

بررسی تاثیر مواد تغییر فازدهنده بر عملکرد حرارتی روسازی‌ها (مطالعه مروری)

مقاله علمی - مروری

علی الهی، دانش آموخته کارشناسی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران، تهران، ایران
مصطفی آدرسی*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران، تهران، ایران
سعید غفارپور جهرمی، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.adresi@sru.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۲ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰

صفحه ۲۶۲-۲۴۷

چکیده

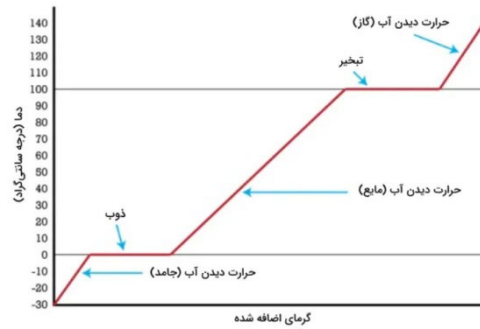
یکی از پیشرفته‌ترین طرح‌های ارائه شده به جهت ارتقای عملکرد روسازی‌ها، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در روسازی است. این مواد با توجه به گرمای نهان بالایی که دارند، می‌توانند مقادیر زیادی گرما را بدون تغییر دما و صرفاً با تغییر فاز جذب یا از دست بدهند به طوری که در تابستان شیار افتادگی و در زمستان ترک خوردن روسازی را کاهش دهند. این مواد به طور عمده به سه دسته مواد آلی، معدنی و یا ترکیبات یونتیک تقسیم می‌شوند و روش‌های مختلفی اعم از انواع پلیمریزاسیون، میکرو کپسوله سازی، قرار دادن داخل سنگدانه‌ها، سل-ژل و سایر روش‌ها برای به کار بردن تغییر فازدهنده‌ها در روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. طبق مراجع استفاده شده، معروف ترین تغییر فازدهنده‌های مورد استفاده به ترتیب عبارتند از: پارافین‌ها، اسیدهای چرب، هیدرات‌های نمک و در نهایت ترکیبات آنها است. در بین مواد توصیه شده مشتقات پارافین به خاطر قیمت مناسب، فرآوانی بسیار و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نزدیک دمای عملکردی روسازی‌ها، توصیه می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: مواد تغییر فازدهنده، روسازی، آسفالت، بتن، شیارشدگی، یخ زدایی، ترک خوردگی

۱- مقدمه

در حضور عوامل محیطی مخرب، پیوسته توانایی انتقال ترافیک را داشته باشند. این مواد با توجه به گرمای نهان بالایی که دارند می‌توانند مقادیر زیادی گرما را بدون تغییر دما و صرفاً با تغییر فاز از جامد به مایع یا از مایع به جامد، جذب یا از دست بدهند. در شکل ۱ نمودار تغییر فاز یخ به آب و از آب به بخار تحت فشار ثابت را می‌توان مشاهده کرد.

در سال‌های اخیر پژوهشگران و مهندسان کشورهای مختلف برآن شدند تا عملکرد روسازی‌ها را ارتقا دهند تا در نهایت سبب توسعه کشور، افزایش سرعت انتقال کالا و مسافران و کاهش دوره تعمیر و نگهداری روسازی‌ها شوند. یکی از معروف‌ترین طرح‌های ارائه شده، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در روسازی است تا آنها را در برابر گرمای تابستان و یخبندان زمستان مقاوم‌سازی کنند و آسیب‌های وارده به راه‌ها به حداقل برسد و



نمودار ۱. نمودار گرمایی آب

می‌توانند باعث کاهش اثر پدیده جزیره گرمایی شهری (شکل ۲) شوند از این رو این مواد در دستیابی به سیستم‌های حمل و نقل هوشمند، سبز و پایدار مفید هستند. پدیده جزیره گرمایی به افزایش دما در محیط شهری به دلیل جذب بیشتر انرژی خورشیدی توسط ساختمان‌ها و روسازی‌های عمدتاً تیره اطلاق می‌شود. روسازی‌هایی که گرما را جذب کنند ولی دمای آنها بالا نرود در واقع پدیده جزیره گرمایی را به تاخیر انداخته‌اند.

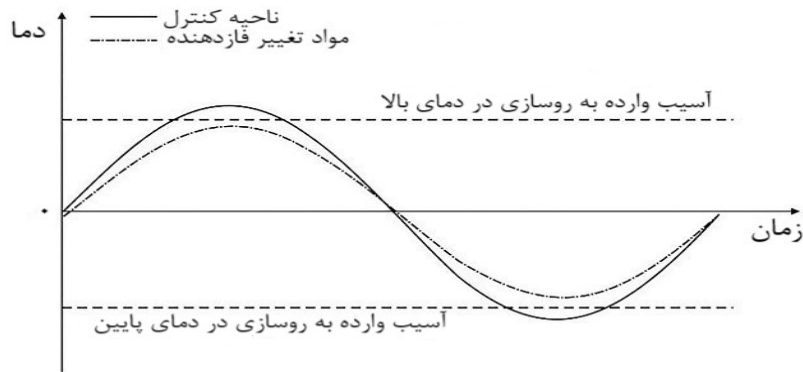
قسمت‌های ذوب و تبخیر، تغییر فازهای آب را به ترتیب از جامد به مایع و از مایع به گاز را نشان می‌دهند. مواد تغییر فاز دهنده عموماً گرمای نهان ذوب و تبخیر بالایی دارند می‌توانند مانند یک خازن ذخیره گرما عمل کنند و تغییرات دمای جسم را در طول شبانه روز کاهش دهند. به طوری که در تابستان دمای روسازی بالا نرود و با کاهش ویسکوزیته قیر احتمال و نرخ شیار افتادگی را کاهش دهد و در زمستان نیز با جلوگیری از کاهش شدید دمای روسازی احتمال ترک خوردن حرارتی روسازی را کاهش می‌دهد کیو یو این، (۲۰۲۰). تغییر فازدهنده‌های مناسب همچنین



شکل ۲. پدیده جزیره گرمایی شهریارم. عمران خان، ۲۰۲۳

با استفاده از تغییر فاز دهنده خاصی مثل نمک (شصت درصد سدیم نیترات و چهل درصد پتاسیم نیترات) ذوب شوند وی. وانگ، (۲۰۲۱)، کی. ام. پاول، (۲۰۱۷). نمودار ۳ اثر افزودن تغییر فاز دهنده‌ها بر روی دمای روسازی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با کاهش دمای روسازی به کمتر از مقداری که تنش‌هایی کمتر از محدوده تنش‌های نهایی روسازی را باعث می‌شود، می‌توان با بهره‌گیری از تغییر فاز دهنده‌ها خرابی ناشی از تغییرات دما در مخلوط روسازی را به حداقل رساند.

خواص حرارتی، مانند دمای ذوب و گرمای ذوب دو شاخص فیزیکی مهم برای انتخاب تغییر فاز دهنده مناسب برای ذخیره انرژی حرارتی هستند. دمای ذوب مورد نیاز بستگی به کاربرد دارد. برای برخی کاربردها، مانند پزشکی، دمای ذوب مورد نیاز ممکن است در محدوده زیر صفر درجه سانتیگراد باشد. در کاربردهای ساختمانی، دمای ذوب مطلوب ممکن است دمای اتاق در محدوده ۲۰ تا ۳۰ درجه سانتیگراد باشد. برای کاربردهای تولید انرژی حرارتی خورشیدی، ممکن است به موادی نیاز داشته باشید که در دماهای بسیار بالاتر مانند ۲۵۰ درجه سانتیگراد



نمودار ۳. اثر افزودن تغییر فاز دهنده‌ها بر دمای روسازی دی. ام. انصاری، ۲۰۰۴

دمای روسازی است که به ظرفیت گرمایی ویژه، هدایت گرمایی، تغییرات دمایی در یک شب و خواص مقاومتی مخلوط روسازی مرتبط خواهد بود. در این رابطه شی و همکاران یک مدل انتقال حرارت با در نظر گرفتن تبادلات حرارتی بین روسازی و محیط اطراف و هدایت گرما در ساختار روسازی را به منظور محاسبه میزان تغییر فاز دهنده مورد نیاز برای کنترل دمای روسازی در محدوده مشخص را مطابق رابطه ۱ پیشنهاد داد.

$$C_p \frac{\partial T}{\partial t} \rho = \rho \dot{b} + k \cdot \text{div}(\text{grad}(T))$$

در واقع مواد تغییر فاز دهنده با تاخیر در روند کاهش دمای روسازی، منطبق با روند کاهش دمای محیط، باعث می‌شوند روسازی در زمان اوج سرمای شب، به آن اندازه‌ای که محیط با کاهش دما روبرو شده است، روبرو نشود و از این رو با سپری شدن اوج سرما و رفتن به رو به گرمی اثر کاهش دمای شبانه را خنثی کند و روسازی را از ترک خوردگی نجات دهد. نکته مهم در استفاده از میزان تغییر فاز دهنده‌ها در روسازی، کنترل گرادیان

