



Ferdowsi
University of
Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

<https://civil-ferdowsi.um.ac.ir>



Iranian
Concrete
Institute



Pavement
Engineering
Association of
Iran

Experimental Evaluation of Energy Storage and Rheological Properties of Bitumen Incorporating PANI/CO PCM*

Research Article

Sayyed Hamid Kamali Nasab¹, Sayyed Ali Hosseini² 

DOI: [10.22067/jfeci.2026.97262.1396](https://doi.org/10.22067/jfeci.2026.97262.1396)

1. Introduction

Asphalt mixture is a temperature-sensitive material. High temperatures make asphalt mixture susceptible to rutting and reduce its service life, while low temperatures can lead to thermal cracking in asphalt pavements, primarily due to increased tensile stress as pavement temperature decreases [1-9]. To enhance the properties of pure bitumen and improve asphalt mixture performance, bitumen modifiers are commonly used today. These additives can reduce temperature-induced stresses, thereby increasing the service life and resistance of asphalt pavements [10,11]. One promising approach involves thermal energy storage (TES) systems in asphalt mixtures through phase change materials (PCMs). PCMs can store and release energy based on latent heat during phase transition between melting-freezing cycles [13-21]. In recent years, researchers have employed PCMs for thermal control of asphalt mixtures. Studies indicate that the phase change temperature should be 30-60°C with appropriate melting enthalpy for pavement applications [11,22-27]. Adding PCMs to asphalt mixtures can control temperature fluctuations that might otherwise lead to heat-induced distress such as rutting [3,12,28-30]. Various methods exist for incorporating phase change materials in asphalt pavements, with composite PCMs (CPCM) being one of the most important. CPCM is fabricated by mixing PCMs with porous materials [36,37]. The effectiveness of composite PCMs often depends on stabilization and encapsulation strategies to reduce PCM migration in the molten state and improve heat transfer. Coconut oil, as a natural phase change material, has attracted researchers' attention due to its unique characteristics and environmentally friendly nature. This material exhibits suitable melting point, high thermal capacity, and good thermal stability, making it appropriate for thermal energy storage applications [45]. Polyaniline (PANI), a conductive polymer, has been employed as a conductive and solid phase in the CO/PANI system within a composite PCM framework. This polymer possesses significant electrical and thermal properties that can enhance PCM performance [46]. Based on previous studies and the

pavement industry's need for proper thermal energy storage and release control, this research utilizes coconut oil (CO) as a phase change material and polyaniline (PANI) as a conductive material. This PCM can store and release thermal energy at phase change temperature, providing an appropriate solution for controlling asphalt mixture temperature and ultimately preventing thermal distress in asphalt pavements. This study investigates the chemical properties and Superpave tests of bitumen containing PCM at 3%, 7%, and 10% concentrations.

2. Experimental Program

2.1. Materials

Aniline (C₆H₅NH₂), hydrochloric acid (HCl 37%), and ammonium persulfate [(NH₄)₂S₂O₈] were procured from Aldrich and Merck companies. The bitumen used in this research has a penetration grade of 60/70.

2.2. Synthesis of Polyaniline

For polyaniline (PANI) synthesis, 5 mL of aniline monomer was added to an aqueous solution containing 5 mL of hydrochloric acid (1 M) under continuous stirring to create a homogeneous acidic environment. The mixture was then cooled and maintained at a controlled temperature of 0-5°C to control reaction rate and ensure better uniformity and reproducibility of PANI formation. Subsequently, an ammonium persulfate solution (0.1 M in HCl) was added dropwise over 30 minutes to act as the primary oxidant (oxidative polymerization initiator). The resulting mixture was stirred at controlled temperature for 4 hours to complete the polymerization process, with dark green color indicating PANI formation. The synthesized PANI was separated by centrifugation and washed several times with deionized water to remove unreacted aniline and byproducts. After washing, PANI was dried under vacuum at 40°C for subsequent use.

2.3. Preparation of CO/PANI Composite

To prepare the phase change material, 10 mL of distilled water was added to 10 g of coconut oil. The prepared PANI

* Manuscript received January 02, 2026, Revised February 09, 2026, Accepted July 28, 2026.

¹ Ph.D. Student, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

² Corresponding author. Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. Email: ahosseini@shahroodut.ac.ir.

was then mixed with coconut oil at a 1:1 weight ratio. The mixture was stirred at a controlled temperature of 50°C with a speed of 500 rpm for 2 hours to ensure more uniform dispersion of PANI in the oil phase and formation of a CO/PANI composite system.

2.4. Preparation of PCM-modified Bitumen

The phase change material (PANI/CO-PCM) was incorporated into bitumen at weight percentages of 3%, 7%, and 10%. The mixture was heated to 160°C and stirred in a high-shear mechanical mixer at 3000 rpm for 30 minutes to ensure homogeneity. After mixing, the composite was gradually cooled at room temperature to obtain a stable PCM-bitumen composite (PANI/CO-PCM/B). The cooling process prevents separation and ensures uniform distribution of PCM in the bitumen.

3. Results and Discussion

3.1. Chemical Characterization

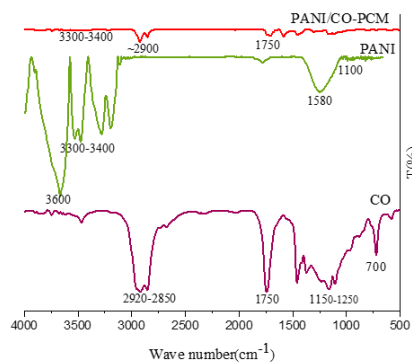


Figure. 1: FTIR analysis results

FTIR spectra confirm successful CO/PANI composite formation with preserved functional groups of both components [47-51]. DSC results show T_g decreases with PCM addition, indicating improved low-temperature flexibility. Melting enthalpy increases by over 90%, demonstrating enhanced thermal energy storage capacity.

3.2. Rheological Characterization

Viscosity remains below the 3 Pa·s standard requirements. DSR results show improved rutting resistance with PCM addition.

Table 1: RV result

Sample	Viscosity (pa.s)
Bitumen	0.407
Bitumen + 7% pcm	0.487
Bitumen + 10% pcm	0.509

Table 2: DSR result

Material	Value	Specification
unaged bitumen	$G^*/\sin\delta$	≥ 1.0 kpa
RTFO residue	$G^*/\sin\delta$	≥ 2.2 kpa
PAV residue	$G^*/\sin\delta$	≤ 5000 kpa

Viscosity remains below the 3 Pa·s standard requirement. DSR results show improved rutting resistance with PCM addition. BBR results indicate pure bitumen performs at -12°C, while PCM-modified bitumen performs at -18°C. MSCR test shows 231% increase in creep recovery for 10% PCM sample, indicating significantly enhanced rutting resistance.

Table 1: BBR results

	-12		-18		-24	
	S_t	m	S_t	m	S_t	m
Specification	≤ 300 Mpa	≥ 0.3 Mpa	≤ 300 Mpa	≥ 0.3 Mpa	≤ 300 Mpa	≥ 0.3 Mpa
Bitumen	171	0.307	309	0.262		
Bitumen + 7% pcm			261	0.312	459	0.263
Bitumen + 10% pcm			229	0.313	440	0.267

4. Conclusions

The results of this research are as follows:

1. PCM addition reduces glass transition temperature (T_g) and improves low-temperature flexibility. BBR results show low-temperature performance grade improves from -12°C in pure bitumen to -18°C in PCM-modified samples.
2. DSC analysis confirms over 90% increase in thermal energy storage capacity, with melting enthalpy increasing from 1.22 J/g to 2.17 J/g for 10% PCM samples.
3. Rotational viscosity remains within acceptable limits (<3 Pa·s), ensuring proper workability for mixing and paving operations.
4. MSCR test demonstrates 231% improvement in creep recovery for 10% PCM samples, with reduced Jnr values indicating enhanced resistance to permanent deformation and rutting.
5. FTIR, XRD, and FESEM analyses confirm successful CO/PANI composite synthesis with preserved functional groups and stable structure within the bitumen matrix.



ارزیابی آزمایشگاهی ذخیره‌سازی انرژی و خواص رئولوژیکی قیر حاوی کامپوزیت ماده تغییر فاز دهنده (PCM) CO/PANI*

مقاله پژوهشی



سید علی حسینی^(۲)

سید حمید کمالی نسب^(۱)

DOI: 10.22067/jfeci.2026.97262.1396

چکیده افزایش یا کاهش بیش از حد دمای مخلوط‌های آسفالتی موجب خرابی‌هایی از جمله شیارشدگی و ترک‌های حرارتی در روسازی‌های آسفالتی می‌شود. هدف از این پژوهش ارزیابی اثر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCM) (Phase Change materials) به عنوان افزودنی قیر جهت کنترل دمای مخلوط‌های آسفالتی است؛ برای این هدف از پلی آنیلین (PANI) به عنوان ماده رسانا و روغن نارگیل (CO) (Coconut) به عنوان ماده تغییر فاز دهنده و یک ماده طبیعی و دوستانه محیط زیست استفاده شده است. این ماده با درصدهای وزنی ۳٪، ۷٪ و ۱۰٪ با قیر ترکیب شده و آزمایش‌های (Differential Scanning Calorimetry) DSC، (X-ray Diffraction) XRD، (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) FTIR، (Field Emission Scanning Electron Microscopy) FESEM، (Rotational Viscosity) RV، (Dynamic Shear Rheometer) DSR، (Bending Beam Rheometer) BBR، (Pressure Aging Vessel) PAV، (Multiple Stress Creep Recovery) MSCR انجام شده است. نتایج آزمایش DSC نشان می‌دهد ذخیره‌سازی انرژی در قیر افزایش یافته، همچنین موجب افزایش بیش از ۹۰ درصدی جذب انرژی گردیده است. نتایج شاخص‌های m و St از آزمایش BBR نشان می‌دهد که دمای عملکردی قیر خالص 12°C است ولی در نمونه‌های حاوی pcm به 18°C می‌رسد.

