

## مروری بر فلزات و آلیاژهای با خواص حرارتی مناسب برای استفاده در مواد تغییر

### فازی (PCM) با هدف ذخیره انرژی گرمایی

#### آروین تقی زاده تبریزی<sup>۱\*</sup>، شاهین خامنه اصل<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی مواد و متالورژی، گروه مهندسی مواد، دانشکده مکانیک، دانشگاه تبریز

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده مکانیک، دانشگاه تبریز

\*تبریز، iarvintt@tabrizu.ac.ir

#### چکیده:

مسئله انرژی و بهینه سازی مصرف انرژی در چند ساله اخیر بسیار مورد توجه قشر عظیمی از جامعه از جمله سیاستمداران، مدیران، دانشمندان و محققان، مهندسان و حتی کاربران و مصرف کنندگان انرژی قرار گرفته است. تا به امروز تلاش های بسیار زیادی در زمینه استفاده از انرژی های تجدیدپذیر صورت گرفته است. برای نیل به این هدف، سلول های خورشیدی و تمامی سیستم هایی که قابلیت جذب، ذخیره و در نهایت رهاسازی انرژی حرارتی را دارند، مورد مطالعه قرار گرفته و پیشرفت های زیادی در این زمینه صورت گرفته است. هم چنین با توجه به اساس استفاده از این انرژی ها که مبنی بر جذب و نشر انرژی تجدیدپذیر است، مواد زیادی مورد آزمایش قرار گرفته اند تا بتوان از این ویژگی آن ها بیشترین بهره را برد. به همین منظور PCM مواد دارای تغییرات فازی، مطرح شده و مورد توجه قرار گرفته اند. این مواد توانایی جذب و رهاسازی انرژی در دماهای نسبتا پایین را دارند و می توانند گزینه مناسبی برای ذخیره سازی انرژی حرارتی باشند. در این مقاله سعی شده است علاوه بر معرفی این مواد، به بررسی امکان استفاده از فلزات و آلیاژها به عنوان ذخیره ساز انرژی گرمایی پرداخته شود. فلزاتی با نقطه ذوب پایین مانند گالیم، ایندیم، بیسموت، آلومینیوم، و سیلیسیم که به دلیل خواص فیزیکی-حرارتی بهتری که از خود نشان می دهند می توانند عملکرد بهتری از خود در این زمینه نشان بدهند.

کلید واژگان: مصرف انرژی، ذخیره انرژی، مواد دارای تغییرات فازی

## Review on Metals and alloys with proper thermal properties as Phase Change Materials with aim of saving thermal energy

Arvin Taghizadeh Tabrizi, Shahin Khameneh Asl

Materials Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Tabriz, Iran, [iarvintt@tabrizu.ac.ir](mailto:iarvintt@tabrizu.ac.ir)

#### Abstract

Energy consumption and energy saving are attracting many attentions recently from every politician, managers, researchers, engineers and even users. In order to this, there are many efforts to use the renewable energy resource. So solar cells and all systems which are able to absorb, save and then release the heat energy, are examined and there are many improvements. Regarding the characteristics of saving energy, many materials are examined and finally phase change materials (PCM) are considered. These materials are able to absorb and release the energy in low temperature too and could be an interesting option for saving energy. In this article, in spite of introducing PCMs, we look on the possibility of using metals and alloys as saving energy materials. Metals with low melting temperature like Ga, In, Bi, Al and Si due to their good and acceptable thermal-physical properties, could show better performance.

**Key Words:** Energy Saving, Energy Consumption, Phase Change Materials

Phase Change Materials

۱- مقدمه

اطمینان خاطر در صنایعی که میزان مصرف انرژی نسبت به انرژی ذخیره شده، در طول شبانه روز بیشتر است، استفاده کرد. برای همین منظور محققان تلاش کردند موادی را در سیستم‌های ذخیره انرژی گرمایی و علی‌الخصوص در سلول‌های خورشیدی استفاده کنند که قابلیت و توانایی جذب و ذخیره انرژی بسیار زیادی را داشته باشند [۶]. در این راستا مواد PCM معرفی شدند. این مواد قابلیت ذخیره کردن انرژی به صورت گرمای نهان تغییر فازی را دارند. از سال ۱۹۴۰ میلادی، از این مواد در ساختن منازل مسکونی استفاده شده است و بعدها تلاش‌هایی برای استفاده از این مواد در ساخت تجهیزات فضایی صورت گرفت. ولی از اواسط دهه ۱۹۷۰ میلادی سعی در بهره‌بری از خاصیت ذخیره انرژی گرمایی این مواد در صنعت شد که تا امروز در حال تحقیق و گسترش است [۷]. لازم به یادآوری است که گرمای بدست آمده از تغییرات فازی مواد از رابطه ۱ بدست می‌آید، که در آن  $Q_{latent}$  مقدار انرژی جذب شده در طول تغییر فاز،  $C_{p,s}$  ظرفیت گرمایی ویژه در حالت جامد و  $C_{p,l}$  و یا حالت مایع  $C_{p,l}$  و  $\Delta H_{pc}$  آنتالپی تغییر فاز است.

$$Q_{latent} = \int_{T_1}^{T_{pc}} C_{p,s} \cdot dT + \Delta H_{pc} + \int_{T_{pc}}^{T_2} C_{p,l} \cdot dT \quad ۱$$

مواد وقتی در برابر منبع حرارتی قرار می‌گیرند ابتدا گوما و حرارت را بدون تغییر فاز جذب می‌کنند که به این نوع جذب انرژی، جذب محسوس نامیده می‌شود. وقتی مقدار این گرمای دریافت شده بیشتر شود، مواد تحت استحاله‌ی فازی شامل ذوب قرار می‌گیرند انرژی را به صورت گرما جذب می‌کنند. این جذب انرژی گرمایی در یک دمای ثابت و به صورت یک استحاله همدم صورت می‌پذیرد. گرمای نهان استحاله رابطه مستقیم با ظرفیت گرمایی ویژه ماده دارد. مهم‌ترین ویژگی مواد تغییر فازی این خصوصیت آن‌ها است که با جذب انرژی می‌توانند تغییر فاز داده و گرمای قابل توجهی را جذب و یا آزاد کنند [۷]. در شکل ۱ طرحواره اساس کار این مواد آورده شده است. لازم به ذکر است که تمامی تغییر فازها از جمله جامد به جامد، جامد به مایع، جامد به گاز و مایع به گاز و بالعکس دارای چنین خصوصیات هستند ولی بیشترین کاربرد صنعتی این مواد در تبدیل فاز جامد به مایع و مایع به جامد است.

