

Energy Management in Various Medical Equipment Using Phase Change Composite Materials

Helga Zabardast¹, Aziz Babapoor^{2 *}, Zohreh Rahimi-Ahar³

¹Ph. D. Student of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

²Professor of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

³Assistant Professor of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Velayat University, Iranshahr, Iran

* P.O.B. 537517-1379, Tabriz, Iran, babapoor@azaruniv.ac.ir

Abstract

Thermal energy storage systems based on phase change materials are considered an efficient tool for energy management in medical devices due to their ability to absorb and release latent heat over a range of temperatures. In this review article, first, types of phase change materials (organic, inorganic, and eutectic) and their encapsulation methods are introduced. Then, different applications of phase change materials in medical devices are categorized into three main areas: (1) vaccine delivery systems (cold chain management), (2) infant coolers (body temperature regulation with minimal active energy consumption), and (3) smart drug delivery systems for cancer treatment (thermally stimulated drug release control). The findings show that composites such as isopropyl stearate-graphite and Glauber's salt solution perform well for cooling (2-8°C) and therapeutic hypothermia (32-34°C) applications, respectively. Finally, the challenges ahead (biocompatibility, cyclical sustainability, production cost) and the prospects for implementing this technology in Iran are examined. The results show that the use of phase-change systems in medical industries can save up to 50% in the electrical energy consumption of the vaccine cold chain.

Keywords: Phase change materials, Drug delivery, Vaccine transport boxes, Cancer treatment

*Tabriz, Iran, Azarbaijan Shahid Madani University, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering, P.O. Box 1379-537517,
Babapoor@azaruniv.ac.ir

۱ مدیریت انرژی در تجهیزات پزشکی با استفاده از کامپوزیت مواد

۲ تغییر فاز دهنده

۳ هلگا زبردست^۱، عزیز باباپور^{۲*}، زهره رحیمی اهر^۳

۴ ۱- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۵ ۲- استاد مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

۶ ۳- استادیار مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، ایران

۱۰ چکیده

۱۱ سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی مبتنی بر مواد تغییر فاز دهنده به دلیل قابلیت جذب و آزادسازی گرمای
۱۲ نهان در بازه دمایی، ابزاری کارآمد برای مدیریت انرژی در تجهیزات پزشکی محسوب می‌شوند. در این مقاله مروری،
۱۳ ابتدا انواع مواد تغییر فاز دهنده‌ها (آلی، معدنی و یوتکتیک) و روش‌های کیسوله‌سازی آنها معرفی شده است. سپس
۱۴ کاربردهای مختلف مواد تغییر فاز دهنده در تجهیزات پزشکی در سه حوزه اصلی دسته‌بندی شده است: (۱)
۱۵ سیستم‌های حمل و نقل واکسن (مدیریت زنجیره سرد)، (۲) خنک‌کننده‌های نوزاد (تنظیم دمای بدن با کمترین
۱۶ مصرف انرژی فعال)، و (۳) سیستم‌های دارورسانی هوشمند برای درمان سرطان (کنترل رهایش دارو با تحریک
۱۷ حرارتی). یافته‌ها نشان می‌دهد که کامپوزیت‌هایی مانند ایزوپروپیل استئارات-گرافیت و محلول نمک گلوبر به
۱۸ ترتیب برای کاربردهای سرمایشی (۸-۲ درجه سانتی‌گراد) و هیپوترمی درمانی (۳۴-۳۲ درجه سانتی‌گراد) عملکرد
۱۹ مطلوبی دارند. در پایان، چالش‌های پیش‌رو (زیست‌سازگاری، پایداری چرخه‌ای، هزینه تولید) و چشم‌انداز
۲۰ پیاده‌سازی این فناوری در ایران مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های تغییر
۲۱ فاز دهنده در صنایع پزشکی می‌تواند تا ۵۰ درصد در مصرف انرژی الکتریکی زنجیره سرد واکسن صرفه‌جویی ایجاد
۲۲ کند.

۲۳ کلیدواژگان: مواد تغییر فاز دهنده، دارورسانی، جعبه حمل واکسن، درمان سرطان

۲۴

۲۵

۲۶

۲۷

۲۸

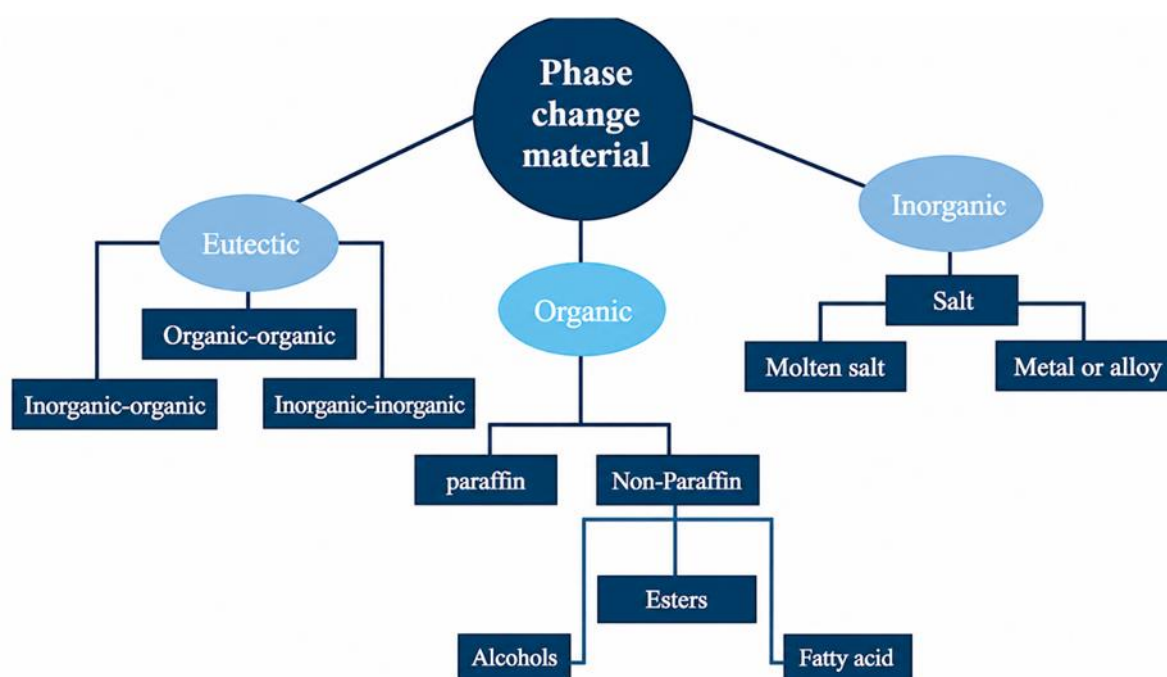
۳۰ مصرف انرژی جهانی در دهه‌های اخیر به دلیل رشد جمعیت، شهرنشینی، صنعت و پیشرفت‌های فناوری به
 ۳۱ طور قابل توجهی افزایش یافته است [۱]. در زندگی امروزی که مسائل زیست محیطی، کاهش چشمگیر
 ۳۲ سوخت‌های فسیلی و جستجوی مداوم برای منابع انرژی تجدیدپذیر و بادوام است، ذخیره‌سازی انرژی به عنوان
 ۳۳ بخشی از راه‌حل‌ها در بسیاری از بخش‌های کاربردی انرژی به نظر می‌رسد [۲]. استفاده از مواد تغییر فاز دهنده
 ۳۴ (PCMs) یکی از راه‌کارهای ذخیره انرژی است. ویژگی کلیدی یک ماده تغییر فاز دهنده، ظرفیت بالای
 ۳۵ ذخیره‌سازی انرژی حرارتی است [۳]. ماده تغییر فاز دهنده می‌تواند گرم شود تا بتواند فاز خود را تغییر دهد،
 ۳۶ معمولاً از حالت جامد به مایع، زمانی که انرژی اضافی از منابع تجدیدپذیر تولید می‌شود، مانند روزهای آفتابی
 ۳۷ یا بادی تا زمانی که به آن نیاز نباشد، انرژی در این ماده ذخیره می‌شود [۴]. انرژی ذخیره شده در کامپوزیت
 ۳۸ ماده تغییر فاز دهنده با تبدیل شدن به حالت جامد خود آزاد می‌شود و هنگامی که نیاز به انرژی از میزان
 ۳۹ عرضه منابع تجدیدپذیر بیشتر می‌شود (به عنوان مثال، در شب یا روزهای ابری)، یک منبع انرژی پایدار و قابل
 ۴۰ اعتماد فراهم می‌کند. در نتیجه، وقتی انرژی تولید می‌شود اما بلافاصله استفاده نمی‌شود، انرژی کمتری هدر
 ۴۱ می‌رود که این امر باعث افزایش راندمان کلی منابع انرژی تجدیدپذیر می‌شود [۵]. عملکرد یک سیستم ذخیره
 ۴۲ انرژی حرارتی مبتنی بر کامپوزیت ماده تغییر فاز دهنده به طور قابل توجهی تحت تأثیر ویژگی‌های ماده تغییر
 ۴۳ فاز دهنده، از جمله رسانایی حرارتی، نقطه ذوب، محدوده دمای عملیاتی، ظرفیت ذخیره انرژی و حرارتی قرار
 ۴۴ دارد [۶]. نتایج مدل‌سازی مواد تغییر فاز دهنده در کاربردهای مختلف از جمله حوضچه‌های تبخیری برای
 ۴۵ بهینه‌سازی مصرف انرژی و مدیریت حرارتی در سیستم‌های مختلف دیدگاه‌های نوینی را فراهم آورده است
 ۴۶ [۷]. هم چنین با مدل‌سازی حوضچه‌های تبخیری با استفاده از پارافین و پره‌های مسی انتقال حرارت را تا ۱۰
 ۴۷ برابر می‌توان افزایش داد [۸]. در کاربردهای ذخیره انرژی گرمایی، مواد تغییر فاز دهنده به دلیل گرمای نهان
 ۴۸ خود اهمیت دارند، اما رسانایی حرارتی ضعیف آن‌ها در سطوح شار حرارتی بالا عملکردشان را محدود می‌کند.
 ۴۹ استفاده از نانوذرات آلومینا^۳ به عنوان بهبوددهنده رسانایی حرارتی، به‌ویژه در نمونه‌های پارافین، باعث افزایش
 ۵۰ قابل توجهی در رسانایی حرارتی و حفظ گرمای نهان می‌شود [۹]. مواد تغییر فاز دهنده می‌توانند با افزودن
 ۵۱ نانوذرات رسنا، مانند اکسید روی^۴ و سیلیکا^۵، بهبود قابل توجهی در رسانایی حرارتی خود کسب کنند. انتخاب
 ۵۲ نوع و درصد وزنی مناسب نانوذرات اهمیت دارد، و نتایج نشان می‌دهند که نانوکامپوزیت‌هایی با ۸ درصد وزنی
 ۵۳ اکسید روی بهترین خواص حرارتی را دارند [۱۰]. استفاده از نانومواد تغییر فاز دهنده برای بهبود مدیریت
 ۵۴ حرارتی و کنترل دما بسیار مؤثر است و بنابراین می‌توان از آنها برای ذخیره و انتقال انرژی استفاده کرد [۱۱].
 ۵۵ افزودن نانوذرات به مواد تغییر فاز دهنده به نوع نانوذرات و درصد وزنی وابسته است. نتایج نشان می‌دهد که
 ۵۶ افزودن ۳ درصد وزنی گرافن و ۱ درصد وزنی نانوذره اکسید تیتانیوم^۶ رسانایی حرارتی پارافین را به صورت
 ۵۷ قابل توجهی افزایش و فرایند انجمادی آنرا تسهیل می‌کند [۱۲]. با شبیه‌سازی نانوالیاف مواد تغییر فاز دهنده

^۲ Phase change materials^۳ Al₂O₃^۴ ZnO^۵ SiO₂^۶ TiO₂

در لوله‌های L شکل، نتایج نشان می‌دهد که استفاده از درصد بالای وزنی پلی‌اتیلن، عملکرد حرارتی و انتقال انرژی را بهبود می‌بخشد [۱۱].