واژه‌های کلیدی مواد تغییر فاز دهنده، پلی آنیلین، قیر، روغن نارگیل، ذخیره‌سازی انرژی، خواص رئولوژیکی.

Experimental Evaluation of Energy Storage and Rheological Properties of Bitumen Incorporating PANI/CO PCM

Sayyed Hamid Kamali Nasab, Sayyed Ali Hosseini

Abstract Extreme fluctuations (sharp increases and decreases) in asphalt mixture temperature can cause distress such as rutting at high temperatures and thermal cracking at low temperatures in asphalt pavements. The purpose of this study is to evaluate the impact of incorporating phase-change material (PCM) as an additive in asphalt binder to control the temperature of asphalt mixture. For this purpose, polyaniline (PANI) was utilized as the conductive material, while coconut oil (CO) was employed as the phase change material. This PCM was blended with asphalt binder at weight percentages of 3%, 7%, and 10%. A comprehensive testing program was conducted including Differential Scanning Calorimetry (DSC), X-ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM), Rotational Viscosity (RV), Dynamic Shear Rheometer (DSR), Bending Beam Rheometer (BBR), Pressure Aging Vessel (PAV), RTFO and Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) tests. DSC results confirm an increase in the thermal energy storage capacity of the modified bitumen, demonstrating over 90% improvement in energy absorption. Analysis of the BBR data—specifically the creep stiffness (St) and m -value—indicates that the low-temperature performance grade of the pure bitumen is -12°C , while for the PCM-modified samples, it improves to -18°C .

Key words Phase change material, Polyaniline, Bitumen, Coconut oil, Composite energy storage, Rheological properties.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۱۰/۱۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۵/۶ می‌باشد.

(۱) دانشجوی مقطع دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

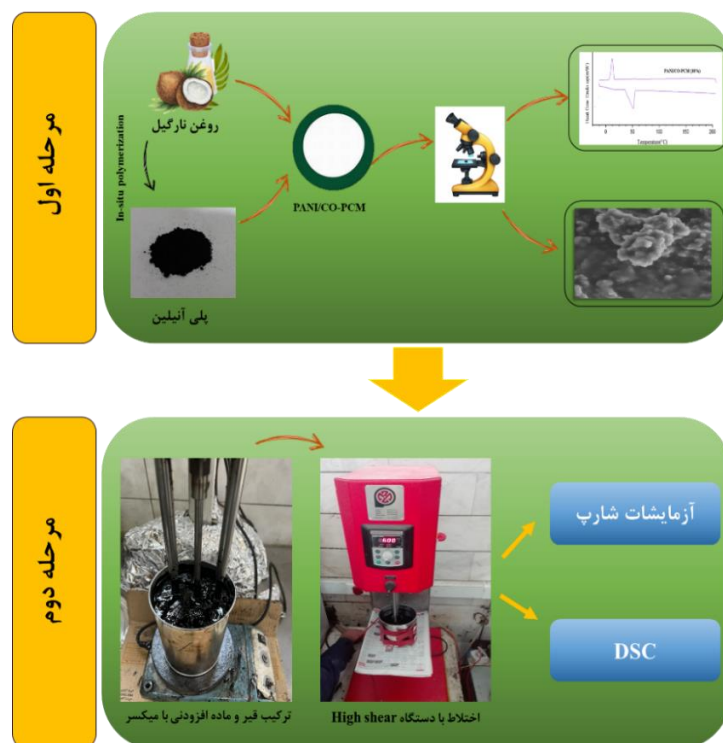
مقدمه

مخلوط آسفالتی یک ماده حساس به دماست و دماهای بالا مخلوط آسفالتی را مستعد شیارشدگی و کاهش دوره سرویس‌دهی می‌کند و دمای پایین می‌تواند منجر به ترک‌خوردگی حرارتی در روسازی‌های آسفالتی شود که عمدتاً به دلیل افزایش تنش کششی با کاهش دمای روسازی است. زمانی که تنش کششی از مقاومت کششی روسازی آسفالتی بیشتر گردد، ترک‌ها شروع به تشکیل شدن می‌کنند. علاوه بر این، ترک‌خوردگی ناشی از خستگی حرارتی، که در اثر تغییرات دمای چرخه‌ای ایجاد می‌شود، در مناطقی با اختلاف دمای قابل توجه روز و شب رایج است. مکانیسم تشکیل ترک در این موارد به دلیل بیشتر بودن تنش کششی از مقاومت کششی نیست بلکه تنش حرارتی مکرر باعث خستگی در روسازی می‌شود. زمانی که خستگی ناشی از تنش حرارتی مکرر از مقاومت خستگی روسازی آسفالتی بیشتر گردد، ترک‌های ناشی از خستگی حرارتی در آسفالت ایجاد می‌شوند [1-9]. قیر بخش نسبتاً کوچکی از وزن کل مخلوط آسفالتی را تشکیل می‌دهد، اما نقش حیاتی در بهینه‌سازی عملکرد، دوام و پایداری مخلوط‌های آسفالتی دارد. برای افزایش خواص قیر خالص و بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالت، امروزه معمولاً از اصلاح‌کننده‌های قیر استفاده می‌شود. این افزودنی‌ها می‌تواند موجب کاهش تنش‌های ناشی از دما شود و در نتیجه طول عمر و مقاومت روسازی‌های آسفالتی را افزایش دهند [10، 11]. به دلیل مستعد بودن مخلوط آسفالتی به ایجاد خرابی در دماهای بالا و پایین، تحقیقات زیادی در مورد دمای مخلوط آسفالت انجام شده است [12]. یکی از این تحقیقات استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی (Thermal energy storage) (TES) در مخلوط‌های آسفالتی از طریق مواد تغییرفازدهنده (PCM) است. PCM‌ها در بخش‌های ساختمان‌سازی، حوزه پزشکی، تجهیزات الکترونیکی و سایر صنایع به عنوان روشی برای ذخیره‌سازی انرژی استفاده می‌شوند. در واقع، PCM به دلیل آنتالپی و پایداری بالا، می‌تواند انرژی را ذخیره و بر اساس گرمای نهان در طول تبدیل فاز بین چرخه ذوب-انجماد این انرژی را آزاد کند [13-21]. در سال‌های اخیر، محققان از PCM‌ها برای کنترل حرارتی مخلوط آسفالتی استفاده کرده‌اند. مطالعات زیادی انجام شده است که نشان می‌دهد دمای تغییر فاز باید ۳۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد باشد و آنتالپی ذوب

مناسبی برای استفاده از PCM در روسازی آسفالتی داشته باشد. در مخلوط آسفالتی از PCM‌های جامد - مایع و جامد - جامد در بیشتر موارد استفاده می‌شوند [11، 22-27]. افزودن PCM‌ها در مخلوط‌های آسفالتی، می‌تواند باعث کنترل نوسانات دما گردد که این نوسانات می‌تواند منجر به خرابی‌هایی ناشی از گرما مانند شیارشدگی شود [3، 12، 28-30]. به عبارت دیگر، PCM‌ها می‌توانند مقادیر زیادی انرژی حرارتی را با تغییر فاز جذب، ذخیره و آزاد کنند که به تنظیم دمای آسفالت کمک می‌کند [31]. PCM‌ها با حفظ دمای پایدارتر در مخلوط آسفالتی، وقوع تنش‌های مرتبط با گرما را کاهش می‌دهند و در نتیجه به طور بالقوه دوام و طول عمر سازه‌های روسازی را افزایش می‌دهند [32]. PCM‌ها با تغییر فاز در طول گرمایش، انرژی حرارتی را ذخیره می‌کنند و در طول فرایند خنک‌سازی معکوس، انرژی ذخیره شده را در محیط آزاد می‌کنند [10، 33-35]. روش‌های متفاوتی برای کاربرد مواد تغییرفازدهنده در روسازی آسفالتی وجود دارد و یکی از مهم‌ترین آن‌ها PCM‌های کامپوزیتی (CPCM) است. CPCM با مخلوط کردن مواد تغییرفازدهنده با مواد متخلخل ساخته می‌شود [36، 37]. در یک پژوهش، کاکار و همکارانش از PCM میکروکپسوله شده حاوی تترادکان با نقطه ذوب ۶ درجه سانتی‌گراد، در دو نسبت وزنی مختلف شامل ۱٪ و ۳٪ به منظور بهبود خواص مخلوط آسفالتی استفاده کردند [38]. آزمایش temperature sweep نشان داد که افزودن PCM منجر به کاهش مدول مختلط قیر در دماهای مختلف می‌شود. در این آزمایش ماده تغییرفازدهنده جامد - جامد پلی‌یورتان (PUSSPCM) با دمای تغییر فاز پایین، با استفاده از روش اختلاط مستقیم و با درصد‌های وزنی مختلف ۰٪، ۳٪، ۵٪ و ۷٪ به قیر آسفالت اضافه شد [39]. یافته‌ها حاکی از آن بود که افزودن PUSSPCM عملکرد شیارشدگی در دمای بالا را اندکی افزایش می‌دهد و در عین حال سختی خزشی را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد و منجر به بهبود قابل توجه عملکرد در دمای پایین شده است. ژانگ و همکاران یک PCM ترکیبی با ترکیب گرافیت گسترش‌یافته (EG) و پلی‌اتیلن گلیکول (PEG) را تولید کردند و کارایی آن را در تنظیم دمای آسفالت اصلاح‌شده نشان دادند [40]. دای و همکاران یک PCM دوگانه ائوتکتیک ساختند که از اسید استیریک (SA) و اسید پالمیتیک (PA) تشکیل می‌شود (SA/PA) (PCM) سپس کاربرد آن را در دوام مخلوط آسفالتی بررسی کردند

