

## بررسی تجربی تأثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده PCM در عملکرد یک سیکل تبرید تراکمی خورشیدی

سیدمسلم موسوی<sup>۱</sup>، محمد رضا صفاریان<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران  
<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

دریافت: تیر ۹۹، بازنگری: مرداد ۹۹، پذیرش: شهریور ۹۹

### چکیده

صرفه‌جویی در مصرف انرژی یکی از چالش‌های مهم جهان امروز است. کاهش مصرف انرژی الکتریکی در سیستم‌های تبرید تراکمی یکی از ضرورت‌های اساسی در طراحی این سیستم‌ها می‌باشد. هنگام استفاده از سیستم‌های تهویه مطبوع خانگی (کولر دوتکه) در مناطق بسیار گرم (خوزستان) ضریب عملکرد آن‌ها کاهش یافته و مصرف جریان الکتریکی افزایش می‌یابد. از این رو استفاده از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر از جمله انرژی خورشیدی می‌تواند نقش بسزایی در کاهش مصرف انرژی ایفا کند. در این طرح با قرار دادن گردآورنده خورشیدی صفحه تخت که درون آن از مواد تغییر فاز (PCM) قرار دارد در مسیر پرفشار سیکل تبرید تراکمی بین کمپرسور و کندانسور و بدست آوردن پارامترهای فشار و دما در نقاط مختلف سیکل، و مقایسه آن با حالت معمولی سیکل تبرید (فاقد کلکتور) کار کمپرسور، ظرفیت سرمایش و ضریب عملکرد محاسبه و مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که گرما با فشار رابطه مستقیم دارد، (افزایش گرمای مبرد در حجم ثابت باعث افزایش فشار می‌گردد) تأمین بخشی از فشار سیکل توسط گردآورنده خورشیدی انجام می‌شود. آزمایش‌های سیکل معمولی و خورشیدی بطور همزمان در سه زمان متفاوت (در ساعات ۷ صبح، ۱۵ بعدظهر و ۲۳ شب) انجام گردید. نتایج تجربی بدست آمده نشان می‌دهد در دمای بی‌شینه (ساعت ۱۵ بعدازظهر) با افزایش  $6/3$  (°C) دمای مبرد خروجی از کلکتور، مشخصات ترمودینامیکی سیستم بهبود یافته بطوریکه ضریب سرمایش از  $10/82$  به  $11/251$  و ضریب عملکرد سیکل از  $5$  به  $5/2$  به ترتیب  $3/83$ ٪ و  $3/84$ ٪ افزایش و توان کمپرسور از  $2/167$  به  $2/160$  که در حدود  $0/32$ ٪ کاهش می‌یابد. ضمن اینکه دلیل عدم وجود نور خورشید کافی و جذب گرمای مناسب توسط کلکتور در آزمایش‌های ساعت ۲۳ شب و ۷ صبح، تأثیر چندان در مشخصات ترمودینامیکی سیکل معمولی و خورشیدی مشاهده نگردید.

\*عهده‌دار مکاتبات: m\_r\_saffarian@yahoo.com

کلمات کلیدی: سیکل تبرید تراکمی، گردآورنده خورشیدی، مواد تغییر فاز دهنده (pcm).

### ۱- مقدمه

امروزه تهیه هوا با شرایط مطلوب و قابل کنترل برای تامین آسایش و امکان فعالیت بی‌هینه انسان که بیشتر وقت خود را در فضاهای بسته مانند محل سکونت، وسیله نقلیه و محل کار سپری می‌کند، از اهمیت زیادی برخوردار است. تنظیم شرایط محیط نه تنها بر بازده کاری بلکه بر رفتارهای روانی افراد اثر قابل توجه دارد. سامانه تهویه مطبوع که به عنوان قلب تپنده ساختمان شناخته می‌شود علاوه بر فضاهای آسایشی مانند ساختمان‌های مسکونی و بیمارستان‌ها در بسیاری از محیط‌های صنعتی،

تولیدی و آزمایشگاهی به عنوان یک عامل بسیار مؤثر بر کیفیت محصول شناخته می شود. اما این وسط بحث انرژی پیش می آید. همان طور که می دانیم، سیستم های تهویه مطبوع مخصوصاً در مناطق گرم و خشک انرژی زیادی مصرف می کنند که بیش تر آن هنوز از سوخت های فسیلی به دست می آید. از این رو به هر اقدامی برای کاهش مصرف انرژی در سرمایش و گرمایش، توسط به کارگیری روش های حرارتی بهتر و افزایش کارایی سیستم ها و تجهیزات باید دست زد.

استان خوزستان پرمصرف ترین انرژی الکتریکی بعد از پایتخت می باشد. و علت آن استفاده مردم استان از کولرهای گازی با سیکل تراکمی برای تهویه منازل و ادارات و دیگر اماکن می باشد. کاهش مصرف انرژی الکتریکی در سیستم های تبرید تراکمی یکی از ضرورت های اساسی در طراحی این سیستم ها می باشد. جایگزین کردن انرژی های تجدید پذیر می تواند نقش بسازی در کاهش مصرف انرژی ایجاد کند.

یکی از این انرژی های قابل تجدید، انرژی حرارتی است که در اینجا روش ذخیره سازی انرژی حرارتی بیان می شود. یکی از مهم ترین روش های ذخیره سازی انرژی حرارتی،  $PCM^1$  یا مواد تغییر فاز دهنده است، موادی که در مواقع لزوم تغییر فاز می دهند، انرژی را در شکل های مختلف در خود ذخیره کرده و در مواقع لزوم آزاد می کنند. این مواد با اثراتی مانند افزایش ضریب انتقال حرارت، افزایش ظرفیت گرمایی، پایداری حرارتی و شیمیایی موجب ذخیره سازی انرژی حرارتی می شوند. پروژه های که در حال بررسی و انجام می باشد با به کارگیری روشی برای افزایش ضریب عملکرد و ضریب سرمایش کولرهای گازی در استان می باشد. در این جا ابتدا شرایط استان از نظر آب و هوایی خصوصاً نسبت رطوبت و زمان به وقوع آمدن آن و یا تشدید آن که ارتباطی مستقیم با واکنش اجزای کولر دارد مورد بررسی قرار می دهیم. استان خوزستان با رطوبت ۸۸٪ در زمستان و دمای خشک ۶٫۶ و در تابستان میزان رطوبت ۳۶٫۲٪ و دمای خشک آن ۴۵٫۸ جزء استان های گرم و خشک جلگه ای قرار می گیرد. همچنین ارتفاع شهر اهواز از سطح دریا ۱۲ متر می باشد که مقدار ارتفاع و فشار اتمسفر را نسبت به دیگر استان های هم جوار تغییر می دهد.