۲- انواع مواد تغییر فاز دهنده

مواد تغییر فاز دهنده را می‌توان بر اساس تغییر فازی که انجام می‌دهند به جامد-مایع، مایع-گاز، جامد-گاز و جامد-جامد تقسیم‌بندی کرد. مواد تغییر فاز دهنده جامد-مایع به سه نوع آلی، معدنی و یوتکتیک طبقه‌بندی می‌شوند. مواد تغییر فاز دهنده آلی به دو دسته اصلی پارافینی و غیرپارافینی طبقه‌بندی می‌شوند. مواد تغییر فاز دهنده‌های غیرپارافینی شامل اسیدهای چرب، استر و پلی‌الکول‌ها می‌شوند، در حالی که مواد تغییر فاز دهنده‌های معدنی شامل آب، فلزات و آلیاژهای آنها، نمک‌ها و نمک‌های مذاب هستند [۱۳]. الزامات کلیدی برای مواد تغییر فاز دهنده‌های مؤثر عبارت هستند از الزامات فیزیکی (دمای تغییر فاز مناسب، چرخه کامل انجماد/ذوب، تغییر آنتالپی بالا، ظرفیت گرمایی ویژه، رسانایی حرارتی بالا)، شیمیایی (پایداری شیمیایی در چرخه‌های مکرر ذوب و انجماد، سازگاری با مواد پوسته و ماتریس نگهدارنده، غیرسمی بودن، عدم خوردگی، مقاومت در برابر اکسیداسیون)، الزامات ترمودینامیکی (فشاربخار پایین در دمای عملیاتی برای جلوگیری از نشت و تبخیر، عدم تجزیه در محدوده دمای کاری) و الزامات اقتصادی و محیط زیستی (هزینه کم، قابلیت بازیافت و فراوانی) [۱۴]. جزئیات طبقه‌بندی و انواع مختلف مواد تغییر فاز دهنده در شکل ۱ آورده شده است [۱۵].



شکل ۱ طبقه‌بندی مواد تغییر فاز دهنده.

Figure 1 Classification of phase change materials.

مزایای مواد تغییر فاز دهنده آلی شامل پایداری شیمیایی و حرارتی، عدم خوردگی و قابلیت بازیافت است. با این حال، آنها معایبی مانند اشتعال‌پذیری، رسانایی حرارتی پایین و آنتالپی تغییر فاز پایین‌تر در مقایسه با سایر انواع دارند. نمونه‌های رایج آن پارافین و اسیدهای چرب هستند [۱۶]. اسیدهای چرب با مواد تغییر فاز دهنده

۸۱	های پارافینی متفاوت هستند، زیرا یک گذار جامد-جامد را نشان می‌دهند که به آنها خواص منحصر به فردی
۸۲	می‌دهد. با این حال، برخی از اسیدهای چرب به دلیل سمیت بالقوه و انتشار گازهای مضر در دماهای بالا،
۸۳	مستقیماً در کاربردهای ساختمانی استفاده نمی‌شوند. در عوض، آنها اغلب به صورت کپسوله شده استفاده
۸۴	می‌شوند [۱۷]. مواد تغییر فاز دهنده‌های غیرآلی که به عنوان نمک‌های مذاب، نمک‌ها و فلزات طبقه‌بندی
۸۵	می‌شوند، عموماً مزایای کمتری نسبت به مواد آلی دارند. مزیت آنها آنتالپی تغییر فاز بالاتر است، اما با معایبی
۸۶	مانند خوردگی، جداسازی فاز و عدم پایداری حرارتی مواجه هستند [۱۸]. هیدرات‌های نمک به عنوان
۸۷	محصولات جانبی فرآیندهای صنعتی و شیمیایی در مقادیر زیادی تولید می‌شوند [۱۹]. یوتکتیک‌ها مخلوطی
۸۸	از ترکیبات یا عناصری هستند که در دمای پایین‌تری نسبت به سایر ترکیبات همان اجزاء جامد می‌شوند. آنها
۸۹	می‌توانند آلی-آلی، غیرآلی-غیرآلی یا غیرآلی-آلی باشند و اغلب برای کاربردهای خنک‌کننده ترجیح داده
۹۰	می‌شوند [۲۰].
۹۱	از کپسوله کردن مواد تغییر فاز دهنده برای محصور کردن و محافظت از مواد تغییر فازدهنده در یک پوسته یا
۹۲	محفظه استفاده می‌شود. کپسوله کردن امکان استفاده از مواد تغییر فاز دهنده را در کاربردهای متنوع فراهم
۹۳	می‌کند، در حالی که از قرار گرفتن مستقیم در معرض محیط اطراف و نشت مواد تغییر فاز دهنده در طول
۹۴	انتقال فاز آنها از جامد به مایع جلوگیری می‌کند. کپسوله کردن را می‌توان با قرار دادن مواد تغییر فاز دهنده
۹۵	در داخل یک پوسته غیرممتخلخل (کپسول) یا با آغشته کردن مواد تغییر فاز دهنده‌های مایع به ذرات متخلخل
۹۶	به نام ماتریس‌های نگهدارنده (کامپوزیت‌ها) انجام داد [۲۱]. اندازه ظرف نیز نقش حیاتی در بهبود عملکرد
۹۷	حرارتی مواد تغییر فاز دهنده ایفا می‌کند. بر اساس اندازه ظرف، کپسوله کردن به سه نوع ماکرو، میکرو و
۹۸	نانوکپسوله طبقه‌بندی می‌شود [۲۲]. فناوری‌های مختلف کپسوله‌سازی مزایای منحصر به فردی را از نظر
۹۹	عملکرد حرارتی، دوام و مناسب بودن برای کاربردهای خاص ارائه می‌دهند. پژوهش‌های مرتبط با مواد تغییر
۱۰۰	فاز دهنده نشان داده‌اند که این مواد می‌توانند درون محفظه‌های آلی یا غیرآلی محصور شوند. کپسول‌سازی
۱۰۱	مواد تغییر فاز دهنده با روش‌های شیمیایی، فیزیکی و فیزیکو شیمیایی انجام می‌شود. روش‌های کپسول‌سازی
۱۰۲	شیمیایی عمدتاً برای ایجاد پوسته‌های پلیمری آلی مانند ملامین فرمالدئید، استفاده می‌شوند [۲۳]. در
۱۰۳	روش‌های کپسول‌سازی فیزیکو شیمیایی، پوسته‌های غیرآلی عمدتاً از روش محلول-ژل به دست می‌آیند [۲۴].
۱۰۴	اگرچه روش‌های کپسول‌سازی فیزیکی برای کپسول‌سازی مواد تغییر فاز دهنده به طور گسترده‌ای پذیرفته
۱۰۵	نشده‌اند [۲۵]، برخی فنون، مانند تبخیر حلال، خشک کردن به روش پاشش، ژل‌سازی یونی و کپسول‌سازی
۱۰۶	میکروسیالی، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۲۶، ۲۷].

جدول ۱ - خلاصه کاربردهای مواد تغییر فاز دهنده در تجهیزات و سیستم‌های پزشکی به تفکیک حوزه کاربردی
Table 1 - Summary of applications of phase change materials in medical equipment and systems by application field

Application Area	Phase Change Material	Temperature Range	Role in Energy Management	References
Vaccine transportation	Isopropyl stearate, n-tetradecanol, eutectic fatty acids	2–8 °C	Cold energy storage, maintaining cold chain without electricity	Dixit et al. (2022); Devrani et al. (2021)
Infant cooling device	Glauber's salt solution ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)	32–34 °C	Stabilizing infant body temperature, reducing active energy consumption	Olson et al. (2021)
Patient bed ventilation system	Binary organic PCM blend (capric acid/myristic acid)	23–25 °C	Reducing building cooling/heating load, localized energy management	Su et al. (2024)
Cancer drug delivery systems	1-tetradecanol, stearic-lauric acid, tetradecanol	37–45 °C	Thermal-stimuli-controlled drug release (energy management at nanoscale)	Wang et al. (2021); Lu et al. (2023); Hu et al. (2023); Wang et al. (2023); Zhang et al. (2026); Bao et al. (2026)
Biosensors	Docosane ($\text{C}_{22}\text{H}_{44}$)	60 °C	Thermal self-regulation, improved	Sun et al. (2022)

Application Area	Phase Change Material	Temperature Range	Role in Energy Management	References
			glucose detection	
Smart wound dressings	Eutectic fatty acid blend (myristic acid, palmitic acid, stearic acid; melting point 39 °C)	39 °C	Infrared-light- triggered drug release, reduced antibiotic consumption	Ye et al. (2023); Zhang et al. (2022)

هدف اصلی این مقاله بررسی نقش کامپوزیت‌های مواد تغییر فاز دهنده در مدیریت انرژی حرارتی تجهیزات پزشکی است. مقاله بر ذخیره‌سازی و تعدیل انرژی گرمایی در دستگاه‌های پزشکی می‌پردازد. دستگاه‌ها شامل سیستم‌های کنترل دمای پایدار برای حمل واکسن (مدیریت انرژی سرمایشی)، خنک‌کننده‌های نوزاد (تنظیم دمای بدن با کمترین مصرف انرژی خارجی)، و سامانه‌های تهویه موضعی تخت بیمار (بهبود آسایش حرارتی با کاهش بار سرمایش/گرمایش ساختمان) است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های مجهز به مواد تغییر فاز دهنده در صنایع پزشکی می‌تواند به کاهش چشمگیر مصرف انرژی کمک کند. در این مقاله، تمایز روشنی میان کاربردهای مدیریت انرژی حرارتی (که هدف اصلی این مطالعه است) و رهایش دارویی (که برای تکمیل بحث مورد اشاره قرار گرفته است) حفظ خواهد شد.

