





mme.modares.ac.ir

# مطالعه تجربی عملکرد چیلر جذبی خورشیدی با جفت کاری کربن فعال/متانول

 $^4$ شهابالدین همراهی $^1$ ، کورش گودرزی $^{2^*}$ ، محمود یعقوبی $^{8}$ ، مهراورنگ قائدی

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج، یاسوج

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج، یاسوج

3– استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز

4- استاد، شيمي، دانشگاه ياسوج، ياسوج

\* ياسوج، صندوق پستى http://www.ac.ir ،7591874934 \*

چکیدہ	اطلاعات مقاله
هدف از این کار، طراحی و ساخت یک دستگاه چیلر جذبی خورشیدی میباشد که توسط کربن فعال/ متانول عمل میکند. سیستمهای تبرید بیریز از اسار از از مراجع از مراجع از اسار از از مراجع الله بر می بیرید از مراجع می مراجع از از مراجع از مراجع	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 10 تیر 1396
پیوسته نوانایی ایجاد سرمایس به صورت مداوم را دارند. در این مقانه به بررسی نابیر میکرو دربن فعال بر عمکرد یک دستگاه چینر جدبی پیوسته پرداخته می شود. منبع گرمای این چیلر از طریق نور خورشید و توسط کلکتور سهموی مرکب که نیاز به ردیابی نور خورشید نمی باشد، تامین می-	پذیرش: 15 شهریور 1396 ارائه در سایت: 19 آبان 1396
🗌 گردد. سیستم توسط دو بستر جاذب عمل می کند که هرگاه یکی در حال جذب باشد، دیگری در حال دفع قرار می گیرد. آزمایش ها در شهر یاسوج	كليد واژگان:
طی سه روز مختلف و به ازاء سه دمای آب گرم ورودی C ،38°C و C°30 به چیلر در ماه بهمن صورت پذیرفته است. دمای میانگین	جذب سطحى فيزيكي
محیط در طول آزمایش C°18 میباشد. نتایج تجربی نشان داد که به ازاء انرژی کل ورودی <sup>2</sup> -13MJm و دمای ورودی آب گرم چیلر C°38،	کلکتور خورشیدی
34°C و C°30 میانگین ضریب عملکرد دستگاه به ترتیب 12.3، 10.3 و 10 درصد و میانگین توان مخصوص دستگاه به ازاء دماهای اشاره	كربن فعال
شده به ترتيب 65Wkg <sup>-1</sup> و 50Wkg <sup>-1</sup> بهدست میآمد.	ضريب عملكرد

# Experimental study on the performance of a solar adsorption chiller with working pair of activated carbon / Methanol

Shahab Edin Hamrahi<sup>1</sup>, Koorosh Goudarzi<sup>1\*</sup>, Mahmood Yaghoubi<sup>2</sup>, Mehrorang Ghaedi<sup>3</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

3- Department of Chemical, Yasouj University, Yasouj, Iran

\* P.O.B. 7591874934, Yasouj, Iran, kgoudarzi@yu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION	ABSTRACT
Original Research Paper Received 01 July 2017 Accepted 06 September 2017 Available Online 10 November 2017	The goal of this research is to design and build a solar adsorption chiller operated by activated carbon / methanol. Continuous refrigeration systems are able to produce cooling continuously. This paper examines the effect of activated carbon particles on the performance of a continuous adsorption chiller device. The source of this chiller is through sunlight and supplied by a parabolic collector that does not
Keywords: Physical adsorption solar collector active carbon performance factor	need to track sunlight. The system operates with two adsorbent beds that, when one is adsorbed, the other is desorbed. The experiments were carried out in Yasuj during three different days in the month of Bahman for three hot water input to the chiller 38°C, 34°C and 30°C. The average ambient temperature during the experiment is 18°C. Experimental results shows that for the total energy input, 13MJm <sup>-2</sup> , the average performance factor of the chiller is when the inlet temperature of the hot water of the chiller is 38°C, 34°C and 30°C. For Previous temperatures the average specific cooling power of the device was obtained at 88Wkm <sup>-1</sup> of 50Wkm <sup>-1</sup> and 50Wkm <sup>-1</sup> respectively.

#### 1- مقدمه

یکی از روشهای تبرید که در سالهای اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. سیکل تبرید جذب سطحی میباشد که براساس جذب و احیای یک ماده جذب شونده در مواد جاذب که جامد متخلخل هستند کار میکنند. از مزایای سیستمهای تبرید جذبی سطحی خورشیدی ساخت، نصب و راه اندازی آسان، تعمیر و نگهداری راحت، عدم تولید آلودگی صوتی، استفاده از منبع پاک و غیرآلاینده، عمر طولانی، عدم وجود قطعات متحرک، قیمت مناسب و قابل استفاده برای مناطق دور از دسترس برق میباشد.

جذب سطحی به عنوان مهمترین فرآیند این گونه سیستمها فرآیندی است که در آن یک یا چند جزء از مایع یا گاز روی سطح جامد جذب با توجه به مشکلات سوختهای فسیلی از قبیل آلودگی زیست محیطی، عدم تجدیدپذیری و … نیازمند منابعی جدید برای تولید انرژی هستیم که انرژی خورشیدی میتواند به عنوان یکی از منابع انرژی نو جایگزین بسیار مناسبی باشد. روشهای گوناگونی برای استفاده از این انرژی پاک وجود دارد که یکی از کاربردهای آن ایجاد برودت توسط سیستمهای تبرید و استفاده از آن در تهویه مطبوع منازل و حتی کاربردهای صنعتی میباشد.