در زمینه سیستم های تهویه مطبوع و تبرید خورشیدی مطالعه ها و پژوهش های بسیاری انجام شده است. اقتداری [۱] در طرحی به بررسی عملکرد کندانسور تبخیری برای کولرهای گازی دو تکه<sup>۲</sup> در شرایط بسیار گرم پرداخت. در این طرح پدهای پوشالی مجهز به سیستم پاشش آب در مسیر مکش هوای ورودی کندانسور قرار گرفته و سبب خنک شدن هوای عبوری می شوند. نتایج تجربی به دست آمده نشان می دهد که مشخصه های ترمودینامیکی سیستم به طور محسوسی بهبود یافته و توان مصرفی کمپرسور تا میزان ۸/۱۸٪ کاهش یافته و ضریب عملکرد سیکل نیز در حدود ۵۹٪ افزایش می یابد. همچنین اثر تبرید سیکل با این روش به میزان ۲۷٪ افزوده می شود. تأثیر افزایش دما بر ضریب عملکرد و توان مصرفی و اثر تبرید مورد بررسی قرار گرفت و معلوم شد که در طرح کندانسور تبخیری با افزایش دمای هوای محیط مشخصه های عملکرد سیکل بهتر می شوند. امیر بهرشت [۴] به بررسی وجود کلکتور خورشیدی بر عملکرد سیکل گرمایش و سیکل سرمایش پرداخته که نتایج تجربی ایشان نشان می دهد که کاربرد کلکتور خورشیدی صفحه تخت بر بهبود عملکرد سیکل یاد شده در زمستان تأثیر دارد و ضریب گرمایش و ضریب عملکرد با افزایش تابش خورشید افزایش می یابد.

حاجی دولو [۷] و [۸] به بررسی تأثیر استفاده از کندانسور تبخیری به جای کندانسور هوایی در عملکرد کولرهای پنجره ای و کولرهای دو تکه پرداخت. برای تبدیل کندانسور هوایی به تبخیری دو طرح ارائه گردید. در طرح تزریق مستقیم آب بر روی لوله های کندانسور پاشیده می شود و در طرح دیواره پوشالی آب بر روی دیواره پوشالی که در مسیر کندانسور تعبیه شده پاشیده می شود. وضعیت ترمودینامیکی سیستم بعد از انجام هر دو طرح به طریق تجربی اندازه گیری شد و با وضعیت معمول آن در همان شرایط مورد مقایسه قرار گرفت. تجزیه و تحلیل نتایج تجربی نشان می دهد که با استفاده از این روش ها ضریب عملکرد سیستم تا ۲۵٪ قابل افزایش و توان الکتریکی تا حدود ۱۳٪ کاهش می یابد. بررسی های آزمایشگاهی نشان داد که افزایش عملکرد در طرح پاشش مستقیم بیشتر است، چون انتقال حرارت بیشتر است. این نکته نیز

<sup>1</sup> Phase Change Material

<sup>2</sup> Eplit air-conditioner

مورد توجه قرار گرفت که طرح پاشش مستقیم از نظر امکان ایجاد رسوب و خوردگی بر روی لوله های کندانسور پتانسیل بیشتری دارد و در دراز مدت می تواند مزایای این روش را کاهش دهد ولی با روش طرح دیواره پوشالی این مشکل تا حد زیادی کاهش می یابد.

ویسی و حاج دولو [۱۲] به مدلسازی و شبیه سازی سیکل تبرید تراکمی کولر گازی و ارزیابی ضریب عملکرد آن تحت شرایط محیطی مختلف پرداختند. نتایج شبیه سازی نشان می دهد با افزایش یک درجه دمای محیط ضریب عملکرد سیکل ۳/۵ درصد کاهش می یابد و با افزایش ۱۰ درصد رطوبت نسبی محیط ضریب عملکرد به طور متوسط ۶/۵ درصد افزایش می یابد افزایش ۱۰ درصدی در دبی حجمی هوای عبوری از روی کندانسور سبب افزایش ۳/۲ درصد در ضریب عملکرد سیکل می شود. سیگلر و یمالی [۱۸] عملکرد یک پمپ حرارتی خورشیدی را به صورت تئوری و تجربی مورد بررسی قرار دادند. آنها برای اینکار از یک کلکتور لوله خلاء استفاده کردند. در این تحقیق تأثیر دمای تبخیر بر ظرفیت گرمایش و ضریب عملکرد سیستم بررسی شد. طبق نتایج به دست آمده دمای تبخیر بین ۵/۲ تا ۲۰/۷ تغییر می کند و ماکزیمم ضریب عملکرد این پمپ حرارتی خورشیدی حاصل از آزمایش های صورت گرفته، ۶/۳۸ به دست آمد. همچنین سیستم پیشنهادی در مقایسه با پمپ حرارتی غیر خورشیدی از نظر اقتصادی مورد بررسی قرار گرفت.

دیکسی و آبولوت [۱۹] به بررسی تجربی مشخصه های عملکرد و تحلیل اکسرژی یک پمپ حرارتی خورشیدی پرداختند. از این سیستم برای گرمایش فضای داخل استفاده شد. طبق نتایج ارائه شده ضریب عملکرد سیستم ۳/۰۸ به دست آمد و اگر افت اکسرژی اواپراتور کاهش یابد، ضریب عملکرد سیستم افزایش می یابد.

## ۲- معادله های حاکم بر سیستم تهویه مطبوع مورد مطالعه

شکل ۱ فرآیند مسیر سیکل مورد مطالعه می باشد. توجه به داده های به دست آمده از آزمایش های تجربی می توان مشخصه های ترمودینامیکی مربوط به سیکل از جمله ظرفیت سرمایش، ضریب عملکرد، و کار کمپرسور را محاسبه نمود و میزان تأثیر وجود کلکتور خورشیدی همراه با مواد pcm را مشخص کرد.