(۱)

در این رابطه:

ρ = چگالی ماده روسازی

C_p = ظرفیت گرمایی ویژه روسازی

K = هدایت گرمایی مجموعه تغییر فاز دهنده و روسازی

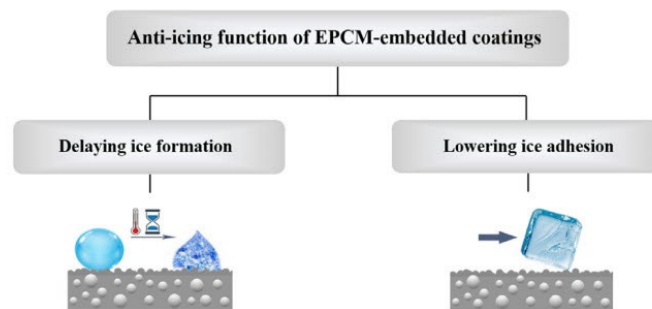
\dot{b} = نرخ تولید حرارت داخلی توسط تغییر فاز دهنده

T = دمای وابسته به زمان و موقعیت

div یعنی دیورژانس، که تابع ارتباط دهنده میزان هدایت گرمایی از سطح روسازی با تغییرات دمای داخلی روسازی است.

می‌شود و روسازی‌ها را قادر می‌سازد تا در سردترین و پر بارش‌ترین روزهای سال، ترافیک را از خود عبور دهند که در افزایش ایمنی و کاهش تاخیر ناشی از یخبندان امری بسیار حیاتی است.

همچنین تغییر فاز دهنده‌ها با تاخیر در ایجاد یخ و کاهش پیوند بین برف و یخ با روسازی در فصل زمستان (نموگراف ۴)، عملیات یخ‌زدایی راحت‌تر می‌کنند به گونه‌ای که حرکت خودروها نیز باعث شکسته شدن یخ‌ها و پاک شدن آن‌ها از سطح روسازی



نموگراف ۴. تاثیر تغییر فاز دهنده‌ها بر یخ زدایی روسازی‌ها

۲- تاریخچه پیدایش و روند توسعه تغییر فاز

دهنده‌ها

تغییر فاز دهنده‌ها نخست برای افزایش ذخیره سازی انرژی خورشیدی کشف شدند. این مواد همچنین عملکرد بهتر سیستم زمین گرمایی را نیز تضمین می‌کنند. کاربرد دوم گنجاندن آن‌ها در پوشش‌های ساختمانی و روسازی راه است. این موضوع اثر مستقیم بر افزایش ذخیره حرارتی سازه دارد و دمای آن‌ها را حول دمای مورد نیاز تثبیت می‌کند. سومین کاربرد در گرمایش و سرمایش فضا است و عملکرد کارآمدتر سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی را تضمین می‌کنند اچ. ام. تیماه، (۲۰۲۳). تغییر فاز دهنده‌ها به طور گسترده به آلی، معدنی (غیر آلی) و یوتکتیک طبقه‌بندی می‌شوند. گونه‌های آلی شامل پارافین‌ها و اسیدهای چرب هستند که معمولاً برای کنترل دما در ساختمان‌ها، نگهداری غذا و داروها، خنک کردن وسایل الکترونیکی و غیره استفاده می‌شوند. نوع معدنی معمولاً شامل نمک‌ها و فلزات هیدراته هستند که برای کاربردهای ذخیره سازی با دمای متوسط تا بالا مانند صنایع و نیروگاه‌های حرارتی مناسب هستند. گونه‌های یوتکتیک از ترکیب چند فاز دهنده معدنی شکل می‌گیرند که می‌توان از این طریق دمای تغییر فاز آنها را تعیین کرد و این مورد از مزیت‌های تغییر فاز دهنده‌های یوتکتیک است. یک تغییر فاز دهنده کارا باید دارای دمای انتقال فاز در محدوده دمای عملیاتی مورد نظر باشد، گرمای نهان همجوشی بالایی داشته باشند به طوری که مقدار کمتری از تغییر فاز دهنده بتواند مقدار مورد نظر انرژی را ذخیره کند، دارای رسانایی حرارتی بالا برای سرعت شارژ و تخلیه سریعتر، تغییرات حجم کمی در طول انتقال فاز داشته باشند، تا تنش‌های درونی کمتری ایجاد کنند، در حین انجماد باعث کاهش دمای محیط نشوند و یا به مقدار بسیار کمی سبب کاهش دمای محیط شوند. دارای پایداری شیمیایی و بدون تجزیه شیمیایی باشند، نباید حاوی عناصر و ترکیبات سمی، قابل اشتعال و انفجاری باشند، دارای خوردگی کم یا بدون خوردگی باشند و اقتصادی بوده و قیمت بالایی نداشته باشند ام. موتوکومار، (۲۰۲۳). انتقال فاز را می‌توان به سه نوع دسته بندی کرد: جامد - مایع، جامد - گاز و مایع - گاز با این حال، به دلیل تغییر حجم کم، جامد - مایع در مقایسه با گاز - جامد و مایع - گاز، انتخاب مواد با دمای ذوب نزدیک به دمای عملکردی ارجح تر است آر هاوانگ و همکاران، (۲۰۲۱)، ای. الگافی، (۲۰۰۵). از مزیت‌های رسانایی حرارتی بالا این است که

امکان تشکیل واکنش‌های شیمیایی برگشت پذیر را در تغییر فاز دهنده‌ها محدود می‌کند که این عامل خود سبب استفاده حداکثری از پتانسیل تغییر فاز دهنده‌ها می‌شود ام. عمران خان، (۲۰۲۳) کی بی ای کی، پاندی، (۲۰۲۰). این در حالیست که رسانایی حرارتی پایین باعث کاهش انتقال انرژی به داخل و خارج تغییر فاز دهنده می‌شود. به طور کلی، فرآیند ذوب این مواد بسیار سریعتر از فرآیند انجماد آنها است. این پدیده به دلیل اثر همرفتی در طول فرآیند ذوب است که به فرآیند انتقال حرارت کمک می‌کند کی. پیولیچوسکا، (۲۰۱۴)، ی ایکس یو، (۲۰۲۲). ضریب انتقال حرارت تحت تاثیر هدایت حرارتی تغییر فاز دهنده جامد تعیین می‌شود، بنابراین وظیفه اصلی در فرآیند طراحی تغییر فاز دهنده‌ها، شناسایی گزینه‌های مقرون به صرفه برای افزایش سطح انتقال حرارت بین تغییر فاز دهنده‌ها است.

۱-۲- تغییر فاز دهنده‌های معدنی

به دلیل هزینه کم، هیدرات‌های نمک مانند هگزا هیدرات کلرید کلسیم، دکاهیدرات، سولفات سدیم (نمک گلابر)، تیو سولفات سدیم پنتا هیدرات، تری هیدرات استات سدیم و اکتاهیدرات هیدروکسید باریم به عنوان مواد تغییر فاز دهنده معدنی معروف شناخته می‌شوند. ویژگی‌های هیدرات‌های نمک مانند ابرسرد کردن و تفکیک فاز، اشکالات اصلی کاربرد آن هستند، اما با استفاده از تکنیک عوامل هسته‌زا (قرار دادن تغییر فاز دهنده‌ها داخل پوسته‌های مخصوص)، این امر امکان حل شدن مشکل تفکیک فاز و فرا سرد کردن (فرآیندی است که در آن مایعات، طی سرد شدن سریع، بدون هسته زایی به دمایی پایین‌تر از نقطه انجماد معمولی خود می‌رسند، بدون اینکه منجمد شوند) را برطرف می‌کند کی. ام. پاول، (۲۰۱۷)، پی دنهولم (۲۰۱۱). در جدول ۱ خواص تعدادی از معروف ترین تغییر فاز دهنده‌های معدنی نشان داده شده است ام. خان، (۲۰۲۲).