در میان روشهای بسیاری که برای ایجاد برودت وجود دارد، دو روش تراکم بخار و جذبی کاربرد بیشتری در صنعت تبرید و تهویه مطبوع دارند.

#### Please cite this article using:

می شود. در این فرآیند، معمولاً ذره جذب شونده فقط وارد حفرات جاذب شده و بر روی سطح آن ها می نشیند. عملیات جذب سطحی از قابلیت جذب برخی از مواد در برابر جامدات استفاده می کند. بدین صورت وقتی که محلول ها (که می توانند جامد، مایع یا گاز باشند) در برابر سطح جامدات واقع می شوند اتم ها، یون ها و یا مولکول های آن ها جذب سطح جامد خواهند شد. در واقع جذب سطحی چسبندگی اتم، یون یا مولکول های گاز یا مایع به سطح می باشد.

اسلام و هوریموتو [1] بر روی عملکرد ترمودینامیکی یک سیستم جذبی خورشیدی مطالعه کردند. نتایج آنها بیانگر این است که استفاده از کلکتور خورشیدی که درون آن از گرانول کربن فعال پر شده باشد، توانایی تولید 3 کیلوگرم یخ در یک شبانه روز را دارد. بوزیفور و همکاران [2] به بررسی تجربی یک سیستم خنک کننده جذبی خورشیدی با جفت کاری سیلیکاژل/ آب پرداختند. نتایج آن ها بیانگر این است که ضریب عملکرد دستگاه بین 0.083 تا 0.09 تغيير مىكند. سانگ و همكاران [3] يک سيستم يخساز جذبی را که جفتکاری آن کربن فعال/متانول میباشد را طراحی و ساختند. آنان بیان کردند که اگر دمای دفع °94 باشد، ظرفیت تولید یخ روزانه 5.1kg کیلوگرم و ضریب عملکرد سیستم 0.0322 است. هونگ یو و همکاران [4] تاثیر قطر جاذب را بر روی قدرت سرمایش سیستمهای جذبی مورد مطالعه قرار دادند. آنان بیان نمودند که کارایی انتقال جرم در بستر جاذب زمانی بهبود خواهد یافت که افت فشار کم گردد. سانتوری و همکاران [5] یک یخساز جذبی خورشیدی که با ترکیب کربن فعال/ متانول کار میکند را تست کردند. ضریب کارایی سیستم در طول یک روز را 0.08 بهدست آوردند. دمير و همكاران [6] مكانيزم انتقال حرارت و انتقال جرم را در يك بستر حلقوی مورد مطالعه قرار دادند. آنها بیان کردند که در هنگام جریان داشتن مبرد از لایه های جاذب، نفوذپذیری بر روی عملکرد انتقال جرم و افت فشار، تاثیر گذار است. لی و همکاران [7] کربن فعال/متانول و کربن فعال/اتانول را بهعنوان دو نمونه از جفت کاری، در سیستم یخساز جذبی خورشیدی را آزمایش کردند. نتایج آن ها نشان داد که در شرایط محیطی و تابش یکسان، ترکیب کربن فعال/متانول توانایی تولید یخ را دارد در صورتی که ترکیب كربن فعال/اتانول قادر به انجام این كار نیست. آنیوانو و همكاران [8] یک یخچال جذبی خورشیدی که جاذب آن کربن و جذب شونده آن متانول مىباشد را طراحى و ساختند. آنها بازده مفيد بين 0.056 تا 0.093 و بازده کلی بین 0.056 تا 0.07 را بهدست آوردند. هیلدبرنت و همکاران [9] یخچال خورشیدی با جفت کاری سیلکاژل/آب را طراحی و ساختند. چگالنده این یخچال با جابجایی طبیعی خنک میشد و اواپراتور شامل 40 لیتر آب بود. آنها ضريب عملكرد دستگاه را 0.19 محاسبه نمودند.

از خصوصیات ترکیب کربن فعال و متانول این می باشد که عمل جذب در دمای پائین صورت می پذیرد و همچنین در فرآیند دفع نیاز به حرارت بالا نمی باشد. همان طور که بیان شد تاکنون مطالعات زیادی بر روی سیستمهای جذبی خورشیدی صورت گرفته است. نتایج مطالعات بیانگر ضریب عملکرد پائین این سیستمها می باشد. پژوهشگران قبلی در مطالعات خود از اندازه جاذب در حد میکرومتری استفاده نکرده بوده اند. در این مقاله در بستر جذب از میکروکربن فعال استفاده شده است. برای آن که دستگاه بتواند به طور مداوم عمل تبرید را انجام دهد از دو بستر جاذب استفاده شده است. برای افزایش سرعت دفع مبرد از جاذب، بسترهای جذب تحت تاثیر مستقیم تابش آفتاب روی خط کانونی دو کلکتور سهموی مرکب قرار گرفته شده است. میکروکربن

فعال در کسرهای حجمی مختلف به جاذب افزوده شده و آزمایشها در دماهای مختلف صورت پذیرفته است.