برای این کار با استفاده از آمپر مصرفی، ولتاژ و ضریب قدرت به دست آمده از دستگاه مولتی متر، ابتدا توان مصرفی سیستم از معادله (۱) محاسبه می شود و سپس با استفاده از معادله (۲) که مربوط به کار کمپرسور است مقدار دبی جرمی میرد به دست می آید. با استفاده از دبی جرمی می توان ظرفیت سرمایش را از معادله (۴) محاسبه کرد. مقادیر  $Q_L$  از معادله (۳) و ضریب عملکرد سیستم هم به ترتیب با استفاده از معادله های (۳-۱۲) محاسبه می شوند.

راه دیگر بیان کارایی سیکل های تبرید تراکمی بیان آن بر حسب میزان توان کمپرسور (بر حسب اسب بخار) بر واحد برودت ایجاد شده (بر حسب تن تبرید) است البته در سیستم واحدهای SI این نسبت به صورت کیلووات بر حسب تن تبرید نیز بیان می شود. رابطه بین این واحدها در معادله (۶) آمده است. بنابر این با افزایش  $COP_R$  مقدار (HP/ ton) کاهش می یابد. و در نهایت از معادله (۷) برای بازدهی انرژی که به اختصار EER نامیده می شود که به صورت نسبت ظرفیت سرمایش بر حسب بی تی یو بر ساعت بر توان ورودی بر حسب وات در یک نقطه کاری مشخص تعریف می شود.

$$W_{Comp} = V \times I_{in} \times \cos \varphi \quad (1)$$

$$\dot{m}_{Cycle} = \frac{W_{Comp}}{h_2 - h_1} \quad (2)$$

$$Q_L = \dot{m}_{Cycle} \times (h_1 - h_4) \quad (3)$$

$$q_L = (h_1 - h_4) \quad (4)$$

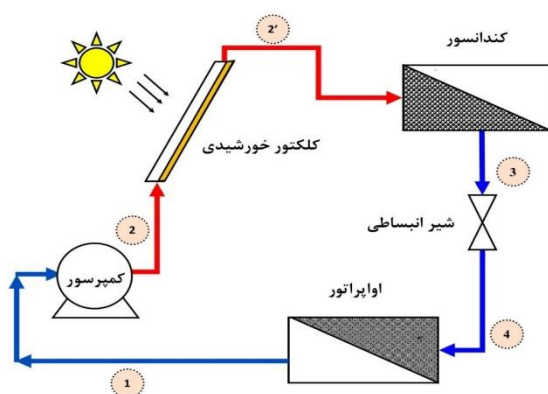
$$COP_R = \frac{Q_L}{W_{Comp}} = \frac{\dot{m}(h_1 - h_4)}{\dot{m}(h_2 - h_1)} = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)} = \frac{\text{اثر تبرید}}{\text{کار به ازای واحد جرم}} \quad (5)$$

$$\frac{KW}{ton} = \frac{3/51}{COP_R} \quad (6)$$

$$EER = 3 / 412 COP_R \quad (7)$$

$$\dot{V} = \dot{m} \times v \quad (8)$$

در شکل ۱ فرآیند سیکل مورد مطالعه به طور شماتیک نشان داده شده است. با بررسی روابط قبل می توان دریافت که کارایی یک سیستم تبرید تابعی از دماهای تبخیر و تقطیر یا اختلاف این دو دما است. با افزایش این اختلاف میزان  $COP_R$  و  $EER$  کاهش یافته و  $HP/ton$  افزایش می یابد؛ بنابراین، در یک سیکل تبرید باید سعی شود که به منظور کاهش مصرف انرژی: یک دمای تقطیر تا حد امکان پایین باشد. دمای تبخیر تا حد امکان بالا باشد.



شکل ۱: شماتیکی از سیکل حاضر

## ۲-۱- ذخیره سازی انرژی گرمایی با استفاده از PCM ها

یکی از بهترین و باصرفه ترین روش ها برای ذخیره سازی انرژی گرمایی استفاده از موادی است که با حجم کوچکیشان نقش مناسبی در این زمینه بازی می کنند. موادی که به هنگام تغییر فاز جامد - مایع ۳، در دمای ثابت، مقدار زیادی انرژی گرمایی را به صورت گرمای نهان در خود ذخیره می کنند. PCM ها در ابتدا رفتاری شبیه به مواد ذخیره کننده گرمای محسوس دارند؛ هنگامی که گرما را جذب می کنند دمای آنها بالا رفته و بر خلاف مواد ذخیره کننده گرمای محسوس هنگامی که به دمای ذوب خود می رسند، شروع به تغییر فاز کرده و مقدار زیادی گرما را در یک دمای ثابت جذب می کنند PCM به جذب گرما بدون بالا رفتن دما ادامه می دهد تا جایی که تمام ماده به فاز مایع تبدیل شود. هنگامی که دمای محیط اطراف کاهش یابد، PCM از حالت مایع به حالت جامد تبدیل شده و انرژی ذخیره شده را رها می کند. [۱۰]

## ۲-۲- تقسیم بندی مواد تغییر فاز دهنده

مواد تغییر فاز دهنده را براساس دمای تغییر فازشان به سه دسته یوتکتیک ها، هیدرات نمکها و مواد آلی تقسیم بندی می کنند. دمای تغییر فاز یوتکتیک ها کمتر از  $0^{\circ}C$  و دمای تغییر فاز هیدرات نمک ها و مواد آلی بالای  $0^{\circ}C$  است. دمای کاری PCM ها بین  $40-117^{\circ}C$  است، موادی که زیر  $15^{\circ}C$  ذوب می شوند

<sup>۲</sup> ذخیره سازی گرمای نهان از طریق تغییر فاز گاز- جامد، گاز- مایع، جامد- جامد و جامد- جامد انجام پذیر است؛ با این حال تغییر فاز استفاده شده برای PCM تنها تغییر فاز جامد - مایع است؛ زیرا تغییر فاز گاز - مایع یا گاز - جامد، بعلا حجم بزرگ یا فشار بالای مورد نیاز برای ذخیره سازی گرما هنگامی که مواد در حالت فاز گاز هستند، عملی نیست. تغییر فاز جامد - جامد نیز بسیار کم رخ می دهد.