است. این پلیمر خواص الکتریکی و حرارتی قابل توجهی دارد که می‌تواند کارایی PCM را بهبود بخشد [46]. با توجه به مطالعات انجام‌شده و نیاز صنعت روسازی به کنترل مناسب ذخیره‌سازی و آزادسازی انرژی حرارتی در این مقاله از روغن نارگیل (CO) به عنوان یک ماده تغییرفازدهنده و پلی آنیلین (PANI) به عنوان یک ماده رسانا استفاده شده است. این ماده تغییرفازدهنده می‌تواند با ذخیره‌سازی و آزادسازی انرژی حرارتی در دمای تغییرفاز راهکار مناسبی برای کنترل دمای مخلوط‌های آسفالتی و در نهایت جلوگیری از خرابی‌های حرارتی در روسازی‌های آسفالتی گردد. در این پژوهش خواص شیمیایی و آزمایش‌های شارپ قیر حاوی PCM در مقادیر ۳٪، ۷٪ و ۱۰٪ بررسی شده است. پارامترهای شیمیایی با هدف اثبات تشکیل شدن کامپوزیت CO/PANI مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و پارامترهای رئولوژیکی قیر با هدف اثبات تأثیر مثبت ماده افزودنی در عملکرد قیر مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و دو هدف جداگانه بین آزمایش‌های شیمیایی و رئولوژیکی وجود دارد. شکل (۱) مراحل ساخت ماده افزودنی و اختلاط آن با قیر را نمایش می‌دهد.

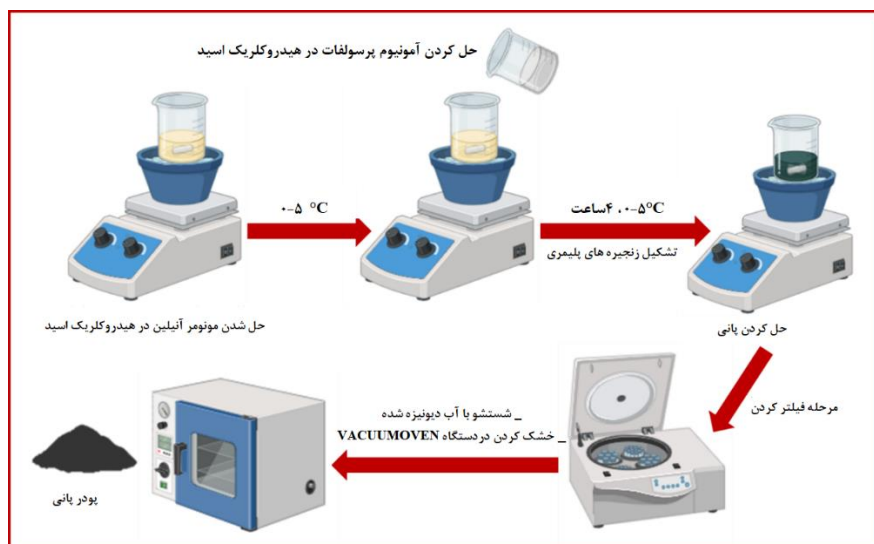
[41]. اثرگذاری PCM‌های کامپوزیتی اغلب به استخدام راهبردهای پایدارسازی و محصورسازی برای کاهش مهاجرت PCM در حالت مذاب و نیز بهبود انتقال حرارت وابسته است. روش‌های مختلفی برای ایجاد میکروکپسوله‌های حاوی PCM مانند روغن نارگیل وجود دارد که می‌توان به پلیمریزاسیون در محیط معلق اشاره کرد [42-44]. روغن نارگیل به عنوان یک ماده تغییرفازدهنده طبیعی، به علت ویژگی‌های منحصر به فرد و به عنوان ماده دوستدار محیط زیست توجه محققان و پژوهشگران زیادی را جلب کرده است. این ماده نقطه ذوب مناسبی دارد، ظرفیت حرارتی بالا و پایداری حرارتی خوبی را از خود نشان می‌دهد که این ویژگی‌ها، آن را برای کاربردهای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، مناسب می‌کند. به عنوان نمونه، از رزین ملائینی و پلی‌متیل متاکریلات (PMMA) به عنوان مواد پوسته‌ای برای محصور کردن روغن نارگیل استفاده شده است، که منجر به ایجاد میکروکپسول‌هایی با پایداری حرارتی بالا و پوسته‌ای با کارایی محصورسازی زیاد می‌شود [45]. پلی‌انیلین (PANI)، یک پلیمر هادی، به عنوان یک فاز رسانا و جامد در سامانه CO/PANI و در چارچوب یک ماده تغییرفازدهنده کامپوزیتی به کار گرفته شده



شکل ۱ مراحل آماده‌سازی و اختلاط قیر حاوی PANI/CO-PCM

جدول ۱ خواص فیزیکی قیر خالص

نتیجه آزمایش	محدوده قابل قبول	شماره استاندارد	نام آزمایش
64	60-70	ASTM D5	درجه نفوذ در دمای 25°C
50.02	49-56	ASTM D36	نقطه نرمی (°C)
2	2.6 ±0.91	ASTM D6084	بازگشت الاستیک (%)
>100	≥100	ASTM D113	کشش پذیری (خاصیت انگمی) (15°C)



شکل ۲ مراحل سنتز کردن PANI

ساخت کامپوزیت قیر / ماده تغییرفازدهنده

مواد آزمایش

مواد این آزمایش عبارتند از آنیلین ($C_6H_5NH_2$)، هیدروکلریک اسید (37 % HCl) و آمونیوم پرسولفات $[(NH_4)_2S_2O_8]$ که از شرکت‌های Aldrich و Merck تهیه شده است. قیر استفاده شده در این پژوهش دارای درجه نفوذ ۶۰/۷۰ است که مشخصات فیزیکی آن در جدول (۱) نمایش داده شده است.

سنتز کردن پلی آنیلین

برای سنتز کردن پلی آنیلین (PANI) ابتدا ۵ میلی لیتر مونومر آنیلین به محلول آب حاوی ۵ میلی لیتر اسید کلریدریک (۱ مولار) تحت هم زدن مداوم اضافه شد تا یک محیط اسیدی همگن ایجاد شود. سپس مخلوط خنک شد و در دمای کنترل شده ۵-۰ درجه سانتی گراد نگهداری شد تا سرعت واکنش کنترل شود و تشکیل پلی آنیلین با یکنواختی و تکرارپذیری بهتر انجام شود. پس از آن، محلولی از پرسولفات آمونیوم (APS، ۰.۱ مولار در HCl) به

آماده سازی ماده تغییرفازدهنده

(روغن نارگیل و پلی آنیلین)

برای تهیه ماده تغییرفازدهنده، ۱۰ گرم روغن نارگیل و ۱۰ میلی لیتر آب مقطر اضافه شد. سپس PANI آماده شده با روغن نارگیل به نسبت وزنی ۱:۱ مخلوط شد. مخلوط در دمای

که روش آزمایش جریان قیر داخل یک لوله موین هست، آزمایش ویسکومتر به روش RV دارای محفظه بزرگتری است و برای قیرهای اصلاح شده همچنین برای قیرهای اصلاح نشده است. از آزمایش (DSR) (Dynamic Shear Rheometer) برای بررسی رفتار ویسکو الاستیک قیر در دماهای متوسط و زیاد برای سه حالت قیر شامل قیرهای پیرنشده، قیر کوتاه مدت پیر شده حاصل از دستگاه (RTFO) (Rolling Thin Film Oven) و قیر بلند مدت پیر شده حاصل از دستگاه (PAV) (Pressure Aging Vessel) استفاده شده است. پارامترهای خروجی دستگاه DSR که در ارزیابی ویژگی ویسکو الاستیک ماده قیری استفاده می شود شامل پارامتر اختلاف فاز δ و پارامتر مدول مختلط G^* است. G^* معیاری از پایداری و مقاومت قیرها در برابر تغییر شکل است و اختلاف فاز معیاری از مقادیر نسبی تغییرات شکل برگشت پذیر و برگشت ناپذیر است. جهت بررسی رفتار قیر در دمای پایین، آزمون رئومتر تیرچه خمشی (Bending Beam Rheometer) BBR انجام شده است. در این آزمایش، رفتار قیر در سردترین دمایی که در طول عمر سرویس دهی متحمل می شود، تحت بار ثابت ارزیابی می گردد. در نهایت از آزمون (Multiple Stress) (Creep Recovery) MSCR برای ارزیابی رفتار قیرها در برابر تغییر شکل های دائمی و یا شیار شدگی استفاده شده است.

نتایج آزمایش های انجام شده در پژوهش

نتایج آزمایش های شیمی

آزمون FTIR برای روغن نارگیل، PANI و کامپوزیت این دو ماده (PANI/CO-PCM) برای بررسی گروه های عاملی و ویژگی های ساختاری مواد انجام شد. نمودار (۱) نتایج آزمون FTIR را نمایش می دهد.