۲-۲- تغییر فاز دهنده‌های آلی

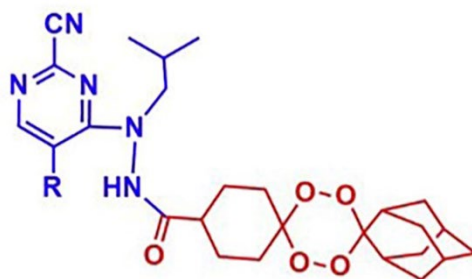
اگرچه پارافین دارای خواص مطلوبی است، اما دارای نقاط ضعف نیز می‌باشد که عبارت است از هدایت حرارتی کم و تغییر حجم زیاد در طول انتقال فاز. هدایت حرارتی آنها را می‌توان با استفاده از پرکننده‌های فلزی، ساختارهای زمینه فلزی، لوله‌های پرده‌دار و براده‌های آلومینیومی بهبود بخشید. موم تجاری، اکتادکان و ایکوزان سه نوع پارافین متداول هستند پی. کی. شارما، (۲۰۱۵)

کم، ناسازگاری با ظروف پلاستیکی و تغییر فاز با حجم بالا در حین انتقال از فاز جامد به فاز مایع هستند. تغییر فاز دهنده‌های مبتنی بر اسیدهای چرب علاوه بر اینکه به گرمای زیادی برای ذوب شدن نیاز دارند، از نظر شیمیایی و حرارتی پایدارتر هستند. موم پارافین، اکتادکان، ایکوزان و هگزادکان (شکل ۵) ظرفیت ذخیره گرمای نهان بالایی دارند پی. پینل، (۲۰۱۱). علاوه بر این، نقطه ذوب و انجماد آنها در منطقه دمای مطلوب برای انسان است. آنها به عنوان کاندیدای تغییر فاز دهنده‌های ارگانیک استفاده شوند. موم پارافین همچنین قادر به یخ زدن بدون سرد شدن زیاد است. پارافین خالص بسیار گران است لذا به تنهایی از آن استفاده نمی‌کنند پی. تانسید دوجونگ، (۲۰۱۳).

و ای. شارما، (۲۰۰۹). اسیدهای چرب، استرها، الکل‌ها و گلیکول‌ها ۷۰ ماده آلی غیر پارافینی دارند که دارای نقطه ذوب در محدوده ۷ تا ۱۸۷ درجه سانتیگراد و ظرفیت گرمایی در محدوده ۴۲ تا ۲۵۰ کیلو ژول بر کیلوگرم درجه سانتیگراد دارند. اسیدهای چرب باکیفیت‌ترین ذوب را در بین گونه‌های دیگر دارند که آنها را برای استفاده در روسازی‌ها به عامل مناسبی تبدیل می‌کند. ویژگی‌های انجماد بدون ایجاد ابر خنک‌کنندگی که آنها را برای کاربردهای گرمایشی مناسب می‌کند جی. جی. جوریناک، (۱۹۷۹). برای هیدروکربن اشباع، هر چه زنجیره هیدروکربنی طولانی‌تر باشد، دمای ذوب بالاتر، فشار بخار کمتر و خوردگی کمتر و قیمت کمتر خواهند بود. گونه‌های آلی دارای برخی خواص نامطلوب مانند قابلیت اشتعال بالا، هدایت حرارتی

جدول ۱. خواص تغییر فاز دهنده‌ها ام. خان، (۲۰۲۲)

نوع ترکیب	هدایت گرمایی (وات بر متر. کلونین)	نقطه ذوب (درجه سلسیوس)	ظرفیت گرمایی (ژول بر گرم)	چگالی انرژي (کیلوژول بر متر مکعب)	چگالی جامد (کیلوگرم بر متر مکعب)	چگالی مایع (کیلوگرم بر متر مکعب)
سدیم نیترات-پتاسیم نیترات به نسبت (۶۰ به ۴۰) (نمک خورشیدی)	۰/۵۵	۲۲۲	۱۰۰/۷	۱۹۳	۱۹۲۰	۱۸۹۹
پتاسیم کلرید-روی کلرید به نسبت (۶۸,۱ به ۳۱,۹)	۰/۸	۲۳۵	۱۹۸	۴۹۱	۲۴۸۰	
لیتیم نیترات	۰/۵۸	۲۴۵	۳۶۰	۲۳۸۰	۲۳۸۰	۱۸۷۰
لیتیم کلرید-لیتیم هیدروکسید	۱/۱	۲۶۲	۴۸۵	۷۵۲	۱۵۸۰	
روی کلرید	۰/۵	۲۸۰	۷۵	۲۱۸	۲۹۰۷	
سدیم نیترات	۰/۵	۳۰۸	۱۹۹	۴۴۹	۲۲۵۷	۱۹۰۸
سدیم فلئورید-منیزیم فلئورید به نسبت (۷۵ به ۲۵)	۱/۱۵	۶۵۰	۸۶۰	۲۴۲۵	۲۸۲۰	



شکل ۵. ساختار شیمیایی هگزادکان ای. آودیف، (۲۰۱۷)

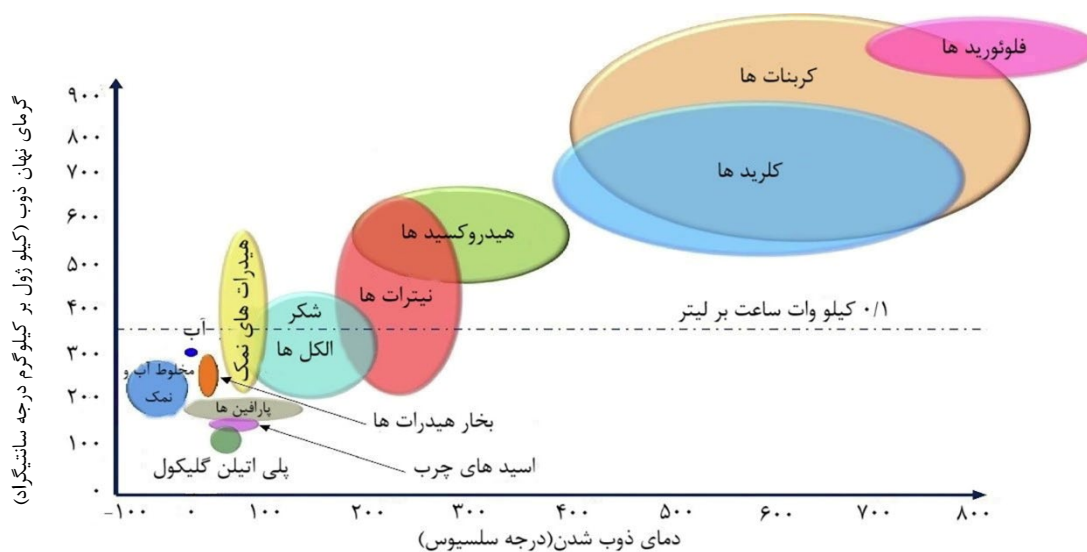
۲-۳- تغییر فاز دهنده های یوتکتیک

مخلوط دو یا چند نمک که دارای نقطه ذوب یا انجماد خاصی هستند یوتکتیک نامیده می‌شوند. یوتکتیک‌ها با داشتن رفتاری مشابه هیدرات‌های نمک، پتانسیل زیادی برای استفاده در تغییر فاز دهنده‌ها را دارند. به اصطلاح تغییر فاز دهنده یوتکتیک جامد - مایع این مزیت را دارند که نقطه ذوب آنها را می‌توان با تنظیم ترکیب مخلوط تنظیم کرد ای. اف. نیکولاس، (۲۰۱۹).

۳- انواع تغییر فاز دهنده‌ها

شکل ۶ توزیع تغییر فاز دهنده‌های رایج را از طریق دو ویژگی حرارتی ضروری را نشان می‌دهد، که می‌تواند برای هدایت محققان به غربالگری اولیه این مواد با توجه به کاربردهای مختلف استفاده شود. هر دایره یا بیضی محدوده دمایی ذوب و گرمای نهان مرتبط با آن تغییر فاز دهنده را نشان می‌دهد زد. وانگ (۲۰۱۴).

تغییر فازدهنده‌های ساخته شده از گونه‌های آلی در زمان ذوب شدن به صورت همگن ذوب می‌شوند، از نظر شیمیایی پایدار و غیر فعال بوده، با مصالح ساختمانی سازگار بوده و برای بدن انسان مضر نیستند. با این حال، موم پارافین را نمی‌توان به عنوان یک ماده ذخیره انرژی استفاده کرد زیرا رسانایی حرارتی ضعیفی دارد و تغییرات حجم را در طول فرآیندهای تغییر فاز تجربه می‌کند که منجر به تبادل حرارت کمتری می‌شود، این پدیده مخصوصاً زمانی رخ می‌دهد که این مواد مستقیماً داخل مصالح ساختمانی گنجانده شوند یو، هاوونگ، (۲۰۲۳). برای غلبه بر این مشکل، تغییر فازدهنده‌ها را می‌توان از طریق تکنیک‌های مختلفی مانند تشکیل نانو کپسول‌ها و قرار دادن کپسول‌ها داخل مواد لایه‌ای، یا محصور کردن آنها در منافذ یک ماده متخلخل مانند کربن فعال کپسوله کرد. استفاده از پلیمرهای مبتنی بر مواد آلی یا مواد متخلخل معدنی به عنوان مواد پشتیبان می‌تواند بر معایب استفاده مستقیم از تغییر فاز دهنده‌ها غلبه کند.