برای خنک کردن هوای اتاق مورد استفاده قرار میگیرند، موادی که بالای  $(^{\circ}\text{C}) 90$  ذوب می شوند برای کاهش دمای مناطقی که دما به صورت غیر منتظره در آنجا بالا رفته باشد و جلوگیری از آتش سوزی و انفجار به کار میروند و موادی که نقطه ذوبشان ما بین این دو دما قرار دارد برای ذخیره سازی انرژی های خورشیدی به کار می روند.

### ۳- مشخصه های دستگاه آزمایش

در جدول ۱: مشخصه های سیستم تهویه مطبوع مورد مطالعه نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصه های سیکل تبرید مورد مطالعه

سرمایش	تابع	ولتاژ ۲۲۰ ولت
۷/۵ (۰/۸-۲/۰) کیلو وات	ظرفیت	فرکانس: ۵۰ هرتز
۲/۲۸ (۰/۵-۲/۷۵) کیلو وات	ورودی	مبرد: ۴۱۰a
۱۴۰۰۷۵۵۰۱۱۰۰۹۰۰۰۰۶	شماره سریال	دهش: ۴/۳ مگا پاسکال
OEM	نام برند	دمکش: ۱/۱ مگا پاسکال
ROHS	استاندارد	کلکتور خورشیدی صفحه تخت
EMC-CE-CB-UL-UR-SASO-SAA-GS	گواهی	ابعاد ۱۰۰۰×۵۵۰×۸۰

### ۳-۱- نحوه انجام آزمایشها

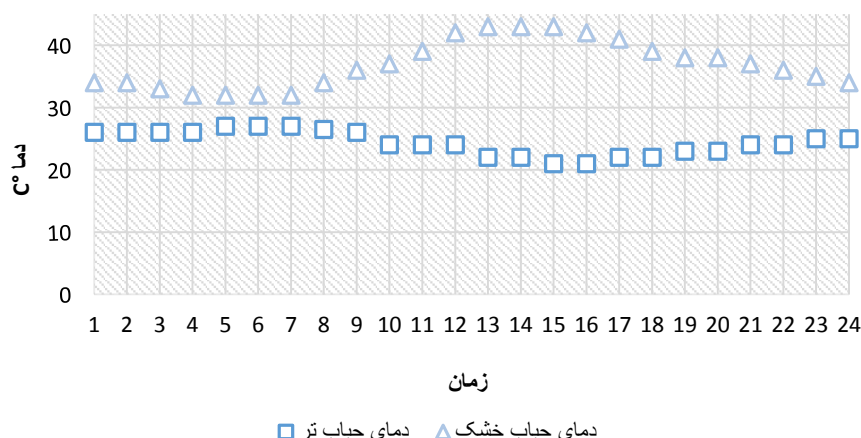
برای بررسی و مطالعه سیکل ترمودینامیکی حاضر و نشان دادن تأثیر وجود pcm در کلکتور خورشیدی که در فرآیند سیکل تبرید تراکمی قرار گرفته، فرآیند سرمایش در فصل تابستان مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. جهت بررسی سیکل خورشیدی و تعیین تأثیر مواد pcm قرار گرفته درون کلکتور با حالت معمولی سه آزمایش در یک روز (۲۰ تیر) و در سه ساعت متفاوت (صبح، بعد از ظهر، شب) انجام گرفت. مشخصات زمان و دمای هوای خشک آزمایشها به شرح زیر می باشد.

در ساعت ۷ صبح دمای هوای خشک  $(^{\circ}\text{C}) 32$

در ساعت ۱۵ بعدظهر دمای هوای خشک  $(^{\circ}\text{C}) 43$

در ساعت ۲۳ شب دمای هوای خشک  $(^{\circ}\text{C}) 36$

برای انجام آزمایشها و همچنین برای سهولت در داده برداری، بعد از فراهم شدن شرایط پایا در سیستم اقدام به داده برداری پارامترهای مختلف ترمودینامیکی شد. به این نکته مهم هم توجه شده است که برای انجام آزمایشها و مقایسه آنها، شرایط آب وهوایی مانند مقدار رطوبت و دمای هوای فضای بیرون مشابه به هم باشند. تا تأثیر استفاده از مواد pcm درون کلکتور در عملکرد سیکل در سه مرحله آزمایش مشخص شود.



شکل نمودار ۲: نمودار دمای حباب خشک و دمای حباب تر در ۲۰ تیر ماه

۴- نتایج آزمایش برای دمای  $32^{\circ}\text{C}$  ساعت (۷ صبح)

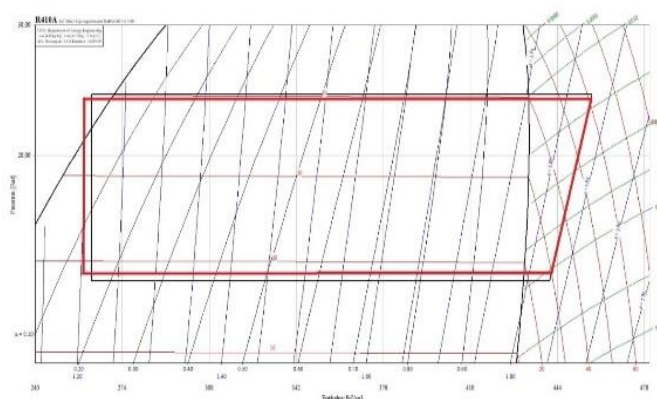
نتایج مربوط به آزمایش‌های صورت گرفته برای دو حالت سیکل در کمترین دمای حباب خشک در دمای هوای ( $32^{\circ}\text{C}$ ) در جدول ۲ نشان داده شده است، در این جدول پارامترهای مختلفی برای سیکل تبرید تراکمی ارائه شده است.