طیف FTIR روغن نارگیل (CO) باندهای شاخص تری گلیسیریدها را نشان داد. باندهای $2850-2920\text{ cm}^{-1}$ به ارتعاشات کششی نامتقارن و متقارن گروه های CH_2 در زنجیرهای آلفاتیک نسبت داده می شوند. باند قوی در حدود $1740-1750\text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاش کششی C=O گروه های کربونیل استری موجود در تری گلیسیریدها است و ناحیه $1150-1250\text{ cm}^{-1}$ نیز به ارتعاشات کششی C-O پیوندهای استری نسبت داده می شود. همچنین باندهای ناحیه پایین فرکانس حدود

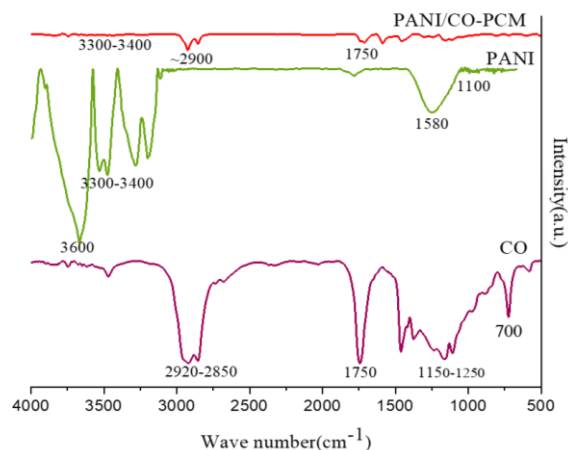
کنترل شده 50°C درجه سانتی گراد با سرعت 500 دور در دقیقه به مدت 2 ساعت به هم زده شد تا از پراکندگی یکنواخت تر PANI در فاز روغنی و تشکیل یک سامانه کامپوزیتی PANI/CO اطمینان حاصل شود.

اختلاط قیر و ماده تغییر فاز دهنده

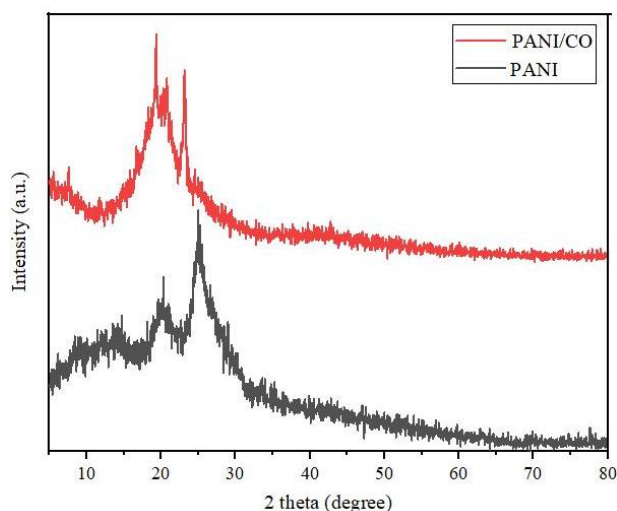
ماده تغییر فاز دهنده (PANI/CO-PCM) با نسبت وزنی 3% ، 7% و 10% در قیر گنجانده و تا دمای 160°C درجه سانتی گراد گرم و در یک مخلوط کن مکانیکی برش بالا با سرعت 3000 دور در دقیقه به مدت 30 دقیقه برای اطمینان از همگنی به هم زده شد. پس از اختلاط، کامپوزیت به تدریج در دمای اتاق خنک شد تا یک کامپوزیت ماده تغییر فاز دهنده - قیر پایدار به دست آید. فرایند خنک سازی برای جلوگیری از جداسازی و اطمینان از توزیع یکنواخت ماده تغییر فاز دهنده در قیر (PANI/CO-PCM/B) است.

آزمایش های انجام شده در پژوهش

ساختار شیمیایی روغن نارگیل و PCM سنتز شده توسط (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) FTIR با استفاده از دستگاه TENSOR 27 در محدوده فرکانس $4000-500\text{ cm}^{-1}$ مشخص شد. مورفولوژی کامپوزیت (PANI/CO-PCM) با استفاده از (Field Emission Scanning Electron Microscopy) FE-SEM Tescan-MIRA III نشان داده شد. همچنین الگوهای (X-ray Diffraction) XRD با استفاده از دستگاه Dron به دست آمد. دمای ذوب و تبلور، همراه با آنتالپی گرمای نهان CO، PANI/CO-PCM و PANI/CO-PCM/B، با استفاده از آنالیز (Differential Scanning Calorimetry) DSC مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آنالیزهای DSC با سرعت گرمایش و سرمایش 10°C درجه سانتی گراد در دقیقه، در محدوده دمایی $10-250^\circ\text{C}$ درجه سانتی گراد، در فضای نیتروژن با سرعت جریان 25 میلی لیتر در دقیقه انجام شد. آزمایش های Superpave خواص رئولوژیکی قیر را در دمای بالا، دمای پایین و دمای متوسط مورد بررسی قرار می دهند. در این پژوهش از آزمایش (Rotational Viscosity) RV برای بررسی ویسکوزیته چرخشی قیر استفاده شده است، برخلاف آزمون های ویسکومتر سینماتیکی و دینامیکی



نمودار ۱ نتایج آزمون FTIR



نمودار ۲ نتایج آزمون XRD

آزمون FE-SEM اطلاعات مفیدی از مورفولوژی و ریزساختار سامانه PANI/CO-PCM ارائه می‌دهد. تصاویر تهیه‌شده در بزرگ‌نمایی‌های مختلف شکل (۳) نشان می‌دهند که فاز پلیمری پلی‌آنیلین دارای مورفولوژی گل‌کلم‌مانند است و در کنار آن نواحی فیلم‌مانند و ساختار شبکه‌ای مشاهده می‌شود. این ویژگی‌ها می‌تواند به تجمع و هم‌جوشی دامنه‌های PANI در فرایند آماده‌سازی و نیز برهم‌کنش‌های بین‌سطحی فیزیکی میان PANI و فاز روغنی؛ از جمله برهم‌کنش‌های قطبی و هیدروژنی ضعیف میان گروه‌های نیتروژنی PANI و گروه‌های استری موجود در تری‌گلیسیریدهای روغن نارگیل و همچنین نیروهای واندروالس نسبت داده شود [54,55]. مشاهده همزمان این ریزساختارها در کنار نتایج FTIR و XRD نشان می‌دهد که سامانه

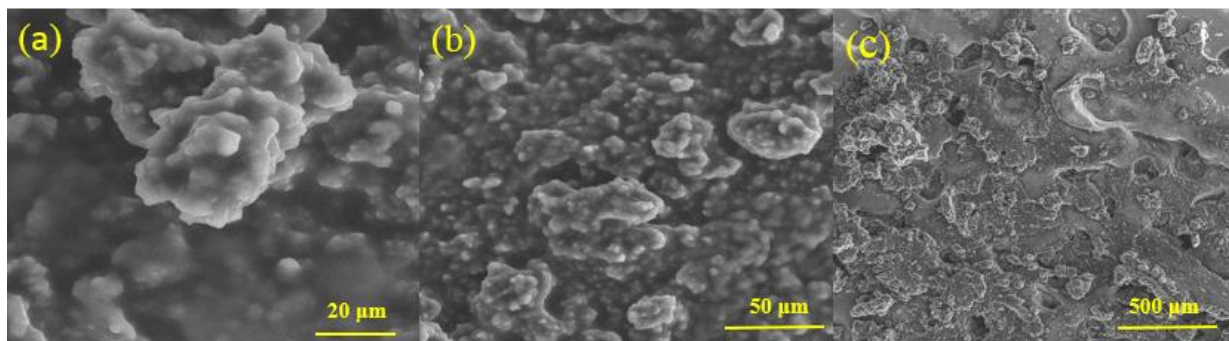
~۷۲۰-۷۰۰ cm^{-1} معمولاً به ارتعاشات rocking گروه‌های (CH_2) در زنجیرهای بلند هیدروکربنی و اسکلت زنجیرهای آلیفاتیک نسبت داده می‌شوند و با ماهیت هیدروکربنی روغن‌های تری‌گلیسیریدی سازگار است [47, 48, 49]. طیف FTIR پلی‌آنیلین (PANI) نیز باندهای مشخصه ساختار آن را نشان داد؛ باندهای حدود ~۱۵۸۰ و ~۱۴۹۰ cm^{-1} به ارتعاشات کششی $\text{C}=\text{C}$ در واحدهای quinoid و benzenoid نسبت داده می‌شوند. باند حدود ~۱۳۰۰ cm^{-1} به ارتعاشات کششی $\text{C}-\text{N}$ (آمین آروماتیک) مرتبط است و باند حدود ~۱۱۴۰ cm^{-1} به عنوان یکی از باندهای شاخص PANI (مرتبط با حالت دوپینگ/ساختار زنجیر و موده‌های ارتعاشی درون‌صفحه‌ای) گزارش شده است. همچنین باند حدود ~۸۰۰ cm^{-1} به ارتعاشات خمشی خارج از صفحه $\text{C}-\text{H}$ حلقه آروماتیک نسبت داده می‌شود [50, 51]. در طیف کامپوزیت CO/PANI، حضور همزمان باندهای شاخص هر دو جزء (به ویژه باند $\text{C}=\text{O}$ استری روغن و باندهای benzenoid/quinoid پلی‌آنیلین) نشان می‌دهد که گروه‌های عاملی اصلی مواد اولیه تا حد زیادی حفظ شده‌اند و سامانه حاصل یک کامپوزیت CO/PANI است. هر گونه تغییرات جزئی در موقعیت یا پهن شدن برخی باندها می‌تواند ناشی از برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی (مانند برهم‌کنش‌های قطبی/هیدروژنی ضعیف بین گروه‌های استری روغن و گروه‌های نیتروژنی PANI) باشد [47, 50].