## 2- طراحی دستگاہ چیلر جذب سطحی خورشیدی

"شکل 1" چیلر جذب سطحی در دست بررسی را نشان میدهد. این چیلر از چهار قسمت اصلی شامل بسترهای جاذب، کلکتور سهموی مرکب، چگالنده و اواپراتور تشکیل شده است. مواد جامد بستر متخلخل بوده، و قادرند با گرم شدن سیال عامل را از سطوح آزاد خود دفع کرده و با سرد شدن سیال را جذب کنند. به این ترتیب سیال عامل بدون صرف هیچگونه توان مکانیکی در سیکل به گردش در میآید و بستر جاذب به عنوان کمپرسور حرارتی عمل می کند. از یک کویل مسی درون یک محفظه خلاء به عنوان اواپراتور استفاده شده است.

هر بستر جاذب شامل 200 گرم کربن فعال میباشد که درون یک لوله مسی به قطر بیرونی 3.5 سانتی متر، ضخامت 1 میلی متر و طول 70 سانتی -متر تعبیه شده است. این لوله های حاوی کربن فعال بر روی خط کانونی کلکتور سهموی مرکب قرار گرفته است. کلکتور خورشیدی، انرژی خورشید را بر روی خط کانونی متمرکز می کند که منجر به گرم شدن کربن فعال می -گردد. از یک لوله ی شیشه ای با قطر بیرونی 5.6 سانتی متر جهت خنک کردن بستر جاذب، بعد از اتمام مرحله دفع استفاده می گردد. کلکتور استفاده شده در این دستگاه از نوع سهموی مرکب میباشد. در این نوع از کلکتورها نیاز به به این که بازتاب تابش رسیده به دهانه کلکتور بر روی سطح کوچک (لوله جذب کننده) جمع می گردد سطح اتلاف انرژی کاهش مییابد. چگالنده ساتفاده شده در این دستگاه از جنس مس که قطر داخلی آن 9 میلی متر و طول آن 7 متر میباشد. در چگالنده بخار متانول دفع شده از بستر جاذب، چگالیده می شود و توسط هوای محیط خنک می گردد. یکی دیگر از اجزاء



**شکل 1** چیلر جذبی خورشیدی با دو بستر جاذب

محفظه اواپراتور، لوله ورودی آب گرم، لوله خروجی آب سرد، لولههای خروج بخار متانول، فشارسنج و شیر ایجاد خلاء نصب شده است. آب گرم چیلر از قسمت بالای اواپراتور وارد یک لوله مسی مارپیچ می شود و حرارت خود را به قطرات متانول مایع که بر روی این سیم پیچ جریان دارد می دهد. آنگاه آب جاذب، ورودی و خروجی چگالنده و دمای مخزن آب گرم استفاده می شود. از 4 فشارسنج خلاء (1- تا صفر بار) برای اندازه گیری فشار در اواپراتور، بسترهای جاذب و مخزن ذخیره متانول استفاده می شود. از یک پمپ خلا مدل IB برای ایجاد خلاء در محدومی موردنیاز استفاده می شود.

جهت اندازه گیری شدت تابش نورخورشید، از یک شدت تابش سنج استفاده می شود. این دستگاه در زمان آزمایش شدت تابش نور خورشید را برحسب <sup>2</sup>-Wm اندازه می گیرد. دقت ابزار مورد استفاده در جدول 1 آورده شده است.

# 3- شرح عملکرد سیستم و چرخه جذب سطحی

"شکل 3" چرخه ترمودینامیکی چیلر جذب سطحی خورشیدی طراحی شده را نشان میدهد. این چرخه تبرید جذبی شامل 4 فرآیند زیر است:

1- فرآیند افزایش فشار و دادن حرارت در غلظت ثابت زیاد (فرآیند گرمایش غلظت ثابت) (1 به 2)

2- فرآیند دفع و چگالش در فشار ثابت چگالنده (فرآیند گرمایش فشار ثابت
 3-2 (2 به 3)

3- فرآیند کاهش فشار و دفع حرارت در غلظت ثابت کم (فرآیند سرمایش غلظت ثابت) (3 به 4)

4- فرآیند جذب سطحی و تبخیر در فشار ثابت اواپراتور (فرآیند سرمایش فشار ثابت) (4 به 1)



Fig. 2 Evaporator and its components

شکل 2 اواپراتور و اجزای آن

## جدول 1 دقت ابزار اندازه گیری

Table 1 precision of measuring instruments		
دقت ابزار	ابزار اندازهگیری	
0.005%	دیتالاگر 8 کاناله دما	
0.025°C	ترموكوپل	
1.6%	گيج فشار	
1Wm <sup>-2</sup>	شدت تابش سنج	