جدول ۲ نتایج برای دمای  $22^{\circ}\text{C}$  درجه

پارامتر	دیمانسیون	سیستم خورشیدی با استفاده از pcm		تغییرات نسبت به سیستم با pcm
		سیستم معمولی	سیستم خورشیدی با استفاده از pcm	pcm
$\dot{W}_{\text{Comp}}$	KW	۲/۱۰۸	۲/۰۶۶	٪-۲
$\dot{m}_{\text{Cycle}}$	Kg/sec	۰/۰۷۲۶	۰/۰۷۰۵۱	٪-۳
$\dot{Q}_L$	KW	۱۲/۰۴	۱۲/۲۷	٪۱/۸۵
COP	-	۵/۸۲۰	۵/۸۲۷	٪۰/۱۲
$\frac{\text{KW}}{\text{ton}}$	-	۰/۶۰۳۱	۰/۶۰۲۳	-۰/۱۲۱
EER	-	۱۹/۸۵	۱۹/۸۸	۰/۱۵۹

به نظر می‌رسد که کلکتور خورشیدی تأثیری مفیدی بر ضریب سرمایه‌گذاری و ضریب عملکرد ندارد. بلکه در نمودار سیکل مربوط به سیستم خورشیدی (سیکل قرمز رنگ) در مقایسه با سیستم معمولی (سیکل سیاه رنگ) تغییرات کمی ایجاد شده است. دلیل این امر می‌تواند به کارگیری مواد pcm با دمای ذوب  $50^{\circ}\text{C}$  باشد، که به نظر می‌رسد کلکتور خورشیدی دمای مورد نیاز برای ذوب کردن pcm در دمای  $32^{\circ}\text{C}$  را از طریق تابش خورشید بدست نیاورده است.

همانطور که از ارزیابی شکل ۵-۲ مشخص می‌شود، در نمودار سیکل مربوط به سیستم خورشیدی (سیکل قرمز رنگ) در مقایسه با سیستم معمولی (سیکل سیاه رنگ) تغییراتی ایجاد شده است. آن چه که تأثیر وجود کلکتور خورشیدی همراه با مواد pcm را در شکل ۳ نشان می‌دهد خط مربوط به انبساط در سیستم خورشیدی است که به سمت چپ انتقال یافته و موجب افزایش اندک ظرفیت سرمایه‌گذاری از  $12/04 \text{ kW}$  به  $12/27 \text{ kW}$  و در نتیجه منجر به افزایش اندک ضریب عملکرد از  $5/82 \text{ kW}$  به  $5/827 \text{ kW}$  می‌شود.



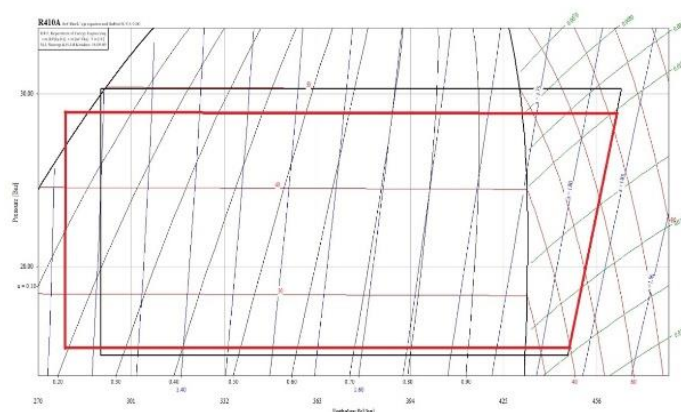
شکل ۳: دیاگرام p-h در دمای ۳۲ °C

#### ۲-۴- نتایج آزمایش برای دمای ۴۳°C ساعت ۱۵

با مقایسه بین پارامترهای مربوط به سیستم خورشیدی نسبت به سیستم معمولی مشاهده می‌شود. دمای تقطیر کاهش پیدا می‌کند و خروجی کندانسور در منطقه مادون سرد می‌باشد. بدلیل اینکه بخار پس از عبور از پنل خورشیدی به گاز سوپرهیت با فشار بالا تبدیل شده و در کندانسور میرد بهتر و بیشتر تغییر فاز داده و از گاز به مایع تبدیل می‌شود اما در سیکل تبرید تراکمی معمولی چون دما و فشار گاز پایین تر است تغییر فاز به خوبی صورت نگرفته و خروجی کندانسور بخار اشباع شده می‌باشد. بنابراین در سیکل تبرید تراکمی خورشیدی مایع با فشار بیشتری به موئینگی رسیده و سرمایش بیشتری ایجاد می‌کند یا به ازای سرمایش یکسان راندمان سیستم خورشیدی بهتر می‌شود. در نتیجه ظرفیت سرمایش و ضریب عملکرد در حالت خورشیدی نسبت به حالت معمولی به ترتیب  $\frac{3}{83}$  و  $\frac{3}{84}$  افزایش می‌یابد. این تغییرات همانطور که قبلاً بیان شد نشان دهنده تأثیر وجود کلکتور خورشیدی همراه با مواد pcm است. در نمودار سیکل مربوط به سیستم خورشیدی (سیکل قرمز رنگ) در مقایسه با سیستم معمولی (سیکل سیاه رنگ) تغییراتی ایجاد شده است. آن چه که تأثیر وجود کلکتور خورشیدی همراه با مواد pcm را در شکل ۴ نشان می‌دهد خط مربوط به انبساط در سیستم خورشیدی است که به سمت چپ انتقال یافته و موجب افزایش ظرفیت سرمایش از  $10/82 \text{ kW}$  به  $11/251 \text{ kW}$  و در نتیجه منجر به افزایش ضریب عملکرد از  $5 \text{ kW}$  به  $5/2 \text{ kW}$  می‌شود.

جدول ۳ نتایج برای دمای ۴۳ درجه

پارامتر	دیمانسیون	سیستم معمولی	سیستم خورشیدی با استفاده از pcm	تغییرات نسبت به سیستم با pcm
$\dot{W}_{Comp}$	KW	۲/۱۶۷	۲/۱۶۰	٪-۰/۳۲
$\dot{m}_{Cycle}$	Kg/sec	۰/۰۷۰	۰/۰۷۰	٪۰/۱۴۲
$\dot{Q}_L$	KW	۱۰/۸۲	۱۱/۲۵۱	٪۳/۸۳
COP	-	۵	۵/۲	۳/۸۴۶
$\frac{KW}{ton}$	-	۰/۷۰۲	۰/۶۷۵	-۴
EER	-	۱۷/۰۶	۱۷/۷۴۲۴	۳/۸۴۶