نتایج آزمون XRD انجام‌شده پانی و ماده تغییرفازدهنده PANI/روغن نارگیل در نمودار (۲) نمایش داده شده است. طبق نتایج، PANI به دلیل پیک‌هایشان در 2θ حدود 10° ، 15° ، و 20° که با طرح‌های (۱۲۱)، (۱۱۳) و (۳۲۲) مطابقت دارند [45, 46] [JCPDS No. 00-053-1718]، ساختار نیمه‌بلوری دارد. در الگوی XRD مربوط به روغن نارگیل (CO)، پیک‌هایی در نواحی $2\theta \approx 10^\circ$ و $2\theta \approx 19-23^\circ$ مشاهده شد. این بازه‌ها با الگوهای پراکندگی چربی‌های مبتنی بر TAG سازگارند؛ به طوری که پیک‌های زاویه کوچک می‌توانند به فاصله‌های لایه‌ای و پیک‌های زاویه بزرگ به زنجیرها مرتبط باشند. پیک‌های XRD در چربی‌ها به تاریخچه حرارتی و آماده‌سازی نمونه حساس‌اند [52, 53]. الگوی XRD نشان می‌دهد کامپوزیت PANI/CO با موفقیت سنتز شده است [4].

PCM خالص دمای انتقال شیشه‌ای مشخصی نشان نمی‌دهد که نشان‌دهنده ماهیت کریستالی آن است. با افزایش درصد PCM، دمای انتقال شیشه‌ای کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش انعطاف‌پذیری مخلوط در دماهای پایین است. کاهش تدریجی Tg (Thermogravimetry) با افزایش درصد PCM (از $4,14^{\circ}\text{C}$ در قیر خالص به $-0,37^{\circ}\text{C}$ در نمونه با ۱۰٪ PCM) نشان‌دهنده افزایش تحرک زنجیره‌های مولکولی در دماهای پایین است. این پدیده می‌تواند به بهبود انعطاف‌پذیری آسفالت در شرایط سرد منجر شود، که برای مقاومت در برابر ترک خوردگی حرارتی بسیار مهم است.

حاصل، یک کامپوزیت CO/PANI است که در آن ارتباط و توزیع فازها در مقیاس میکرو برقرار شده است. از دید کاربردی، حضور فاز جامد و شبکه‌ای PANI در چنین سامانه‌ای می‌تواند در کاهش مهاجرت فاز روغنی در حالت مذاب نقش داشته باشد و به پایداری شکلی PCM در هنگام گذار فاز کمک کند.

جدول (۲) مرحله گرمایش و جدول (۳) پیک ذوب یا نقطه نرم شدن (Phase change) آنالیز گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) را نشان می‌دهد که تأثیر کامپوزیت پلی‌آنیلین - روغن نارگیل (PANI/CO) را بر رفتار حرارتی قیر در غلظت‌های ۰٪، ۳٪، ۷٪ و ۱۰٪ مشخص می‌کند.



شکل ۳ تصاویر FE-SEM روغن نارگیل / پلی آنیلین

جدول ۲ دمای انتقال شیشه‌ای (Tg)

نمونه	دمای شروع ($^{\circ}\text{C}$)	دمای میانی ($^{\circ}\text{C}$)	دمای پایان ($^{\circ}\text{C}$)	Δcp (J/g·K)
قیر خالص	-۱,۹۲	۴,۱۴	۱۰,۴۵	۰,۲۴
PCM خالص	مشاهده نشد	مشاهده نشد	مشاهده نشد	مشاهده نشد
قیر + ۳٪ PCM	-۲,۶۲	۴,۲۴	۹,۱۵	۰,۱۷
قیر + ۷٪ PCM	-۶,۶۷	۱,۳۶	۸,۰۰	۰,۳۰
قیر + ۱۰٪ PCM	-۸,۵۷	-۰,۳۷	۶,۹۲	۰,۳۴

جدول ۳ پیک ذوب یا نقطه نرم شدن آزمون DSC

نمونه	دمای شروع ($^{\circ}\text{C}$)	دمای اوج ($^{\circ}\text{C}$)	دمای پایان ($^{\circ}\text{C}$)	آنتالپی ذوب (J/g)
قیر خالص	۵۸,۷۸,۳۳,۳۰	۶۳,۷۹,۴۰,۱۳	۷۱,۲۲,۵۷,۲۷	۰,۳۱,۰۰,۹۱
PCM خالص	۴۱,۷۸,۵۸,۸۰	۹۳,۹۸,۲۲,۸۷	۱۰۵,۸۴,۲۵,۸۹	۵۲,۸۱,۴۱,۹۷
قیر + ۳٪ PCM	۲۲,۹۶	۵۱,۴۴	۵۸,۲۹	۰,۷۸
قیر + ۷٪ PCM	۳۳,۸۵	۴۶,۸۵	۷۱,۲۸	۲,۰۲
قیر + ۱۰٪ PCM	۳۴,۹۰	۴۴,۳۵	۷۲,۳۶	۲,۱۷

دلیل حضور فاز جامد/ پلیمری پلی‌آنیلین (PANI) در سامانه کامپوزیتی CO/PANI می‌تواند باعث افزایش ویسکوزیته قیر شود و با افزایش میزان افزودنی ویسکوزیته قیر نیز افزایش یافته است، هر چند این افزایش چشم‌گیر نیست ولی ویسکوزیته قیرهای دارای PCM نسبت به قیر خالص بیشتر است.

جدول ۴ نتایج آزمایش ویسکوزیته دورانی

نمونه	ویسکوزیته (pa.s)
قیر خالص	0.407
7% PCM + قیر خالص	0.487
10% PCM + قیر خالص	0.509

پیرشدگی کوتاه مدت (RTFO) و پیرشدگی بلندمدت (PAV)

در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی پیرشدگی کوتاه‌مدت قیر در آزمایشگاه از آزمایش RTFO طبق استاندارد ASTM D2872 استفاده شده است. از نمونه‌های قیر پیرشده RTFO به منظور انجام آزمایش DSR در دمای بالا در جهت بررسی شیارشدگی استفاده می‌شود. همچنین، پیرشدگی بلندمدت قیر نیز با استفاده از آزمایش PAV و بر روی قیر خروجی از RTFO مطابق با استاندارد ASTM D4402 انجام شده است. از نمونه‌های پیرشده، در آزمایش BBR برای بررسی عملکرد قیر در ترک‌های درجه حرارت پایین و همچنین ارزیابی عملکرد قیر در برابر ترک‌های خستگی با استفاده از دستگاه DSR استفاده شده است. طبق استاندارد باید حداکثر میزان افت وزنی قیر ۱٪ باشد تا بتوان از آن در آزمایش‌های BBR و DSR استفاده کرد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد مقدار افت وزنی قیر کمتر از ۱٪ است.

رئومتر برش دینامیکی (DSR)

آزمایش DSR رفتار ویسکوالاستیک قیر را بر اساس استاندارد ASTM D7175 برای قیر پیرنشده، قیر کوتاه‌مدت پیرشده و قیر بلندمدت پیرشده ارزیابی می‌کند. ارزیابی عملکرد قیر در mixture tenderness بر روی قیر پیرنشده، ارزیابی عملکرد قیر در خرابی شیارشدگی بر روی قیر کوتاه‌مدت پیرشده و ارزیابی عملکرد قیر در ترک‌های خستگی بر روی قیر بلندمدت پیرشده انجام می‌شود. نتایج به دست آمده در آزمایش DSR در دمای بالا

PCM خالص دو پیک ذوب مشخص را با آنتالپی ذوب بسیار بالاتر نسبت به سایر نمونه‌ها نشان می‌دهد. با افزایش درصد PCM، پیک‌های ذوب گسترده‌تر می‌شود و آنتالپی ذوب افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی است. PCM خالص دو پیک ذوب مشخص ($22,87^{\circ}\text{C}$ و $93,98^{\circ}\text{C}$) با آنتالپی ذوب بالا (مجموعاً $94,78\text{ J/g}$) نشان می‌دهد. این ویژگی در مخلوط‌های قیر/PCM نیز مشاهده می‌شود، اگر چه با شدت کمتر. افزایش آنتالپی ذوب در مخلوط‌ها (از $1,22\text{ J/g}$ در قیر خالص به $2,17\text{ J/g}$ در نمونه با ۱۰٪ PCM) نشان‌دهنده بهبود قابلیت ذخیره‌سازی انرژی حرارتی است. عدم وجود Tg مشخص در PCM خالص و حفظ پیک‌های ذوب مشخص در مخلوط‌ها نشان می‌دهد که PCM خواص کریستالی خود را در مخلوط با قیر حفظ می‌کند. ترکیب خواص حرارتی PCM با قیر منجر به ایجاد ماده‌ای با قابلیت مدیریت حرارتی بهتر می‌شود که می‌تواند در کنترل دمای سطح آسفالت و کاهش تنش‌های حرارتی مؤثر باشد. ترکیب تغییرات در Tg و رفتار ذوب/ تبلور نشان می‌دهد که قیر اصلاح‌شده با PCM می‌تواند در محدوده دمایی وسیع‌تری عملکرد مطلوبی داشته باشد.

نتایج آزمایش Superpave

در این بخش به بررسی و ارزیابی نتایج آزمایش‌های Superpave در قیرهای اصلاح شده با درصد‌های مختلف ماده تغییرفازدهنده و قیر خالص پرداخته می‌شود. هدف از انجام آزمایش‌های Superpave بر روی نمونه‌های قیر، تعیین درجه عملکردی (PG) قیرهای اصلاح شده است.