شکل ۶. توزیع تغییر فازدهنده‌ها از لحاظ ویژگی‌های حرارتی ام. عمران خان، (۲۰۲۳)

۴- استفاده از تغییر فازدهنده‌ها در روسازی‌های آسفالتی

دماهای پایین، نتایج نشان داد تغییر فاز دهنده‌های پلیمری نظیر پلی اتیلن گلیکول، عملکرد و کاربرد بهتری در آسفالت دارند دی. ام انصاری (۲۰۰۴). در حال حاضر، تغییر فاز دهنده‌های زیادی برای تنظیم دمای روسازی آسفالتی مناسب هستند، اما گونه‌های جامد یا مایع کپسوله نشده، به راحتی تخییر می‌شوند، در روسازی نشسته می‌کنند و هنگامی که مستقیماً در آسفالت استفاده می‌شوند، به عملکرد آسفالت آسیب وارد می‌کنند ای. بی. آر. یو ساهاو، (۲۰۲۰). یک مطالعه جامع

آسفالت یک ماده حساس به دما است. بنابراین رفتار و عملکرد مکانیکی آن به طور قابل توجهی تحت تأثیر دمای محیط قرار دارد. این عامل می‌تواند باعث تنش‌های حرارتی، شیار شدگی، قیرزدگی و ترک خوردگی ناشی از تغییرات دمای شود سی. آکان، (۲۰۱۲). در یک تحقیق انجام شده با تغییر فاز دهنده‌های مختلف نظیر اسیدهای چرب، پارافین، پلی اتیلن گلیکول و تغییر فاز دهنده‌های یوتکتیک برای تنظیم دمای روسازی‌های آسفالتی و جلوگیری از ترک خوردن و یخ زدگی در

از مدل انتقال دما مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آلکان، (۲۰۱۲)، تی. کارلسی، (۲۰۰۹)، اس. ان. ای. ال. سادی، (۲۰۱۳)، سی. آلکان، (۲۰۱۲). ترکیب این تغییر فازدهنده‌های گرافیتی می‌تواند گرمای ورودی به روسازی را کاهش داده و به طور مؤثر دمای داخل روسازی را کاهش دهد، انصاری، (۲۰۰۴)، ساهو، (۲۰۲۰)، آتوکورولاژ، (۲۰۱۸)، آلوآ، (۲۰۱۷). همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که افت دمای سطح به حداکثر ۱٫۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد زمانی که ۳۰ درصد وزنی کل مخلوط از تغییر فاز دهنده استفاده می‌شود و زمانی که محتوای آن به ۶۰ درصد برسد، هدایت حرارتی مؤثر مخلوط به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد التوکورولاژ، (۲۰۱۶)، وانگ، (۲۰۲۳). جدول ۲ تاثیر تغییر فازدهنده‌های مختلف بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی را نشان می‌دهد.

بر روی ترکیب پلی اتیلن گلیکول و اکسید سیلیسیم به عنوان جایگزینی برای سنگدانه‌های ریز در مخلوط‌های آسفالتی انجام شد. مشاهده شد که پلی اتیلن گلیکول پایداری جرمی بهتری نسبت به سایر تغییر فاز دهنده‌ها در دمای بالا دارد. بر اساس نتایج آزمایش، این تغییر فاز دهنده با محتوای جرمی ۷۰ درصد پلی اتیلن گلیکول، پایداری حجمی بهینه را در بین همه ترکیبات داشت جی. جین، (۲۰۱۷)، یو. کو، (۲۰۱۸). نتایج نشان داد که افزودن ۳ درصد پلی اتیلن گلیکول و اکسید سیلیسیم به لایه رویی تنها منجر به کاهش ۴ درصدی عمق تجمعی شیارهای روسازی آسفالتی پس از هفته اول می‌شود. ادغام تغییر فاز دهنده در لایه‌های بالایی می‌تواند دمای سطح و لایه بالایی روسازی آسفالتی را به طور مؤثر تنظیم کند، اما اثر تنظیم دما در لایه‌های میانی و پایینی کم است. در تحقیق دیگر اثرات ترکیبات مختلف گرافیت و تغییر فازدهنده‌های ساخته شده با آنها بر انتقال حرارت روسازی با استفاده

جدول ۲. تاثیر تغییر فازدهنده‌ها بر روسازی های آسفالتی

انواع تغییر فازدهنده	معروف ترین نمونه‌ها	کاربرد	مزایا	معایب
اسیدهای چرب مشتقات پارافین تغییر فازدهنده‌های مرکب گونه‌های معدنی گونه‌های آلی	گونه‌های مبتنی بر پلیمر استرها اکسید های فلزی آلکان‌ها و اسیدهای چرب هیدرات های نمک	تعدیل دما کاهش آسیب دیدن روسازی جلوگیری از افت راندمان راه‌ها کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری رفاه رانندگان	ایجاد تعادل در دما کاهش اثر جزیره گرمایی شهری افزایش طول عمر کاهش هزینه های تعمیر و برف روبی بهبود عملکرد راه دستیابی به حمل و نقل سبز	هزینه بالا عدم شناخت کافی از ویژگی‌های آنها عدم تناسب تغییر فازدهنده‌ها با روسازی عدم وجود ارزیابی دقیق از افزودن تغییر فازدهنده‌ها به روسازی نشت کردن در روسازی

استفاده از تغییر فاز دهنده‌ها در روسازی بتنی

عموماً دو روش برای ترکیب تغییر فاز دهنده‌ها در بتن استفاده شد: قرار دادن این مواد در سنگدانه‌های سبک وزن (شکل ۷) و دیگری قرار دادن تغییر فاز دهنده‌ها در لوله‌های فلزی تعبیه شده در طول دال بتنی در زمان بتن ریزی فرنان، (۲۰۱۵)، آرورا، (۲۰۱۷)، بنتز، (۲۰۰۷)، لینگ، (۲۰۱۳)، ساکولیچ، (۲۰۱۲). روغن پارافین به عنوان تغییر فازدهنده یکی از پرکاربردترین موارد در این زمینه است که در آزاد سازی گرما در نزدیکی دمای انجماد تحت تغییر فاز از مایع به جامد، مؤثر است. گرمای آزاد شده در طول تبدیل فاز می‌تواند برف و یخ را روی سطح روسازی بتنی ذوب کند پیرا، (۲۰۱۶)، شارما، (۲۰۱۴). از این مواد همچنین برای کنترل گرمای ناشی از فرآیند هیدراتاسیون بتن ریزی های حجیم نیز می‌توان استفاده کرد.

اگر چه تحقیقات روی تغییر فازدهنده‌ها برای روسازی آسفالتی بیش از ۱۰ سال است که انجام شده است، اما هنوز این مواد به طور سیستماتیک و به صورت فناوری کاربردی دقیق و جامعی شکل نگرفته‌اند آلائی، (۲۰۱۱)، آلیها، (۲۰۱۹). دلایل اصلی محدود کردن توسعه این فناوری شامل عدم تناسب بین تغییر فازدهنده‌ها و روسازی آسفالتی، عدم شناخت کامل ویژگی‌های تغییر فازدهنده‌ها و عدم وجود ارزیابی دقیق از اثرات ناشی از افزودن این مواد به روسازی‌های آسفالتی است علی محمدی، (۲۰۲۰).



شکل ۷. سنگدانه سبک از جنس لیکا بوردر، (۲۰۱۶)

کننده‌ای را برای ذوب برف و یخ در حالتی که در یک لوله تعبیه شده و داخل ملات قرار داشتند از خود نشان دادند هاوز، (۱۹۹۲)، فرنان، (۲۰۱۵). اگر تغییر فاز دهنده‌ها بر هیدراتاسیون سیمان تأثیر منفی بگذارند و مقاومت مکانیکی بتن را کاهش دهند، برای جلوگیری از ترکیب با خمیر سیمان درون کپسول گنجانده می‌شوند بطوریکه کپسول دارای پوشش با هدایت الکتریکی مناسب باشد تا از نفوذ آن‌ها به بتن جلوگیری کند و عملکرد حرارتی آن‌ها را نیز دچار اختلال نکند. در مطالعه‌ای مشخص شد که استفاده از تغییر فاز دهنده‌های در دال بتنی دمای بیشینه سطح روسازی را نسبت به حالت بدون وجود این مواد تا ۲/۷۶ درجه سانتی گراد کاهش می‌دهد ساهو). نتایج نشان می‌دهد که اگرچه هدایت حرارتی تغییر فاز دهنده‌های آلی معمولی ممکن است کم باشد اما کنار هم قرار گرفتن این مواد کاهش قابل توجه دمای روسازی را تضمین می‌کند. یک نکته مهم اجرایی که وجود دارد این است که برای ایجاد بیشترین افت دما در روسازی باید تغییر فاز دهنده‌ای انتخاب کنیم که دمای تغییر فاز آن درست برابر با دمای محیطی باشد که روسازی بتنی قرار است در آن محیط احداث شود بنتز، (۲۰۰۷)، فرناندز، (۲۰۱۴)، تیاگی، (۲۰۰۷). ماهیت گرمای هیدراتاسیون سیمان و قرار گرفتن در معرض گرمای محیطی منجر به افزایش دمای درونی روسازی می‌شود و این گرمای درونی در سطح مقطع روسازی تغییرات دمای یکسانی را ایجاد نمی‌کند و باعث ایجاد گرادیان دمایی در روسازی‌های بتنی می‌شود. چنین افزایش دما و سرد شدن متعاقب آن که در روزهای بعد رخ می‌دهد می‌تواند منجر به ایجاد ترک های حرارتی در روسازی‌های بتنی شود کابزا، (۲۰۰۷)، یالینگ، (۲۰۰۹). سردتر بودن سطح پایین نسبت به سطح بالا در روسازی و تولید گرمای داخلی در زمان بتن ریزی می‌تواند منجر به ایجاد گرادیان‌های حرارتی و در نتیجه ایجاد تنش‌های کششی در روسازی شود که در نهایت می‌تواند