شکل ۴: دیاگرام p-h در دمای ۴۳ °C

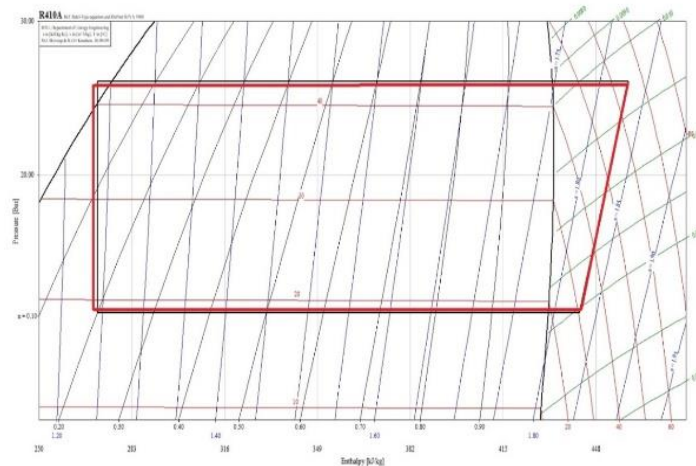
### ۳-۴- نتایج آزمایش برای دمای ۳۶ °C ساعت ۲۳

همانطور که از ارزیابی شکل ۵-۵ مشخص می‌شود، به نظر می‌رسد که کلکتور خورشیدی تأثیری مفیدی بر ضریب سرمایش و ضریب عملکرد ندارد. بلکه در نمودار سیکل مربوط به سیستم خورشیدی (سیکل قرمز رنگ) در مقایسه با سیستم معمولی (سیکل سیاه رنگ) تغییرات کمی ایجاد شده است. دلیل این امر می‌تواند به کارگیری مواد pcm با دمای ذوب ۵۰ درجه باشد، که به نظر می‌رسد کلکتور خورشیدی دمای مورد نیاز برای ذوب کردن pcm و انتقال گرما به مبرد را در دمای ۳۶ درجه از طریق تابش خورشید بدست نیاورده است. همانطور که از ارزیابی شکل ۵ مشخص می‌شود، در نمودار سیکل مربوط به سیستم خورشیدی (سیکل قرمز رنگ) در مقایسه با سیستم معمولی (سیکل سیاه رنگ) تغییراتی ایجاد شده است.

جدول ۲ نتایج برای دمای ۳۶ درجه

پارامتر	دیمانسیون	سیستم معمولی	سیستم خورشیدی با استفاده از pcm	تغییرات نسبت به سیستم pcm
$W_{Comp}$	KW	۲/۰۷۳	۲/۰۴۸	٪-۱/۲۲
$\dot{m}_{Cycle}$	Kg/sec	۰/۰۷۱	۰/۰۷۰	٪-۱/۴۲
$\dot{Q}_L$	KW	۱۱/۷۳	۱۱/۶۲	-۰/۹۴
COP	-	۵/۶۶	۵/۶۹	٪۰/۵۲
$\frac{KW}{ton}$	-	۰/۶۲	۰/۶۱۶۸	٪-۰/۵۱
EER	-	۱۹/۳۱۱	۱۹/۴۱	٪۰/۵۱

آنچه که تأثیر وجود کلکتور خورشیدی همراه با مواد pcm را نشان می‌دهد خط مربوط به انبساط در سیستم خورشیدی است که به سمت چپ انتقال یافته و موجب افزایش ظرفیت سرمایش از ۱۱/۶۲ kW به ۱۱/۷۳ kW و در نتیجه منجر به افزایش ضریب عملکرد از ۵/۶۶ kW به ۵/۶۹ kW می‌شود.

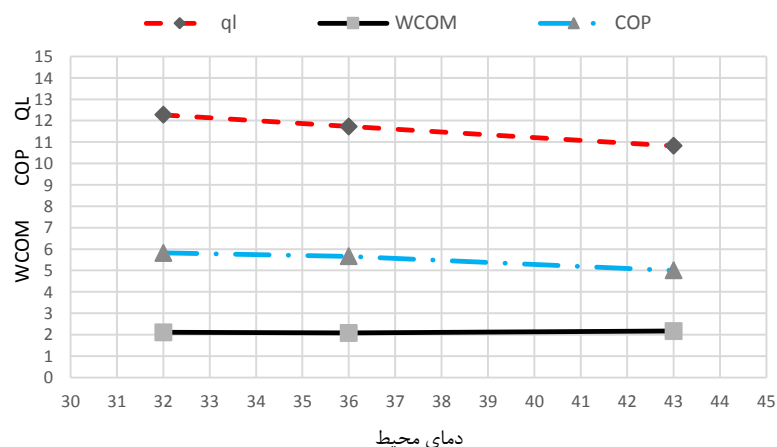


شکل ۵: دیاگرام p-h در دمای ۳۶ °C

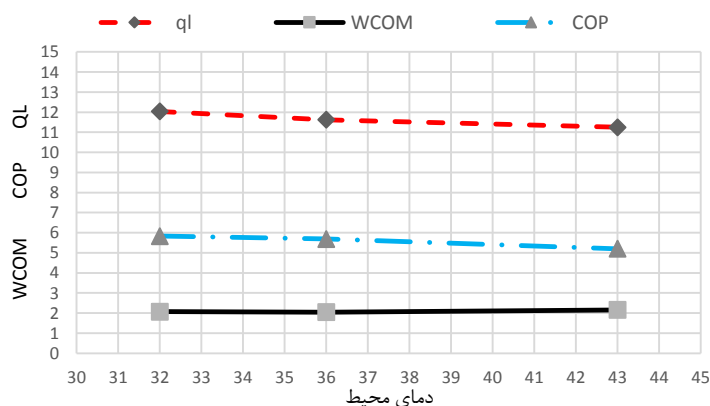
#### ۵- بحث و بررسی نتایج

نمودارهای ۶ و ۷ تغییرات ضریب عملکرد، ضریب سرمایش و کار کمپرسور نسبت به دمای محیط را در سه آزمایش انجام شده در دماهای (°C) ۳۲ ساعت ۷ صبح، (°C) ۴۳، ساعت ۱۵ بعدظهر، (°C) ۳۶، ساعت ۲۳ شب برای حالت سیکل معمولی و سیکل خورشیدی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در دماهای صبح و شب تغییرات چندانی در عملکرد سیکل در حالت معمولی و خورشید ایجاد نشده است. بنظر می‌رسد کلکتور خورشیدی در زمان‌های فوق گرمای کافی برای رسیدن به دمای ذوب pcm را از نور خورشید جذب نمی‌کند. دلیل آن کمتر بودن تابش مستقیم آفتاب می‌باشد. از اینرو به بررسی آزمایش در ساعت ۱۵ (°C) ۴۳ که تغییرات بیشتری نسبت به دو آزمایش دیگر داشته است می‌پردازیم.