یکی از عوامل عمده توسعه اقتصادی در کشورهای پیش-رفته انرژی است. تاکنون سوخت‌های فسیلی نظیر نفت، گاز و زغال سنگ تامین کننده اصلی انرژی‌های مورد استفاده بشر بوده‌اند، اما با کاهش منابع انرژی و ازدیاد جمعیت و پیشرفت تکنولوژی تردیدی نیست که در آینده‌ای نزدیک باید از منابع جدید و تجدیدپذیر انرژی استفاده نمود.

در چند سال اخیر منابع انرژی فسیلی به دلیل ایجاد آلودگی و مشکلات زیست محیطی توسط سیاست‌گذاران انرژی مورد بازبینی قرار گرفته و آنان را بر آن داشته به دنبال منابع جدید انرژی باشند، تا ضمن جایگزینی با سوخت‌های فسیلی و کاهش آلودگی زیست محیطی، پایان ناپذیر بوده و بتوان از آن در دراز مدت استفاده کرد و تا حد امکان اقتصادی نیز باشد. این منابع عبارتند از انرژی خورشیدی، باد، آب، زمین گرمایی، جزر و مد و ... که در این میان انرژی خورشیدی دارای پتانسیل بالایی بوده و به عنوان منبع همیشگی و پاک و قابل دسترس، نقش مهمی را ایفا می‌کند. لازم است بدانیم که میزان انرژی که زمین در طول یک ساعت از خورشید دریافت می‌کند بیش از میزان انرژی مصرفی تمام جهان در مدت یکسال است [۴-۱].

اگرچه توزیع این انرژی در سراسر کره زمین بطور یکسان نیست اما سطح وسیع از آن امکان استفاده از انرژی خورشیدی را دارد. کشور ایران با عرض جغرافیایی ۲۵ الی ۴۵ درجه شمالی در منطقه‌ای از جهان قرار گرفته است که از نظر دریافت انرژی خورشیدی دارای وضعیت مناسبی است. بایستی توجه داشت که این ثروت خدادادی بیشتر و ارزشمندتر از ثروت نفتی است [۵]. از زمان‌های بسیار دور استفاده از انرژی خورشیدی رایج بوده است اما با دستیابی بشر به منابع سوخت‌های فسیلی از قبیل نفت، گاز و زغال سنگ و هم‌چنین ارزان بودن بهای مصرفی این سوخت‌ها، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر را افزایش و به طبع آن انرژی خورشیدی را تا اواسط دهه ۱۹۷۰ میلادی کاهش داده و نهایتاً متوقف کرد. پس از افزایش قیمت نفت در سال ۱۹۷۳ میلادی، کشورهای پیشرفته صنعتی مجبور شدند به مساله انرژی جدی‌تر بنگرند و این سرآغاز برنامه‌های تحقیقات در زمینه صرفه‌جویی و بهینه‌سازی مصرف انرژی و پیدا نمودن منابع جدید انرژی گردید. در این میان استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر بخصوص انرژی خورشیدی در دستور کار کشورها قرار گرفت [۳ و ۴].

از سلول‌های خورشیدی در صنایع و زمینه‌های مختلفی مانند گرم کردن هوا و آب، خشک کردن محصولات کشاورزی و تولید الکتروسیسته استفاده می‌شود. ولی با توجه به مزایای گوناگون این انرژی و علاقه‌مندی فراوان نسبت به استفاده از آن در صنایع مختلف، این امر تا به دلیل عدم دسترس بودن متناوب و یکنواخت انرژی خورشیدی در طول شبانه روز، تا به امروز میسر نشده است. در نتیجه نمی‌توان با

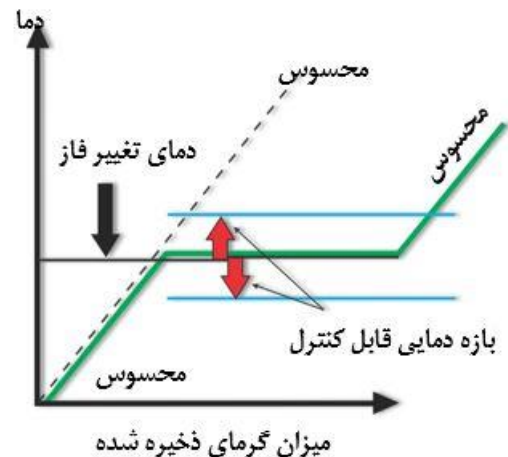
\*Sensible Heat



سیکلی بدین معنی است که ماده مورد استفاده بعد از تعداد مشخصی تغییر استحاله (ذوب/انجماد)، این ماده بتواند خواص حرارتی، شیمیایی و فیزیکی خود را کاملاً و یا با درصد بالایی حفظ و تکرار بکند. برای بررسی خواص حرارتی این مواد باید تجهیزات بررسی، تکنیک مشخصه‌یابی قبل و بعد از سیکل حرارتی، تعداد سیکل اعمالی و سرعت گرمایش مد نظر قرار بگیرد تا بتوان این خاصیت را به درستی در این مواد مورد ارزیابی قرار داد [۱۱]. علاوه بر خصوصیات ذکر شده، ویژگی‌های اقتصادی و زیست محیطی مناسب بسیار مورد توجه قرار گرفته است. نمونه‌ای از این موارد در شکل ۲ نشان داده شده است.

## ۲- دسته بندی مواد تغییر فازی

تقسیم بندی این مواد به چند طریق و بر پایه دمای کاربردی، نوع تغییر فاز و ترکیب شیمیایی این مواد انجام می‌شود. در تقسیم بندی این مواد بر اساس دمای کاربردی به سه دسته دمای تغییر فازی پایین (زیر ۱۵ درجه سانتی‌گراد)، دمای تغییر فازی متوسط (بین ۱۵ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد) و دمای تغییر فازی بالا (بیشتر از ۹۰ درجه سانتی‌گراد) تقسیم بندی می‌شوند. بازه دمایی قابل استفاده بخشی از این مواد در شکل ۳ آورده شده است. همچنین بر اساس نوع تغییر فاز به دسته‌های جامد-جامد، جامد-مایع، جامد-گاز و مایع-گاز تقسیم‌بندی شده [۷] و در نهایت به لحاظ ترکیب شیمیایی این مواد به دو دسته آلی و معدنی طبقه‌بندی می‌شوند. دسته اول، معمولاً شامل موادی مانند پارافین، اسیدهای چرب و الکل‌های شکر هستند، که کاربردهای بسیار متنوعی در صنعت دارند که در منابع مختلف به آن‌ها اشاره شده است [۱۴-۱۲]. با این وجود محدودیت استفاده از آن‌ها، ناپایداری در دماهای بالا و قابل اشتعال بودن، علی‌الخصوص پارافین‌ها است. دسته دوم شامل هیدرات‌های نمکی، محلول‌های نمکی و فلزات است. این دسته دارای گرمای نهان به مراتب بالاتری از مواد آلی بوده و خاصیت ذخیره‌سازی انرژی بالاتری را دارند. همچنین یوتکتیک‌ها و ترکیبات دیگری برای عملکرد در بازه‌های دمایی دلخواه مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته‌اند. این ترکیبات از ترکیب مواد آلی با آلی یا غیرآلی و یا غیرآلی با غیرآلی بدست می‌آیند و علیرغم تحقیقات صورت گرفته در این زمینه، همچنان اطلاعات کاملی از این مواد در دسترس نیست. در جدول ۱ مزایا و معایب این مواد آورده شده است. باید توجه داشت که در کاربرد این مواد، آنتالپی تغییر فاز بالا و دمای مناسب کاربرد بسیار مهم هستند [۱۱ و ۱۵].



