman, (2013). Composition analysis of crumb rubber during interaction with asphalt and effect on properties of binder, *Int. J. Pavement Eng*. 14 (5), 517-530.  
-AASHTO guide for design of pavement structures, (1993).  
-AASHTO T 313 Standard method of test for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the Bending Beam Rheometer (BBR), (2012).  
-AASHTO T 315. (2011). Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), American Association of State Highway and Transportation Officials, *Washington, DC, USA*.  
-AASHTO T. 316-13. (2017). Standard Method of Test for Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer, American Association of State and Highway Transportation Officials, *Washington DC, USA*.  
-Abdullah. N. Olimat, Ahmed Al-Salaymeh, Ayman Al-Maaitah. (2017). Studying the Stability of Melting and Solidification Behavior of Phase Change Material. *Journal of Applied Research on Industrial*

- du Bois P., (1966). Die Temperatur des Asphaltbitumens beim Übergang in den glasigen Zustand. Bitumen-Teere-Asphalte-Peche, Vol. 17, No. 7, 254-255.
- EN 14771 Bitumen and bituminous binders –Determination of the flexural creep stiffness – Bending Beam Rheometer (BBR), (2012).
- Eyad. Masad, A.(Tom). Scarpas, Kumbakonam.R. Rajagopal, Emad. Kassem, Saradhi Koneru & Cor Kasbergen, (2016). Finite element modelling of field compaction of hot mix asphalt. Part II: Applications, Int. J. *Pavement Eng.* Vol.17, Iss.1.
- H. Latifi, P. Hayati. (2018). Evaluating the effects of the wet and simple processes for including carbon Nanotube modifier in hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 164, 326–336.
- Jonathan P. Blitz. (1998). Diffuse Reflectance Spectroscopy. Modern Techniques in Applied Molecular Spectroscopy, Edited by Francis M. Mirabella. Techniques in Analytical Chemistry Series. ISBN 0-471-12359-5, John Wiley & Sons, Inc.
- Kumaresan, G., Velraj, R., & Iniyar, S. (2011). Thermal analysis of d-mannitol for use as phase change material for latent heat storage. *Journal of Applied Sciences*, 11(16), 3044-8.
- M. Ameri, S. Kouchaki, H. Roshani, (2013). Laboratory evaluation of the effect of nanoorganosilane anti-stripping additive on the moisture susceptibility of HMA mixtures under freeze–thaw cycles, *Constr. Build. Mater.* 48. 1009-1016.
- M. Arabani, M. Faramarzi, (2015). Characterization of CNTs-modified HMA's mechanical properties, *Constr. Build. Mater.* 83, 207–215.
- M.O. Marasteanu, A. Basu, (2004). Stiffness m-value and the low temperature relaxation properties of asphalt binders, *Road Mater. Pavement Des.* 5. 121–131.
- Mehmet Yilmaz, Muhammed Ertug̃rul Celog̃lu. (2013). Effects of SBS and different natural asphalts on the properties of bituminous binders and mixture. characterization of polymer and linear nanocomposite modified asphalt binder and mixture, *Constr. Build. Mater.* 91, 32-38.
- B. Golestani, B.H. Nam, F. MoghadasNejad, S.Fallah, (2015). Nanoclay application to asphalt concrete: characterization of polymer and linear nanocompositemodified asphalt binder and mixture, *Constr. Build. Mater.* 91, 32–38.
- B. Golestani, F. Moghadas Nejad, S.Sadeghpour Galooyak, (2012). Performance evaluation of linear and nonlinear nanocomposite modified asphalts, *Constr. Build. Mater.* 35, 197–203.
- B. Zhang, M. Xi, D. Zhang, H. Zhang, B. Zhang, (2009).The effect of styrene–butadiene– rubber/montmorillonite modification on the characteristics and properties of asphalt, *Constr. Build. Mater.* 23 (10), 3112-3117.
- Bhagya Athukorallage, Tharanga Dissanayaka, Sanjaya Senadheera, Darryl Jame. (2018). Performance analysis of incorporating phase change materials in asphalt concrete pavements. *Construction and Building Materials* 164, 419–432.
- Biao Maa, Sanjeev Adhikari b, Yujiao Chang , Junping Ren , Jiang Liu, Zhanping You. (2013). Preparation of composite shape-stabilized phase change materials for highway pavements. *Construction and Building Materials* 42, 114–121.
- Bin Zhang a, Anna Bogush, Jiangxiong Wei, Tongsheng Zhang, Weiting Xu, Qijun Yu .(2015). Influence of sulfur on the fate of heavy metals during clinkerization. *Construction and Building Materials* 182, 144–155.
- DIN Deutsches Institute für Normung e.V., Kunststoffe – Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) (2014). Teil 2, Bestimmung der Glasübergangstemperatur unter Glasübergangsstufenhöhe (ISO 11357-2), Beuth Verlag, Berlin.
- Dincer I, Rosen M.A, (2010). Thermal Energy Storage SYSTEMS and APLICATIONS, 2nd ed. *John Wiley and Sons*.