با ممانعت از تشکیل برف و یخ در سطح روسازی، نیاز به مواد شیمیایی، نمک‌های یخ زدایی و برف روبی یا هر سه را کاهش یافته یا از بین می‌رود، بنابراین در هزینه‌ها صرفه جویی شده و تأثیر مثبتی بر اثرات زیست محیطی می‌گذارد. علاوه بر این، کاهش استفاده از مواد شیمیایی و نمک‌های یخ زدا و پتانسیل کاهش تعداد چرخه‌های انجماد و ذوب در عناصر بتنی می‌تواند طول عمر زیرساخت بتن را افزایش دهد لیستون، (۲۰۱۵)، رجین، (۲۰۰۸)، فرنان، (۲۰۱۷)، کاستیوکاس، (۲۰۱۶)، خردمند، (۲۰۱۵). نتایج محاسبات نشان می‌دهد که دمای سطح بتن را می‌توان تقریباً ۳/۵۸ درجه سانتیگراد با افزودن ۵ درصد جرمی کل طرح مخلوط بتن، تغییر فاز دهنده‌های میکرو کپسوله شده کاهش داد همچنین دامنه نوسانات دمایی روسازی بتنی با حضور این مواد به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و تعداد چرخه‌های انجماد و ذوب تجربه شده توسط روسازی بتنی را می‌توان تا ۵۰ درصد کاهش داد ابهت، (۱۹۸۳). همچنین روغن پارافین و متیل لورات که ماده‌ای بر پایه مواد گیاهی است به عنوان تغییر فاز دهنده انتخاب شدند زیرا دارای آنتالپی ذوب بالا در حدود ۱۳۰ الی ۱۷۰ ژول بر گرم و دمای انجماد مطلوب حدود ۲ الی ۳ درجه سانتیگراد بود بنتز، (۲۰۱۷)، چوی، (۲۰۱۴)، کاسترو، (۲۰۱۱)، چن، (۲۰۱۳). دوام و پایداری این مواد در مخلوط سیمانی با تغییر در آنتالپی روسازی، کاهش جرم تغییر فاز دهنده و مقاومت فشاری بتن مورد مطالعه قرار می‌گیرد. هنگامی که تغییر فاز دهنده داخل سنگدانه سبک قرار می‌گیرد و روسازی با آنها ساخته می‌شود روغن پارافین می‌تواند مقدار قابل توجهی گرما را در طول تبدیل فاز آزاد کند که می‌تواند برای ذوب برف و یخ استفاده شود. با این حال، مشاهده شد که متیل لورات با ماتریس سیمانی واکنش داده و باعث آسیب به ملات می‌شود آلتوی، (۲۰۲۰)، هاوز، (۱۹۹۲)، همباد، (۲۰۱۴)، مونیکال، (۲۰۱۶). هر دو روغن پارافین و متیل لورات عملکرد امیدوار

می کنند که در نهایت باعث افزایش هزینه های مورد نیاز برای نگهداری زیرساخت ها می شود حریری (۱۹۸۸)، ژانگ، (۲۰۰۷)، سوآرس، (۲۰۱۵)، ژو، (۲۰۰۹). قرار دادن تغییر فاز دهنده های آلی مبتنی بر پارافین با دمای انتقال فاز ۴/۵ درجه سانتی گراد در روسازی بتنی با پوشش رزین ملامین فرمالدئید مشاهده شد که طول عمر روسازی های بتنی در برابر چرخه های یخ زدگی افزایش می یابد. مشخص شد که گنجاندن این مواد بر مقاومت فشاری و خمشی بتن تأثیر منفی می گذارند اسپچتر، (۱۹۹۹)، مارسیک، (۲۰۱۶)، پولات، (۲۰۱۶)، ریاضی، (۲۰۱۷). جین و همکاران دنگ، (۲۰۲۱) نتیجه گرفتند که پلی اتیلن گلیکول محصور شده توسط دیاتومیت و پرلیت منبسط شده از نظر حرارتی و شیمیایی در آزمایش چرخه ای حرارتی پایدار باقی می ماند. همچنین کاهش تغییرات دما به دلیل افزودن این مواد به ترتیب به ۷ و ۴/۳ درجه سانتیگراد برای آزمایشات آزمایشگاهی و میدانی رسیده است. چن و همکاران دو، (۲۰۱۸)، جیانگ، (۲۰۱۶) اظهار داشتند که استفاده از تغییر فاز دهنده پلی اتیلن گلیکول و اکسید سیلیسیم برای جایگزینی سنگدانه ها تا ۳ درصد (بر حسب جرم) می تواند مخلوط های بتنی با خواص مکانیکی رضایت بخش تولید کند. همچنین افزودن ۳ درصد از این تغییر فاز دهنده، کاهش دما در نمونه دال می تواند تا ۱/۴ درجه سانتی گراد برسد. در جدول ۳ پارامترهای مختلف را در روسازی های بتنی مشاهده می فرمایید.

منجر به ترک خوردن دال بتنی شود اما افزودن تغییر فاز دهنده می تواند تا حدود زیادی این مشکلات را کاهش دهد کین، (۲۰۱۱)، اسپچتر، (۲۰۰۲).

انتظار می رود ترک های حرارتی در سنین پایین بتن ریزی مخصوصاً در ۷ روز اول، زمانی که روسازی بتنی بیشترین تغییرات را در دمای داخلی خود تجربه می کند، رخ دهد آنها، (۲۰۰۹)، فاریا، (۲۰۰۶)، ایکسو، (۲۰۱۱)، اسپچتر، (۲۰۰۴). کامپوزیت های سیمانی حاوی تغییر فاز دهنده را می توان برای عملکرد بهینه در طیف وسیعی از ترکیبات مواد و مکان های آب و هوایی طراحی کرد. در مطالعه ای پارافین داخل پوسته ای از ملامین فرمالدئید قرار داده شد که باعث می شد دمای ذوب تغییر فاز دهنده ۲۴ درجه سلسیوس شود تیل، (۲۰۱۴)، یانگ، (۲۰۱۷). تعداد زیادی از زیر ساخت های بتنی در مناطق سردسیر مانند روسازی ها، عرشه پل، دال های پیاده رو و دیوارهای بتنی از قرار گرفتن در معرض یخبندان های متوالی و کاربردهای نمک یخ زدایی دچار آسیب می شوند. عموماً مشکل سیکل های مختلف ذوب یخ بر روی سطح رویه های بتنی شامل پوسته پوسته شدن و ترک خوردگی است. زیرا آب در هنگام انجماد ۹ درصد حجمی منبسط می شود و فشار داخلی منافذ را در بتن و سنگدانه های درشت افزایش می دهد. این خرابی ها عملکرد و قابلیت سرویس دهی طولانی مدت زیرساخت ها را تحت تاثیر قرار می دهد، زیرا ترک ها و خرابی ها به عنوان راه هایی برای نفوذ مواد مضر مختلف و همچنین رطوبت به داخل روسازی عمل

