



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

شهاب‌الدین همراهی<sup>1</sup>، کوروش گودرزی<sup>2\*</sup>، محمود یعقوبی<sup>3</sup>، مهرورنگ قائدی<sup>4</sup>

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، شیمی، دانشگاه یاسوج، یاسوج

\* یاسوج، صندوق پستی 7591874934، kgoudarzi@yu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 10 تیر 1396

پذیرش: 15 شهریور 1396

ارائه در سایت: 19 آبان 1396

کلید واژگان:

جذب سطحی فیزیکی

کلکتور خورشیدی

کربن فعال

ضریب عملکرد

### چکیده

هدف از این کار، طراحی و ساخت یک دستگاه چیلر جذبی خورشیدی می‌باشد که توسط کربن فعال / متانول عمل می‌کند. سیستم‌های تبرید پیوسته توانایی ایجاد سرمایش به‌صورت مداوم را دارند. در این مقاله به بررسی تاثیر میکروکربن فعال بر عملکرد یک دستگاه چیلر جذبی پیوسته پرداخته می‌شود. منبع گرمای این چیلر از طریق نور خورشید و توسط کلکتور سهموی مرکب که نیاز به ردیابی نور خورشید نمی‌باشد، تامین می‌گردد. سیستم توسط دو بستر جاذب عمل می‌کند که هرگاه یکی در حال جذب باشد، دیگری در حال دفع قرار می‌گیرد. آزمایش‌ها در شهر یاسوج طی سه روز مختلف و به ازاء سه دمای آب گرم ورودی 38°C، 34°C و 30°C به چیلر در ماه بهمن صورت پذیرفته است. دمای میانگین محیط در طول آزمایش 18°C می‌باشد. نتایج تجربی نشان داد که به ازاء انرژی کل ورودی 13MJm<sup>-2</sup> و دمای ورودی آب گرم چیلر 38°C، 34°C و 30°C میانگین ضریب عملکرد دستگاه به ترتیب 12.3، 10.3 و 10 درصد و میانگین توان مخصوص دستگاه به ازاء دماهای اشاره شده به ترتیب 88Wkg<sup>-1</sup>، 65Wkg<sup>-1</sup> و 50Wkg<sup>-1</sup> به‌دست می‌آید.

## 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>2\*</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

Original Research Paper

Received 01 July 2017

Accepted 06 September 2017

Available Online 10 November 2017

### Keywords:

Physical adsorption

solar collector

active carbon

performance factor

### ABSTRACT

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 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, respectively, of 0.123, 0.103 and 0.10. For Previous temperatures the average specific cooling power of the device was obtained at 88Wkg<sup>-1</sup>, 65Wkg<sup>-1</sup> and 50Wkg<sup>-1</sup> respectively.

### 1- مقدمه

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.

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 به‌عنوان مهمترین فرآیند این‌گونه سیستم‌ها فرآیندی است که در آن یک یا چند جزء از مایع یا گاز روی سطح جامد جذب

Please cite this article using:

Sh. Hamrahi, K. Goudarzi, M. Yaghoubi, M. Ghaedi, Experimental study on the performance of a solar adsorption chiller with working pair of activated carbon / Methanol, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 11, pp. 118-124, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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

## 2- طراحی دستگاه 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 می‌کند. از یک کوئل مسی درون یک محفظه خلاء به عنوان اواپراتور استفاده شده است.