خنک شده از خروجی اواپراتور که در پائین قرار دارد، خارج می گردد. برای اندازه گیری دما، فشار و شدت تابش نور خورشید نیازمند ابزار اندازه گیری مناسب می باشد. از یک دیتالاگر 8 کاناله به همراه 8 عدد ترموکوپل نوع K جهت اندازه گیری دما در ورودی، خروجی و محفظه اواپراتور، بسترهای در مرحله اول (1-2) فشار اولیه در جاذب برابر فشار اواپراتور و دمای آن یکسان و برابر آب ورودی چیلر میباشد. زمانی که از طریق انرژی خورشیدی به جاذب گرما داده می شود فشار و دمای بستر جذب سطحی افزایش می یابد. این فرآیند گرم شدن تا زمانی که فشار جاذب به مقداری برسد که جذب شونده را دفع کند، ادامه پیدا خواهد کرد. در این حالت فشار جاذب برابر فشار چگالنده خواهد بود (نقطه 2). طی مرحله (2-3) شیر باز شده و حرارت ناشی از انرژی خورشید منجر به دفع جذب شونده (بصورت بخار) از جاذب می گردد. بخار جذب شونده بطرف چگالنده جریان می یابد و در چگالنده چگالش می یابد. در چگالنده، بخار مبرد حرارت محسوس و گرمای نهان خود را از دست میدهد و در فشار چگالنده دمای آن به دمای چگالش میرسد. سپس مبرد چگالیده شده، در یک مخزن ذخیره می گردد. در ادامه فرآیند دفع، جاذب کماکان به دفع مبرد از سطح خود ادامه می دهد و فشار درون بستر به فشار چگالنده خواهد رسید.

شایان ذکر است که فرآیندهای 1، 2 و 3 برابر با همان فرآیند تراکم در سیستمها تراکمی میباشد. تا زمانی که بستر گرم میشود و دما افزایش مییابد تا فشار در فشار چگالنده، ثابت نگه داشته شود، فرآیند دفع بطور پیوسته ادامه پیدا خواهد کرد. این فرآیند تا وقتی که یکی از شرایط زیر برقرار شود ادامه پیدا خواهد کرد:

1- دمای بستر جذب سطحی به بیشترین مقدار قابل دسترس خود که در آن از لحاظ شیمیایی ناپایدار می گردد، برسد.

2- دمای جاذب به دمای منبع گرمایی برسد که در اینصورت دیگر جذب رخ نخواهد داد.

هرگاه یکی از دو شرط فوق رخ دهد، آنگاه شیر بسته خواهد شد که در اینصورت ارتباط بستر جذب با چگالنده قطع میگردد و فرآیند سرمایش بستر آغاز میگردد. در نقطه (3) زمانی که جاذب به حداکثر دمای خود میرسد، جاذب شروع به سرد شدن میکند. ارتباط کلکتور از چگالنده قطع میگردد و دمای آن افت پیدا میکند. خنک شدن جاذب منجر به افت فشار در جاذب میشود. این افت فشار تا زمانی که فشار جاذب به فشار اواپراتور



**Fig. 3** Clapeyron diagram of adsorption refrigeration cycle [10] شکل 3 دیاگرام کلاپیرون چرخه تبرید جذبی [10]

برسد ادامه مییابد مرحله (3-4). در حالت 4 شیر باز میگردد و مبرد مایع که در جذب کننده ذخیره شده بود از شیر اختناق عبور میکند. با توجه به فرآیند اختناق، مبرد مایع قبل از ورود به اواپراتور، توسط تبخیر مقداری مایع بهخوبی سرد میگردد.

نقطه (4) مبرد مایع پمپ شده، گرما را از اواپراتور می گیرد و تبخیر می گردد. هنگامی که فشار به فشار در درجه حرارت اواپراتور برسد، شیر باز شده کلکتور به اواپراتور وصل می گردد و بخار مبرد از اواپراتور به جاذب منتقل می شود (مرحله 4-1) و منجربه سرمایش در یک محفظه بسته می گردد. مراحل فوق روند جذب سطحی مبرد درون یک جاذب با تولید تبرید در اواپراتور می باشد [12,11].

# 4- روابط حاكم

از روابط مورد نیاز جهت تحلیل عملکرد یک سیستم تبرید، توان مخصوص آن میباشد. توان مخصوص تبرید عبارت است از نرخ حرارتی گرفته شده از آب به جرم جاذب [13].

$$SCP = \frac{\dot{m}c_{\rm p,w}(T_{\rm hot} - T_{\rm chilled})}{m_{\rm ads}t_{\rm sycle}} \tag{1}$$

ضریب عملکرد چیلر جذب سطحی نسبت سرمایش متوسط تولیدی به حرارت ورودی سیستم است که براساس رابطه (2) محاسبه می شود [14].  $COP = \frac{Q_{evap}}{Q_{mun}}$ (2)

به دلیل متناوب بودن دمای آب سرد خروجی از اواپراتور، توان تبرید سیکل نیز به طور متناوب تغییر میکند. به همین دلیل برای مشخص کردن توان تبرید بهعنوان اصلیترین ویژگی چیلر جذب سطحی، میتوان از رابطه (3) استفاده کرد [13]:

 $Q_{\text{evap}} = \dot{m}c_{\text{p,w}}(T_{\text{hot}} - T_{\text{chilled}})t_{\text{sycle}}$  (3) حرارت جذب شده توسط کلکتور خورشیدی از طریق رابطه (4) محاسبه میشود [2]:

$$Q_{\rm sun} = \int_{t_1}^{t_2} I(t) A_c dt \tag{4}$$

# 5- اعتبارسنجي

برای بررسی صحت نتایج آزمایش نیاز است نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از یک نمونه تجربی مقایسه شود. لذا اعتبارسنجی این مطالعه با تطبیق شرایط عملکردی سیکل با نمونه آزمایشگاهی فادار و همکارانش [15] انجام شده است. آنها از دو بستر جاذب با جفت کاری کربن فعال/اتانول برای راه اندازی سیستم تبرید پیوسته که حرارت خود را از یک کلکتور سهموی تامین میکرد، استفاده کردند. در کار آنها مساحت کلکتور 2008 و انرژی دریافت شده خورشیدی 17.5MJm<sup>-2</sup> و دبی آب ورودی به اواپراتور I<sup>-1</sup> میباشد. آنها تاثیر دمای منبع آب گرم که از تا تغییر میکند را بر روی توان مخصوص تبرید بررسی کردند.