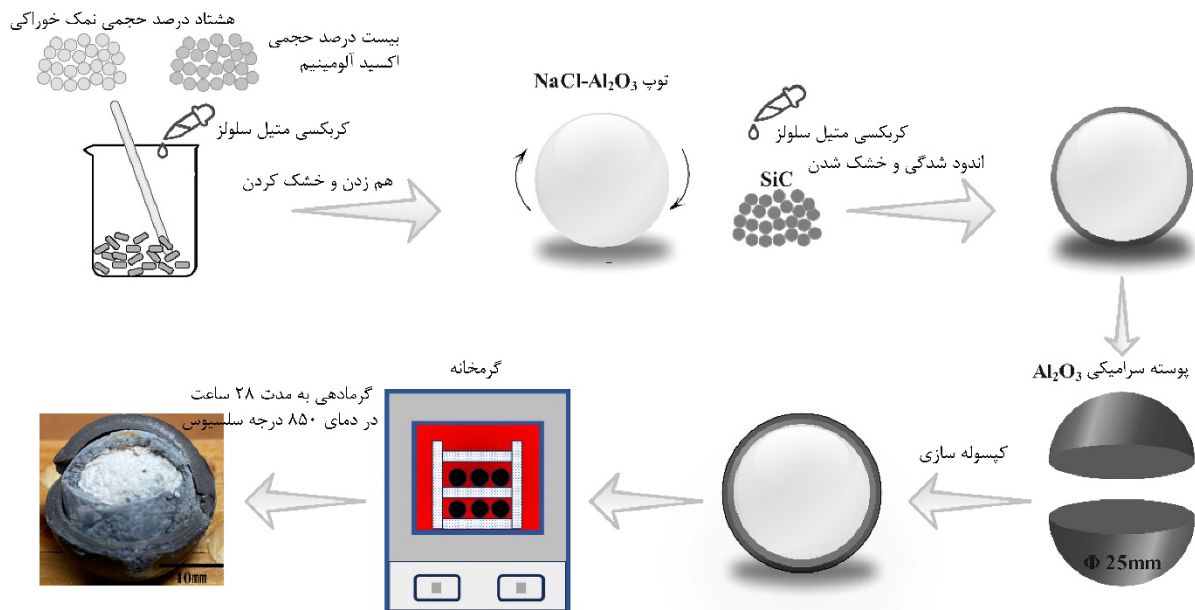
جدول ۳. پارامترهای تغییر فاز دهنده ها در روسازی های بتنی

معایب	مزایا	کاربرد	معروف ترین نمونه ها	نوع تغییر فاز دهنده
هزینه بالا کاهش مقاومت فشاری و خمشی بتن پیچیدگی استفاده از تغییر فاز دهنده ها در روسازی بتنی عدم شناخت کامل ویژگی آنها عدم تناسب تغییر فاز دهنده ها با روسازی	ایجاد تعادل دمایی افزایش طول عمر کاهش خرابی ها کاهش تعداد چرخه های یخ زدگی کنترل حجم دال بتنی در بتن ریزی ها کاهش هزینه برف روبی و نمک پاشی حفظ محیط زیست	تعدیل دما کاهش چرخه های یخ زدگی کاهش تنش های حرارتی	روغن پارافین تغییر فاز دهنده ها با پوسته رزین فرمالدئید پلی اتیلن گلیکول با پوسته اکسید سیلیسیم نمک های یونکتیک اسیدهای چرب	تغییر فاز دهنده های آلی گونه های معدنی ترکیبات یونکتیک

کپسوله کردن تغییر فازدهنده‌ها

و ۳- مواد معدنی (سیلیکا، کلسیم کربنات، تیتانیوم دی اکسید و آلومینا) می‌باشند، (۲۰۲۴). در شکل ۸ روند کپسوله کردن یک ماده تغییر فازدهنده ترکیبی (اکسید آلومینیم به همراه نمک طعام) را می‌توان مشاهده کرد. روش ساخت کپسول‌ها بسیار متنوع است و با توجه به کاربردهای مختلف، مواد تغییر فاز دهنده مورد استفاده، دمای کاری مورد نیاز، قیمت تمام شده و ... انتخاب می‌شوند.

تغییر فاز دهنده‌ها را مستقیماً نمی‌توان در روسازی استفاده کرد و برای اینکه بر روی روسازی اثر نامطلوبی نداشته باشند آن‌ها را درون کپسول‌هایی جا می‌دهند و در هنگام ساخت بتن یا آسفالت مورد استفاده قرار می‌دهند. کپسول‌ها به طور کلی از دو جزء اصلی تشکیل می‌شوند. هسته و پوسته. هسته این مواد می‌تواند آلی، معدنی یا یوتکتیک باشد. معروف‌ترین پوسته آنها هم شامل ۱- مواد فلزی، ۲- مواد پلیمری (رزین فرمالدئید، پلی اورتان، رزین اوره فرمالدئید، پلی متیل متاکریلات، پلی استایرن)



شکل ۸ استفاده از آلومینا به عنوان پوسته تغییر فازدهنده‌ها لیاثو، (۲۰۲۴)

۵- نتیجه‌گیری

کاربرد و شرایط محیطی قابل استفاده در انواع روسازی‌های بتنی، آسفالتی هستند. افزودن هر کدام از آنها به روسازی مزایا و معایب خاص خود را دارد. برای عملکرد بهتر و جلوگیری از نشت آنها در روسازی باید از تدابیری همچون کپسوله سازی، مانند جایگذاری در سنگدانه‌های سبک یا لوله‌ها و دیگر روش‌ها استفاده شود. در بین مواد توصیه شده مشتقات پارافین به خاطر قیمت مناسب، فراوانی بسیار و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و سازگاری با روسازی مخصوصاً روسازی آسفالتی توصیه می‌شود. محققان از مدل‌های عددی هم برای رسیدن به درصد‌های بهینه مواد اولیه در ساخت تغییر فازدهنده‌ها استفاده می‌کنند که سبب عملکرد بهتر آن‌ها می‌شود.

اهمیت نگهداری و قابل استفاده بودن مداوم راه‌ها، مهندسان را برآن داشت تا روش‌ها و محصولات نوینی را بکار بگیرند تا به این مهم دست یابند. در بین تحقیقات و مطالعات فراوان انجام شده، مواد تغییر فازدهنده از محبوبیت و مقبولیت بالایی برخوردار هستند. با انتخاب اجزای مناسب تغییر فازدهنده می‌توانند با هزینه‌های مناسب راه‌ها را از آسیب‌ها در فصول و شرایط مختلف جوی حفظ کرد. تغییر فاز دهنده این خاصیت را به روسازی می‌دهند که در زمستان بدون نیاز به نمک پاشی، برف روبی و دیگر روش‌ها یخ زدایی به درستی صورت گیرد و در تابستان با کاهش احتمال قیر زدگی، شیار زدگی و سایر خرابی‌ها به افزایش دوام و عمر روسازی کمک کنند. تغییر فازدهنده‌ها به سه نوع آلی، معدنی و ترکیبی تقسیم می‌شوند که بسته به