هر بستر جاذب شامل 200 گرم کربن فعال می‌باشد که درون یک لوله‌ی مسی به قطر بیرونی 3.5 سانتی‌متر، ضخامت 1 میلی‌متر و طول 70 سانتی‌متر تعبیه شده است. این لوله‌های حاوی کربن فعال بر روی خط کانونی کلکتور سهموی مرکب قرار گرفته است. کلکتور خورشیدی، انرژی خورشید را بر روی خط کانونی متمرکز می‌کند که منجر به گرم شدن کربن فعال می‌گردد. از یک لوله‌ی شیشه‌ای با قطر بیرونی 5.6 سانتی‌متر جهت خنک کردن بستر جاذب، بعد از اتمام مرحله دفع استفاده می‌گردد. کلکتور استفاده شده در این دستگاه از نوع سهموی مرکب می‌باشد. در این نوع از کلکتورها نیاز به ردیابی نور خورشید نمی‌باشد. همچنین در مقایسه با دیگر کلکتورها، با توجه به این‌که بازتاب تابش رسیده به دهانه کلکتور بر روی سطح کوچک (لوله جذب کننده) جمع می‌گردد سطح اتلاف انرژی کاهش می‌یابد. چگالنده استفاده شده در این دستگاه از جنس مس که قطر داخلی آن 9 میلی‌متر و طول آن 7 متر می‌باشد. در چگالنده بخار متانول دفع شده از بستر جاذب، چگالیده می‌شود و توسط هوای محیط خنک می‌گردد. یکی دیگر از اجزاء چیلر، اواپراتور می‌باشد که در "شکل 2" نشان داده شده است. بر روی

می‌شود. در این فرآیند، معمولاً ذره جذب شونده فقط وارد حفرات جاذب شده و بر روی سطح آن‌ها می‌نشینند. عملیات جذب سطحی از قابلیت جذب برخی از مواد در برابر جامدات استفاده می‌کند. بدین صورت وقتی که محلول‌ها (که می‌توانند جامد، مایع یا گاز باشند) در برابر سطح جامدات واقع می‌شوند اتم‌ها، یون‌ها و یا مولکول‌های آن‌ها جذب سطح جامد خواهند شد. در واقع جذب سطحی چسبندگی اتم، یون یا مولکول‌های گاز یا مایع به سطح می‌باشد.

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 آن‌ها بیانگر این است که ضریب عملکرد دستگاه بین 0.083 تا 0.09 تغییر می‌کند. سانگ و همکاران [3] یک سیستم یخ‌ساز جذبی را که جفت کاری آن کربن فعال/متانول می‌باشد را طراحی و ساختند. آنان بیان کردند که اگر دمای دفع  $94^{\circ}\text{C}$  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 به دست آوردند. دمیر و همکاران [6] مکانیزم انتقال حرارت و انتقال جرم را در یک بستر حلقوی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها بیان کردند که در هنگام جریان داشتن مبرد از لایه‌های جاذب، نفوذپذیری بر روی عملکرد انتقال جرم و افت فشار، تاثیرگذار است. لی و همکاران [7] کربن فعال/متانول و کربن فعال/اتانول را به عنوان دو نمونه از جفت کاری، در سیستم یخ‌ساز جذبی خورشیدی را آزمایش کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در شرایط محیطی و تابش یکسان، ترکیب کربن فعال/متانول توانایی تولید یخ را دارد در صورتی که ترکیب کربن فعال/اتانول قادر به انجام این کار نیست. آنیوانو و همکاران [8] یک یخچال جذبی خورشیدی که جاذب آن کربن و جذب شونده آن متانول می‌باشد را طراحی و ساختند. آن‌ها بازده مفید بین 0.056 تا 0.093 و بازده کلی بین 0.056 تا 0.07 را به دست آوردند. هیلدبرنت و همکاران [9] یخچال خورشیدی با جفت کاری سیلیکاژل/آب را طراحی و ساختند. چگالنده این یخچال با جابجایی طبیعی خنک می‌شد و اواپراتور شامل 40 لیتر آب بود. آن‌ها ضریب عملکرد دستگاه را 0.19 محاسبه نمودند.

از خصوصیات ترکیب کربن فعال و متانول این می‌باشد که عمل جذب در دمای پائین صورت می‌پذیرد و همچنین در فرآیند دفع نیاز به حرارت بالا نمی‌باشد. همان‌طور که بیان شد تاکنون مطالعات زیادی بر روی سیستم‌های جذبی خورشیدی صورت گرفته است. نتایج مطالعات بیانگر ضریب عملکرد پائین این سیستم‌ها می‌باشد. پژوهشگران قبلی در مطالعات خود از اندازه جاذب در حد میکرومتری استفاده نکرده بوده‌اند. در این مقاله در بستر جذب از میکروکربن فعال استفاده شده است. برای آن‌که دستگاه بتواند به‌طور 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