۳- مواد تغییر فاز دهنده در تجهیزات پزشکی

همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، کاربردهای مواد تغییر فاز دهنده در پزشکی به دو دسته کلی تقسیم می‌گردد. در ادامه، سیستم‌های دارورسانی نیز به دلیل همپوشانی در مواد اولیه و برای ارائه تصویری جامع از قابلیت‌های مواد تغییر فاز دهنده در حوزه پزشکی مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۲- طبقه‌بندی مواد تغییر فاز دهنده در کاربردهای پزشکی

Table 2- Classification of phase change materials in medical applications

Application Category	Example Medical Equipment	Role of Phase Change Material	Main Mechanism	Relevance to Energy Management
Thermal management (main focus of the paper)	Vaccine transport box, infant cooling device, patient bed ventilation system	Cold/heat storage, ambient temperature stabilization	Absorption and release of latent heat within a specific temperature range	Direct reduction of energy consumption by maintaining temperature without the need for a continuous power supply
Drug delivery systems (secondary review)	Cancer therapeutic nanoplateforms, smart wound dressings	Thermal stimulus for pore opening, controlled drug release	Phase change (solid-to-liquid) in response to external stimuli (light, magnetic field)	Energy management at the nanoscale to enhance therapeutic efficacy and reduce side effects

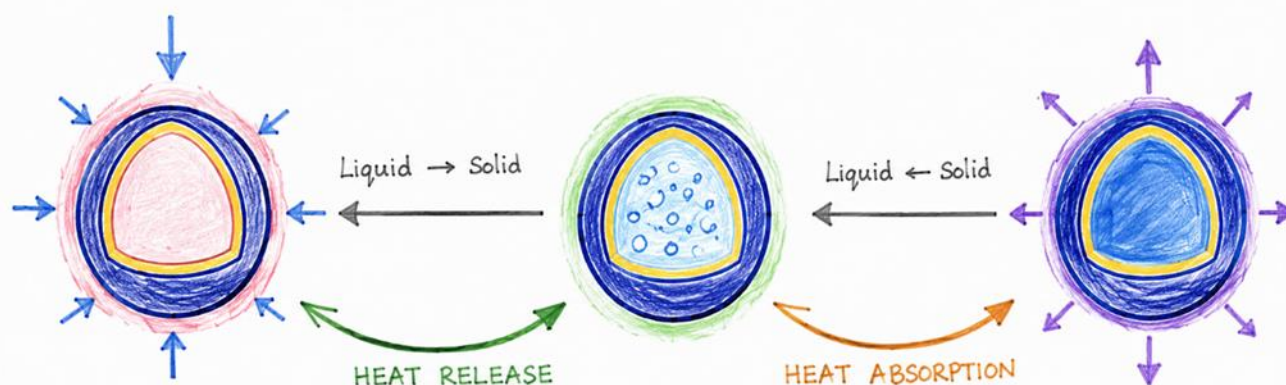
۱۳۷

۱۳۸

۱۳۹ مواد تغییر فاز دهنده‌ها با ارائه کنترل دقیق گرما به حفظ کیفیت و ایمنی درمان‌ها و لوازم پزشکی ضروری
 ۱۴۰ کمک می‌کنند. سیستم کنترل دما مبتنی بر مواد تغییر فاز آلی به دلیل مزایای بارز ذخیره‌سازی گرمای زیاد،
 ۱۴۱ کنترل دقیق دما، سهولت اصلاح و غیره، توجه زیادی را در کاربردهای پزشکی به خود جلب کرده است. به
 ۱۴۲ منظور استفاده کامل از مزایای مواد تغییر فاز دهنده‌های آلی برای کاربرد بهتر در زیست پزشکی، اغلب لازم
 ۱۴۳ است مواد تغییر فاز دهنده‌ها را کپسوله کرد تا کاستی‌های آنها (مانند ناپایداری در شکل، ایمنی زیستی، زیست
 ۱۴۴ سازگاری و غیره) بهبود یابد [۲۸].

۱۴۵ سازمان بهداشت جهانی محققان را تشویق می‌کند تا راه‌حل‌های مقرون به صرفه‌ای برای نگهداری داروهای
 ۱۴۶ حساس به گرما برای مدت طولانی در دمای ایمن پیدا کنند. این امر ممکن است با استفاده از قابلیت‌های
 ۱۴۷ ذخیره‌سازی و آزادسازی گرما در ماده تغییر فاز دهنده محقق شود [۲۹]. توانایی مدیریت توزیع دارو در مکان
 ۱۴۸ و زمان، هدف یک سیستم دارورسانی است. اخیراً مواد تغییر فاز دهنده در سیستم‌های دارورسانی برای درمان
 ۱۴۹ سرطان، به عنوان مثال درمان فتودینامیک، درمان حرارتی، شیمی‌درمانی و ترکیبی از چندین درمان، مورد
 ۱۵۰ مطالعه قرار گرفته‌اند. مواد تغییر فاز دهنده در یک سیستم دارورسانی می‌توانند آزادسازی دارو را به طور دقیق
 ۱۵۱ تنظیم کنند، از نشت داروها قبل از رسیدن به محل هدف جلوگیری کنند، تأثیر درمانی را بهبود بخشند و

- سیستم را به طور روان اجرا کنند [۳۰, ۳۱]. پردازش مواد تغییر فاز دهنده‌ها به عنوان ذرات کلوئیدی پایدار ۱۵۲
- در یک محیط آبی تحت شرایط فیزیولوژیکی جهت استفاده در نانوپزشکی بسیار مهم است [۳۲]. ۱۵۳
- حرارت نهفته‌ی مواد تغییر فاز دهنده به آن‌ها اجازه می‌دهد که برای مدت طولانی حرارت را جذب یا آزاد ۱۵۴
- کنند، که این امر در انواع مختلفی از درمان‌های پزشکی، مانند درمان آرتريت، ماسک‌های چشمی قابل حمل، ۱۵۵
- پانسمان‌های پزشکی، سوزاندن تومور حرارتی، و کاربردهای دارورسانی مفید است [۳۳]. حرارتی که به عمق ۱۵۶
- عضلات نفوذ می‌کند، باعث افزایش جریان خون و حذف سموم مضر عضلانی می‌شود [۳۴]. ۱۵۷
- الیاف طبیعی دوست‌دار محیط زیست، تجدیدپذیر و سازگار با محیط زیست هستند. استفاده از مواد مبتنی بر ۱۵۸
- زیست به عنوان مواد پوشش میکروکپسول‌های تغییر فاز دهنده مورد مطالعه قرار گرفته است [۳۵]. از فیبروئین ۱۵۹
- ابریشم بازیافتی به عنوان ماده‌ای برای پوشش‌دهی استفاده کرده‌اند تا میکروکپسول‌های تغییر فاز دهنده تولید ۱۶۰
- کنند، زیرا دارای قابلیت بازتولید بالا و سازگاری زیستی است [۳۶]. ۱۶۱
- شمع‌های خوراکی (بر پایه پارافین) توسط سازمان غذا و داروی ایالات متحده برای استفاده در مواد غذایی، ۱۶۲
- آرایشی و دارویی تأیید شده‌اند، زیرا غیرسمی محسوب می‌شوند. پارافین وکس و پلی‌اتیلن گلیکول به دلیل ۱۶۳
- سمیت کم، زیست‌سازگاری، پایداری حرارتی بالا، آنتالپی نهان بالا، محدوده دمای گذار نسبتاً گسترده و سهولت ۱۶۴
- اصلاح شیمیایی، رایج‌ترین مواد تغییر فاز دهنده‌های مورد مطالعه در حوزه پزشکی هستند [۳۷]. ۱۶۵
- در شکل ۲ میکروکپسول‌های تغییر فاز دهنده حساس به محرک دما برای کاربردهای چندمنظوره در دارورسانی ۱۶۶
- هوشمند نشان داده شده است. در این ساختار هسته میکروکپسول از جنس ماده تغییر فاز دهنده (مانند ۱- ۱۶۷
- تترادکانول یا اسیدهای چرب) و پوسته بیرونی از جنس پلیمر زیست سازگار (مانند ملامین فرمالدئید) ساخته ۱۶۸
- می‌شود. هنگامی که دمای محیط به نقطه ذوب ماده تغییر فاز دهنده می‌رسد، این ماده با تغییر فاز از جامد ۱۶۹
- به مایع، انرژی حرارتی را از محیط اطراف جذب و ذخیره می‌کند. این فرآیند جذب گرما (و نه آزادسازی آن) ۱۷۰
- باعث ایجاد یک پلاتوی دمایی در محیط می‌شود. در سیستم دارورسانی هوشمند، این جذب گرمای محیطی ۱۷۱
- یا افزایش دمای ناشی از منابع خارجی (مثل نور مادون قرمز) به عنوان محرکی عمل می‌کند که منجر به ذوب ۱۷۲
- شدن هسته PCM می‌شود. در نتیجه، داروی محبوس شده در هسته یا ماتریس پوسته، آزاد می‌گردد. به عبارت ۱۷۳
- دیگر، نقش ماده تغییر فاز در اینجا دریچه حرارتی است که با جذب انرژی، مسیر انتشار دارو را باز می‌کند. این ۱۷۴
- فرآیند در دارورسانی چندمنظوره بسیار مفید است، چون می‌تواند نیازهای متفاوت بدن را در زمان‌ها و دماهای ۱۷۵
- مختلف پاسخ دهد [۳۸]. ۱۷۶