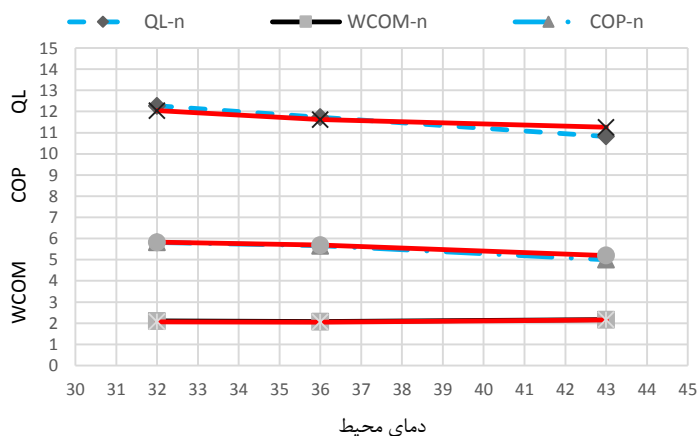
با افزایش دمای هوا، ضریب عملکرد و ضریب سرمایش روند نزولی و کار کمپرسور تقریباً ثابت می‌باشد. ولی طبق نتایجی که در نمودار ۸ نشان داده شده است شیب ضریب عملکرد و ضریب سرمایش در سیستم خورشیدی در مقایسه با سیستم معمولی در دمای (°C) ۴۳ کمتر نزول یافته و در سطح بالاتری نگه داشته می‌شود که دلیل آن افزایش ضریب عملکرد و ضریب سرمایش در سیستم خورشیدی نسبت به سیستم معمولی است.



شکل ۶: تغییرات سیکل معمولی بر حسب دمای محیط



شکل نمودار ۷: تغییرات سیکل خورشیدی برحسب دمای محیط



شکل نمودار ۸: مقایسه تغییرات سیکل خورشیدی و معمولی برحسب دمای محیط

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تجربی تأثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده pcm در عملکرد یک سیکل تبرید تراکمی خورشیدی پرداخته شد. بررسی نتایج داده‌های تجربی در ساعت ۱۵ (بیشینه دما) نشان می‌دهد که با استفاده از کلکتور خورشیدی همراه با pcm در سیستم خورشیدی نسبت به سیستم معمولی ظرفیت سرمایش نسبت به حالت سیکل معمولی افزایش یافته و در نهایت این موضوع باعث افزایش ضریب عملکرد سیکل می‌شود ولی تأثیر چندانی در توان مصرفی کمپرسور ایجاد نمی‌کند. از طرفی نتایج آزمایشات بدست آمده در ساعت ۷ صبح و ۲۳ شب (کمینه دما) نشان می‌دهد که کلکتور خورشیدی تأثیر چندانی در کارکرد و عملکرد سیستم نخواهد داشت.

#### ۶-۱- جمع‌بندی

در این مقاله تأثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده pcm در عملکرد یک سیکل تبرید تراکمی خورشیدی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج به‌دست آمده در این تحقیق در ساعت ۱۵ به طور خلاصه به صورت زیر بیان می‌شوند.

(۱) ضریب عملکرد سیستم معمولی در مقایسه با سیستم خورشیدی با افزایش دمای مبرد در خروجی کمپرسور از ۵ به ۵/۲ (در حدود ۳/۸۴۶٪) افزایش می‌یابد.

(۲) ضریب سرمایش سیستم معمولی در مقایسه با سیستم خورشیدی با افزایش دمای مبرد در خروجی کمپرسور از ۱۰/۸۲ به ۱۱/۲۵۱ (حدود ۳/۸۳٪) افزایش می‌یابد.

۳) کار کمپرسور سیستم معمولی در مقایسه با سیستم خورشیدی با افزایش دمای مبرد در خروجی کمپرسور از ۲/۱۶۷ به ۲/۱۶ (حدود ۰/۳۲٪) کاهش می یابد.

## مراجع

- ۱- اقتداری، هاشم، طراحی، ساخت و ارزیابی عملکرد کندانسور تبخیری برای کولرهای گازی دو تکه، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، شهریور ۸۷
- ۲- بخشی پور و همکاران، بررسی عملکرد سیکل تبرید تراکمی با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCM)، پنجمین کنفرانس بین المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی
- ۳- بازوند، ا.، بررسی پارامترهای عملکردی سایکلون‌های جداکننده گازی، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، مهر ۹۰
- ۴- بهسرشت، ا.، تحلیل تجربی عملکرد یک سیستم تهویه مطبوع هیبریدی خورشیدی، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه چمران، مهر ۹۱
- ۵- جعفر کاظمی، ف.، ۱۳۸۸، کتاب تبرید و اصول و روش ها، چاپ اول، انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب
- ۶- حاج سقطی، ا.، جعفری، ا.، اصول تبرید، طراحی و محاسبات سیستم های سردکننده، تألیف، روی جی. دوسات، چاپ هشتم، تهران، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۸
- ۷- حاجی دولو، ا.، ارزیابی سرمایه‌ی تبخیری برای انتقال گرما در کندانسور کولرهای گازی، نشریه مهندسی دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، سال ۲۵، شماره ۱، اسفند ۸۵
- ۸- حاجی دولو، ا.، بررسی تأثیر استفاده از کندانسور تبخیری به جای کندانسور هوایی در عملکرد کولرهای گازی، نشریه مهندسی دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، سال ۲۲، شماره ۲، اسفند ۸۲
- ۹- فاطمه، جعفری، ذخیره سازی انرژی با استفاده از مواد (PCM)، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه سمنان، مهر ۹۰
- ۱۰- مسعودی و همکاران، مروری بر مواد تغییر فاز دهنده (PCM) به عنوان منبع ارزشمند انرژی، پنجمین کنفرانس انرژیهای تجدید پذیر، پاک و کارآمد، اسفند ۹۲
- ۱۱- مقیمان، م.، مهندسی تهویه مطبوع و حرارت مرکزی، چاپ سوم، مشهد، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۵
- ۱۲- ویسی، ف.، ا.، حاجی دولو، دل سازی و شبیه سازی سیکل تبرید تراکمی کولر گازی و ارزیابی ضریب عملکرد آن تحت شرایط محیط مختلف، مجله علمی و پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت ۱۳۹۱
- 13- Alexis, G.K., Karayiannis, E.K., "A solar ejector cooling system using refrigerant 134a in the Athens", Technical Note, Renewable Energy, Vol. 30, 2005, pp. 1457-1469
- 14- Andrén L., Solenergi Praktiska tillämpningar i bebyggelse, 2<sup>nd</sup> ed., Stockholm, 2001: AB Svensk Byggtjäns ISBN 91-7332-967-3
- 15- Bergander, M., Butrymowicz, D., Karwacki, J., Wojciechowski, J., "application of two phase ejector as second stage compressor in refrigeration cycles", World conference on experimental heat transfer, Fluid mechanics and thermodynamics, Krakow, Poland, No. 7, 2009, 2237-2244
- 16- Badescu, V., "Model of a solar-assisted heat-pump system for space heating integrating a thermal energy storage unit", Energy and Buildings, Vol. 34, 2002, pp. 715-726
- 17- Badescu, V., "First and second law analysis of a solar assisted heat pump based heating system", Energy Conversion and Management, Vol. 43, 2002, pp. 2539-2552