Fig. 1 two bed solar adsorption chiller

شکل 1 چیلر جذبی خورشیدی با دو بستر جاذب

خنک شده از خروجی اواپراتور که در پائین قرار دارد، خارج می‌گردد. برای اندازه‌گیری دما، فشار و شدت تابش نور خورشید نیازمند ابزار اندازه‌گیری مناسب می‌باشد. از یک دیتالاگر 8 کاناله به همراه 8 عدد ترموکوپل نوع K جهت اندازه‌گیری 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 می‌شود فشار و دمای بستر جذب سطحی افزایش می‌یابد. 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 می‌گردد. بخار جذب شونده بطرف چگالنده جریان می‌یابد و در چگالنده چگالش می‌یابد. 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 می‌گردد. در ادامه فرآیند دفع، جاذب کماکان به دفع مبرد از سطح خود ادامه می‌دهد 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 می‌گردد، 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

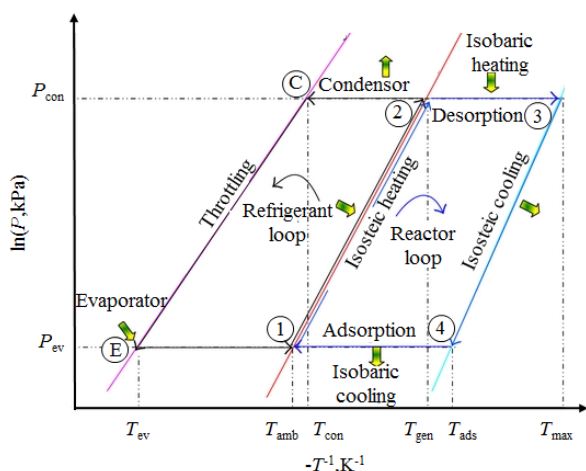


Fig. 3 Clapeyron diagram of adsorption refrigeration cycle [10]

شکل 3 دیاگرام کلاپیرون چرخه تبرید جذبی [10]

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 می‌شود و حرارت خود را به قطرات متانول مایع که بر روی این سیم پیچ جریان دارد می‌دهد. آنگاه آب جاذب، ورودی و خروجی چگالنده و دمای مخزن آب گرم استفاده می‌شود. از فشارسنج خلاء (1- تا صفر بار) برای اندازه‌گیری فشار در اواپراتور، بسترهای جاذب و مخزن ذخیره متانول استفاده می‌شود. از یک پمپ خلا مدل JB برای ایجاد خلاء در محدوده‌ی موردنیاز استفاده می‌شود. جهت اندازه‌گیری شدت تابش نور خورشید، از یک شدت تابش سنسج استفاده می‌شود. این دستگاه در زمان آزمایش شدت تابش نور خورشید را برحسب  $Wm^{-2}$  اندازه می‌گیرد. 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) (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)

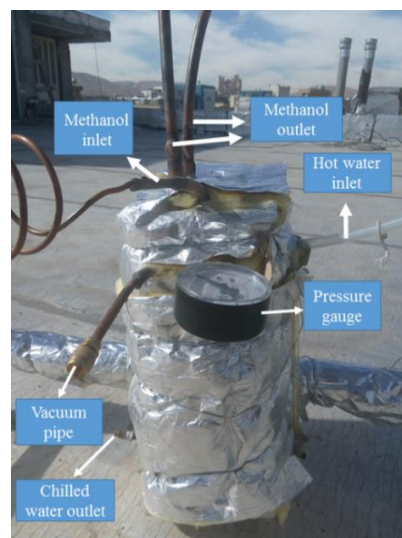


Fig. 2 Evaporator and its components

شکل 2 اواپراتور و اجزای آن

جدول 1 دقت ابزار اندازه‌گیری

Table 1 precision of measuring instruments

دقت ابزار	ابزار اندازه‌گیری
0.005%	دیتالاگر 8 کاناله دما
0.025°C	ترموکوپل
1.6%	گیج فشار
1Wm <sup>-2</sup>	شدت تابش سنسج