در "شکل 4" تغییرات میانگین توان مخصوص تبرید، برای یک چرخه در مدت زمان نیم سیکل کاری برای نمونه تجربی فادار و همکاران و همچنین کار انجام گرفته در این پژوهش مشاهده میشود. همانطور که از شکل پیداست نتایج آزمایش صورت گرفته با کار تجربی فادار و همکاران تطابق خوبی دارد.

# 6- تحليل نتايج

آزمایشهای صورت گرفته در این بخش در شهر یاسوج و در ماه بهمن سال 1395 انجام شد. چیلر مورد نظر در هوای بیرون و جایی که در طول روز هیچ سایهای بر روی آن نباشد و بتواند تابش مستقیم نور خورشید را دریافت نماید، مستقر و مورد مطالعه قرار گرفته است. کلکتور را به سمت نور خورشید تنظیم کرده، فشار سیستم توسط پمپ خلاء تا فشار موردنیاز پائین آورده می شود.. دبی آب گرم ورودی به اواپراتور توسط شیر کنترل که قبل از اواپراتور قرار داده شده است.<sup>1</sup>-60mlmin تنظیم شده است. با باز شدن شیر آب گرم ورودی به اواپراتور، آب از درون حلقههای مارپیچ اواپراتور عبور کرده و از خروجی حلقه مارپیچ که در قست پائین اواپراتور قرار گرفته شده است خارج میگردد. در حین این که آب درون اواپراتور شروع به جریان پیدا می کند، شیر ورودی متانول مایع به اواپرتور باز شده و متانول بر روی کویل مارپیچ مسی جریان مییابد. متانول مایع، حرارت آب را میگیرد و تبخیر میشود که منجر به خنک شدن آب خروجی از اواپراتور میشود.

نقطه جوش متانول در فشار اتمسفر دمای 2°64.7 میباشد [16]. برای آن که متانول بتواند در دمای پایین تری تبخیر شود، باید فشار آن را پایین آورد. با استفاده از پمپ خلا فشار دستگاه پایین آورده شده است. حداقل فشار خلا که اواپراتور به آن میرسد 20kPa میباشد. با در نظر گرفتن افت فشار در اواپراتور، اولین فشار کاری طبق جدول فشار بخار متانول 20kPa در نظر گرفته میشود (شکل 5). دمای تبخیر متانول در این فشار 2°30 است به همین جهت دمای آب گرم ورودی به اواپراتور در آزمایش اول 2°30 در گرفته میشود. برای مقایسه نتایج، دو آزمایش دیگر با دماهای 2°45 و 3°38 صورت گرفته است.

عملکرد برودتی چیلر به ازاء سه دمای مختلف ورودی (2°30، 2°44 و 2°38) به اواپراتور مورد ارزیابی قرار گرفته است. بستر جاذب را با میکرو کربن فعال پر کرده و آزمایش در یکی از دماهای فوق صورت میگیرد. در هر آزمایش نمودار تغییرات دمای آب خروجی از اواپراتور، دمای بسترهای جاذب، دمای محیط، تغییرات فشار در اواپراتور و بسترهای جاذب رسم شده است. همچنین با کمک روابط، حرارت گرفته شده در اواپراتور و حرارت ورودی به کلکتور خورشیدی را بدست آورده سپس با بهدست آوردن مقدار تشعشع روزانه توسط شدت تابش سنج، بازده و توان مخصوص تبرید روزانه محاسبه شده است. تغییرات شدت تابش نور مستقیم خورشید و دمای محیط در طول روز آزمایش در "شکل 6" نشان داده شده است. همان طور که پیداست شدت تابش به مرور زمان افزایش می یابد تا در هنگام ظهر به مقدار بیشینه خود



Fig. 4 Comparison of specific cooling power with a Experimental sample

**شکل 4** مقایسه توان مخصوص تبرید با یک نمونه آزمایشگاهی



Fig. 5 Vapor pressure change of methanol relative to temperature [17] شكل 5 تغييرات فشار بخار متانول نسبت به دما [17]



Fig. 6 Variation of solar radiation and ambient temperature شکل 6 تغییرات شدت تابش نور خورشید و دمای محیط در مدت زمان آزمایش

# 1-6- نتایج به ازاء دمای آب گرم ورودی C°38 به اواپراتور

در این قسمت آب گرم ورودی به اواپراتور 2°38 تنظیم می گردد. فشار مورد نیاز جهت تبخیر متانول درون اواپراتور در این دما 30kPa میباشد. با درنظر گرفتن افت فشار ناشی از تبخیر متانول، فشار اولیه درون اواپراتور 25kPa در نظر گرفته میشود. نمودار تغییرات دما برحسب زمان در خروجی از اواپراتور، بستر 1 و بستر 2 در "شکل 7" نشان داده شده است. اطلاعات این نمودار توسط دیتالاگر اندازه گیری شده است که دمای هر دو بستر 1 و 2 را بصورت تناوبی در هر چرخه، طی یک روز آزمایش نشان میدهد. دمای دفع متانول از کربن فعال بین 2°60 تا 2°80 میباشد. بنابراین در این پژوهش اجازه داده میشود تا در دمای 2°70 شیر خروجی از بستر کربن فعال باز شود.