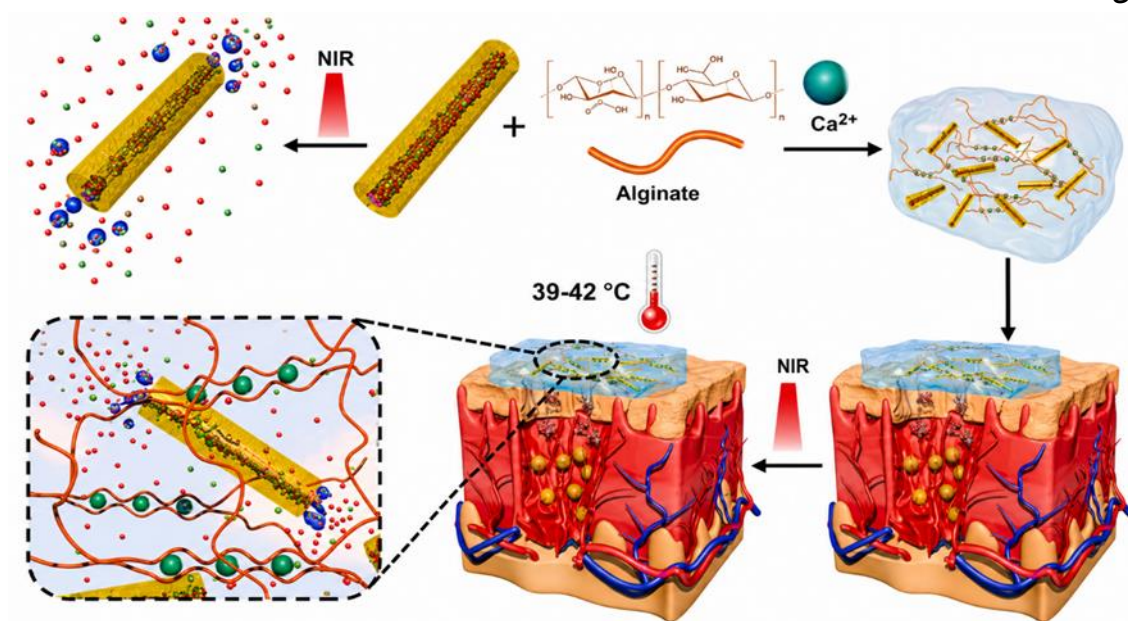


شکل ۲ میکروکپسول‌های تغییر فاز دهنده با هسته از جنس ماده تغییر فاز دهنده و پوسته پلیمری زیست‌سازگار حساس به محرک دما در دارورسانی هوشمند

Figure 2 Phase-change microcapsules with a core made of a phase-change material and a temperature-sensitive biocompatible polymer shell for multifunctional applications in smart drug delivery

درمان نانوکاتالیستی به عنوان یک روش امیدوارکننده برای درمان سرطان شناخته شده است. با این حال، فعالیت کاتالیستی آن‌ها اغلب به دلیل سطوح پایین هیدروژن پراکسید اندوژن در میکرو محیط تومور محدود می‌شود. به دلیل بازده بسیار خوب تبدیل فوتوحرارتی نزدیک به مادون قرمز، نانوذرات و سیکول کربنی به عنوان حامل انتخاب شدند. نانوذرات آلیاژ پلاتین و آهن به صورت درجا بر روی نانوذرات و سیکول کربنی رشد داده شدند و برای محصور کردن مواد تغییر فاز دهنده و داروی لاپاشون استفاده شدند. این نانوکاتالیزورهای چندمنظوره توانستند اثر فوتوحرارتی راه‌اندازی شده را نشان دهند و منجر به آزادسازی داروی لاپاشون شوند. با توجه به تقویت خاص هیدروژن پراکسید در تومور و درمان فوتوحرارتی با دماهای ملایم، این نانوکاتالیزور چندمنظوره ممکن است به عنوان یک عامل درمانی چندمنظوره عمل کند که به صورت هم‌افزا با درمان نانوکاتالیستی تومور تقویت‌شده با نور نزدیک به مادون قرمز کار می‌کند [۳۹]. پژوهشگران نانوذرات کربنی مزومتخلخل (MCN) را با مواد تغییر فاز دهنده یوتکتیک استئاریک-لوریک ترکیب کردند تا به آزادسازی "بر اساس تقاضا" داروی کم محلول مرکاپتوپورین دست یابند. مواد تغییر فاز دهنده یوتکتیک با دمای ذوب ۴۰ درجه سانتی‌گراد به عنوان نگه‌دارنده مرکاپتوپورین عمل کرده و پیش‌رهاسازی دارو را در دماهای بدن متوقف کردند. آزادسازی دارو تنها در دمای بالاتر از نقطه ذوب مواد تغییر فاز دهنده و تحت تابش نور نزدیک به مادون قرمز انجام شد. این روش دارورسانی تحریک‌شده با نور نزدیک به مادون قرمز و اثر فوتوترمال آن، به‌ویژه فعالیت ضد توموری را بهبود بخشید [۴۰]. نانوذرات مغناطیسی مختلف نظیر α -Fe₂O₃، γ -Fe₂O₃ و Fe₃O₄ به دلیل ویژگی‌هایی مانند اندازه نانو و ماهیت مغناطیسی‌شان، در دارورسانی هدفمند و درمان سرطان کاربردهای گسترده‌ای دارند. این نانوذرات می‌توانند ترکیبات درمانی را به خود متصل کرده و با استفاده از میدان‌های مغناطیسی خارجی، داروها را به محل‌های هدف در بدن منتقل کنند [۴۱]. مواد تغییر فاز دهنده از نوع اسیدهای چرب و الکل‌های چرب، به دلیل ویژگی‌هایی از جمله زیست‌سازگاری ذاتی، قابلیت تنظیم نقطه ذوب، و ظرفیت بالای بارگذاری دارو، گزینه‌های بسیار مناسبی برای طراحی سکوه‌های نانوحامل هوشمند در درمان

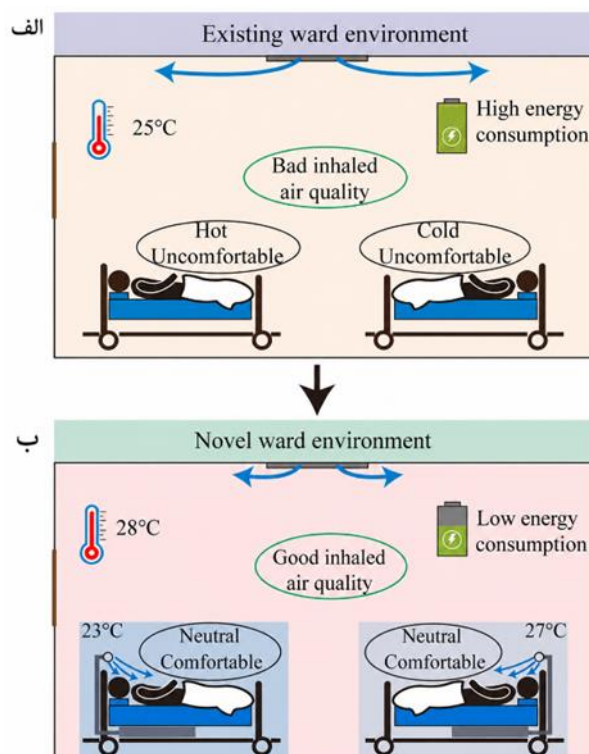
۲۰۳ سرطان در سال‌های اخیر هستند [۴۲]. یک کامپوزیت هیدروژل ضدباکتری مؤثر را با کنترل رهایش داروی
 ۲۰۴ ریفامپیسین از طریق تحریک نور مادون قرمز نزدیک ایجاد کردند. این کامپوزیت از ترکیب آلژینات و
 ۲۰۵ نانولوله‌های هالوژیت تشکیل شده و شامل کپسوله‌سازی ریفامپیسین، رنگ جاذب نور مادون قرمز،
 ۲۰۶ ایندوسیانین سبز و ماده تغییر فاز دهنده یوتکتیک مبتنی بر اسیدهای چرب است. ماده تغییر فاز دهنده
 ۲۰۷ یوتکتیک با دمای ذوب ۳۹ درجه سانتی‌گراد به عنوان درگاهی برای تسهیل انتشار دارو تحت تحریک نور
 ۲۰۸ مادون قرمز عمل کرد. کاربرد این هیدروژل کامپوزیت در موش‌های آلوده به باکتری، منجر به مهار کلونیزاسیون
 ۲۰۹ باکتری‌ها، کاهش پاسخ التهابی و افزایش رسوب کلاژن شد و در نتیجه بهبود بازسازی زخم را تسهیل کرد
 ۲۱۰ (شکل ۳) [۴۳].



شکل ۳ طرح رهایش مولکول‌های دارو با تحریک نور مادون قرمز [۴۳]
Figure 3 Scheme of drug molecule release by infrared light stimulation [43]

۲۱۱ یک نانوپلتفرم جدید مبتنی بر ماده تغییر فاز دهنده برای انجام شیمی‌درمانی همزمان با فتوتراپی دوگانه در
 ۲۱۲ درمان تومورهای پستان توسعه داده شد. این نانوپلتفرم به طور مؤثری پاکلیتاکسل، IR780 و گامبوژیک اسید
 ۲۱۳ را به صورت همزمان تحویل می‌دهد. نانوذرات مبتنی بر ماده تغییر فاز دهنده دارای اندازه ذرات مطلوب و
 ۲۱۴ همچنین پایداری نوری بهبودیافته IR780 هستند، یعنی ذرات نانو که بر پایه مواد تغییر فاز دهنده ساخته
 ۲۱۵ شده‌اند، اندازه ذرات آنها در تعیین ویژگی‌ها نقش مهمی دارد. اندازه مناسب ذرات باعث می‌شود که این نانوذرات
 ۲۱۶ در بهبود ویژگی‌های عملکردی، مانند پایداری نوری، موثر باشند. ماده تغییر فاز دهنده موجب آزادسازی
 ۲۱۷ پاکلیتاکسل به واسطه هیپرترمی می‌شود و به کاهش عوارض جانبی درمان کمک می‌کند. شیمی‌درمانی مبتنی
 ۲۱۸ بر پاکلیتاکسل به دوز کم که با فتوتراپی حرارتی و فتوتراپی دوگانه فعال شده، نشان دهنده اثرات ضدتوموری
 ۲۱۹ چشمگیری در شرایط آزمایشگاهی و نیز در مدل‌های حیوانی است. این نانوپلتفرم باعث ترکیب مؤثر
 ۲۲۰ شیمی‌درمانی و فتوتراپی با دوز پایین می‌شود، که هم تومور را بهتر می‌کشد و هم عوارض جانبی را کاهش
 ۲۲۱ می‌دهد [۴۴].

استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به عنوان ابزاری برای سیستم کنترل محیط شخصی در زیر تخت بیمار	۲۲۶
توسعه داده شده است که در آن می‌توان دمای هوای خروجی را با اعمال ترکیبی از دو نوع ماده تغییر فاز	۲۲۷
تنظیم کرد. نتایج نشان می‌دهد که سیستم کنترل محیط شخصی می‌تواند به طور مؤثر دمای هوا را با حداکثر	۲۲۸
ظرفیت سرمایش و گرمایش به ترتیب ۴۸ وات و ۴۱ وات خنک یا گرم کند. علاوه بر این، دمای خروجی را	۲۲۹
می‌توان در محدوده ۱ تا ۲ درجه سانتیگراد تنظیم کرد تا نیازهای آسایش فردی بیماران را برآورده کند. به	۲۳۰
طور کلی، سیستم آسایش شخصی پیشنهادی می‌تواند زمانی که میانگین دمای مواد تغییر فاز دهنده در	۲۳۱
محدوده دمای تغییر فاز باشد، به طور پایدار عمل کند. این مطالعه امکان‌سنجی شکل پیشنهادی کنترل محیط	۲۳۲
بخش را تأیید می‌کند و پیش‌بینی می‌شود که راه‌حل جدیدی برای ایجاد یک محیط راحت و سالم بخش به	۲۳۳
شیوه‌ای کارآمد از نظر انرژی ارائه دهد. در شکل (۴) که نشان‌دهنده عملکرد سیستم کنترل دما در تخت‌های	۲۳۴
بیمارستانی در دو وضعیت محیطی مختلف است، تأثیر مستقیم آن بر راحتی بیماران و مصرف انرژی را به	۲۳۵
نمایش می‌گذارد. در وضعیت اول، محیط خارجی با دمای بالا (۲۵ درجه سانتی‌گراد) باعث بروز هوای ناخوشایند	۲۳۶
و گرمای بیش از حد در داخل تخت می‌شود، که این حالت منجر به احساس ناراحتی و فشار بر سیستم تهویه	۲۳۷
و مصرف زیاد انرژی می‌گردد.	۲۳۸
در وضعیت دوم، به جای سیستم‌های سنتی کنترل دما، از مواد تغییر فاز دهنده در هر تخت جداگانه استفاده	۲۳۹
شده است. این مواد نقش مهمی در بهبود کارایی و کاهش مصرف انرژی دارند، زیرا قادر هستند در فرآیند	۲۴۰
تغییر فاز خود، حرارت را به صورت مؤثر نگه دارند و به تثبیت دما کمک کنند. در نتیجه، در محیط جدید،	۲۴۱
گرمای تولید شده توسط بیماران به زودی توسط مواد تغییر فاز دهنده جذب می‌شود و دما در سطح مطلوب	۲۴۲
و راحت (۲۳ درجه سانتی‌گراد) حفظ می‌گردد، در حالی که مصرف انرژی به میزان قابل توجهی کاهش یافته	۲۴۳
است. این رویکرد پیشرفته نه تنها راحتی بیماران را بهبود می‌بخشد، بلکه باعث می‌شود که سیستم‌های	۲۴۴
سرمایش و گرمایش کم‌کارتر و اقتصادی‌تر عمل کنند، و در نتیجه، بهره‌وری کلی سیستم بهبود یابد و اثرات	۲۴۵
زیست‌محیطی کاهش پیدا کند [۴۵].	۲۴۶

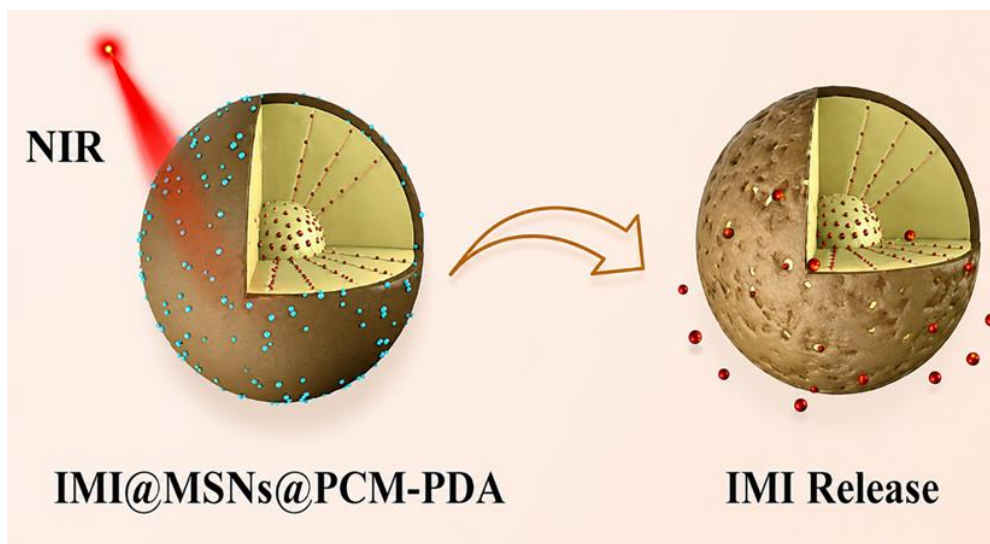


شکل ۴ مقایسه شماتیک عملکرد سیستم کنترل محیط شخصی مبتنی بر تخت بیمارستان (الف) وضعیت بدون استفاده از ماده از ماده تغییر فاز دهنده (ب) وضعیت با استفاده از ماده تغییر فاز دهنده [45].

Figure 4 Schematic comparison of the performance of the hospital bed-based personal environment control system (a) Situation without using phase change material (b) Situation with using phase change material [45].

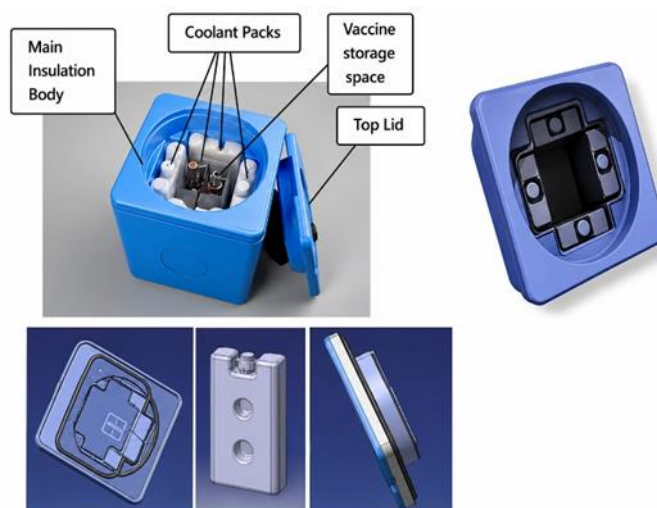
یک روش جدید برای درمان عفونت‌های ناشی از باکتری (مخصوصاً زخم‌هایی که مقاوم به دارو هستند). استفاده از مواد نانوکامپوزیتی هوشمند و مقاوم در برابر تغییرات محیطی است که می‌تواند همزمان چند نوع درمان را برای نابود باکتری‌ها انجام دهد. در این سیستم، دو ماده مهم، کورکومین (یک ماده گیاهی با خواص ضدالتهاب و ضدباکتری) و ایندوسیانین گرین (یک رنگ نوری که به افزایش گرمای نوری کمک می‌کند)، درون نانو حامل‌های خاصی قرار گرفتند. این نانوحامل‌ها از ترکیباتی به نام ZIF-8 و پلی‌لاکتیک اسید ساخته شده‌اند، که باعث می‌شود مواد درون آن‌ها پایداری کافی داشته باشند و بتوانند به صورت هدفمند و کنترل‌شده آزاد شوند. این سیستم به گونه‌ای طراحی شده است که با استفاده از نور و تغییر pH محیط، کورکومین و ایندوسیانین گرین آزاد می‌شوند. وقتی نور به این نانوحامل‌ها می‌تابد، ترکیب آنها گرمای موثری تولید می‌کند و همچنین اکسیژن فعال آزاد می‌کند تا به صورت فتوترمال و فوتودینامیک با باکتری‌ها مقابله کند. علاوه بر این، با تغییر در محیط اسیدی (مانند درون زخم عفونی)، مواد به طور طبیعی آزاد می‌شوند و زودتر اثر می‌گذارند. مزایای این سیستم شامل پایداری بیشتر، اثر سریع و قوی، و توانایی مقابله با عفونت‌های مقاوم است. آزمایش‌های آزمایشگاهی نشان داده‌اند که این نانوپلت می‌تواند بیش از ۹۹٪ باکتری‌ها را از بین ببرد، به طوری که زخم‌های عفونی به سرعت بهبود یابند [۴۶].