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 مورد نیاز پائین آورده می‌شود. دبی آب گرم ورودی به اواپراتور توسط شیر کنترل که قبل از اواپراتور قرار داده شده است،  $60 \text{ mlmin}^{-1}$  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 می‌کند، شیر ورودی متانول مایع به اواپراتور 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  $64.7^\circ\text{C}$  می‌باشد [16]. برای آن که متانول بتواند در دمای پایین‌تری 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  $20 \text{ kPa}$  می‌باشد. با در نظر گرفتن افت فشار در اواپراتور، اولین فشار کاری طبق جدول فشار بخار متانول  $20 \text{ kPa}$  در نظر گرفته می‌شود (شکل 5). دمای تبخیر متانول در این فشار  $30^\circ\text{C}$  است به همین جهت دمای آب گرم ورودی به اواپراتور در آزمایش اول  $30^\circ\text{C}$  در نظر گرفته می‌شود. برای مقایسه نتایج، دو آزمایش دیگر با دماهای  $34^\circ\text{C}$  و  $38^\circ\text{C}$  صورت گرفته است.

عملکرد برودتی چیلر به ازاء سه دمای مختلف ورودی ( $30^\circ\text{C}$ ،  $34^\circ\text{C}$  و  $38^\circ\text{C}$ ) 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 بدست 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. همان‌طور که پیداست شدت تابش به مرور زمان افزایش می‌یابد تا در هنگام ظهر به مقدار بیشینه خود می‌رسد و از ظهر به بعد دوباره کاهش پیدا می‌کند.

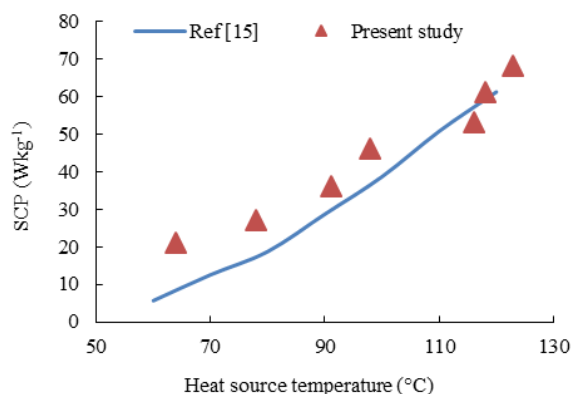


Fig. 4 Comparison of specific cooling power with a Experimental sample

شکل 4 مقایسه توان مخصوص تبرید با یک نمونه آزمایشگاهی

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 می‌گیرد و تبخیر می‌گردد. هنگامی که فشار به فشار در درجه حرارت اواپراتور برسد، شیر باز شده کلکتور به اواپراتور وصل می‌گردد و بخار مبرد از اواپراتور به جاذب منتقل می‌شود (مرحله 4-1) و منجر به سرمایش در یک محفظه بسته می‌گردد. مراحل فوق روند جذب سطحی مبرد درون یک جاذب با تولید تبرید در اواپراتور می‌باشد [11,12].

#### 4- روابط حاکم

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].

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

ضریب عملکرد چیلر جذب سطحی نسبت سرمایش متوسط تولیدی به حرارت ورودی سیستم است که براساس رابطه (2) محاسبه می‌شود [14].

$$COP = \frac{Q_{evap}}{Q_{sun}} \quad (2)$$

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]:

$$Q_{evap} = \dot{m}c_{p,w}(T_{hot} - T_{chilled})t_{cycle} \quad (3)$$

حرارت جذب شده توسط کلکتور خورشیدی از طریق رابطه (4) محاسبه می‌شود [2]:

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

#### 5- اعتبارسنجی

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/تانول برای راه اندازی سیستم تبرید پیوسته که حرارت خود را از یک کلکتور سهموی تامین می‌کرد، استفاده کردند. در کار آنها مساحت کلکتور  $0.08 \text{ m}^2$  و انرژی دریافت شده خورشیدی  $17.5 \text{ MJm}^{-2}$  و دبی آب ورودی به اواپراتور  $0.005 \text{ kgs}^{-1}$  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- تحلیل نتایج