- P. Denholm and M. Hand (2011). Grid flexibility and storage are required to achieve very high penetration of variable renewable electricity. *Energy Policy*, Vol. 39, Vol. 3, 1817–1830.
- M. Khan, F. Asfand, and S. G. Al-Ghamdi (2022). Progress in Research and Development of Phase Change Materials for Thermal Energy Storage in Concentrated Solar Power. *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 219, 119546.
- R. K. Sharma, P. Ganesan, V. V Tyagi, H. S. C. Metselaar, and S. C. Sandaran (2015). Developments in organic solid–liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage. *Energy Convers. Manag.*, Vol. 95, 193–228.
- A. Sharma, V. V., Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 13, No. 2, 318–345.
- J. J. Jurinak and S. I. Abdel-Khalik (1979). On the performance of air-based solar heating systems utilizing phase-change energy storage. *Energy*, Vol. 4, No. 4, 503–522.
- P. Pinel, C. A., Cruickshank, I. Beausoleil-Morrison, and A. Wills (2011). A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 15, No. 7, 3341–3359.
- P. Tatsidjodoung, N. Le Pierrès, and L. Luo, (2013). A review of potential materials for thermal energy storage in building applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 18, 327–349.
- A. Avdeef (2007). Solubility of sparingly soluble ionizable drugs. *Adv. Drug Deliv. Rev.*, Vol. 59, No. 7, 568–590-591.
- Y. Huang, A. Stonehouse, and C. Abeykoon (2023). Encapsulation methods for phase change materials – A critical review. *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 200, 123458.
- A. F. Nicholas, M. Z. Hussein, Z. Zainal, and T. Khadiran (2019). Chapter 12 - Activated Carbon for Shape-Stabilized Phase Change Material. in *Synthesis, Technology and Applications of Carbon Nanomaterials*, S. A. Rashid, R. N. I. Raja Othman, and M. Z. Hussein, Eds. Elsevier, 279–308.
- Z. Wang, *Design of Solar Thermal Power Plants*.
- C. Alkan, E. Günther, S. Hiebler, Ö. Ensari, and D. Kahraman (2012). Polyethylene glycol-sugar composites as shape-stabilized phase change materials for thermal energy storage. *Polym. Compos.*, Vol. 33.
- A. B R, U. Sahoo, and P. Rath (2020). Phase change materials for pavement applications: A review. *Constr. Build. Mater.*, Vol. 247, 118553.
- Q. U. Ain, *et al.* (2020). Facile fabrication of hydroxyapatite-magnetite-bentonite composite for efficient adsorption of Pb(II), Cd(II), and crystal violet from aqueous solution. *J. Clean. Prod.*, Vol. 247, 119088.
- M. Imran Khan, F. Asfand, and S. G. Al-Ghamdi (2023). Progress in research and development of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar power. *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 219, 119546.
- W. Wang, L. Fan, and B. Laumert (2021). A theoretical heat transfer analysis of different indirectly-irradiated receiver designs for high-temperature concentrating solar power applications. *Renew. Energy*, Vol. 163, 1983–1993.
- K. M. Powell, K. Rashid, K. Ellingwood, J. Tuttle, and B. D. Iverson (2017). Hybrid concentrated solar thermal power systems: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 80, 215–237.
- D. M. Ansari and G. J. Price (2004). Chromatographic estimation of filler surface energies and correlation with photodegradation of kaolin-filled polyethylene. *Polymer (Guildf.)*, Vol. 45, No. 6, 1823–1831.
- H. M. Teamah (2023). Chapter 1 - Introduction and history of phase change materials' heat transfer. In *Phase Change Materials for Heat Transfer*, H. Muhammad Ali, Ed. Elsevier, 1–26.
- P. Muthukumar and H. Niyas (202). Materials, Design and Development of Latent Heat Storage Systems for Medium and Large-Scale Applications: Issues and Challenges. in *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, S. Hashmi and I. A. Choudhury, Eds. Oxford: Elsevier, 417–437.
- R. Huang *et al.* (2021). Carbon precursors in coal tar: Extraction and preparation of carbon materials. *Sci. Total Environ*, vol. 788, 147697.
- A. Elgafy and K. Lafdi (2005). Effect of Carbon Nanofiber Additives on the Thermal Behavior of Phase Change Materials *Carbon N. Y.*, Vol. 43, No. 15, 3067–3074.
- K. B, A. K. Pandey, S. Shahabuddin, M. Samykan, T. M, and R. Saidur (2020). Phase change materials integrated solar thermal energy systems: Global trends and current practices in experimental approaches. *J. Energy Storage*, Vol. 27, 101118.
- K. Pielichowska and K. Pielichowski (2014). Phase change materials for thermal energy storage,” *Prog. Mater. Sci.*, Vol. 65, 67–123.
- B. Xu, P. Li, and C. Chan (2015). Application of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar thermal power plants: A review of recent developments. *Appl. Energy*, Vol. 160, 286–307.

Concr. Compos., vol. 64, 1–15.

-A. Arora, G. Sant, and N. Neithalath (2017). Numerical simulations to quantify the influence of phase change materials (PCMs) on the early- and later-age thermal response of concrete pavements. *Cem. Concr. Compos.*, Vol. 81, 11–24.

-D. Bentz and R. Turpin (2007). Potential Applications of Phase Change Materials in Concrete Technology. *Cem. Concr. Compos.*, Vol. 29, 527–532.

-T.-C. Ling and C.-S. Poon (2013). Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete: An overview,” *Constr. Build. Mater.* Vol. 46, 55–62.

-A. R. Sakulich and D. P. Bentz (2012). Incorporation of phase change materials in cementitious systems via fine lightweight aggregate. *Constr. Build. Mater.*, Vol. 35, 483–490.

-J. Pereira da Cunha and P. Eames (2016). Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials – A review. *Appl. Energy*, Vol. 177, 227–238.

-A. Sharma, A. Shukla, C. R. Chen, and T.-N. Wu (2014). Development of phase change materials (PCMs) for low-temperature energy storage applications. *Sustain. Energy Technol. Assessments*, Vol. 7, 17–21.

-R. F. W. Boarder, P. L. Owens, and J. M. Khatib (2016). The sustainability of lightweight aggregates manufactured from clay wastes for reducing the carbon footprint of structural and foundation concrete. In *Sustainability of Construction Materials (Second Edition)*, Second Edi., J. M. Khatib, Ed. Woodhead Publishing, 209–244.

-L. Liston, Y. Farnam, M. Krafcik, W. Weiss, K. Erk, and B. Tao (2015). Binary mixtures of fatty acid methyl esters as phase change materials for low temperature applications. *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 96.

-A. F. Regin, S. C. Solanki, and J. S. Saini (2008). Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 12, No. 9, 2438–2458.

-Y. Farnam, H. S. Esmaceli, P. Zavattieri, J. Haddock, and W. Weiss (2017). Incorporating phase change materials in concrete pavement to melt snow and ice. *Cem. Concr. Compos.*, Vol. 84, 134–145.

-G. Kastiukas, X. Zhou, and J. Castro-Gomes (2016). Development and optimisation of phase change material-impregnated lightweight aggregates for geopolymer composites made from aluminosilicate-rich mud and milled glass powder. *Constr. Build. Mater.*, Vol. 110, 201–210.

-M. Kheradmand, J., Castro-Gomes, M. Azenha, P. D., Silva, J. L. B. de Aguiar, and S. E. Zoorob (2015). Assessing the feasibility of impregnating phase

-J. Jin *et al.* (2017). Preparation and thermal properties of mineral-supported polyethylene glycol as form-stable composite phase change materials ({CPCMs}) used in asphalt pavements. *Sci. Rep.*, Vol. 7, No. 1, 16998, Dec.

-Y. Kou *et al.* (2018). Thermal analysis and heat capacity study of polyethylene glycol (PEG) phase change materials for thermal energy storage applications. *J. Chem. Thermodyn.*, Vol. 128.

-T. Karlessi, M. Santamouris, K. Apostolakis, A. Synnefa, and I. Livada (2009). Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures. *Sol. Energy*, Vol. 83, No. 4, 538–551.

-S. N. AL-Saadi and Z. (John) Zhai, (2013). Modeling phase change materials embedded in building enclosures: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 21, 659–673.

-C. Alkan, E. Günther, S. Hiebler, Ö. Ensari, and D. Kahraman (2012). Polyurethanes as solid-solid phase change materials for thermal energy storage. *Sol. Energy*, Vol. 86, 1761-1762.

-H. Alimohammadi, J. Zheng, A. Buss, V. R. Schaefer, C. Williams, and G. Zheng (2020). Field and simulated rutting behavior of hot mix and warm mix asphalt overlays. *Constr. Build. Mater.*, Vol. 265, 120366.

-B. Athukorallage, T. Dissanayaka, S., Senadheera, and D. James (2018). Performance analysis of incorporating phase change materials in asphalt concrete pavements. *Constr. Build. Mater.*, Vol. 164, 419–432.

-G. Alva, Y. Lin, L. Liu, and G. Fang (2017). Synthesis, characterization, and applications of microencapsulated phase change materials in thermal energy storage: A review. *Energy Build.*, Vol. 144, 276–294.

-B. Athukorallage and D. James (2016). Incorporating Phase Change Materials to Mitigate Extreme Temperatures in Asphalt Concrete Pavements, V008T10A043.

-X. Wang *et al.* (2023). Review of the application of phase change materials in asphalt pavement. *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, Vol. 10, No. 2, 185–229.

-S. Alay, F. Gode, and C. Alkan (2011). Synthesis and Thermal Properties of Poly(n-butyl acrylate)/n-Hexadecane Microcapsules Using Different Cross-Linkers and Their Application to Textile Fabrics. *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 120, 2821–2829.

-M. R. M. Aliha, (2019). On predicting mode II fracture toughness (KIIc) of hot mix asphalt mixtures using the strain energy density criterion. *Theor. Appl. Fract. Mech.*, Vol. 99, 36–43.