- از مواد تغییر فاز دهنده و مواد بیوالکترونیک الکتروشیمیایی برای ساخت یک حسگر زیستی هوشمند خودتنظیم ۲۶۷
- حرارتی استفاده شد که باعث بهبود تشخیص گلوکز را در دماهای بالا گردید. یک سیستم الکتروفعال مبتنی ۲۶۸
- بر ماده تغییر فاز دهنده با میکروکپسول سازی دکوزان در پوسته سیلیکا طراحی شد و لایه الکتروفعال متشکل ۲۶۹
- از پلی دوپامین و نانولوله های کربنی را روی آن رسوب دادند. این میکروکپسول های الکتروفعال دارای هسته- ۲۷۰
- پوسته ای و شکل کروی بودند و با استفاده از آنزیم اکسیداز گلوکز، یک سیستم حسگر زیستی الکتروشیمیایی ۲۷۱
- ایجاد کردند. این حسگر با آنتالپی ۱۳۷ ژول بر گرم، در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد، حساسیت بالاتر از حد ۲۷۲
- تشخیص را نشان داد و عملکرد بهتری نسبت به حسگرهای زیستی معمولی داشت [۴۷]. ۲۷۳
- یک نانوپلتفرم هوشمند مبتنی بر نانوذرات ارگانوسیلیکا مزومتخلخل دندریت برای هدفمندسازی و آزادسازی ۲۷۴
- کنترل شده داروهای شیمی درمانی در درمان سرطان طراحی شده است. در این سیستم، ماده تغییر فاز دهنده، ۲۷۵
- تترادکانول، نقش "درب" را بر عهده دارد که بر اثر تغییر دما، آزادسازی دارو را فعال می کند. پلی اتیلن گلیکول ۲۷۶
- نیز برای افزایش پراکندگی و زیست سازگاری نانوذرات استفاده شده است. داروی سیس پلاتین، به عنوان داروی ۲۷۷
- شیمی درمانی، همراه با ایندوسیانیل گرین در نانوپلتفرم بارگذاری شده است. هنگام تابش لیزر، ایندوسیانیل ۲۷۸
- گرین موجب افزایش حرارت و فعال سازی گذار فازی در تترادکانول می شود و فرآیند آزادسازی دارو آغاز ۲۷۹
- می شود. این نانوپلتفرم، با ترکیب درمان های شیمی درمانی، فوتوترمال و فوتودینامیک، قادر است سلول های ۲۸۰
- سرطانی را هدف قرار دهد و تومور را به طور مؤثر مهار کند، در حالی که کمترین آسیب را به سلول ها و ۲۸۱
- ارگان های اطراف وارد می نماید. نتایج آزمایش ها نشان می دهد که این سیستم نه تنها اثرات ضدتوموری قابل ۲۸۲
- توجهی دارد، بلکه از نظر سمیت سیستمیک و آسیب های کبدی نیز ایمن است، بنابراین می تواند رویکردی ۲۸۳
- نوین و کارآمد در درمان چندوجهی سرطان باشد [۴۸]. نانوحلقه های اکسید آهن با پوشش ماده تغییر فاز ۲۸۴
- دهنده به عنوان یک پلتفرم درمانی چندمنظوره در سال های اخیر معرفی شدند. این نانوحلقه ها در میدان ۲۸۵
- مغناطیسی متناوب با نرخ جذب ویژه ۱۰۵۸ وات بر گرم گرما تولید می کنند. این گرما به طور همزمان ابتدا ۲۸۶
- پوسته ماده تغییر فاز را ذوب کرده و داروی محبوس شده را به صورت کنترل شده آزاد می کند. سپس هیپرترمی ۲۸۷
- موضعی ایجاد می کند و سلول های سرطانی را از بین می برد. در دمای بدن، نشت دارو تقریباً صفر است. ۲۸۸
- همچنین این نانوحلقه ها امکان هدایت تصویری درمان را فراهم می کنند [۴۹]. ۲۸۹
- ماده تغییر فاز دهنده و پلی دوپامین (PDA) به طور همزمان بر روی ذرات نانو سیلیکای مزومتخلخل (MSN) ۲۹۰
- حاوی ایمیداکلوپرید (IMI) پوشش داده شدند تا آزادسازی ایمیداکلوپرید با تحریک نور مادون قرمز حاصل ۲۹۱
- شود. بهترین ماده تغییر فاز دهنده برای ایجاد تعادل بین پایداری حرارتی بالا و پاسخ حرارتی ظریف، الکل ۲۹۲
- میریستیل (MA) بود. با حداکثر افزایش دما ۲۳/۳ درجه سانتیگراد (۸۰۸ نانومتر، ۲ وات بر سانتی متر مربع، ۲۹۳
- ۳۰۰ گرم بر میلی لیتر)، نانوکامپوزیت های MSNs@MAPDA ظرفیت تبدیل فوتوترمال پایدار را نشان دادند ۲۹۴
- (شکل ۵)، که به غلظت و توان تابش وابسته بود. طبق ایمیداکلوپرید، راندمان بارگیری و کپسوله سازی دارو به ۲۹۵
- ترتیب ۳۰/۱٪ و ۴۳٪ بود. وقتی دما از ۲۵ درجه سانتیگراد به ۳۸ درجه سانتیگراد افزایش یافت، تقریباً ۳۰٪ ۲۹۶
- افزایش در آزادسازی تجمعی ایمیداکلوپرید از IMI@MSNs@MA-PDA مشاهده شد [۵۰]. ۲۹۷



شکل ۵ آزادسازی تجمعی IMI از IMI@MSNs@MA-PDA [۵۰]
Figure 5 Cumulative release of IMI from IMI@MSNs@MA-PDA [۵۰]

از گرافیت منبسط شده به عنوان ماتریس پشتیبان و ایزوپروپیل استئارات به عنوان ماده تغییر فاز دهنده برای طراحی جعبه واکسن استفاده شده است. پنج نوع کامپوزیت با استفاده از نسبت های مختلف اتیلن گلیکول و بارگذاری ثابت ایزوپروپیل استئارات تولید شدند. این کامپوزیت ها دارای حداکثر محتوای هسته ۸۸ درصد وزنی با آنتالپی ۱۷۲ ژول بر گرم و نقطه ذوب ۶ درجه سانتی گراد می باشند. با قرار دادن کامپوزیت ماده تغییر فاز دهنده در یک جعبه حامل واکسن و آزمایش آن در دماهای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی گراد و در معرض آفتاب، نتایج نشان داد که این کامپوزیت در حفظ دمای واکسن ها و سایر محصولات زیر ۱۵ درجه سانتی گراد مؤثر است. در شکل ۶ ساختار داخلی و اجزای مختلف جعبه حمل واکسن نشان داده شده است. در این طراحی، قسمت اصلی، بدن عایق کاری شده است که باعث حفظ دما و محافظت از محتوا می شود. درون جعبه، بسته های خنک کننده قرار دارند که وظیفه کاهش و تثبیت دما را بر عهده دارند. بالای جعبه، فضای نگهداری واکسن طراحی شده است که محل قرارگیری بطری ها یا بسته های واکسن است. قسمت درب برای دسترسی آسان و محافظت از محتوا قرار داده شده است. این طراحی به منظور تضمین حفظ کیفیت و اثربخشی واکسن ها در طول حمل و انتقال در شرایط سرد و کنترل شده ساخته شده است، که اهمیت ویژه ای در پشتیبانی از فرآیندهای بهداشتی و واکسیناسیون دارد [۵۱]. با استفاده از دو نوع ماده تغییر فاز دهنده در یک ظرف استوانه ای حمل واکسن با بهینه سازی پارامترهای طراحی با شبکه عصبی مصنوعی محققان موفق به افزایش زمان نگهداری واکسن در دمای ایمن تا ۱۹۷ ساعت شدند [۵۲].



شکل ۶ جعبه حمل واکسن [۵۳]
Figure 6 Vaccine transport box [53]

جنبه‌های ایمنی (خطرات سلامتی، سمیت و اثرات زیست‌محیطی) انواع مختلف ماده تغییر فاز دهنده در جدول ۳ خلاصه شده است [۵۴].

جدول ۳ - خلاصه ای از جنبه‌های ایمنی چندین ماده تغییر فاز دهنده [54, 55]

Table 3 Summarizes the safety aspects of several phase change materials

Phase Change Material	Health Hazards / Toxicity / Environmental Impacts
Fatty acids	Variable toxicity (this material is not always toxic under all conditions; rather, the degree and type of toxic effect may vary depending on the method of use, dosage, other compounds, and environmental conditions)
Vegetable oils	Safe for oral consumption; food-grade; highly flammable; renewable; carbon-neutral; environmentally friendly
Salt hydrates	Generally non-flammable; with varying degrees of toxicity; Magnesium chloride ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$): non-toxic; irritant to eyes and skin; Calcium chloride ($CaCl_2 \cdot 6H_2O$): eye irritant, health hazard if swallowed; Magnesium nitrate ($Mg(NO_3)_2$): non-degradable and safe; Glauber's salt: may cause asthma and eye irritation
Paraffin wax	Non-biodegradable; carcinogenic and flammable; produces harmful toxins when burned

- ۳۲۹ پارچه‌های عمل‌آوری شده با پلی‌اتیلن گلیکول با قابلیت انتقال مایع و خواص ضد میکروبی، می‌توانند برای
- ۳۳۰ کاربردهای پزشکی مانند محصولات بی‌اختیاری ادرار، گازهای جراحی و پوشک استفاده شوند. پارچه‌های
- ۳۳۱ کنترل‌شده با مواد تغییر فاز دهنده می‌توانند دما را در محدوده خاصی نگه دارند و آنها را برای لباس و عملیات
- ۳۳۲ حرارتی-سرمایشی مناسب کنند [۳۰]. خفگی و کمبود اکسیژن در هنگام تولد می‌تواند باعث آسیب مغزی در
- ۳۳۳ نوزادان شود. در فاصله دمایی مورد نیاز برای خنک کردن نوزادانی که از کمبود اکسیژن رنج می‌برند، در طول
- ۳۳۴ زایمان یا ظرف ۶ ساعت، محلول نمک گلوبر می‌تواند به عنوان یک ماده تغییر فاز دهنده مناسب از نظر پزشکی
- ۳۳۵ عمل کند. دمای مقعد نوزاد باید با ترکیب نمک گلوبر با انیدریت‌های سولفات در دمای ۳۳/۵-۳۴ درجه
- ۳۳۶ سانتیگراد حفظ شود. محلول نمک گلوبر یک ماده تغییر فاز دهنده مناسب از نظر درمانی در بازه دمایی مورد
- ۳۳۷ نیاز برای خنک کردن نوزادان دچار خفگی است [۵۶].
- ۳۳۸
- ۳۳۹ در سال ۲۰۲۵، اثربخشی تشک‌های حاوی ماده تغییر فاز دهنده برای هیپوترمی درمانی نوزادان مبتلا به
- ۳۴۰ آسفیکسی هنگام تولد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که اگرچه تشک‌های مبتنی بر ماده
- ۳۴۱ تغییر فاز در کاهش دمای بدن نوزادان به محدوده درمانی (۳۳-۳۴ درجه سانتی‌گراد) مؤثر هستند، اما در
- ۳۴۲ مقایسه با روش‌های سروو کنترل شده (دارای بازخورد دمایی پیوسته)، با نوسانات دمایی بیشتری همراه هستند.
- ۳۴۳ این یافته حاکی از آن است که اگرچه تشک‌های مجهز به ماده تغییر فاز به دلیل عدم نیاز به برق، گزینه‌ای
- ۳۴۴ مناسب برای مناطق کم‌برخوردار هستند، اما برای دستیابی به تثبیت دقیق‌تر دما، نیاز به بهینه‌سازی طراحی
- ۳۴۵ یا ترکیب با سیستم‌های کنترلی ساده دارند [۵۷].

جدول ۴- مقایسه عملکرد انواع مواد تغییر فاز دهنده در کاربردهای پزشکی

Table 4- Comparison of the performance of different types of phase change materials in medical applications

PCM Type	Phase Change Material	Temperature Range (°C)	Latent Heat (J/g)	Advantages	Disadvantages	Proposed Medical Application
Organic (Paraffinic)	Paraffin wax	30-60	150-250	Chemical stability, non-corrosiveness, non-toxicity	Low thermal conductivity, flammability	Drug delivery, thermotherapy dressings

PCM Type	Phase Change Material	Temperature Range (°C)	Latent Heat (J/g)	Advantages	Disadvantages	Proposed Medical Application
Organic (Non-paraffinic)	Stearic acid	30–70	150–220	High biocompatibility, renewable	Higher cost, supercooling phenomenon	Cancer drug delivery, biosensors
Inorganic (Salt hydrate)	Glauber's salt	32–34	180–250	High latent heat, low cost, non-flammable	Phase segregation, corrosion, cyclic instability	Infant cooling device, therapeutic hypothermia
Eutectic	Stearic-lauric acid	39–45	160–200	Precise and tunable melting temperature	Synthesis complexity	Light-triggered drug delivery

۳۵۰

۳۵۱

۴- نتیجه‌گیری و چشم اندازهای آینده ۳۵۲

۳۵۳ در این مقاله، کاربردهای متنوع مواد تغییر فاز دهنده در تجهیزات و سیستم‌های پزشکی بر مدیریت انرژی

۳۵۴ حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سیستم‌های مبتنی بر مواد تغییر فاز دهنده در کاربردهایی

۳۵۵ مانند حمل واکسن و خنک‌کننده نوزادان، به طور مستقیم به کاهش مصرف انرژی الکتریکی کمک می‌کند.