شکل ۱. شماتیک اساس کاری مواد تغییر فازی

همچنین می‌توان اشاره کرد که خواص ترمودینامیکی مواد، خواص شیمیایی، خواص سینتیکی و ملاحظات اقتصادی بسیار مهم هستند. این مواد، PCM ها دارای مزایایی از قبیل:

- بازه فعالیت دمایی بالا،
- چگالی انرژی بالا،
- دمای کارکرد مناسب،
- انرژی نهان ذوب زیاد و
- قابلیت ذخیره‌سازی حرارتی بر واحد حجم و جرم هستند [۸].

مزایای ذکر شده در بالا باعث شده است این مواد یکی از اولین انتخاب‌ها در بحث سیستم‌های ذخیره انرژی و حرارت باشند. دماهای ذوب این مواد متفاوت است و از ۳۳- درجه سانتی‌گراد تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد متفاوت است که باعث افزایش بازه کاربردی این مواد می‌شود [۹]. لازم به ذکر است که طبق تحقیقات نشان داده شده است بازدهی حرارتی این مواد در حدود ۷۵ تا ۹۰ درصد می‌باشد که در قیاس با نمونه‌های دیگر مواد که به این منظور استفاده می‌شوند، بیشتر است (۵۰ تا ۹۰ درصد) [۶]. همچنین تحقیقات انجام شده، نشان داده که این مواد تا ۱۴ برابر بیشتر موادی که در حال حاضر استفاده می‌شود، انرژی گرمایی را در خود ذخیره می‌کنند [۶]. مورد بسیار مهمی که در این مواد باید مد نظر قرار داد پایداری سیکلی این مواد است. پایداری

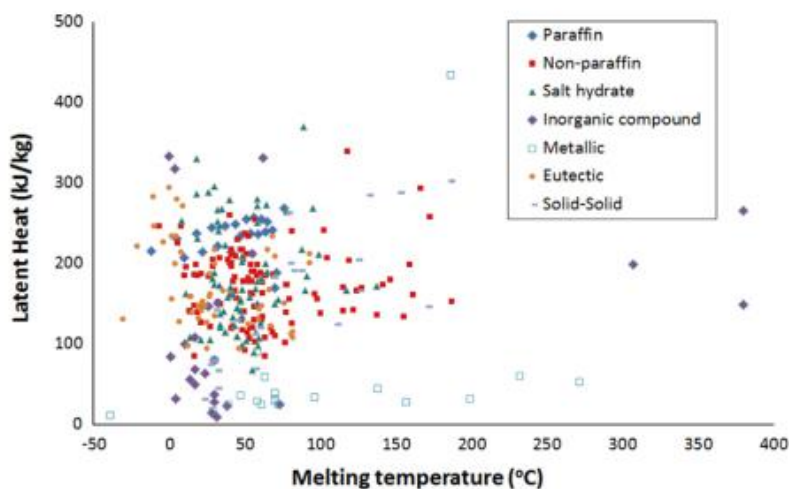


جدول ۱. مزایا و معایب مواد تغییر فازی [۱۵ و ۱۱]

یوتکتیک و ترکیب‌ها	غیرآلی	آلی	
دمای ذوب تیز قابلیت ذخیره سازی چگالی حرارتی بالا	آنتالپی تغییر فاز بسیار بالا هدایت بالاتر غیرقابل اشتعال ارزان	غیر خورنده عدم وجود فوق‌سرمايش و یا مقدار کم پایداری سیکنی	مزایا
به علت مشکلات ترموفیزیکی اطلاعات کمتری وجود دارد	وجود فوق‌سرمايش خورنده جدایش فازی پایداری سیکنی پایین	آنتالپی تغییر فاز پایین هدایت حرارتی پایین‌تر قابل اشتعال	معایب
	۳-۸	۶-۱۳/۵	قیمت (پوند بر کیلوگرم)



شکل ۲. خصوصیات مواد تغییر فازی [۱۵]



شکل ۳. بازه دمایی قابل استفاده مواد تغییر فازی [۷]

### ۳- مواد تغییر فازی دما بالا

برای استفاده از این مواد در دماهای بالا معمولاً از نمک‌های مذاب و یا نمک‌های یوتکتیکی استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر تلاش‌های فراوانی برای استفاده از فلزات در این زمینه شده است. همان‌طور که از شکل ۲ هم قابل دریافت است، خصوصیات گرمایی-فیزیکی، شیمیایی، اقتصادی و زیست محیطی در انتخاب این مواد نقش اساسی را ایفا می‌کنند. تحقیقات فراوانی که در این زمینه انجام شده است، نشان-دهنده این موضوع است که با توجه به ماهیت این مواد و کاربرد آن‌ها، خصوصیات گرمایی-فیزیکی بیش‌تر مد نظر طراحان قرار می‌گیرد. مطالعات نشان داده است که مواد با نقطه ذوب بالای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌توانند به عنوان ذخیره‌کننده حرارت دما بالا مورد استفاده قرار بگیرند. این مواد به طور خاص کامپوزیت‌های یوتکتیکی نمک و فلزات چند جزئی هستند که برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر غیرسنتی بسیار مناسب هستند. نمونه‌ای از فلزات و آلیاژهای فلزی که به عنوان مواد تغییر فازی در نظر گرفته شده و دارای نقطه ذوب بالای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد هستند، در جدول ۲ آورده شده است.