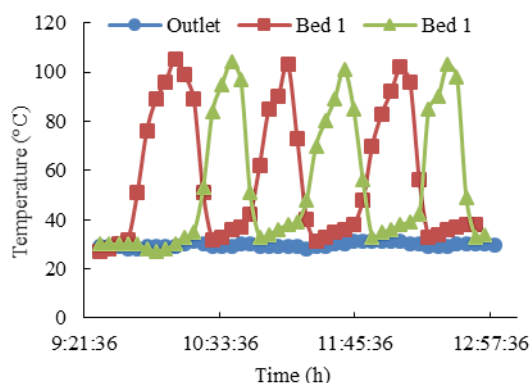


Fig. 7 Temperature changes in different parts of the chiller

شکل 7 تغییرات دما در نقاط مختلف چیلر

آماده جذب در مرحله بعد گردد. همان‌طور که از "شکل 7" پیداست هر دو بستر در طول آزمایش به‌طور مرتبط گرم شده و خنک می‌شوند تا عملیات تبرید پیوسته در کل سیستم صورت پذیرد. در اواخر آزمایش دمای خروجی اواپراتور نسبت به اوایل آزمایش بالاتر می‌رود. علت این افزایش دما آن است که در طول آزمایش به مرور زمان فشار تبخیر درون اواپراتور بالا می‌رود که منجر به افزایش دمای تبخیر متانول می‌گردد و این افزایش دمای تبخیر باعث می‌شود تا دمای آب در خروجی از اواپراتور در اواخر آزمایش بالا رود. به ازاء دمای ورودی  $38^{\circ}\text{C}$  میانگین دمای خروجی از اواپراتور به  $29.5^{\circ}\text{C}$  می‌رسد.

جهت محاسبه ضریب عملکرد چیلر از رابطه (2) استفاده شده است. با توجه به این‌که این چیلر به‌طور ضرب‌دری عمل می‌کند (یعنی هرگاه یک بستر در حال جذب متانول باشد، دیگری در حال دفع می‌باشد) ضریب عملکرد آن نیز باید به‌صورت متناوبی محاسبه گردد. جهت محاسبه توان تبرید در رابطه (3) دبی آب گرم ورودی  $60\text{mlmin}^{-1}$  و ظرفیت گرمایی ویژه آب  $4200\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$  می‌باشد. همچنین دمای آب گرم ورودی و دمای آب خنک شده خروجی در هر چرخه اندازه‌گیری می‌شود. با جایگذاری اطلاعات مورد نیاز در رابطه (3) میانگین توان تبرید در هر چرخه محاسبه می‌شود. جهت محاسبه حرارت ورودی به بسترها از رابطه (4) استفاده می‌شود. در این رابطه مساحت هر کلکتور  $0.19\text{m}^2$  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 می‌شود. پس از محاسبه ضریب عملکرد چیلر در هر چرخه، نمودار آن در "شکل 8" ترسیم می‌گردد. همان‌طور که از شکل پیداست در اوایل صبح به علت پائین بودن شدت تابش نور خورشید، ضریب عملکرد دستگاه نیز پائین می‌باشد. در میانه روز هنگامی که شدت تابش نور خورشید افزایش پیدا می‌کند، ضریب عملکرد دستگاه نیز افزایش می‌یابد. در بعدازظهر، هنگامی که شدت تابش نور خورشید کم می‌شود، 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 $34^{\circ}\text{C}$ به اواپراتور

در این آزمایش آب گرم ورودی به اواپراتور  $34^{\circ}\text{C}$  تنظیم می‌گردد. فشار مورد نیاز جهت تبخیر متانول درون اواپراتور در این دما  $25\text{kPa}$  می‌باشد. با درنظر گرفتن افت فشار ناشی از تبخیر متانول، فشار اولیه درون اواپراتور  $23\text{kPa}$  در نظر گرفته شد. نمودار تغییرات دما برحسب زمان در خروجی از اواپراتور،