۳۵۶ همچنین مواد تغییر فاز دهنده را می‌توان به صورت کامپوزیت با مواد دیگر ترکیب کرد و در طراحی تجهیزات

۳۵۷ پزشکی جدید یا بهینه‌سازی تجهیزات موجود به کار برد. با انتخاب نوع مناسب ماده تغییر فاز دهنده (مانند

۳۵۸ یوتکتیک اسیدهای چرب یا هیدرات‌های نمکی)، می‌توان محدوده دمایی مورد نیاز برای کاربردهای مختلف

۳۵۹ پزشکی (از ۲-۸ درجه برای واکسن تا ۳۷-۴۵ درجه برای درمان سرطان) را تأمین کرد. با این حال، چالش‌های

۳۶۰ متعددی پیش روی توسعه و تجاری‌سازی این فناوری وجود دارد. زیست‌سازگاری طولانی‌مدت برخی مواد

۳۶۱ تغییر فاز دهنده‌های مصنوعی، پایداری حرارتی در چرخه‌های مکرر ذوب و انجماد، و هزینه تولید بالا از جمله

۳۶۲ موانع اصلی هستند. تحقیقات فعلی در زمینه کپسوله‌سازی مواد تغییر فاز دهنده‌های آلی برای کاربردهای

۳۶۳ زیست‌پزشکی، به ویژه از نظر طراحی عملکردی و ارزیابی سمیت، هنوز پراکنده و ناکافی است.

در تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود که طراحی و سنتز مواد تغییر فاز دهنده جدید بر پایه ترکیبات طبیعی (مانند لیپیدها و موم‌های گیاهی) با قابلیت تجزیه زیستی و سمیت حداقل، اولویت اصلی باید باشد. ترکیب مواد تغییر فاز دهنده با نانوذرات مغناطیسی، فوتوترمال یا رسانا برای دستیابی به قابلیت‌های چندگانه (مانند تصویربرداری همزمان، هیپرترمی هدفمند و رهایش داروی هوشمند) در یک سکوی واحد پیشنهاد می‌گردد.	۳۶۴
استفاده از رویکردهای هوش مصنوعی و بهینه‌سازی چندهدفه برای طراحی جعبه‌های حمل واکسن با دو یا چند لایه مواد تغییر فازدهنده که بتوانند هم از یخ‌زدگی و هم از گرم‌زدگی واکسن جلوگیری کنند. انتظار می‌رود با پیشرفت در زمینه سنتز مواد جدید، کپسوله‌سازی در مقیاس نانو، و یکپارچه‌سازی هوشمند با سایر فناوری‌ها، نقش مواد تغییر فاز دهنده در مدیریت انرژی تجهیزات پزشکی در دهه آینده به طور چشمگیری افزایش یابد و مسیر را برای توسعه پزشکی پایدارتر و کم‌مصرف‌تر هموار سازد. ایران با برخورداری از منابع غنی پارافین و نمک‌های معدنی (مانند سدیم سولفات در دریاچه ارومیه)، پتانسیل بالایی برای تولید بومی مواد تغییر فاز دهنده مورد استفاده در تجهیزات پزشکی دارد. با این حال، موانعی نظیر نبود استانداردهای ملی، هزینه بالای کپسوله‌سازی و محدودیت در کارآزمایی‌های بالینی وجود دارد. پیشنهاد می‌شود با همکاری دانشگاه‌ها، شرکت‌های دانش‌بنیان و سازمان غذا و دارو، نسبت به تدوین استانداردها و تولید نمونه‌های آزمایشگاهی جعبه واکسن و خنک‌کننده نوزاد اقدام شود. حمایت معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری از این حوزه می‌تواند زمینه‌ساز تجاری‌سازی این فناوری در کشور گردد.	۳۶۵ ۳۶۶ ۳۶۷ ۳۶۸ ۳۶۹ ۳۷۰ ۳۷۱ ۳۷۲ ۳۷۳ ۳۷۴ ۳۷۵ ۳۷۶ ۳۷۷ ۳۷۸ ۳۷۹

فهرست علائم اختصاری ۳۸۰

Nomenclature ۳۸۱

انگلیسی	فارسی	علامت اختصاری
Phase Change Material	ماده تغییر فاز دهنده	PCM
Mesoporous Carbon Nanoparticles	نانوذرات کربنی مزومتخلخل	MCN
Mesoporous Silica Nanoparticles	نانوذرات سیلیکای مزومتخلخل	MSN
Polydopamine	پلی‌دوپامین	PDA
Imidacloprid	ایمیداکلوپرید	IMI
Myristyl Alcohol	الکل میریستیل	MA
Near-Infrared Radiation	نور نزدیک به مادون قرمز	NIR

ZIF-8

چارچوب آلی-
فلزی زئولیتی

Zeolitic Imidazolate Framework-8

MRI

تصویربرداری
تشدید مغناطیسی

Magnetic Resonance Imaging

۵- مراجع

- ۳۸۲
- ۳۸۳
- ۳۸۴
- ۳۸۵
- ۳۸۶
- ۳۸۷
- ۳۸۸
- ۳۸۹
- ۳۹۰
- ۳۹۱
- ۳۹۲
- ۳۹۳
- ۳۹۴
- ۳۹۵
- ۳۹۶
- ۳۹۷
- ۳۹۸
- ۳۹۹
- ۴۰۰
- ۴۰۱
- ۴۰۲
- ۴۰۳
- ۴۰۴
- ۴۰۵
- ۴۰۶
- ۴۰۷
- ۴۰۸
- ۴۰۹
- ۴۱۰
- ۴۱۱
- ۴۱۲
- ۴۱۳
- ۴۱۴
- ۴۱۵
- ۴۱۶
- ۴۱۷
- ۴۱۸
- ۴۱۹
- ۴۲۰
- ۴۲۱
- ۴۲۲
- ۴۲۳
- ۴۲۴
- ۴۲۵
- ۴۲۶
- ۴۲۷
- ۴۲۸
- ۴۲۹
- [1] Rathore, P. K. S., Gupta, K. K., Patel, B., Sharma, R., & Gupta, N. K. (2023). Beeswax as a potential replacement of paraffin wax as shape stabilized solar thermal energy storage material: An experimental study, *Journal of Energy Storage*, 68, 107714.
 - [2] Osterman, E., Tyagi, V., Butala, V., Rahim, N. A., & Strith, U. (2012). Review of PCM based cooling technologies for buildings, *Energy and Buildings*, 49, 37-49.
 - [3] Ma, Y., Sun, S., Li, J., & Tang, G. (2014). Preparation and thermal reliabilities of microencapsulated phase change materials with binary cores and acrylate-based polymer shells, *Thermochimica Acta*, 588, 38-46.
 - [4] Lin, X., Qiu, C., Wang, K., Zhang, Y., Wan, C., Fan, M., Wu, Y., Sun, W., & Guo, X. (2023). Biomimetic bone tissue structure: An ultrastrong thermal energy storage wood, *Chemical Engineering Journal*, 457, 141351.
 - [5] Zhang, S., Ocloń, P., Klemeš, J. J., Michorczyk, P., Pielichowska, K., & Pielichowski, K. (2022). Renewable energy systems for building heating, cooling and electricity production with thermal energy storage, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 165, 112560.
 - [6] Reddy, V. J., Ghazali, M. F., & Kumarasamy, S. (2024). Innovations in phase change materials for diverse industrial applications: A comprehensive review, *Results in Chemistry*, 8, 101552.
 - [7] Peyrovedin, H., & Razmjooie, A. (2024). Modeling the Effect of Phase Change Materials on Water Temperature and Vaporization Rate of Evaporation Ponds, *Journal of Iranian Chemical Engineering*, 23(135), 17-31. (In Persian)
 - [8] Peyrovedin, H., & Razmjooie, A. (2024). Modeling the Effect of Phase Change Materials on Water Temperature and Vaporization Rate of Evaporation Ponds.
 - [9] Babapoor, A., & Karimi, G. (2015). Thermal properties measurement and heat storage analysis of paraffin nanoparticles composites phase change material: Comparison and optimization, *Applied Thermal Engineering*, 90, 945-951.
 - [10] Babapoor, A., Karimi, G., & Sabbaghi, S. (2016). Thermal characteristic of nanocomposite phase change materials during solidification process, *Journal of Energy Storage*, 7, 74-81.
 - [11] Babapoor, A., AhmadiMezjin, M., Hoseinasadi, A., Jokar, S., Paar, M., & Golestaneh, S. (2020). Simulation and optimization of thermal management in L-shaped tubes coated with phase change material nanofibers, *Iranian Chemical Engineering Journal*, 18(107), 15-27. (In Persian)
 - [12] Babapoor, A., Haghighi, A., Jokar, S. M., & Ahmadi, M. M. (2022). The performance enhancement of paraffin as a PCM during the solidification process: utilization of graphene and metal oxide nanoparticles, *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 41(1), 37-48.
 - [13] Yaghoubi, S., Seddighi, H., Biglary, A., Saeidi, M., & Babapoor, A. (2023). Temperature control of smartphone batteries using nanocomposites of phase change materials, *Journal of Renewable and New Energy*, 10(2), 175-191.
 - [14] Pomianowski, M., Heiselberg, P., & Zhang, Y. (2013). Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings, *Energy and Buildings*, 67, 56-69.
 - [15] Sanker, S. B., & Baby, R. (2022). Phase change material based thermal management of lithium ion batteries: A review on thermal performance of various thermal conductivity enhancers, *Journal of Energy Storage*, 50, 104606.
 - [16] Suppes, G., Goff, M., & Lopes, S. (2003). Latent heat characteristics of fatty acid derivatives pursuant phase change material applications, *Chemical Engineering Science*, 58(9), 1751-1763.
 - [17] Hassan, A., Shakeel Laghari, M., & Rashid, Y. (2016). Micro-encapsulated phase change materials: a review of encapsulation, safety and thermal characteristics, *Sustainability*, 8(10), 1046.
 - [18] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318-345.