-Y. Farnam, S. Dick, A. Wiese, J. Davis, D. Bentz, and J. Weiss (2015). The influence of calcium chloride deicing salt on phase changes and damage development in cementitious materials (2015). *Cem.*

- Sustain. Energy Rev.*, Vol. 11, No. 6, 1146–1166.
- L. F. Cabeza, C. Castellón, M. Nogués, M. Medrano, R. Leppers, and O. Zubillaga (2007). Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. *Energy Build.*, Vol. 39, No. 2, 113–119.
- C. Yaling, S. Yu, and W. Zhen-ming (2009). Evaluation of thermal stability of embankments with different strikes in permafrost regions. *Cold Reg. Sci. Technol. - COLD REG SCI TECHNOL*, Vol. 58, 151–157.
- Y. Qin (2011). Modeling temperature distribution in rigid pavement slabs: Impact of air temperature,” *Constr. Build. Mater. - CONSTR BUILD MATER*, Vol. 25, 3753–3761.
- G. De Schutter (2002). Finite element simulation of thermal cracking in massive hardening concrete elements using degree of hydration-based material laws. *Comput. Struct.*, Vol. 80, No. 27, 2035–2042.
- M. Azenha, R. Faria, and D. Ferreira (2009). Identification of early-age concrete temperatures and strains: Monitoring and numerical simulation. *Cem. Concr. Compos.*, Vol. 31, No. 6, 369–378.
- R. Faria, M. Azenha, and J. A. Figueiras (2006). Modelling of concrete at early ages: Application to an externally restrained slab. *Cem. Concr. Compos.*, Vol. 28, No. 6, 572–585.
- Q. Xu, J., Ruiz, J., Hu, K. Wang, and R. Rasmussen (2011). Modeling hydration properties and temperature developments of early-age concrete pavement using calorimetry tests. *Thermochim. Acta - THERMOCHIM ACTA*, Vol. 512, 76–85.
- G. De Schutter (2004). Applicability of the degree of hydration concept and the maturity method for thermo-visco-elastic behaviour of early age concrete. *Cem. Concr. Compos.*, 437–443.
- A. Thiele, A. Kumar, G. Sant, and L. Pilon (2014). Effective thermal conductivity of three-component composites containing spherical capsules. *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 73, 177–185.
- B. A. Young *et al.* (2017). Early-age temperature evolutions in concrete pavements containing microencapsulated phase change materials. *Constr. Build. Mater.*, Vol. 147, 466–477.
- A. S. Hariri and I. C. Ward (1988). A review of thermal storage systems used in building applications. *Build. Environ.*, Vol. 23, No. 1, 1–10.
- Y. Zhang, G. Zhou, K. Lin, Q. Zhang, and H. Di (2007). Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook. *Build. Environ.*, Vol. 42, 2197–2209.
- N. Soares, J. J., Costa, A. R. Gaspar, and P. Santos (2013). Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings’ energy efficiency. *Energy Build.*, vol. 59, 82–103.
- N. Zhu, Z. Ma, and S. Wang (2009). Dynamic Characteristics and Energy Performance of Buildings Using Phase Change Materials: A Review. change materials in lightweight aggregate for the development of thermal energy storage systems. *Constr. Build. Mater.*, Vol. 89, 48–59.
- A. Abhat (1983). Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials. *Sol. Energy*, Vol. 30, No. 4, 313–332.
- Standard {Test} {Method} for {Compressive} {Strength} of {Hydraulic} {Cement} {Mortars} ({Using} 2-in. or)50-mm {Cube} {Specimens}).
- W.-C. Choi, B.-S. Khil, Y.-S. Chae, Q.-B. Liang, and H.-D. Yun (2014). Feasibility of using phase change materials to control the heat of hydration in massive concrete structures. *ScientificWorldJournal*, Vol. 2014, 781393.
- J. Castro, L. Keiser, M. Golias, and J. Weiss (2011). Absorption and desorption properties of fine lightweight aggregate for application to internally cured concrete mixtures. *Cem. Concr. Compos.*, Vol. 33, No. 10, 1001–1008.
- Z. Chen, L., Cao, F., Shan, and G. Fang (2013). Preparation and characteristics of microencapsulated stearic acid as a composite thermal energy storage material in buildings. *Energy Build.*, Vol. 62, 469–474.
- F. Althoey and Y. Farnam (2020). Performance of {Calcium} {Aluminate} {Cementitious} {Materials} in the {Presence} of {Sodium} {Chloride}. *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 32, No. 10, 4020277.
- D. W. Hawes, D. Banu, and D. Feldman (1992). The stability of phase change materials in concrete. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 27, No. 2, 103–118.
- L. Hembade, N. Neithalath, and S. Rajan (2014). Understanding the Energy Implications of Phase-Change Materials in Concrete Walls through Finite-Element Analysis. *J. Energy Eng.*, Vol. 140, 4013009.
- J. Monical, E. Unal, T. Barrett, Y. Farnam, and W. J. Weiss (2016). Reducing {Joint} {Damage} in {Concrete} {Pavements}: {Quantifying} {Calcium} {Oxychloride} {Formation},” *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, Vol. 2577, No. 1, 17–24.
- Y. Farnam *et al.* (2015). Evaluating the Use of Phase Change Materials in Concrete Pavement to Melt Ice and Snow. *J. Mater. Civ. Eng.*, 4015161.
- R, {A}. {B}., {Sahoo}, {U}. {C}., \& {Rath}, {P}. (2021b). {Thermal} and mechanical performance of phase change material incorporated concrete pavements. {Road} {Materials} and {Pavement} {Design}, 23(6), 1287–1304. doi.org/10.1080/14680629.2021.1
- F. Fernandes *et al.*, (2014). On the Feasibility of Using Phase Change Materials (PCMs) to Mitigate Thermal Cracking in Cementitious Materials. *Cem. Concr. Compos.*, Vol. 51.
- V. V. Tyagi and D. Buddhi (2007). PCM thermal storage in buildings: A state of the art. *Renew.*

- Y. Du, J. Chen, Z. Han, and W. Liu (2018). A review of solutions for improving the rutting resistance of asphalt pavement and test methods. *Constr. Build. Mater.*, Vol. 168, 893–905.
- W. Jiang, A. Sha, J. Xiao, Z. Wang, and A. Apeagyei (2016). Experimental study on materials composition design and mixture performance of water-retentive asphalt concrete. *Constr. Build. Mater.*, Vol. 111, 128–138.
- V. Jagadeeswara Reddy, M. Fairusham Ghazali, and S. Kumarasamy (2024). Innovations in phase change materials for diverse industrial applications: A comprehensive review. *Results Chem.*, Vol. 8, 101552.
- S. Liao *et al.* (2024). Development of Macro-Encapsulated Phase-Change Material Using a Composite of NaCl-Al₂O₃ with Characteristics of Self-Standing. *Processes*, Vol. 12, No. 6.
- Energy Convers. Manag.*, Vol. 50, 3169–3181.
- G. W. Scherer, “Crystallization in pores (1999). *Cem. Concr. Res.*, Vol. 29, No. 8, 1347–1358.
- N. P. Mayercsik, M. Vandamme, and K. E. Kurtis (2016). Assessing the efficiency of entrained air voids for freeze-thaw durability through modeling. *Cem. Concr. Res.*, Vol. 88, 43–59.
- R. Polat (2016). The effect of antifreeze additives on fresh concrete subjected to freezing and thawing cycles. *Cold Reg. Sci. Technol.*, Vol. 127, 10–17.
- S. Riyazi, J. Kevern, and M. Mulheron (2017). Super absorbent polymers (SAPs) as physical air entrainment in cement mortars. *Constr. Build. Mater.*, Vol. 147, 669–676.
- Y. Deng, X. Luo, Y. Zhang, and R. L. Lytton (2021). Evaluation of flexible pavement deterioration conditions using deflection profiles under moving loads. *Transp. Geotech.*, Vol. 26, 100434.

Investigating the Effect of Phase Change Materials on The Thermal Performance of Pavement (Review Study)

Ali Elahi, B.Sc., Faculty of Civil Engineering of Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

Mostafa Adersi, Associate Professor, Faculty of Civil Engineering of Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

Saeed Ghaffarpour Jahromi, Associate Professor, Faculty of Civil Engineering of Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

E-mail: m.adresi@sru.ac.ir

Received: April 2025- Accepted: November 2025

ABSTRACT

Pavement deterioration under extreme temperatures poses a significant challenge to infrastructure longevity, driving the search for innovative solutions. Phase-changing materials (PCMs) emerge as a groundbreaking strategy to enhance pavement resilience by leveraging their unique thermal properties. Embedded within the pavement's top layer, PCMs absorb and release substantial latent heat during phase transitions—effectively stabilizing surface temperature fluctuations. This dynamic thermal regulation mitigates critical issues such as summer rutting and winter thermal cracking, while extending pavement service life and reducing maintenance costs. PCMs are broadly classified into organic, inorganic, and eutectic compounds, with integration achieved through advanced encapsulation techniques like micro-encapsulation, sol-gel methods, and polymer-based shells. Among these, paraffin-based PCMs stand out as the most promising due to their cost-effectiveness, high thermal efficiency, and compatibility with pavement operational temperatures. Fatty acids and salt hydrates also demonstrate potential, yet paraffins dominate for their optimal balance of performance and affordability. This review synthesizes cutting-edge research to highlight PCMs' transformative role in sustainable pavement engineering. By reducing temperature-induced stresses and enhancing durability, PCM-integrated pavements represent a vital step toward climate-resilient infrastructure. Their adoption not only addresses immediate structural challenges but also aligns with global sustainability goals by minimizing resource consumption and lifecycle costs. As the demand for smarter, longer-lasting roads grows, PCMs offer a scientifically validated pathway to revolutionize pavement design, ushering in an era of infrastructure that adapts to environmental extremes.

Keywords: Phase Change Materials, Pavement; Rutting, Defrosting, Cracking