با توجه به جدول ۲ بسیاری از فلزات و آلیاژهای معرفی شده به عنوان مواد فازی دارای یوتکتیک سیستم‌های دو گانه یا چندگانه هستند و طبق آنچه در منابع ذکر شده این مواد با نقطه ذوب پایین به عنوان مواد تغییر فازی دما بالا در نظر گرفته می‌شوند. فلزاتی با نقطه ذوب پایین مانند گالیم، ایندیم، بیسموت، آلومینیوم، و سیلیسیم که به دلیل خواص فیزیکی-حرارتی بهتری که از خود نشان می‌دهند، بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته‌اند. شارما، لیو و بانرجی [۱۶ و ۱۷] دلیل نادیده گرفتن این مواد را در طراحی‌های مهندسی، وزن بالای آن‌ها عنوان

کردند، در حالی که با در نظر گرفتن حجم به عنوان اساس طراحی، یکی از کاندیداهای قابل توجه در بحث طراحی مواد تغییر فازی هستند. با توجه به همین جدول می‌توان خصوصیات مشترک مواد تغییر فازی فلزی را بر شمرد:

- ۱- حرارت ذوب بر واحد وزن پایین
- ۲- حرارت ذوب بر واحد حجم بالا
- ۳- هدایت حرارتی بالا
- ۴- ظرفیت گرمایی پایین
- ۵- فشار بخار نسبتاً پایین

در این راستا تحقیقات بسیار زیادی برای بررسی خواص حرارتی فلزات توسط دستگاه‌های آنالیز حرارتی صورت گرفته است [۱۸-۲۰]. اولین آلیاژهای کامپوزیتی توسط وانگ [۲۱] مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق که بر روی آلومینیوم و سیلیسیم صورت گرفت و به ترتیب دو ترکیب  $AlSi_{12}$  و  $AlSi_{20}$  با دماهای ذوب ۵۷۶ و ۵۸۵ درجه سانتی‌گراد با گرمای ذوب ۵۶۰ و ۴۶۰ ژول بر گرم تولید شدند که نتایج آزمایش‌ها رفتار بهتر آلیاژ  $AlSi_{12}$  را نشان می‌دهد. در ادامه تحقیقات دیگری در زمینه ترکیبات یوتکتیک سه تایی آلومینیوم-منیزیم-روی انجام شد. بررسی آلیاژهای ارائه شده در جدول شماره ۲، نشان می‌دهد که ترکیباتی که نزدیک یوتکتیک دوتایی و یا سه تایی قرار دارند، دارای گرمای نهان بیشتری نسبت به بقیه آلیاژها هستند. هم‌چنین مشخص است که بالاترین میزان این انرژی، مربوط به آلیاژهای دوتایی آلومینیوم و سیلیسیم است. نکته‌ی قابل تأمل در این جدول تفاوت میزان هدایت حرارتی است. بالا بودن این کمیت فیزیکی باعث جذب حرارت بیشتر در طی فرایند جذب انرژی توسط این مواد می‌شود. با توجه به مقادیر

اشاره شده در جدول ۲، این خصوصیت در آلیاژهای آلومینیوم-سیلیسیم محسوس‌تر از بقیه موارد ذکر شده است.

با توجه به خصوصیات عنوان شده برای این مواد، آلومینیوم، منیزیم، سیلیسیم و روی و یونکتیک‌های این فلزات می‌توانند گزینه‌های جذابی برای کاربرد به عنوان مواد تغییر فازی در بازه‌ی دمایی ۴۰۰ تا ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد باشند. خواص مطلوب این دسته (هدایت حرارتی و گرمای ذوب) نسبت به خواص نمک‌های مذاب برتری داشته و هم‌چنین خواص زیست محیطی مناسب‌تری را به دارا هستند. برای همین منظور این مواد را برای استفاده صنعتی به عنوان مواد تغییر فازی بسیار مناسب به نظر می‌آیند.

در این زمینه علاوه بر فلزات ذکر شده در بالا، ژانگ و همکارانش [۲۲] و هم‌چنین ما و همکارانش [۲۳] تحقیقاتی را بر روی مس کپسول شده با هدف تعیین خواص حرارتی آن برای کاربرد به عنوان مواد تغییر فازی برای ذخیره انرژی مورد بررسی قرار دادند. ژانگ و همکارانش سطح مس را با لایه‌ای از کروم-نیکل کپسول کردند. نتایج آزمایش آن‌ها نشان داد که مس قابلیت تحمل ۱۰۰۰ سیکل حرارتی در بازه‌ی دمایی ۱۰۵۰ تا ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد را دارد. این مطالعات نشان داد که از مس برای ذخیره‌سازی انرژی در دماهای بالا می‌توان استفاده کرد. مورفولوژی فصل مشترک مس با لایه کروم-نیکل در شکل ۴ نشان داده شده است. از این شکل پایداری خوب این ماده را در دمای آزمایش می‌توان مشاهده کرد که نشان‌دهنده پایداری سیکلی مناسب این ماده است.

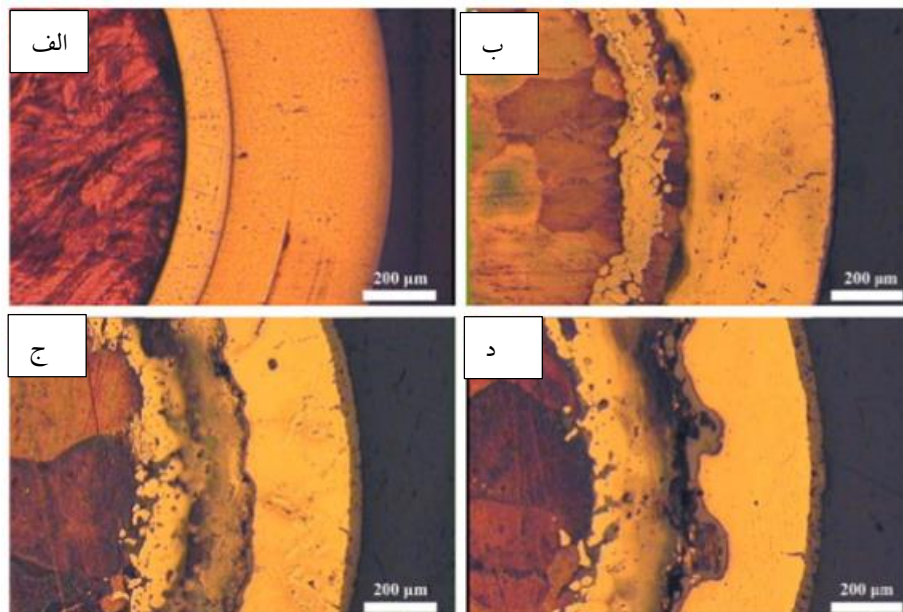
جدول ۲. خصوصیات فلزات و آلیاژهایی که خاصیت تغییر فازی دارند [۱۸]