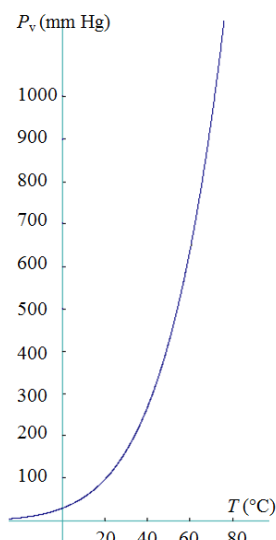


Fig. 5 Vapor pressure change of methanol relative to temperature [17]

شکل 5 تغییرات فشار بخار متانول نسبت به دما [17]

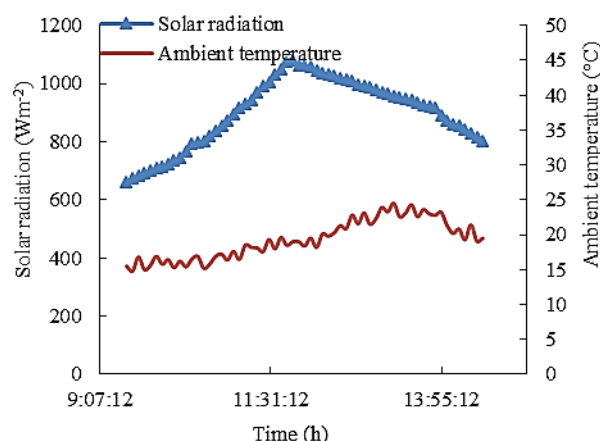


Fig. 6 Variation of solar radiation and ambient temperature

شکل 6 تغییرات شدت تابش نور خورشید و دمای محیط در مدت زمان آزمایش

## 1-6- نتایج به ازاء دمای آب گرم ورودی $38^{\circ}\text{C}$ به اواپراتور

در این قسمت آب گرم ورودی به اواپراتور  $38^{\circ}\text{C}$  تنظیم می‌گردد. فشار مورد نیاز جهت تبخیر متانول درون اواپراتور در این دما  $30\text{kPa}$  می‌باشد. با درنظر گرفتن افت فشار ناشی از تبخیر متانول، فشار اولیه درون اواپراتور  $25\text{kPa}$  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 اندازه‌گیری 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  $60^{\circ}\text{C}$  تا  $80^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. بنابراین در این پژوهش اجازه داده می‌شود تا در دمای  $70^{\circ}\text{C}$  شیر خروجی از بستر کربن فعال باز شود.

همچنین اجازه داده می‌شود تا بستر به دمای بالاتر از  $100^{\circ}\text{C}$  برسد. بعد از این‌که شیر بین اواپراتور و بستر 1 باز شد عمل جذب صورت می‌گیرد و پس از اتمام عمل جذب، شیر بین اواپراتور و بستر 1 بسته شده و این بستر شروع به گرم شدن می‌کند. در همین حین شیر بین اواپراتور و بستر 2 باز می‌شود تا جذب در بستر 2 آغاز گردد.