doi. 10.1080/14680629.2008.9690158

- Practice, Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- Rahmat Madandoust, Ehsan Mohseni, S. Yasin Mousavi, Maryam Namnevis.(2015). An experimental investigation on the durability of self-compacting mortar containing nano-SiO<sub>2</sub>, nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and nano-CuO .*Construction and Building Materials*, 86, 44–50.
- Refine AASHTO T283, (2008). Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage for Super pave. Robert Y. Liang, Ph.D., P.E. for the Ohio Department of Transportation Office of Research and Development and the U.S. *Department of Transportation Federal Highway Administration State Job Number 134221 Final Report FHWA/OH-2008-1*.
- T. Aashto, (2003). Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage, American Association of State and Highway Transportation Officials, *Washington, DC*.
- Virginie Mouillet, Fabienne Farcas, Stanislas Besson. (2008). Ageing by UV radiation of an elastomer modified bitumen. *Fuel* 87 2408–2419.
- Williams M.L., Landel L.F., Ferry J.D., (1995). The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids. *J Am Chem Soc*, Vol. 77, No. 14, 3701-3707.
- Construction and Building Materials*, 44, 533–54.
- N. Yuksel, A. Avci, M. Kilic, (2006). A model for latent heat energy storage systems. *Int. J. Energ. Res.* 30, 1146-1157.
- Nazari Ali, Riahi Shadi. (2011). Effects of CuO nanoparticles on compressive strength of self-compacting concrete. *Sadhana*. Vol. 36, Part 3, *Indian Academy of Sciences*. June 371–391.
- Nazari Ali, Riahi Shadi. (2011). Effects of CuO nanoparticles on microstructure, physical, mechanical and thermal properties of self-compacting cementitious composites. *J Mater Sci Technol.* 27(1), 81–92.
- Ngai K.L., (2004). The Glass Transition and the Glassy State in Mark J.E. (Ed), *Physical Properties of Polymers*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 72-152.
- of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry.
- Pavel Kriz, Jiri Stastna, Ludo Zanzotto. (2008). Glass Transition and Phase Stability in Asphalt Binders. *Road Materials and Pavement Design*.
- Pavement Interactive. Superpave Performance Grading, (2018). Available [www.pavementinteractive.org/article/superpave-performance-grading/](http://www.pavementinteractive.org/article/superpave-performance-grading/).
- Peter Mikhailenko, Alexandra Bertron and Erick Ringot. (2015). Methods for Analyzing the Chemical Mechanisms of Bitumen Aging and Rejuvenation with FTIR Spectrometry. F. Canestrari and M.N. Part I (eds.), 8<sup>th</sup> RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials, RILEM Book series 11. **doi.10.1007/978-94-017-7342-3\_17**

# **Nano Gas, Carbon Nano Tubes and Styrene Butadiene Styrene on the Chemical, Thermal and Mechanical Properties of "Asphalt" Mixtures**

*Nahid Amini, Ph.D., Student of Civil Engineering, , Technical & Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.*

*Parham Hayati, Assistant Professor, Civil Engineering Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

*Ali Abdi kordani Professor, Faculty of Technical & Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.*

*E-mail: aliabdi@eng.ikiu.ac.ir*

Received: February 2024- Accepted: June 2024

## **ABSTRACT**

The aim of this study is to increase the temperature of the asphalt mixture too much, which causes rutting phenomenon in the asphalt pavement. Evaluation of the effect of using PCM as a bitumen additive is to control the temperature of the asphalt mixture. For this purpose, conductive materials (MWCNT 1.5%), nano materials (CuO 4%) and polymer (SBS 5%) have been used separately and in combination in 6 mixed designs. Classic tests of bitumen include degree of penetration and softening point to determine PI and elastic recovery test to determine stretch ability properties of bitumen. The RV test, which is a part of Sharp's tests, was investigated to determine the viscosity of bitumen. FT-IR was used to analyze the changes in the chemical composition of bitumen, DRS were used to determine the amount of energy absorption in bitumen and thermal analysis of bitumen was done by DSC test. The results of the tests show that the use of PCM improves Pi and the Pi of bitumen has increased to 2.88. The elastic return of bitumen has reached 81% from 2%. Also, according to the results of FT-IR and DRS, the use of PCM can almost eliminate the destructive groups in bitumen and increase the amount of energy absorption of bitumen by more than 90%. According to the results of DSC diagrams, the use of these materials has increased the energy storage in bitumen and improved the phase change temperature.

**Keywords:** Phase Change Materials, DRS, DSC, Bitumen, Energy Storage