نوع	انبساط حجمی	هدایت حرارتی (وات بر متر کلوبین)	ظرفیت		چگالی (کیلوگرم بر لیتر)	گرمای نهان ذوب		نقطه ذوب (درجه سانتی‌گراد)	ماده
			ظرفیت حرارتی ویژه در مایع (کیلوژول بر کیلوگرم کلوبین)	ظرفیت حرارتی ویژه در جامد (کیلوژول بر کیلوگرم کلوبین)		کیلو ژول بر لیتر	کیلو ژول بر کیلوگرم		
-	-	-	-	-	-	۱۸۰	۳۴۰	۵۲۰۰-۴۸۰۰	
یونکتیک	-	-	-	-	۴/۶	۸۵۱	۱۸۵	۵۳۰۰۰-۴۶۳۰۰	
یونکتیک	-	۷۵	-	۰/۷۳	۲/۸۵	۴۴۲	۱۵۵	۵۱۰۰-۴۹۰۰	
یونکتیک	-	-	-	-	۶/۶۳	۹۱۶	۱۳۸	۹۶۰۰-۴۰۰	
-	-	-	-	-	۲/۲۶	-	۱۴۶	۵۵۰۰-۲۸-۱۷۰۰	
-	۹۳/۵	-	۰/۴۸	۰/۳۹	۷/۱۴	-	۱۱۲	Zn (Com. Pure, min ۹۹.۹٪)	
-	-	-	۱/۴۶	۱/۶۳	۲/۳۸	-	۳۱۰	۵۹۰۰-۳۵۰۰-۶۰۰	
-	۹۳/۸۰-۵/۱	-	۱/۴۶	۱/۶۳	۲/۳۸	-	۳۱۲	۶۰۰۰-۳۴۰۰-۶۰۰	
-	-	-	-	-	-	-	۳۲/۱	۶۰۰۰-۳۴۰۰-۶۰۰	
-	-	-	-	-	۲/۸	-	۲۵۴	۶۰۰۰-۲۵۰۰-۱۵۰۰	
-	-	-	-	-	۲	-	۱۸۴	۵۲۰۰-۲۵۰۰-۲۳۰۰	
یونکتیک	-	-	-	-	-	-	۴۷۱	۸۶۴۰۰-۹۴۰۰-۴۲۰۰	
یونکتیک	-	-	-	-	۲/۱۵۵	۶۱۵	۲۸۵	۳۴۶۵۰۰-۶۵۳۵۰۰	
یونکتیک	-	-	-	-	۳/۰۵	۱۱۱/۳	۳۶۵	۶۰۸۰۰-۲۲۲۰۰-۶۰۰	
یونکتیک	-	-	-	-	۴/۴	۱۶۴/۴	۳۷۴	۶۴۱۰۰۰-۵۲۰۰-۲۸۰۰-۲۲۰۰	
-	-	-	۱/۱۳	۱/۵۱	۳/۱۴	-	۳۰۵	۵۴۰۰-۲۲۰۰-۱۸۰۰-۶۰۰	
یونکتیک	-	-	-	-	۲/۹۳۸	۱۰۶/۹	۳۶۴	۶۸۵۰۰-۲۶۵۰۰-۵۰۰	
یونکتیک	-	-	-	-	۴	۱۳۲/۴	۳۳۱	۶۴۳۰۰-۳۴۰۰-۱۷۰۰	
یونکتیک	-	-	-	-	۳/۶	۱۳۳/۹	۳۷۲	۶۶۹۲۰۰-۳۳۰۰۸۰۰	
یونکتیک	-	-	-	-	۲/۵	۱۲۱/۳	۴۸۵	۸۳۱۴۰۰-۱۱۷۰۰-۵۱۶۰۰	
یونکتیک	-	-	-	-	۲/۵۴	۱۲۶/۵	۴۹۸	۸۷۳۶۰۰-۱۲۲۴۰۰	
یونکتیک	-	-	-	-	۵/۵۶	۲۲۶	۴۰۶	۴۹۱۰۰-۴۶۳۰۰-۴۶۰۰	
-	-	-	۱/۲	۱/۳	۲/۷۳	-	۴۲۲	۶۵۰۰-۳۰۰۰-۵۰۰	
یونکتیک	-	-	-	-	۲/۷	۱۲۷/۲	۴۷۱	۸۶۴۰۰-۹۴۰۰-۴۲۰۰	
آلیاژ	-	۱۶۰	۱/۷۴۱	۱/۰۳۸	۲/۷	-	۵۶۰	۸۸۰۰-۱۲۰۰	





فلز	۶۳/۹	-	۱/۷۴	۱/۰۴	۲/۷	-	۵۶۰	۵۷۶	۸۸۰۰-۱۲۰۰
فلز	-	-	-	-	۲/۷	-	۵۶۰	۵۷۶	۸۶۰۰-۱۲۰۰
آلیاژ	-	-	-	-	-	-	۵۶۰	۵۷۶	۸۸۰۰-۱۲۰۰
آلیاژ	-	۱۸۱	-	۰/۹۳۹	-	-	۴۶۲	۵۷۷	۸۸۰۰-۱۲۰۰
آلیاژ	-	-	-	-	-	-	۴۶۰	۵۸۵	۸۰۰۰-۲۰۰۰
-	-	-	-	-	-	-	۲۳۰	۵۸۸	Zn <sub>2</sub> Mg
فلز	۸۷	-	۱/۳۷	۱/۲۷	۱/۷۴	-	۳۶۵	۶۴۸	Mg (Commercial Purity)
فلز	۸۰/۱	-	۰/۹	۰/۹	۲/۷	-	۳۸۸	۶۶۱	Al (commercial Purity)
آلیاژ	-	-	-	۰/۴۲	۸/۶۷	-	۱۷۶	۷۰۳	۴۹۰۰-۴۵۰۰-۶۰۰
آلیاژ	-	-	-	-	۵/۶	-	۱۳۴	۷۱۵	۹۱۰۰-۹۰
آلیاژ	-	-	-	-	۷	-	۳۶۸	۷۲۰	۶۹۰۰-۱۷۰۰-۱۴۰
آلیاژ	-	-	-	-	۷/۱۷	-	۱۲۵	۷۶۵	۷۴۰۰-۱۹۰۰-۷۰۰
آلیاژ	-	-	-	۰/۷۵	۴/۱۵	-	۴۲۰	۷۷۰	۵۶۰۰-۲۷۰۰-۱۷۰۰
آلیاژ	-	-	-	-	۱/۳۸	-	۲۷۲	۷۹۰	۸۴۰۰-۱۶۰۰
آلیاژ	-	-	-	-	-	-	۳۱۴	۸۰۰	۴۷۰۰-۳۸۰۰-۱۵۰۰
آلیاژ	-	-	-	۰/۵	۶/۶	-	۱۹۷	۸۰۳	۸۰۰۰-۲۰۰۰
آلیاژ	-	-	-	-	۶/۸۸	-	۹۲	۸۴۰	۸۳۰۰-۱۰۰-۷۰۰
آلیاژ	-	-	-	-	-	-	۲۴۳	۸۴۱	Mg <sub>2</sub> Cu
آلیاژ	-	-	-	-	۲/۲۵	-	۳۰۵	۸۶۵	۴۹۰۰-۲۰۰۰-۲۱۰۰
آلیاژ	-	-	-	۰/۷۹	۱/۹	-	۷۵۷	۹۴۶	۵۶۰۰-۴۴۰۰
فلز	-	-	-	-	-	-	۷۱	۱۰۷۷	Cu