بعد از این‌که بستر 1 به اندازه کافی گرم شد باید دوباره خنک گردد تا

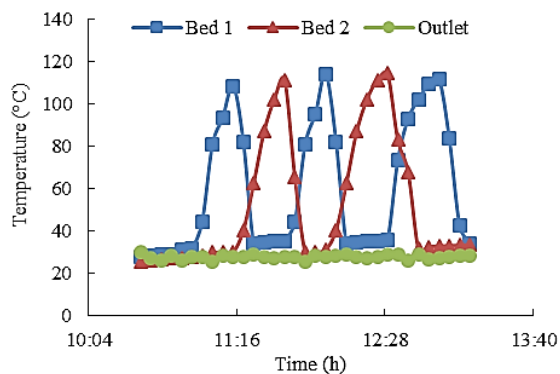


Fig. 9 Temperature changes in different parts of the chiller

شکل 9 تغییرات دما در نقاط مختلف چیلر

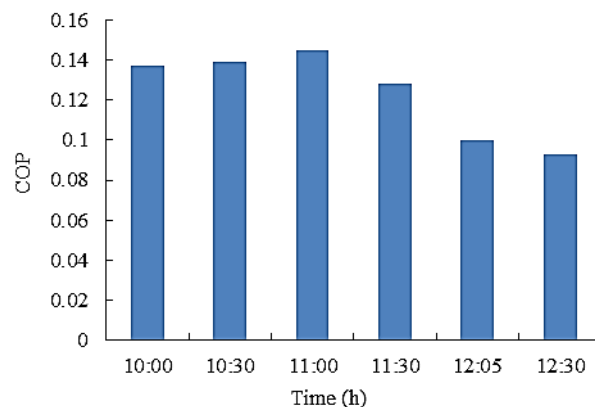


Fig. 8 Performance changes over time

شکل 8 تغییرات ضریب عملکرد نسبت به زمان

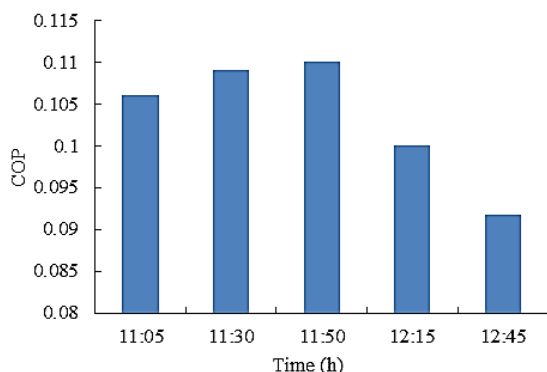


Fig. 10 Performance changes over time

شکل 10 تغییرات ضریب عملکرد نسبت به زمان

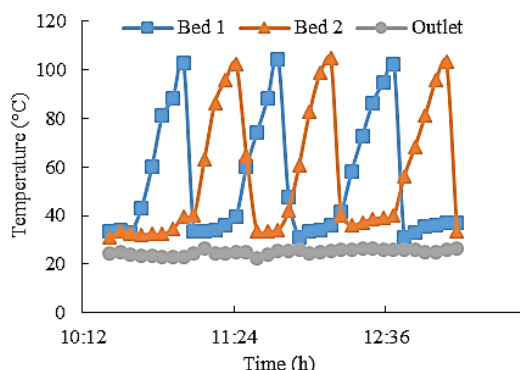


Fig. 11 Temperature changes in different parts of the chiller

شکل 11 تغییرات دما در نقاط مختلف چیلر

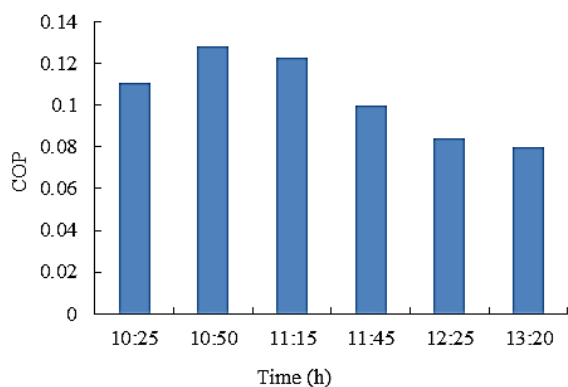


Fig. 12 Performance changes over time

شکل 12 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  $114.1^{\circ}\text{C}$  و  $114.3^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. با توجه به "شکل 9" بعد از این که دمای بسترها به بیشینه خود رسیدند، دمای آن‌ها به صورت ناگهانی و خطی پائین می‌آید. علت آن است که برای خنک کردن بسترها از آب سرد استفاده می‌شود. هر دو بستر در طول آزمایش به طور مرتب گرم شده و خنک می‌شوند تا عملیات تبرید پیوسته در کل سیستم صورت پذیرد. به ازاء دمای ورودی  $34^{\circ}\text{C}$  میانگین دمای خروجی از اواپراتور به  $27.8^{\circ}\text{C}$  می‌رسد.