آزمایش ویسکوزیته دورانی (RV)

این آزمایش طبق استاندارد ASTM D4402 و در دمای 135°C درجه سانتی‌گراد انجام شده است و طبق استاندارد مقدار ویسکوزیته مجاز باید حداکثر ۳ پاسکال ثانیه باشد تا پمپاژ قیر، اختلاط سنگدانه و قیر و عملیات آسفالت‌ریزی و تراکم مخلوط آسفالتی به درستی انجام شود. همان طور که در جدول (۴) قابل مشاهده است ویسکوزیته نمونه‌های حاوی ۷ درصد و ۱۰ درصد ماده تغییرفازدهنده نسبت به قیر خالص بیشتر است به طوری که ویسکوزیته قیر خالص $0,407\text{ pa.s}$ و برای قیر حاوی ۱۰٪ ماده تغییرفازدهنده $0,509\text{ pa.s}$ است. ماده تغییرفازدهنده انتخابی به

بررسی عملکرد قیر در دماهای پایین طبق استاندارد ASTM D6648 و از دمای ۶- تا ۲۴- درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود. طبق این استاندارد سختی خزشی قیر (S) و نرخ تغییر سختی با زمان (m) دو پارامتری هستند که از این آزمایش بدست می‌آیند، و نتایج این دو پارامتر به منظور کنترل ترک‌خوردگی قیر در دمای عملکردی پایین باید طبق جدول (۶) باشد. همچنین این جدول نتایج حاصل از آزمایش BBR در این پژوهش را نیز نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است دو پارامتر m و st در قیر خالص در دمای عملکردی ۱۲- قابل قبول بوده ولی در نمونه‌های حاوی PCM دو پارامتر مذکور در دمای ۱۸- قابل قبول بوده‌اند؛ بنابراین افزودن PCM می‌تواند با کاهش سختی خزشی و بهبود قابلیت ریلکسیشن تنش در دماهای پایین، مقاومت قیر را در برابر ترک‌های پرودتی افزایش دهد و قیر حاوی PCM می‌تواند تا دمای ۱۸- مقاومت داشته باشد.

بر روی قیر پیرنشده و کوتاه‌مدت پیرشده در تعیین درجه عملکردی درجه حرارت قیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این آزمایش پارامتر G^* به معنی مقاومت کل در برابر تغییر شکل و δ توزیع نسبی مقاومت بین بخش الاستیک و بخش ویسکوز تعریف می‌گردد. جدول (۵) مقادیر قابل قبول در آزمایش DRS طبق استاندارد ASTM D7175 و نتایج حاصل از آزمایش DSR در سه مرحله را نشان می‌دهد. همان طور که نتایج نشان می‌دهند دمای عملکردی بالای قیر حاوی PCM با قیر خالص یکی و برابر ۶۴ درجه سلسیوس است و با افزایش درصد PCM شاخص $G^*/\sin \delta$ قیر پیرنشده افزایش یافته است و پیش‌بینی می‌شود با افزایش مقدار PCM در قیر دمای ۶۴ به ۶۰ تغییر پیدا کند. همچنین نتایج حاصل از آزمایش DSR بر روی قیر به دست آمده از آزمایش PAV نشان از بهبود شاخص $G^*\sin \delta$ و در نتیجه بهبود رفتار خستگی قیر حاوی PCM دارد.

رئومتر تیرچه خمشی (BBR)

این آزمایش بر روی قیر به دست آمده از آزمایش PAV جهت

جدول ۵ نتایج آزمایش رئومتر برش دینامیکی

	قیر پیر نشده $G^*/\sin \delta$		RTFO $G^*/\sin \delta$		PAV $G^*/\sin \delta$	
	64°C	70°C	64°C	70°C	22°C	25°C
Specification	≥ 1.0 kpa		≥ 2.2 kpa		≤ 5000 kpa	
قیر	1.26	0.608	2.297	1.055		2350
7% pcm + قیر	1.71	0.864	2.57	1.25	2899	
10% pcm + قیر	1.96	0.964	2.79	1.36	2729	

جدول ۶ نتایج آزمایش رئومتر تیرچه خمشی

	-12		-18		-24	
	S_t	m	S_t	m	S_t	M
نمونه	≤ 300 Mpa	≥ 0.3 Mpa	≤ 300 Mpa	≥ 0.3 Mpa	≤ 300 Mpa	≥ 0.3 Mpa
قیر	171	0.307	309	0.262		
7% PCM + قیر			261	0.312	459	0.263
10% PCM + قیر			229	0.313	440	0.267

بازگشت خزشی در چند سطح تنش (MSCR)

به منظور بررسی حساسیت و رفتار قیرها در برابر شیارشدگی و یا تغییرشکل دائمی، روش MSCR طبق استاندارد AASHTOT350 استفاده می‌شود. در این آزمایش یک نمونه قیر حاصل از آزمایش RTFO به ضخامت ۱ میلی‌متر و قطر ۲۵ میلی‌متر تحت ۱۰ سیکل اعمال بار به مدت ۱ ثانیه تحت بار خزشی و ۹ ثانیه توقف و استراحت در سطح تنش ۱۰۰ و تنش ۳۲۰۰ پاسکال به وسیله دستگاه DSR قرار می‌گیرد. پس از آن مقدار کرنش اعمالی، مقدار نرمی، مقدار درصد بازگشت کرنش[®]، و همچنین میزان نرمی خزشی غیر قابل بازگشت (Jnr) در هر ۱۰ سیکل و هر سطح تنش و درصد اختلاف در نرمی خزشی غیر قابل بازگشت (diff-Jnr) قیرهای اصلاح‌شده مختلف محاسبه می‌شود. پارامتر Jnr، نسبتی از مقدار کرنش باقی‌مانده در قیر بعد از باربرداری و بارگذاری به میزان تنش اعمالی است که میزان مقاومت نمونه قیری را در برابر تغییرشکل‌های دائمی نمایش می‌دهد. میزان نرمی خزشی غیر قابل بازگشت می‌تواند مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی را پیش‌بینی کند. این پارامتر نسبت به پارامتر $G^* / \sin \delta$ برای مشخص کردن مقاومت نمونه قیری به تغییرشکل دائمی مناسب‌تر است. جدول (۷) پارامترهای مربوط به آزمایش MSCR در این پژوهش را نشان می‌دهد.

نتایج نشان می‌دهد که در قیر اصلاح‌شده با ۱۰٪ PCM در سطح تنش ۳۲۰۰ pa مقدار بازگشت خزشی قیر ۲۳۱٪ افزایش پیدا کرده است که بر این اساس می‌توان گفت مقاومت آن در برابر شیارشدگی نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر است. درصد بیشتر بازگشت کرنش در نمونه قیری بیانگر این موضوع است که نمونه قیری توانایی بازگشت مقدار بیشتری از کرنش بعد از بارگذاری را دارد. شایان ذکر است هر مقداری که درصد بازگشت کرنش، بیشتر باشد، نمونه قیری دارای توانایی بیشتر را برای مقابله و

مقاومت با شیارشدگی دارد. همچنین جدول (۷) مقادیر نرمی خزشی غیر قابل بازگشت Jnr را در سطوح کرنش ۱۰۰ pa و ۳۲۰۰ pa نمایش می‌دهد. نتایج حاصل از آزمایش نشان می‌دهد که پارامتر Jnr با افزودن ۱۰٪ PCM در سطح تنش ۱۰۰ pa حدود ۲۸٪ و در سطح تنش ۳۲۰۰ pa حدود ۲۵٪ کاهش می‌یابد. به طوری که قیر حاوی ۱۰٪ PCM کمترین مقدار Jnr را دارد. مقدار کمتر Jnr بیان‌کننده مقاومت بیشتر مخلوط آسفالتی ساخته‌شده با آن نمونه قیری با حساسیت کمتر مخلوط آسفالتی نسبت به شیارشدگی است. اگر میزان سطوح تنش در آزمون MSCR یکسان باشد، می‌شود نتیجه گرفت که میزان کرنش دائمی برای نمونه قیری اصلاح‌شده نسبت به نمونه قیری خالص کمتر است. حساسیت قیر نسبت به میزان تنش اعمالی با استفاده از پارامتر نرمی خزشی غیر قابل بازگشت Jnr-diff محاسبه می‌شود. همچنین جدول (۷) نتایج درصد اختلاف بین نرمی خزشی غیر قابل بازگشت را در آزمایش باربرداری و بارگذاری نمایش می‌دهد. درصد اختلاف بیانگر حساسیت نمونه قیری به افزایش در سطح تنش است. در نتیجه، مقادیر کمتر نشان‌دهنده کمتر بودن حساسیت نمونه قیری به تنش است. طبق آیین‌نامه آشتو، حداکثر میزان درصد قابل قبول تغییر در نرمی خزشی غیر قابل بازگشت ۷۵٪ است. این معیار می‌تواند استفاده از نمونه‌های قیری را که نسبت به تغییر تنش حساس هستند و پتانسیل و امکان شیارشدگی زیادی دارند محدود کند، هر چند که در الزامات درجه عملکردی قابل قبول باشد. با توجه به نتایج نمایش داده‌شده در جدول (۷) می‌توان گفت که مقدار پارامتر diff-Jnr برای قیر حاوی ۱۰٪ PCM بالاترین مقدار است. بنابراین، این نوع نمونه قیری اصلاح‌شده می‌تواند یک نمونه قیری با حساسیت بالا نسبت به تنش قرار گیرد.

جدول ۷ نتایج آزمایش بازگشت خزشی در چند سطح تنش

نمونه	شاخص‌ها					
	R 0.1	R 3.2	J _{nr} 0.1	J _{nr} 3.2	R-diff	J _{nr} -diff
قیر	7.755	0.497	3.462	3.78	93.58	9.17
7% pcm + قیر	5.221	0.946	2.883	3.211	81.87	11.36
10% pcm + قیر	6.138	1.15	2.493	2.826	81.25	13.38

نتیجه گیری

در این پژوهش با هدف کنترل دمای مخلوط‌های آسفالتی از یک نوع ماده تغییرفازدهنده کامپوزیتی بر پایه روغن نارگیل و پلی آنیلین (PANI/CO-PCM) به منظور ذخیره‌سازی انرژی حرارتی استفاده شده است. پس از سنتز کردن و آماده‌سازی ماده تغییرفازدهنده را با قیر مخلوط کرده و آزمایش‌های شناسایی مواد و Superpave انجام شده است که خلاصه نتایج در زیر ذکر شده است:

۱. افزودن PCM باعث کاهش قابل توجه T_g می‌شود که منجر به بهبود انعطاف‌پذیری قیر در دماهای پایین می‌گردد. این امر موجب افزایش مقاومت در برابر ایجاد ترک در دماهای پایین می‌شود.