شکل ۴. مورفولوژی سطح مشترک مس و لایه نیکل-کروم بعد از ۱۰۰ سیکل حرارتی در دمای ۱۰۵۰ تا ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد- الف- قبل از تغییر فاز ب- بعد از ۱۰ سیکل حرارتی ج- بعد از ۵۰ سیکل حرارتی د- بعد از ۱۰۰ سیکل حرارتی [۲۲]

#### ۴- عوامل موثر در انتخاب فلزات به عنوان مواد تغییر فازی

در طراحی مواد مهندسی بسیاری از جنبه‌های مهندسی مانند میزان استحکام مورد نیاز، دما و فشار کارکرد، نوع اتمسفری محیطی و میزان مقاومت به خوردگی مواد و همچنین جنبه‌های اقتصادی و زیست محیطی و در دست بودن، مورد بررسی قرار گرفته و بهترین گزینه ممکن انتخاب می‌شود. در انتخاب فلزات و آلیاژها برای مواد جاذب انرژی و ذخیره‌کننده انرژی نیز مواردی وجود دارد که باید به دقت مورد بررسی قرار بگیرند. این موارد در ادامه به تفکیک بررسی شده‌اند.

##### الف- فشار بخار بالا

همانطور که پیش‌تر اشاره شد، استفاده از فلزات به عنوان مواد ذخیره‌کننده انرژی یک راه حل پیشنهادی است. با این وجود بعضی از فلزات مانند روی و منیزیم دارای فشار بخار بالایی هستند که استفاده از آن‌ها را به عنوان مواد تغییر فازی نامناسب می‌کند. انتخاب فلزاتی که دارای فشار بخار پایینی هستند بسیار مهم است.

##### ب- میزان زیر تبرید

در فلزات خالص، زیر تبرید اعمالی نیز باید در نظر گرفته شود. زیر تبرید هم در جوانه‌زنی همگن و هم در جوانه‌زنی غیرهمگن اتفاق می‌افتد و در صنایع معمول مانند ریخته‌گری بحرانی نیست ولی در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی باید حتماً در نظر گرفته شود. برای مثال در دو فلز خالص آلومینیوم و منیزیم میزان این فوق تبرید در حالت همگن ۱۰۰ درجه کلون است. این اطلاعات بایستی به صورت کامل برای سایر مواد پیشنهادی جمع‌آوری گردد.

##### ج- زمان انجماد و تعادلی بودن شرایط

تقریباً تمامی فلزات و آلیاژهایی که امروزه به عنوان مواد جاذب انرژی گرمایی پیشنهاد داده می‌شوند دارای ترکیب شیمیایی نزدیک به نقطه یوتکتیک در ترکیب‌های سه تایی و دو تایی هستند (به جدول ۲ دقت شود). برای نگه داشتن استحاله فازی به شرایط تعادل ترمودینامیکی، سرعت ذوب و انجماد باید در پایین‌ترین مقدار ممکن نگه داشته شود. مزیت دیگر پایین نگه داشتن سرعت، عدم وجود تنش حرارتی در مواد بالک است زمانی که گرمایش/سرمايش از سطح به طرف داخل نفوذ می‌کند. طبق رابطه ۲ مقدار زمانی (t) که طول می‌کشد تا گرما از ضخامت (X) ماده‌ای با نفوذ a عبور کند را نشان می‌دهد.

$$t = \frac{X^2}{2a} \quad 2$$

\*Pareto Curve

پس برای افزایش زمان نفوذ بایستی طبق رابطه ۲، ضریب نفوذ تا حد ممکن پایین باشد. از آنجایی که ضریب نفوذ نسبت بین ظرفیت حرارت حجمی  $\rho.C_p$  و هدایت  $\lambda$  است، رابطه ۲ به شکل زیر تغییر می‌کند:

$$t = \frac{X^2 \rho C_p}{\lambda} \quad 3$$

پس برای افزایش این زمان، بایستی موادی انتخاب شوند که دارای نسبت  $\frac{\rho C_p}{\lambda}$  بالاتری باشند. از طرفی دیگر، در طراحی مواد تغییر فازی، موادی نیاز است که مقدار انرژی بیشتری را در واحد حجم ذخیره کنند. مقدار گرمای ذخیره شده  $Q_{\text{stored}}$  در واحد حجم از رابطه ۴ بدست می‌آید:

$$Q_{\text{stored}} = \rho C_p \Delta T \quad 4$$

با در نظر گرفتن روابط ۳ و ۴ مشخص می‌شود موادی که دارای مقدار  $\rho C_p$  بالاتری هستند مناسب‌تر هستند. با توجه به این که حرارت منتقل شده در مواد به هدایت حرارتی آن‌ها بستگی دارد، گرمای منتقل شده بر واحد حجم  $Q_{\text{transferred}}$  طبق رابطه ۵ بدست می‌آید:

$$Q_{\text{transferred}} = \lambda \frac{\Delta T}{X} \quad 5$$

با توجه به شکل ۵ هدایت حرارتی مواد بر حسب چگالی آن‌ها بیان شده است، موادی که نزدیک منحنی پارتو<sup>۳</sup> هستند دارای ضریب نفوذ پایین‌تری هستند. در نتیجه مشخص می‌شود که برای نزدیک شدن به حالت تعادل ترمودینامیکی بایستی ماده طراحی شده دارای ظرفیت حرارتی ویژه بالا و هدایت حرارتی پایینی باشد. با توجه به این که این دو خصوصیت در تضاد هم هستند بایستی حالت بهینه در طراحی صورت بگیرد.

علاوه بر موارد ذکر شده، در زمینه انتخاب مواد فلزی برای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، مواردی دیگری نیز باید مد نظر گرفته شود که عبارتند از:

۱- ضریب هدایت حرارتی بالای فلزات، ضریب انبساط متفاوت بین فلز در هسته و لایه کپسول که باعث کمتر شدن میزان تنش حرارتی می‌شود.