همچنین اجازه داده میشود تا بستر به دمای بالاتر از C°100 برسد. بعد از این که شیر بین اواپراتور و بستر 1 باز شد عمل جذب صورت می گیرد و پس از اتمام عمل جذب، شیر بین اواپراتور و بستر 1 بسته شده و این بستر شروع به گرم شدن می کند. در همین حین شیر بین اواپراتور و بستر 2 باز میشود تا جذب در بستر 2 آغاز گردد.

بعد از این که بستر1 به اندازه کافی گرم شد باید دوباره خنک گردد تا



Fig. 7 Temperature changes in different parts of the chiller شکل 7 تغییرات دما در نقاط مختلف چیلر

آماده جذب در مرحله بعد گردد. همان طور که از "شکل 7" پیداست هر دو بستر در طول آزمایش به طور مرتبط گرم شده و خنک می شوند تا عملیات تبرید پیوسته در کل سیستم صورت پذیرد. در اوخر آزمایش دمای خروجی اواپراتور نسبت به اوایل آزمایش بالاتر می رود. علت این افزایش دما آن است که در طول آزمایش به مرور زمان فشار تبخیر درون اواپراتور بالا می رود که منجر به افزایش دمای تبخیر متانول می گردد و این افزایش دمای تبخیر باعث می شود تا دمای آب در خروجی از اواپراتور در اواخر آزمایش بالا رود. به ازاء دمای ورودی 2°38 میانگین دمای خروجی از اواپراتور به 29.5° می رسد.

جهت محاسبه ضريب عملكرد چيلر از رابطه (2) استفاده شده است. با توجه به این که این چیلر بهطور ضرب دری عمل می کند (یعنی هرگاه یک بستر در حال جذب متانول باشد، دیگری در حال دفع می باشد) ضریب عملكرد أن نيز بايد بهصورت متناوبي محاسبه گردد. جهت محاسبه توان تبرید در رابطه (3) دبی آب گرم ورودی <sup>1</sup>-60mlmin و ظرفیت گرمایی ویژه آب  $4200 J k g^{-1} K^{-1}$  میباشد. همچنین دمای آب گرم ورودی و دمای آب خنک شده خروجی در هر چرخه اندازه گیری می شود. با جایگذاری اطلاعات مورد نیاز در رابطه (3) میانگین توان تبرید در هر چرخه محاسبه می شود. جهت محاسبه حرارت ورودی به بسترها از رابطه (4) استفاده می شود. در این رابطه مساحت هر کلکتور <sup>2</sup>-0.19m میباشد و شدت تابش نور خورشید را با استفاده از دستگاه شدت تابش سنج اندازه گرفته و در هر چرخه میانگین آن در رابطه (4) قرار داده می شود. پس از محاسبه ضریب عملکرد چیلر در هر چرخه، نمودار آن در "شکل 8" ترسیم می گردد. همان طور که از شکل پیداست در اوایل صبح به علت پائین بودن شدت تابش نور خورشید، ضریب عملکرد دستگاه نیز پائین می باشد. در میانه روز هنگامی که شدت تابش نور خورشید افزایش پیدا می کند، ضریب عملکرد دستگاه نیز افزایش می یابد. در بعدازظهر، هنگامی که شدت تابش نور خورشید کم می شود، ضریب عملکرد دستگاه نیز پائین خواهد آمد. میانگین ضریب عملکرد در این آزمایش 12.3 درصد محاسبه شد.

# 2-6- نتایج به ازاء دمای آب گرم ورودی C°34 به اواپراتور

در این آزمایش آب گرم ورودی به اواپراتور C°34 تنظیم می گردد. فشار مورد نیاز جهت تبخیر متانول درون اواپراتور در این دما 25kPa می باشد. با درنظر گرفتن افت فشار ناشی از تبخیر متانول، فشار اولیه درون اواپراتور 23kPa در نظر گرفته شد. نمودار تغییرات دما برحسب زمان در خروجی از اواپراتور،



**شکل 8** تغییرات ضریب عملکرد نسبت به زمان

بستر 1 و بستر 2 در "شکل 9" نشان داده شده است. مدت زمان جذب و دفع چرخه اول در بستر 1 به ترتیب 30 و 20 و در بستر 2 به ترتیب 25 و 25 دقیقه همچنین بیشینه دما در بستر 1 و 2 به ترتیب 2°14.11 و 2°14.3 می باشد. با توجه به "شکل 9" بعد از این که دمای بسترها به بیشینه خود رسیدند، دمای آنها به صورت ناگهانی و خطی پائین می آید. علت آن است که برای خنک کردن بسترها از آب سرد استفاده می شود. هر دو بستر در طول آزمایش به طور مرتب گرم شده و خنک می شوند تا عملیات تبرید پیوسته در کل سیستم صورت پذیرد. به ازاء دمای ورودی 2°34 میانگین دمای خروجی از اواپر اتور به 27.8° می رسد.