۲. PCM خالص آنتالپی ذوب بسیار بالایی دارد (مجموعاً $94,7 \text{ kJ/g}$). افزودن آن به قیر باعث افزایش قابل توجه ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی می‌شود، هر چند به میزان کمتر از PCM خالص. با افزایش درصد PCM، آنتالپی ذوب افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده بهبود قابلیت ذخیره‌سازی و آزادسازی انرژی حرارتی است. این ویژگی می‌تواند در کنترل دمای سطح آسفالت مؤثر باشد.

۳. افزودن PCM به قیر باعث ایجاد تغییرات قابل توجهی در رفتار حرارتی آن می‌شود. این تغییرات شامل بهبود انعطاف‌پذیری در دمای پایین، افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی، گسترش محدوده دمایی عملکرد و تغییر در الگوی ذوب و تبلور است. خواص منحصر به فرد PCM خالص، مانند آنتالپی ذوب بالا و دو پیک ذوب مجزا، به مخلوط قیر و PCM منتقل می‌شود، هر چند با شدت کمتر. این خصوصیات می‌توانند منجر به بهبود عملکرد آسفالت در شرایط آب و هوایی مختلف شوند.

۴. PCM خالص دو پیک ذوب در دماهای متفاوت نشان می‌دهد. این ویژگی باعث می‌شود که مخلوط قیر و PCM در محدوده دمایی وسیع‌تری قابلیت ذخیره و آزادسازی انرژی حرارتی داشته باشد.

۵. دمای تبلور بالای PCM خالص باعث افزایش دمای شروع تبلور در مخلوط‌های قیر و PCM می‌شود که می‌تواند بر خواص رئولوژیکی قیر در دماهای بالا تأثیر بگذارد.

۶. نتایج آزمایش BBR نشان داد که دمای عملکردی قیر خالص -12°C است ولی در نمونه‌های حاوی PCM به -18°C

می‌رسد.

۷. ویسکوزیته قیر خالص $0,407 \text{ Pa.s}$ و ویسکوزیته قیر حاوی 10% ماده تغییرفازدهنده $0,509 \text{ Pa.s}$ است که نشان از بهبود ویسکوزیته قیر دارد.

۸. می‌بایست حداکثر میزان افت وزنی قیر 1% باشد تا بتوان از آن در آزمایش‌های BBR و DSR استفاده کرد در نمونه حاوی 10% افزودنی مقدار افت وزنی قیر کمتر از 1% است.

۹. طبق آزمایش MSCR قیر اصلاح‌شده با 10% PCM در سطح تنش $3,2 \text{ Pa}$ مقدار بازگشت خزشی قیر 231% افزایش پیدا کرده است که نشان از افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها دارد.

واژه‌نامه

Phase Change Material (PCM)	ماده تغییرفازدهنده
Coconut (co)	روغن نارگیل
	گرماسنج روبشی تفاضلی
Differential Scanning Calorimetry (DSC)	
X-ray Diffraction (XRD)	پراش پرتو ایکس
	طیف‌سنج مادون قرمز
Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)	
	میکروسکوپ الکترونی روبشی انتشار میدانی
Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM)	
Rotational Viscosity (RV)	ویسکوزیته چرخشی قیر
Rolling Thin Film Oven (RTFO)	آون دوار لایه نازک قیر
Dynamic Shear Rheometer (DSR)	رئومتر برشی دینامیکی
Bending Beam Rheometer (BBR)	رئومتر تیرچه خمشی
Pressure Aging Vessel (PAV)	محفظه تسریع پیری
	آزمایش خزش و برگشت قیر در چند سطح تنش
Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)	
polyaniline (PANI)	پلی آنیلین (پانی)
m	نرخ تغییر سختی با زمان
st	سختی خزشی قیر
	سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی
Thermal energy storage (TES)	
Expanded Graphite (EG)	گرافیت گسترش‌یافته
Polyethylene glycol (PEG)	پلی اتیلن گلیکول

pa. s	پاسکال.ثانیه	Salicylic acid (SA)	اسید سالیسیلیک
Jnr	نرمی خزشی غیر قابل بازگشت	palmitic acid (PA)	پالمیتیک اسید
diff-Jnr	درصد اختلاف در نرمی خزشی غیر قابل بازگشت	APS	آلومینیوم پرسولفات
Jnr-diff	نرمی خزشی غیر قابل بازگشت	HCL	هیدروکلریک اسید
Glass Transition Temperature (Tg)	دمای انتقال شیشه‌ای	Superpave	آزمایش‌های روسازی ممتاز
		δ	پارامتر اختلاف فاز
سیاسگزاری		G*	مدول مختلط
		Performance grade (PG)	درجه عملکردی قیر

مراجع

- [1] L. Zhang, Y. C. Cui, C. Xing, M. Y. Shan, and F. Gao, "Diffusion influence mechanism of virgin and aged asphalt binder system based on molecular dynamics," *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, vol. 150, no. 3, p. 04024022, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1061/JPEODX.PVENG-1439>
- [2] Y. Du, J. Chen, Z. Han, and W. Liu, "A review on solutions for improving rutting resistance of asphalt pavement and test methods," *Construction and Building Materials*, vol. 168, pp. 893–905, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.151>
- [3] Y. Wang, W. Wang, and L. Wang, "Understanding the relationships between rheology and chemistry of asphalt binders: A review," *Construction and Building Materials*, vol. 329, p. 127161, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127161>
- [4] A. F. Justino Uchoa, W. da Silva Rocha, J. P. Macedo Feitosa, R. L. Nogueira, D. H. A. de Brito, J. B. Soares, and S. de Aguiar Soares, "Biobased palm oil as an additive for asphalt binder: Chemical characterization and rheological properties," *Construction and Building Materials*, vol. 285, p. 122883, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122883>
- [5] F. Moghadas Nejad, A. Azarhoosh, and G. H. Hamed, "Effect of high-density polyethylene on the fatigue and rutting performance of hot mix asphalt – a laboratory study," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 15, no. 3, pp. 746–756, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.876443>
- [6] B. Anupam, U. C. Sahoo, and P. Rath, "Phase change materials for pavement applications: A review," *Construction and Building Materials*, vol. 247, p. 118553, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118553>
- [7] D. Zhang, M. Chen, S. Wu, and P. Liu, "Effect of expanded graphite/polyethylene glycol composite phase change material (EP-CPCM) on thermal and pavement performance of asphalt mixture," *Construction and Building Materials*, vol. 277, p. 122270, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122270>
- [8] J. Dai, F. Ma, Z. Fu, C. Sangiorgi, P. Tataranni, G. Tarsi, C. Li, Y. Hou, and Y. Guo, "Binary eutectic phase change materials application in cooling asphalt: An assessment for thermal stability and durability," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 700, p. 134790, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.134790>
- [9] J. Wang, J. Zhang, Z. Dong, and Y. Wang, "Compatibility of PCM modified asphalt based on naphthenic oil

- modification: A multiscale study,” *Construction and Building Materials*, vol. 426, p. 136206, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136206>
- [10] M. Yang, X. Zhang, X. Zhou, B. Liu, X. Wang, and X. Lin, “Research and exploration of phase change materials on solar pavement and asphalt pavement: A review,” *Journal of Energy Storage*, vol. 35, p. 102246, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102246>
- [11] X. Wang, B. Ma, S. Li, W. Si, K. Wei, H. Zhang, X. Zhou, Y. Fang, X. Kang, and W. Shi, “Review on application of phase change materials in asphalt pavement,” *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 10, no. 2, pp. 185–229, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.12.001>
- [12] M. Guo, M. Liang, Y. Jiao, W. Zhao, Y. Duan, and H. Liu, “A review of phase change materials in asphalt binder and asphalt mixture,” *Construction and Building Materials*, vol. 258, p. 119565, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119565>
- [13] F. Wang, X. Fang, and Z. Zhang, “Preparation of phase change material emulsions with good stability and little supercooling by using a mixed polymeric emulsifier for thermal energy storage,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 176, pp. 381–390, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.10.025>
- [14] C. Alkan, E. H. Alakara, S. A. Aksoy, and I. Demir, “Cement mortar composites including 1-tetradecanol@PMMA Pickering emulsion particles for thermal energy management of buildings,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 476, p. 146843, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146843>
- [15] C. Baylis and C. A. Cruickshank, “Review of bio-based phase change materials as passive thermal storage in buildings,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 186, p. 113690, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113690>
- [16] J. Giro-Paloma, M. Martínez, L. F. Cabeza, and A. I. Fernández, “Types, methods, techniques, and applications for microencapsulated phase change materials (MPCM): A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 1059–1075, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.040>
- [17] Y. Zhang, G. Zhou, K. Lin, Q. Zhang, and H. Di, “Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook,” *Building and Environment*, vol. 42, no. 6, pp. 2197–2209, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.023>
- [18] G. Li, “Review of thermal energy storage technologies and experimental investigation of adsorption thermal energy storage for residential application,” M.S. thesis, University of Maryland, College Park, 2013. [Online]
- [19] B. Zalba, J. M. Marin, L. F. Cabeza, and H. Mehling, “Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, no. 3, pp. 251–283, 2003. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8)
- [20] Y. Chen, H. Wang, Z. You, and N. Hossiney, “Application of phase change material in asphalt mixture – a review,” *Construction and Building Materials*, vol. 263, p. 120219, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120219>
- [21] H. Jouhara, A. Żabnieńska-Góra, N. Khordeghah, D. Ahmad, and T. Lipinski, “Latent thermal energy storage technologies and applications: A review,” *International Journal of Thermofluids*, vol. 5, p. 100039, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100039>