۲- در عمل بسیاری از فلزات نیازمند عملیات حرارتی برای رسیدن به ریزساختار مناسب مدنظر با هدف دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب هستند. اگر این خواص مکانیکی در کاربردهای ذخیره‌سازی مد نظر قرار نگیرد می‌توان این عملیات را از فرایند تولیدی این مواد حذف کرد ولی سیکل‌های گرمایشی/سرمايشی که در طول کارکرد به عنوان ذخیره‌ساز انرژی گرمایی بر این مواد اعمال می‌شود باعث تغییر ریزساختار آن‌ها شده که بایستی مطالعاتی بر روی آن انجام بگیرد.





۶- واکنش‌های ناخواسته با محفظه، کوئل و لوله‌ها می‌تواند اتفاق بیافتد. ملاحظات لازم برای جلوگیری از این واکنش‌ها بایستی با استفاده از دی‌اگرام الینگهام در نظر گرفته شود و سازگاری مواد تغییر فازی با مواد نگهدارنده بایستی آزمایش گردد.

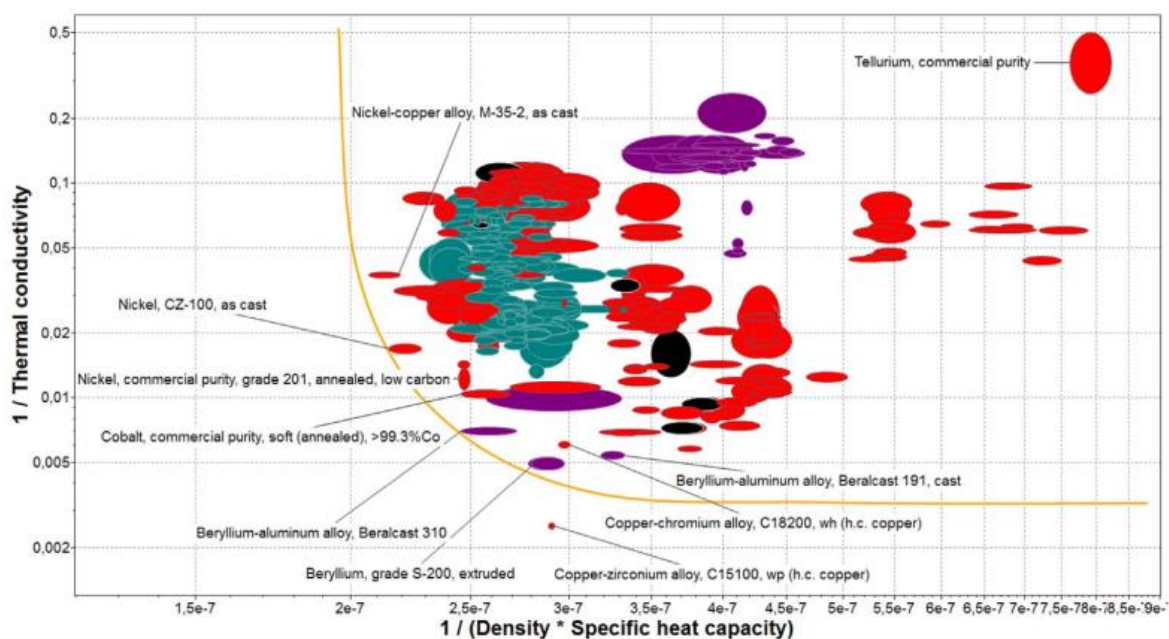
۷- انجماد یکی از مهم‌ترین فرایندها در این مواد است. بایستی اقدامات لازم جهت جلوگیری از تشکیل حفره در این مواد مد نظر قرار بگیرد.

هدف اصلی از استفاده از فلزات و آلیاژها به عنوان ذخیره‌ساز انرژی، استفاده از گرمای نهان و هدایت حرارتی آن‌ها بوده به طوری که انرژی بیشتری را جذب کرده و بازدهی را بالا ببرد. با این وجود و با بیان مشکلات، انتظار نمی‌رود که در تمامی موارد بتوان با در نظر گرفتن تمامی این عوامل طراحی مناسبی را انجام داد. به همین منظور اخیراً متخصصان اقدام به بالا بردن خصوصیات هدایت حرارتی مواد تغییر فازی آلی با کمک گرفتن از فوم‌های فلزی شده‌اند که نتایج قابل قبولی در منابع ذکر شده است [۲۸-۲۵].

۳- رسوبات و تشکیل اکسیدها دیگر موردی است که بایستی در نظر گرفته شود. تشکیل این ترکیبات باعث تغییر رنج دمایی کارکرد این مواد می‌شود.

۴- برای جلوگیری از اکسید شدن این مواد می‌توان از گاز خنثی استفاده کرد، که این باعث حل شدن مقداری از گاز در مذاب فلزی می‌شود. حل شدن این گازها در مذاب فلزی و تاثیر آن‌ها بر روی عملکرد این مواد نیز باید مورد بررسی قرار بگیرد.

۵- کپسولی کردن این مواد یکی از روش‌های کاربرد این مواد است. مواد تغییر فازی فلزی را می‌توان هم با فلزات و هم با سرامیک‌ها کپسوله کرد ولی بایستی مسائلی از قبیل تحمل شوک حرارتی در سرامیک‌ها، مقاومت به خوردگی در فلزات و نفوذ محصولات خوردگی به درون کپسول را نیز مد نظر قرار داد. [۲۴]



شکل ۵. نمودار تغییرات هدایت حرارتی بر حسب تغییرات چگالی

### ۵- نتیجه‌گیری

گرفته شده‌اند. می‌توان ادعا کرد که فلزاتی با نقطه ذوب پایین مانند گالیم، ایندیم، بیسموت، آلومینیوم، و سیلیسیم که به دلیل خواص فیزیکی حرارتی بهتری که از خود نشان می‌دهند، می‌توانند در مواردی وزن عامل تعیین‌کننده‌ای برای طراحی نباشد با نمک‌های مذاب رقابت کنند. بطور کلی علاوه بر دمای استحاله و گرمای نهان استحاله، برای نزدیک شدن به حالت تعادل ترمودینامیکی بایستی ماده طراحی شده

می‌توان ادعان داشت که مواد فلزی برای کاربرد به عنوان مواد تغییر فازی و ذخیره کننده انرژی، علیرغم خصوصیات جذابشان مانند هدایت حرارتی بالا، مقاومت به خوردگی و تغییرات حجمی بسیار کم در هنگام تغییر فاز و نداشتن زیر تیرید از طرف طراحان مواد مهندسی نادیده



the Physical Behavior of Phase Change Materials Based on Linear Low-Density Polyethylene and Paraffin Wax", *Thermochimica Acta* 641 (2015) 218-225