"شکل 10" تغییرات ضریب عملکرد دستگاه را نسبت به زمان نشان می دهد. علاوه بر شدت تابش نور خورشید، فشار خلا نیز بر ضریب عملکرد دستگاه تاثیرگذار است کل سیستم می باشد. در آغاز آزمایش فشار پائین بوده و با توجه به این که مایع متانول قطره قطره بر روی کویل مارپیچ اواپراتور تزریق می شود، تبخیر متانول سبب افزایش فشار درون اواپراتور می شود. در اواخر آزمایش افزایش فشار محفظه اواپراتور منجر می شود تا آب درون اواپراتور به خوبی سرد نگردد که سبب کاهش عملکرد سیستم می شود. میانگین ضریب عملکرد در این آزمایش 10.3 درصد محاسبه شد.

#### نتایج به ازاء دمای آب گرم ورودی $^{\circ}\mathrm{C}$ به اواپراتور $^{\circ}\mathrm{C}$

در این قسمت آب گرم ورودی به اواپراتور 2°30 تنظیم می گردد. فشار مورد نیاز جهت تبخیر متانول درون اواپراتور در این دما 22kPa می باشد. لذا با درنظر گرفتن افت فشار ناشی از تبخیر متانول، فشار اولیه درون اواپراتور فشار آن 20kPa در نظر گرفته شد. نمودار تغییرات دما برحسب زمان در خروجی از اواپراتور، بستر1 و بستر2 در "شکل 11" نشان داده شده است. علت شکسته شدن نمودار بستر1 آن است که بعد از باز شدن شیر خروجی از بستر1، این بستر به چگالنده و مخزن ذخیره متصل می گردد و چون دمای این دو قسمت کمتر از دمای بستر1 می باشد بنابراین کمی افت دما پیدا می کند تا به تعادل برسد. به ازاء دمای ورودی 2°30 میانگین دمای خروجی از اواپراتور به 24.9°می درسد.

"شکل 12" تغییرات ضریب عملکرد چیلر را نسبت به زمان نشان میدهد. همان طور که از شکل پیداست، همانند آزمایش های قبلی در میانه روز هنگامی که شدت تابش نور خورشید در حالت بیشینه است، ضریب عملکرد دستگاه نیز بیشترین مقدار خود را دارد. این ضریب در این آزمایش 10 درصد محاسبه شد.



Fig. 9 Temperature changes in different parts of the chiller شکل 9 تغییرات دما در نقاط مختلف چیلر



Fig. 10 Performance changes over time شکل 10 تغییرات ضریب عملکرد نسبت به زمان



Fig. 11 Temperature changes in different parts of the chiller شکل 11 تغییرات دما در نقاط مختلف چیلر



# 7- نتیجه گیری

در این پژوهش یک دستگاه چیلر جذبی پیوسته با جفتکاری کربن فعال/متانول که با انرژی خورشید کار میکند، طراحی، ساخته و مورد مطالعه قرار گرفته است. برخلاف سیستمهای متناوب که فقط در طول شب عمل روز (پیوسته)، استفاده شده است. آزمایشها در سه روز مختلف و به ازاء سه دمای آب گرم ورودی 2°38، 2°34 و 2°30 صورت پذیرفته است. دمای میانگین محیط در طول آزمایش 2°18 میباشد. هدف اصلی این پژوهش بررسی تاثیر میکروکربن فعال بر روی عملکرد سرمایی چیلر مذکور میباشد. بدین منظور آزمایشها با 200 گرم میکروکربن فعال در هر بستر صورت گرفت.

نتایج آزمایشهای صورت گرفته بیانگر آن است که:

به ازاء انرژی کل ورودی <sup>2-</sup>13MJm و دمای آب گرم ورودی به چیلر C<sup>3</sup>8° ، 2°34 وC<sup>3</sup>00 میانگین ضریب عملکرد دستگاه به ترتیب 12.3، 10.3 و 10 درصد و میانگین توان مخصوص تبرید به ازاء دماهای اشاره شده <sup>1</sup>-88Wkg<sup>1</sup> ،88Wkgو<sup>1</sup> 50Wkg<sup>1</sup>

هنگامی که شدت تابش نور خورشید به بیشترین مقدار خود برسد، دستگاه بیشترین ضریب عملکرد را دارد. علت آن است که افزایش شدت تابش، باعث میشود تا متانول بیشتری از بستر کربن فعال دفع گردد این امر موجب افزایش ظرفیت جذب در مرحله جذب متانول میگردد و بالا رفتن ظرفیت جذب، ضریب عملکرد دستگاه را افزایش میدهد.