- [22] X. Zhou, B. Ma, Y. Ren, and X. Wang, "Study on temperature control performance of composite shaped phase change material for asphalt pavement," *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, vol. 37, no. 11, pp. 3611–3616, 2018. (In Chinese)
- [23] Y. Farnam, H. S. Esmaeeli, P. D. Zavattieri, J. Haddock, and J. Weiss, "Incorporating phase change materials in concrete pavement to melt snow and ice," *Cement and Concrete Composites*, vol. 84, pp. 134–145, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.09.002>
- [24] O. V. Laukkanen, H. Soenen, T. Pellinen, S. Heyrman, and G. Lemoine, "Creep-recovery behavior of bituminous binders and its relation to asphalt mixture rutting," *Materials and Structures*, vol. 48, pp. 4039–4053, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0464-7>
- [25] M. Yang, X. L. Zhang, X. C. Zhou, B. Liu, X. Wang, and X. W. Lin, "Research and exploration of phase change materials on solar pavement and asphalt pavement: A review," *Journal of Energy Storage*, vol. 35, p. 102246, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102246>
- [26] M. Jia, A. Sha, W. Jiang, X. Li, and W. Jiao, "Developing a solid–solid phase change heat storage asphalt pavement material and its application as functional filler for cooling asphalt pavement," *Energy and Buildings*, vol. 285, p. 112935, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112935>
- [27] Y. Zhou and Z. Liu, "A cross-scale 'material-component-system' framework for transition towards zero-carbon buildings and districts with low, medium and high-temperature phase change materials," *Sustainable Cities and Society*, vol. 89, p. 104378, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104378>
- [28] D. Betancourt-Jimenez, M. Montoya, J. Haddock, J. P. Youngblood, and C. J. Martinez, "Regulating asphalt pavement temperature using microencapsulated phase change materials (PCMs)," *Construction and Building Materials*, vol. 350, p. 128924, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128924>
- [29] M. Guo, M. Liang, Y. Jiao, W. Zhao, Y. Duan, and H. Liu, "A review of phase change materials in asphalt binder and asphalt mixture," *Construction and Building Materials*, vol. 258, p. 119565, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119565>
- [30] S. Wang, K. Wei, W. Shi, P. Cheng, J. Shi, and B. Ma, "Study on the rheological properties and phase-change temperature regulation of asphalt modified by high/low-temperature phase change material particles," *Journal of Energy Storage*, vol. 56, p. 105970, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105970>
- [31] M. Wu, S. Wu, Y. Cai, R. Wang, and T. Li, "Form-stable phase change composites: Preparation, performance, and applications for thermal energy conversion, storage and management," *Energy Storage Materials*, vol. 42, pp. 380–417, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2021.07.019>
- [32] J. Dai, F. Ma, C. Sangiorgi, G. Tarsi, Z. Fu, P. Tataranni, C. Li, and Y. Hou, "Assessment of high-enthalpy composite eutectic phase change materials efficiency in asphalt binders for cooling pavements," *Journal of Cleaner Production*, vol. 442, p. 140999, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140999>
- [33] S. Zhang, D. Feng, L. Shi, L. Wang, Y. Jin, L. Tian, Z. Li, G. Wang, L. Zhao, and Y. Yan, "A review of phase change heat transfer in shape-stabilized phase change materials (ss-PCMs) based on porous supports for thermal energy storage," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 135, p. 110127, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110127>

- [34] X. Wang, W. Li, Z. Luo, K. Wang, and S. P. Shah, "A critical review on phase change materials (PCM) for sustainable and energy efficient building: Design, characteristic, performance and application," *Energy and Buildings*, vol. 260, p. 111923, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111923>
- [35] Y. Ren and P. Hao, "Modification mechanism and enhanced low-temperature performance of asphalt mixtures with graphene-modified phase-change microcapsules," *Construction and Building Materials*, vol. 320, p. 126301, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126301>
- [36] B. J. Manning, P. R. Bender, S. A. Cote, R. A. Lewis, A. R. Sakulich, and R. B. Mallick, "Assessing the feasibility of incorporating phase change material in hot mix asphalt," *Sustainable Cities and Society*, vol. 19, pp. 11–16, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.06.005>
- [37] J. Jin, F. Lin, R. Liu, *et al.*, "Preparation and thermal properties of mineral-supported polyethylene glycol as form-stable composite phase change materials (CPCMs) used in asphalt pavements," *Scientific Reports*, vol. 7, no. 1, p. 16998, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17224-1>
- [38] M. R. Kakar, Z. Refaa, J. Worlitschek, A. Stamatiou, M. N. Partl, and M. Bueno, "Thermal and rheological characterization of bitumen modified with microencapsulated phase change materials," *Construction and Building Materials*, vol. 215, pp. 171–179, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.171>
- [39] K. Wei, X. Wang, B. Ma, W. Shi, S. Duan, and F. Liu, "Study on rheological properties and phase-change temperature control of asphalt modified by polyurethane solid–solid phase change material," *Solar Energy*, vol. 194, pp. 893–902, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.007>
- [40] D. Zhang, M. Chen, S. Wu, M. Riara, J. Wan, and Y. Li, "Thermal and rheological performance of asphalt binders modified with expanded graphite/polyethylene glycol composite phase change material (EP-CPCM)," *Construction and Building Materials*, vol. 194, pp. 83–91, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.237>
- [41] J. Dai, F. Ma, Z. Fu, C. Li, M. Jia, K. Shi, Y. Wen, and W. Wang, "Applicability assessment of stearic acid/palmitic acid binary eutectic phase change material in cooling pavement," *Renewable Energy*, vol. 175, pp. 748–759, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.016>
- [42] V. Ashok, N. Geetha, S. Rajkumar, and T. Pauline, "Experimental investigations for thermal energy management by encapsulation of nano-enhanced bio phase change material in buildings," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, vol. 44, no. 18, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2091715>
- [43] A. Jain and G. Pal, "Development and characterization of saturated fatty acids and biopolymer based novel multilayer encapsulated phase change materials system for buildings," *Construction and Building Materials*, vol. 454, p. 139115, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139115>
- [44] M. Nazari, M. Jebrane, and N. Terziev, "Bio-based phase change materials incorporated in lignocellulose matrix for energy storage in buildings—a review," *Energies*, vol. 13, no. 12, p. 3065, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en13123065>
- [45] B. Kalidasan, A. Pandey, S. Shahabuddin, M. George, K. Sharma, M. Samykano, V. Tyagi, and R. Saidur, "Synthesis and characterization of conducting Polyaniline@cobalt-Paraffin wax nanocomposite as nano-phase change material:

- Enhanced thermophysical properties,” *Renewable Energy*, vol. 173, pp. 1057–1069, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.042>
- [46] E. G. Saraç, E. Öner, and M. V. Kahraman, “Microencapsulated organic coconut oil as a natural phase change material for thermo-regulating cellulosic fabrics,” *Cellulose*, vol. 26, pp. 8939–8950, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02701-9>
- [47] R. Jamwal, S. Kumari, A. S. Dhaulaniya, B. Balan, and D. K. Singh, “Application of ATR-FTIR spectroscopy along with regression modelling for the detection of adulteration of virgin coconut oil with paraffin oil,” *LWT – Food Science and Technology*, vol. 118, p. 108754, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108754>
- [48] M. De Luca, G. Ioele, F. Grande, M. A. Occhiuzzi, M. Chieffallo, A. Garofalo, and G. Ragno, “Multivariate curve resolution methodology applied to the ATR-FTIR data for adulteration assessment of virgin coconut oil,” *Molecules*, vol. 28, no. 12, p. 4661, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/molecules28124661>
- [49] K. Shiv, A. Singh, L. B. Prasad, R. N. Gautam, M. K. Bharty, and T. Das, “Comparative analysis of edible oils classification using Fourier transform infrared and fluorescence spectroscopy coupled with chemometrics,” *Journal of Food Composition and Analysis*, vol. 129, p. 106056, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106056>
- [50] N. S. Sariciftci, H. Neugebauer, H. Kuzmany, and A. Neckel, “In situ FTIR spectroscopy of polyaniline,” in *Electronic Properties of Conjugated Polymers*, Berlin, Heidelberg: Springer, 1987, pp. 228–231. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-642-83284-0_38
- [51] H. Neugebauer, A. Neckel, N. S. Sariciftci, and H. Kuzmany, “In situ FTIR measurements of polyaniline in the non-metallic phase,” *Synthetic Metals*, vol. 29, no. 1, pp. 185–192, 1989. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0379-6779\(89\)90300-4](https://doi.org/10.1016/0379-6779(89)90300-4)
- [52] C. Liu, Z. Meng, P. Cao, J. Jiang, X. Liang, M. Piatko, S. Campbell, S. K. Lo, and Y. Liu, “Visualized phase behavior of binary blends of coconut oil and palm stearin,” *Food Chemistry*, vol. 266, pp. 66–72, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.05.117>
- [53] B. Mahisanunt, H. Hondoh, and S. Ueno, “Coconut oil crystallization on tripalmitin and tristearin seed crystals with different polymorphs,” *Crystal Growth & Design*, vol. 20, no. 8, pp. 4980–4990, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.0c00087>
- [54] J. Stejskal, J. Dybal, and M. Trchová, “The material combining conducting polymer and ionic liquid: Hydrogen bonding interactions between polyaniline and imidazolium salt,” *Synthetic Metals*, vol. 197, pp. 168–174, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2014.09.008>
- [55] M. R. McCord and H. Baniasadi, “Advancements in form-stabilized phase change materials: Stabilization mechanisms, multifunctionalities, and applications—a comprehensive review,” *Materials Today Energy*, vol. 41, p. 101532, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2024.101532>