۱۴. A.M. Thiele, A. Jamet, G. Sant & L. Pilon, "Annual Energy Analysis of Concrete Containing Phase Change Materials for Building Envelopes", *Energy Conversion and Management* 103 (2015) 374-386
۱۵. C. Zeng, S. Liu & A. Shukla, "Adaptability Research on Phase Change Materials Based Technologies in China", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73 (2017) 145-158
۱۶. A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, A. Lazaro, P. Dolado, B. Zalba & L.F. Cabeza, "State of Art on High Temperature Thermal Energy Storage for Power Generation Part 1-Concepts, Materials and Modellization", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 31-55
۱۷. M.K. Rathod & J. Banerjee, "Thermal Stability of Phase Change Materials Used in Latent Heat Energy Storage Systems: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 18 (2013) 246-258
۱۸. C.E. Birchenall & M. Telkes, "Thermal Storage in Metal, In: Proceedings of Sharing The Sun: Solar Technology In The Seventies-Joint Conf. American Section Of ISES And Solar Energy Society Of Canada 8, 38-54, 1976
۱۹. M.M. Kanisarin, "High-Temperature Phase Change Materials for Thermal Energy Storage", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 955-970
۲۰. C.E. Birchenall & A.F. Riechman, "Heat Storage in Eutectic Alloys", *Metallurgical Transaction A* (1980) 1415-1420
۲۱. X. Wang, J. Liu, Y. Zhang, H. Di & Y. Jiang, "Experimental Research on a kind of Novel High Temperature Phase Change Storage Heater", *Energy Conversion and Management* 47 (2006) 2211-2222
۲۲. G. Zhang, J. Li, Y. Chen, H. Xiang, B. Ma, Z. Xu & X. Ma, "Encapsulation of Copper-Based Phase Change Materials for High Temperature Thermal Energy Storage", *Solar Energy Materials & Solar Cells* 128 (2014) 131-137
۲۳. B. Ma, J. Li, Z. Xu & Z. Peng, "Fe-Shell/Cu-Core Encapsulated Metallic Phase Change Materials Prepared by Aerodynamic Levitation Method", *Applied Energy* 132 (2014) 568-574
۲۴. F. Zhang, Y. Zhong, X. Yang, J. Lin & Z. Zhu, "Encapsulation of Metal-Based Phase Change Materials Using Ceramic Shells Prepared by Spouted Bed CVD Method", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 170 (2017) 137-142
۲۵. W. Li, R. Hou, H. Wan, P. Liu, G. He & F. Qin, "A New Strategy for Enhanced Latent Heat Energy Storage with Microencapsulated Phase Change Material Saturated in Metal Foam", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 171 (2017) 197-204
۲۶. X.H. Yang, S.C. Tan & J. Liu, "Numerical Investigation of the Phase Change Process of Low Melting Point Metal", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 100 (2016) 899-907
۲۷. F. Zhu, C. Zhang & X. Gong, "Numerical Analysis on the Energy Storage Efficiency of Phase Change Material Embedded in Finned Metal Foam with Graded Porosity", *Applied Thermal Engineering* 16 (2017) 05
۲۸. F. Zhu, C. Zhang & X. Gong, "Numerical Analysis and Comparison of the Thermal Performance Enhancement Methods for Metal Foam/Phase

دارای ظرفیت حرارتی ویژه بالا و هدایت حرارتی پایینی باشد. با توجه به این که این دو خصوصیت در تضاد هم هستند بایستی حالت بهینه در طراحی صورت بگیرد. هم‌چنین در کاربردهای دما بالا فلز مس رفتار مناسبی از خود برای ذخیره‌سازی انرژی نشان داده است.

## ۶-منابع

۱. م.ج. شمس، م.کیا و ب. مهدوی، "مطالعات طراحی بهینه یک نیروگاه فتوولتائیک ۱۰۰ کیلوواتی متصل به شبکه در تهران با استفاده از نرم‌افزار PVSyst"، نشریه انرژی ایران، دوره ۱۶، شماره ۲ تابستان ۱۳۹۲
۲. م.ج. سیدان و ج. عبدالهی سروی، "گزارش وضعیت جهانی، انرژی‌های تجدیدپذیر ۲۰۱۶"، یافته‌های کلیدی ۲۰۱۶
۳. M. Boxwell, "Solar Electricity Handbook", 2017 Edition, United Kingdom
۴. R. Teeuwen, Z. Wang & J. Kouzmanoff, "Renewables in Iran: An Overview", SolarPlaza, retradmission
۵. P. Sobolciak, H. Abdelrazeq, M. Quederni, M. Karkri, M.A. Al-Maadeed & I. Krupa, "The Stabilizing Effect of Expanded Graphite on the Artificial Aging of Shape Stabilized Phase Change Materials", *Polymer Testing* 46 (2015) 65-71
۶. G.R. Dheep & A. Sreekumar, "Influence of Accelerated Thermal Charging and Discharging Cycles on Thermo-Physical Properties of Organic Phase Change Materials for Solar Thermal Energy Storage Applications", *Energy Conversion and Management* 105 (2015) 13-19
۷. M.M. Islam, A.K. Pandey, M. Hasanuzzaman & N.A. Rahim, "Recent Progress and Achievements in Photovoltaic-Phase Change Material Technology: A Review with Special Treatment on Photovoltaic Thermal-Phase Change Material Systems", *Energy Conversion and Management* 126 (2016) 177-204
۸. D. Gossard, M. Karkri, A. Mariam & I. Krupa, "A New Experimental Device and Inverse Method to Characterize Thermal Properties of Composite Phase Change Materials", *Composite Structures* 15 (2016) 8-32
۹. T.E. Alam, J.S. Dhau, D.Y. Goswami & E. Stefanakos, "Macroencapsulation and Characterization of Phase Change Materials for Latent Heat Thermal Energy Storage Systems", *Applied Energy* 154 (2015) 92-101
۱۰. A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen & D. Buddhi, "Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 318-345
۱۱. G. Ferrer, A. Sole, C. Barneche, I. Martorell & L.F. Cabeza, "Review on the Methodology used in Thermal Stability Characterization of Phase Change Materials", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50 (2015) 665-685
۱۲. T. Khadiran, M.Z. Hussein, Z. Zainal & R. Rusli, "Encapsulation Techniques for Organic Phase Change Materials as Thermal Energy Storage Medium: A Review", *Solar Energy Materials & Solar Cells* 143 (2015) 78-98
۱۳. I. Krupa, Z. Nogellova, Z. Spitalsky, M. Malikova, P. Sobolciak, H.W. Abdelrazeq, M. Quederni & M. Karkri, "Positive Influence of Expanded Graphite on