نرخ تبرید وابسته به فشار خلا درون دستگاه میباشد به همین دلیل یکی از نکات کلیدی در راهاندازی دستگاه فشار خلاء کل سیستم میباشد. در آغاز آزمایش فشار پائین میباشد با توجه به این که مایع متانول قطره قطره بر روی سیم مارپیچ اواپراتور تزریق میشود، لذا در مدت آزمایش فشار درون اواپراتور بهصورت آرام بالا میرود تا این که در اواخر آزمایش، افزایش فشار محفظه اواپراتور منجر میشود تا آب درون اواپراتور به خوبی سرد نگردد لذا باعث کاهش عملکرد سیستم میشود.

#### 8- فهرست علائم

- (Jkg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>) ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت  $c_p$ 
  - COP ضريب عملكرد
  - I شدت تابش نور خورشید (Wkg<sup>-1</sup>)
    - (kJkg<sup>-1</sup>) گرمای نهان تبخیر  $L_0$ 
      - m جرم (kg)
      - ش دبی جرمی (kgs<sup>-1</sup>)
      - Q انرژی حرارتی (kJ)
    - SCP توان مخصوص تبريد (Wkg<sup>-1</sup>)
      - T دما (<sup>°</sup>C)
      - t زمان (s)

#### زيرنويسها

جاذب	ads
كلكتور	с
خنک	chilled
چگالنده	cond
اواپراتور	evap
گرم	hot
مبرد	ref
خورشيد	sun
چرخه	sycle

# 9- مراجع

- P. Islam, M. Tetsuo, Thermodynamic performances of a solar driven adsorption system, *Solar Energy*, Vol. 139, pp. 266-277, 2016.
   F. Bouzeffour, B. Khelidj, M. Tahar, Experimental investigation of a solar
- [2] F. Bouzeffour, B. Khelidj, M. Tahar, Experimental investigation of a solar adsorption refrigeration system working with silicagel/water pair: A case study for Bou-Ismail solar data, *Solar Energy*, Vol. 131, pp. 165-175, 2016.
- [3] X. Song, X. Ji, M. Li, Effect of desorption parameters on performance of solar water-bath solid adsorption ice-making system, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 89, pp. 316-322, 2015.
- [4] H. Hongyu, H. Zhaohong, Y. Haoran, K. Noriyuki, Z. Dandan, G. Huafang, Effect of adsorbent diameter on the performance of adsorption refrigeration, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol. 22, No. 5, pp. 602-606, 2014.
- [5] G. Santori, S. Santamaria, A. Sapienza, A stand-alone solar adsorption refrigerator for humanitarian aid, *Solar Energy*, Vol. 100, pp. 172-178, 2014.
- [6] H. Demir, M. Mobedi, S. Ulku, Effects of porosity on heat and mass transfer in a granular adsorbent bed, *Heat Mass Transfer*, Vol. 36, No. 4, pp. 372-377, 2009.
- [7] M. Li, H. B. Huang, R. Z. Wang, L. L. Wang, W. D. Cai, W. M. Yang, Experimental study on adsorbent of activated carbon with refrigerant of methanol and ethanol for solar ice maker, *Renewable Energy*, Vol. 29, No. 15, pp. 2235-2244, 2004.
- [8] E. E. Anyanwu, C. I. Ezekwe, Design, construction and test run of a solid adsorption solar refrigerator using activated carbon/methanol, as adsorbent/adsorbate pair, *Energy Conversion and Management*, Vol. 44, No. 18, pp. 2879-2892, 2003.
- [9] C. Hildbrand, P. Dind, M. Pons, F. Buchter, A new solar powered adsorption refrigerator with high performance, *Solar Energy*, Vol. 77, No. 3, pp. 311-318, 2004.
- [10] D. D. Kumar, S. A. Karshna, S. Kasthurirengan, G. B. Krishnappa, An experimental investigation on adsorption refrigeration system using silica gel-water, *Journal of Mechanical Engineering and Biomechanics*, Vol. 1, pp. 56-63, 2016
- [11] N. Spahis, H. Mahmoudi, Proposition of a new adsorption refrigeration system using activated carbon prepared from olive stones, *Journal of International Environmental Application & Science*, Vol. 3, No. 5, pp. 368-372, 2008.
- [12] H. Z. Hassan, Energy Analysis and Performance Evaluation of the Adsorption Refrigeration System, *ISRN Mechanical Engineering Hindawi Publishing Corporation*, pp. 1-14, 2013.
- [13] A. E. Fadar, A. Mimet, M. Perez, Study of an adsorption refrigeration system powered by parabolic trough collector and coupled with a heat pipe, *Solar Energy*, Vol. 34, No. 10, pp. 2271-2279, 2009.
- [14] W. S. Chang, C. C. Wang, C. C. Shieh, Experimental study of a solid adsorption cooling system using flat-tube heat exchangers as adsorption bed, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, No. 13, pp. 2195-2199, 2007.
- [15] A. E. Fadar, A. Mimet, M. Perez, Modelling and performance study of a continuous adsorption refrigeration system driven by parabolic trough solar collector, *Solar Energy*, Vol. 83, No. 6, pp. 850-861, 2009.
  [16] *Methanol*, Accessed 20 January 2013; http://www.zpcir.com/AllContents/
- [16] *Methanot*, Accessed 20 January 2013; http://www.zpcir.com/AllContents/ 1/.../ZAGROS-MSDS-FARSI.pdf. (in Persian فارسی)
- [17] Methanol (data page), Accessed 14 May 2016; https://en.wikipedia.org/wiki/Methanol\_(data\_page)