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

### 3-6- نتایج به ازاء دمای آب گرم ورودی $30^{\circ}\text{C}$ به اواپراتور

در این قسمت آب گرم ورودی به اواپراتور  $30^{\circ}\text{C}$  تنظیم می‌گردد. فشار مورد نیاز جهت تبخیر متانول درون اواپراتور در این دما  $22\text{kPa}$  می‌باشد. لذا با در نظر گرفتن افت فشار ناشی از تبخیر متانول، فشار اولیه درون اواپراتور فشار آن  $20\text{kPa}$  در نظر گرفته شد. نمودار تغییرات دما برحسب زمان در خروجی از اواپراتور، بستر 1 و بستر 2 در "شکل 11" نشان داده شده است. علت شکسته شدن نمودار بستر 1 آن است که بعد از باز شدن شیر خروجی از بستر 1، این بستر به چگالنده و مخزن ذخیره متصل می‌گردد و چون دمای این دو قسمت کمتر از دمای بستر 1 می‌باشد بنابراین کمی افت دما پیدا می‌کند تا به تعادل برسد. به ازاء دمای ورودی  $30^{\circ}\text{C}$  میانگین دمای خروجی از اواپراتور به  $24.9^{\circ}\text{C}$  می‌رسد.

"شکل 12" تغییرات ضریب عملکرد چیلر را نسبت به زمان نشان می‌دهد. همان طور که از شکل پیداست، همانند آزمایش‌های 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.

## 7- نتیجه گیری

در این پژوهش یک دستگاه چیلر جذبی پیوسته با جفت کاری 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 تبرید انجام می‌دهند، در این پژوهش از دو بستر جاذب جهت تولید تبرید در روز (پیوسته)، استفاده شده است. آزمایش‌ها در سه روز مختلف و به ازاء سه دمای آب گرم ورودی  $30^{\circ}\text{C}$ ،  $34^{\circ}\text{C}$ ،  $38^{\circ}\text{C}$  و صورت پذیرفته است. دمای میانگین محیط در طول آزمایش  $18^{\circ}\text{C}$  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  $13\text{MJm}^{-2}$  و دمای آب گرم ورودی به چیلر  $38^{\circ}\text{C}$ ،  $34^{\circ}\text{C}$  و  $30^{\circ}\text{C}$  میانگین ضریب عملکرد دستگاه به ترتیب 10.3، 10 و 10 درصد و میانگین توان مخصوص تبرید به ازاء دماهای اشاره شده  $88\text{Wkg}^{-1}$ ،  $65\text{Wkg}^{-1}$  و  $50\text{Wkg}^{-1}$  به دست می‌آید.

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 ماریچج اوپراتور تزریق می‌شود، لذا در مدت آزمایش فشار درون اوپراتور به صورت آرام بالا می‌رود تا این که در اواخر آزمایش، افزایش فشار محفظه اوپراتور منجر می‌شود تا آب درون اوپراتور به خوبی سرد نگردد لذا باعث کاهش عملکرد سیستم می‌شود.

## 8- فهرست علائم

$c_p$	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت ( $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
$COP$	ضریب عملکرد
$I$	شدت تابش نور خورشید ( $\text{Wkg}^{-1}$ )
$L_0$	گرمای نهان تبخیر ( $\text{kJkg}^{-1}$ )
$m$	جرم (kg)
$\dot{m}$	دبی جرمی ( $\text{kg s}^{-1}$ )
$Q$	انرژی حرارتی (kJ)
$SCP$	توان مخصوص تبرید ( $\text{Wkg}^{-1}$ )
$T$	دما ( $^{\circ}\text{C}$ )
$t$	زمان (s)

## زیر نویس‌ها

جاذب	ads
کلکتور	c
خنک	chilled
چگالنده	cond
اوپراتور	evap
گرم	hot
مبرد	ref
خورشید	sun
چرخه	cycle

## 9- مراجع

- [1] P. Islam, M. Tetsuo, Thermodynamic performances of a solar driven adsorption system, *Solar Energy*, Vol. 139, pp. 266-277, 2016.
- [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-Ismaïl 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. Kasthuriengan, 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. Mimmet, 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. Mimmet, 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/1/.../ZAGROS-MSDS-FARSI.pdf>. (in Persian فارسی)
- [17] *Methanol (data page)*, Accessed 14 May 2016; [https://en.wikipedia.org/wiki/Methanol\\_\(data\\_page\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Methanol_(data_page))