- 18- Caglar, A., Yamali, C., “Performance analysis of a solar-assisted heat pump with an evacuated tubular collector for domestic heating”, *Energy and Buildings*, Vol. 54, 2012, pp. 22-28
- 19- Dikici, A., Akbulut, A., “Performance characteristics and energy-exergy analysis of solar-assisted heat pump system”, *Building and Environment*, Vol. 43, 2008, pp. 1961-1972
- 20- Duffie, J. W., Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Printed in The United States of America, 2006
- 21- Ersoy, H.K., Yalcin, S., Yapici, R., Ozgoren, M., “Performance of a solar ejector cooling-system in the southern region of Turkey”, *Applied Energy*, Vol. 84, 2007, pp. 971-983
- 22- Guo, J., Shen, H.G., “Modeling solar-driven ejector refrigeration system offering air conditioning for office buildings”, *Energy and Buildings*, Vol. 41, 2009, pp. 175-181
- 23- Hernández, J.I., Best, R., Dorantes, R.J. and Estrada, C.A., “Study of a Solar Booster Assisted Ejector Refrigeration System With R134a”, *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, Vol. 127, 2005, pp. 53-59
- 24- Hernández, J.I., Dorantes, R.J., Best, R., Estrada, C.A., “The behavior of a hybrid compressor and ejector refrigeration system with refrigerants 134a and 142b”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, 2004, pp. 1765-1783
- 25- Huang, B.J., Wu, J.H., Hsu, H.Y., Wang, J.H., “Development of hybrid solar-assisted cooling/heating system”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, 2010, pp. 1643-1650
- 26- Hugh, W., Coleman, W., Glenn, S., *Experimentation, validation and uncertainty analysis for engineers*, 3<sup>rd</sup> Ed., John Wiley & Sons, New Jersey, 2009
- 27- Kim, D.S., Infante Ferreira, C.A., “Solar refrigeration options—a state-of-the-art review” *International Journal of Refrigeration*, Vol. 31, 2008, pp. 3-15
- 28- Kaygusuz, K., “Experimental and theoretical investigation of a solar heating system with heat pump”, *Renewable Energy*, Vol. 21, 2000, pp. 79-102
- 29- Kuang, Y.H., Wang, R.Z., “Performance of a multi-functional direct-expansion solar assisted heat pump system”, *Solar Energy*, Vol. 80, 2006, pp. 795-803
- 30- Khalaji Assadi, M., Gilani, *Design Solar Hybrid Air Conditioning Compressor System Article in MATEC Web of Conferences*, January 2016
- 31- Norton, B., “Solar Energy Thermal Technology”, Springer Verlag, Germany, 1992
- 32- Pridasawas, W., *Solar-driven refrigeration systems with focus on the ejector cycle*, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2006
- 33- Rona, N., *Solar Air- Conditioning Systems Focus on components and their working principles*, Ebook-Edition, Göteborg, Sweden, Chalmers University of Technology, 2004
- 34- Rabl, A., “Active solar collectors and their applications”, Oxford University Press Inc, USA, 1985
- 35- Twidell, J., Weir, T., “Renewable Energy Resources”, Great Britain, E&FN Spon, 1998
- 36- <https://www.tges.ir>
- 37- <https://www.solarkar.ir>

## Experimental investigation on the effect of phase change materils (PCM) in solar compression refrigeration cycle efficiency

Seyed Moslem Moosavi<sup>1</sup>, MohammadReza Saffarian<sup>2\*</sup>

1Department of Mechanical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran  
2 Department of Mechanical Engineering, Chamran University, Ahvaz, Iran

Received: August 2020, Accepted: September 2020

### Abstract

Saving energy is one of the most important challenges of today's world. Reducing electrical energy consumption in compressed air systems is one of the essential requirements for designing these systems. When using domestic air conditioners (dual air conditioners) in very hot areas (Khuzestan) their performance decreases and electric current consumption increases. Therefore, the use of new and renewable energies such as solar energy can play a significant role in reducing energy consumption. In this plan, the plane plate solar collector, which contains PCM, is placed in the compressed air compression and condenser refrigeration cycle, and by obtaining the parameters of pressure and temperature at different points of the cycle, and comparing it with the ordinary mode The refrigeration cycle (no collector), compressor work, cooling capacity and performance factor are calculated and investigated. In the same way, the data is synchronized in the normal state and in the solar system at three different times (at 7 am, 15 o'clock, and 23 o'clock). The experimental results show that at the maximum temperature (at 15 o'clock), with a rise (6.3°C), the refrigerant temperature of the collector output, the thermodynamic characteristics of the improved system, such that the cooling coefficient from 10.82 to 11.21 and the coefficient of cycle performance From 5 to 5.2 was increased by %3.83 and %3.84 and the compressor power was from 167.2 to 160.2 which decreased by about 0.32%. Moreover, due to the lack of adequate sunlight and proper collector heat absorption in the experiments at 23 o'clock and 7 o'clock, there was little effect on the thermodynamic characteristics of the conventional and solar cycles.

**Key words:** Condensation refrigeration cycle solar collector, phase change material (pcm)

\*corresponding author: moslem\_mousavi@yahoo.com