- [19] Berroug, F., Lakhal, E., El Omari, M., Faraji, M., & El Qarnia, H. (2011). Thermal performance of a green house with a phase change material north wall, *Energy and Buildings*, 43(11), 3027-3035. ٤٣٠
- [20] Pendyala, S. (2012). *Macroencapsulation of phase change materials for thermal energy storage*, University of South Florida. ٤٣١
- [21] Dixit, P., Vennapusa, J. R., Parvate, S., Singh, J., Dasari, A., & Chattopadhyay, S. (2021). Thermal buffering performance of a propyl palmitate/expanded perlite-based form-stable composite: experiment and numerical modeling in a building model, *Energy & Fuels*, 35(3), 2704-2716. ٤٣٢
- [22] Reddy, V. J., Dixit, P., Singh, J., & Chattopadhyay, S. (2022). Understanding the core-shell interactions in macrocapsules of organic phase change materials and polysaccharide shell, *Carbohydrate Polymers*, 294, 119786. ٤٣٣
- [23] Singh, J., Parvate, S., Vennapusa, J. R., Maiti, T. K., Dixit, P., & Chattopadhyay, S. (2022). Facile method to prepare 1-dodecanol@ poly (melamine-paraformaldehyde) phase change energy storage microcapsules via surfactant-free method, *Journal of Energy Storage*, 49, 104089. ٤٣٤
- [24] Dixit, P., Parvate, S., Reddy, V. J., Singh, J., Maiti, T. K., Dasari, A., & Chattopadhyay, S. (2022). Effect of surfactants on encapsulation of hexadecane phase change material in calcium carbonate shell for thermal energy storage, *Journal of Energy Storage*, 55, 105491. ٤٣٥
- [25] Huang, Y., Stonehouse, A., & Abeykoon, C. (2023). Encapsulation methods for phase change materials–A critical review, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 200, 123458. ٤٣٦
- [26] Podara, C. V., Kartsonakis, I. A., & Charitidis, C. A. (2021). Towards phase change materials for thermal energy storage: classification, improvements and applications in the building sector, *Applied Sciences*, 11(4), 1490. ٤٣٧
- [27] Cárdenas-Ramírez, C., Jaramillo, F., & Gómez, M. (2020). Systematic review of encapsulation and shape-stabilization of phase change materials, *Journal of Energy Storage*, 30, 101495. ٤٣٨
- [28] Zhang, Q., Yu, K., Pan, Y., Li, J., Qu, Q., Pan, S., & Liu, Y. (2024). Encapsulation and functionalization strategies of organic phase change materials in medical applications, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149(10), 4333-4366. ٤٣٩
- [29] Saito, A. (2002). Recent advances in research on cold thermal energy storage, *International Journal of Refrigeration*, 25(2), 177-189. ٤٤٠
- [30] Kumar, N., Gupta, S. K., & Sharma, V. K. (2021). Application of phase change material for thermal energy storage: An overview of recent advances, *Materials Today: Proceedings*, 44, 368-375. ٤٤١
- [31] Ji, D., Li, T., Liu, J., Amirjalayer, S., Zhong, M., Zhang, Z.-Y., Huang, X., Wei, Z., Dong, H., & Hu, W. (2019). Band-like transport in small-molecule thin films toward high mobility and ultrahigh detectivity phototransistor arrays, *Nature Communications*, 10(1), 12. ٤٤٢
- [32] Qiu, J., Huo, D., & Xia, Y. (2020). Phase- change materials for controlled release and related applications, *Advanced Materials*, 32(25), 2000660. ٤٤٣
- [33] Moon, G. D., Choi, S.-W., Cai, X., Li, W., Cho, E. C., Jeong, U., Wang, L. V., & Xia, Y. (2011). A new theranostic system based on gold nanocages and phase-change materials with unique features for photoacoustic imaging and controlled release, *Journal of the American Chemical Society*, 133(13), 4762-4765. ٤٤٤
- [34] Ma, K., Zhang, X., Ji, J., Han, L., Ding, X., & Xie, W. (2021). Application and research progress of phase change materials in biomedical field, *Biomaterials Science*, 9(17), 5762-5780. ٤٤٥
- [35] Junghanss, T., Um Boock, A., Vogel, M., Schuette, D., Weinlaeder, H., & Pluschke, G. (2009). Phase change material for thermotherapy of Buruli ulcer: a prospective observational single centre proof-of-principle trial, *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 3(2), e380. ٤٤٦
- [36] Becherini, S., Mitmoen, M., & Tran, C. D. (2020). Biocompatible and smart composites from cellulose, wool, and phase-change materials encapsulated in natural sporopollenin microcapsules, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(27), 10089-10101. ٤٤٧
- [37] Zare, M., & Mikkonen, K. S. (2023). Phase change materials for life science applications, *Advanced Functional Materials*, 33(12), 2213455. ٤٤٨
- [38] Wang, S., Liu, H., Wu, D., & Wang, X. (2021). Temperature and pH dual-stimuli-responsive phase-change microcapsules for multipurpose applications in smart drug delivery, *Journal of Colloid and Interface Science*, 583, 470-486. ٤٤٩
- [39] Xu, M., Xie, X., Liu, Y., Topham, P. D., Zeng, Y., Zhan, J., Wang, L., & Yu, Q. (2023). Mild-temperature responsive nanocatalyst for controlled drug release and enhanced catalytic therapy, *Acta Biomaterialia*, 167, 473-488. ٤٥٠
- [40] Lu, H., Liu, N., Sun, T., Liu, Z., Luo, X., Zhao, Q., & Wang, S. (2023). Release kinetics study of fatty acids eutectic mixture gated mesoporous carbon nanoparticles for chemo-photothermal therapy, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 669, 131450. ٤٥١

- [41] Avval, Z. M., Malekpour, L., Raeisi, F., Babapoor, A., Mousavi, S. M., Hashemi, S. A., & Salari, M. (2020). Introduction of magnetic and supermagnetic nanoparticles in new approach of targeting drug delivery and cancer therapy application, *Drug Metabolism Reviews*, 52(1), 157-184. ٤٨٨
- [42] Zhang, X., Li, Z., & Ji, J. (2026). Drug delivery system based on Phase change material: thermo-responsive controlled release and multimodal synergistic therapy, *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 107967. ٤٨٩
- [43] Ye, J.-J., Li, L.-F., Hao, R.-N., Gong, M., Wang, T., Song, J., Meng, Q.-H., Zhao, N.-N., Xu, F.-J., & Lvov, Y. (2023). Phase-change composite filled natural nanotubes in hydrogel promote wound healing under photothermally triggered drug release, *Bioactive Materials*, 21, 284-298. ٤٩٠
- [44] Wang, Y., Yue, C., Zhang, M., Li, D., Xu, T., He, M., Wang, M., Zhao, Y., Ni, Z., & Zhi, F. (2023). Dually enhanced phototherapy by gambogic acid and hyperthermia-activated chemotherapy for synergistic breast cancer treatment, *Chemical Engineering Journal*, 452, 139108. ٤٩١
- [45] Su, W., Ai, Z., & Yang, B. (2024). A novel phase change material based personal environment control system for hospital wards, *Journal of Building Engineering*, 95, 110207. ٤٩٢
- [46] Zhang, S., Ye, J., Liu, X., Wang, G., Qi, Y., Wang, T., Song, Y., Li, Y., & Ning, G. (2022). Dual stimuli-responsive smart fibrous membranes for efficient photothermal/photodynamic/chemo-therapy of drug-resistant bacterial infection, *Chemical Engineering Journal*, 432, 134351. ٤٩٣
- [47] Sun, Z., Liu, H., & Wang, X. (2022). Thermal self-regulatory intelligent biosensor based on carbon-nanotubes-decorated phase-change microcapsules for enhancement of glucose detection, *Biosensors and Bioelectronics*, 195, 113586. ٤٩٤
- [48] Hu, X., Li, H., Li, R., Qiang, S., Chen, M., Shi, S., & Dong, C. (2023). A Phase- Change Mediated Intelligent Nanoplatfrom for Chemo/Photothermal/Photodynamic Therapy of Cancer, *Advanced Healthcare Materials*, 12(5), 2202245. ٤٩٥
- [49] Bao, J., Guo, S., Ren, Y., Cheng, J., Yang, Y., Zhang, Y., Tu, H., Wang, J., Fan, D., & Zhuang, Y. (2026). Smart single hollow magnetothermal nanorings with phase change materials for controlled drug release and negative MRI guided cancer therapy, *International Journal of Pharmaceutics*, 127042. ٤٩٦
- [50] Yu, S., Xu, W., Xiao, W., Li, S., & Zou, A. (2022). Imidacloprid-loaded mesoporous silica nanoparticles simultaneously coated with myristyl alcohol and polydopamine for NIR-triggered delivery on *Aphis craccivora* Koch, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 220, 112882. ٤٩٧
- [51] Dixit, P., Konala, A., Reddy, V. J., Singh, J., Dasari, A., & Chattopadhyay, S. (2022). Thermal performance evaluation of isopropyl stearate-expanded graphite based shape stabilized phase change material composite targeting cold chain application, *Journal of Molecular Liquids*, 363, 119829. ٥٠٠
- [52] Ayala-Zambrano, S., Jäckel, R., Gutiérrez-Urueta, G. L., Blanco, A. R., & Jiménez, C. M. (2025). Parametric optimization of cylindrical vaccine transport containers with dual phase change materials to prevent vaccine freezing and heat damage using artificial neural networks, *Journal of Energy Storage*, 109, 115239. ٥٠١
- [53] Devrani, S., Tiwari, R., Khan, N., Sankar, K., Patil, S., & Sridhar, K. (2021). Enhancing the insulation capability of a vaccine carrier box: An engineering approach, *Journal of Energy Storage*, 36, 102182. ٥٠٢
- [54] Dincer, I., & Rosen, M. A. (2011). *Thermal energy storage: systems and applications*, John Wiley & Sons. ٥٠٣
- [55] Moral, F. J. L., Ramírez, R. C., Padura, Á. B., & Valverde, J. M. (2017). Characterization of thermal energy storage materials for building applications, *Proceedings of the 3rd International Congress on Sustainable Construction and Eco-efficient Solutions*, Seville, Spain. ٥٠٤
- [56] Olson, L., Lothian, C., Ådén, U., Lagercrantz, H., Robertson, N. J., & Setterwall, F. (2021). Phase-changing glauber salt solution for medical applications in the 28–32 C interval, *Materials*, 14(23), 7106. ٥٠٥
- [57] Govind, A., Raghoji, C., & Guruprasad, G. (2025). Therapeutic Hypothermia for Birth Asphyxia Using a New Servo-Controlled Device—A Randomised Controlled Trial, *Journal of Neonatology*, 39(4), 321-328. ٥٠٦