

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

هدف این مقاله بررسی عددی عملکرد یک سیستم سرمایشی جذب سطحی فیزیکی خورشیدی است که در آن از کربن فعال / متانول به عنوان جفت کاری استفاده می‌شود که درون یک کلکتور خورشیدی سهموی شکل قرار داده شده است. مدل ریاضی حاکم بر مسأله بر اساس معادلات بقاء جرم، بقاء انرژی و ترمودینامیک فرایند جذب سطحی فیزیکی بدست آمده است. معادلات به روش اختلاف محدود کاملاً ضمنی گسسته سازی و توسط برنامه کامپیوتری فورترن شبیه‌سازی شده است. این مدل از طریق مقایسه با نتایج پژوهش‌های آزمایشگاهی و عددی پیشین اعتبارسنجی شد. در هر نقطه از بستر دمای بستر، فشار بستر و جرم مبرد جذب شده در طول فرایند جذب/دفع سطحی فیزیکی محاسبه شده است. علاوه بر این تأثیر قطر بستر، میزان تابش خورشیدی، دمای منبع سرد، دما و فشار اواپراتور و کندانسور بر روی ضریب عملکرد خورشیدی و توان تبرید ویژه سیستم مورد بررسی قرار گرفت. مطابق مدل آزمایشگاهی ساخته شده و شرایط کاری سیستم، میزان ضریب عملکرد خورشیدی و توان تبرید ویژه سیستم به ترتیب برابر  $0.12$  و  $45.6 \text{ Wkg}^{-1}$  می‌باشد.

امیر عاشوری<sup>۱</sup>  
دانشجوی کارشناسی ارشد

کوروش گودرزی<sup>۲</sup>  
دانشیار

محمود یعقوبی<sup>۳</sup>  
استاد

واژه های راهنما: جذب سطحی فیزیکی، کلکتور خورشیدی سهموی، کربن فعال، ضریب عملکرد خورشیدی، توان تبرید ویژه

### ۱- مقدمه

از زمان پروتکل مونترال مبنی بر عدم استفاده از کلروفلئوروکربن<sup>۴</sup>ها محققان به بررسی تکنولوژی‌های سرمایشی سازگار با محیط زیست و با ویژگی عدم تخریب لایه اوزون روی آوردند. سیستم‌های تبرید جذب سطحی فیزیکی راه حل مناسبی برای مشکل آلاینده‌گی این سیستم‌ها می‌باشد. این سیستم‌ها جهت برآورده نمودن نیاز به تبرید از قبیل تهویه مطبوع، تولیدیخ، نگهداری غذا و دارو در مناطق فاقد شبکه برق حائز اهمیت بالایی می‌باشند.

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج، یاسوج

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج، یاسوج kgoudarzi@yu.ac.ir

<sup>۳</sup> استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۲/۲۶، تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۶/۳۰

<sup>۴</sup> Chlorofluorocarbon

در مقایسه با سیستم‌های تبرید تراکمی بخار این سیستم‌ها دارای فواید متعددی می‌باشند، آلودگی صوتی ایجاد نمی‌کنند، معمولا از مواد سازگار با محیط زیست به عنوان میرد استفاده می‌کنند (از قبیل آب، متانول، آمونیوم و غیره) [۱-۲]، این سیستم‌ها فاقد هر گونه جزء متحرکی هستند و جز انرژی خورشیدی به هیچ منبع انرژی دیگری نیاز ندارند. در کنار تمام مزایای گفته شده این سیستم‌ها دارای معایبی در مقایسه با انواع تجاری سیستم‌های تبرید از جمله وزن و حجم بالا، ظرفیت تبرید ویژه و ضریب عملکرد پایین می‌باشند [۳-۴]. در دهه‌های اخیر چندین نوع مختلف از سیستم‌های تبرید جذب سطحی فیزیکی با هندسه‌ها و جفت‌های کاری متفاوتی طراحی ساخته و مورد تحلیل قرار گرفته است. در اکثر آن‌ها از کربن فعال / آمونیوم، کربن فعال / متانول، سیلیکاژل / آب و زئولیت / آب به عنوان جفت کاری جذب استفاده شده است. این تحقیقات معمولا در حوزه‌های تولید یخ (یخ سازها) [۵-۷]، تولید تبرید برای نگهداری غذا و دارو [۸-۱۰] و مصارف تهویه مطبوع [۱۱-۱۲] صورت گرفته است و عموماً سیستم‌های تبرید متناوب با یک بستر جاذب که تنها در طول شب قادر به تولید سرمایش هستند را مورد مطالعه قرار داده‌اند. اخیراً نیز همراهی و همکاری [۱۳] در مطالعه ای تجربی و در راستای بهبود عملکرد به بررسی تاثیر نانو کربن فعال بعنوان بخشی از بستر جاذب بر روی عملکرد چیلر جذبی سطحی خورشیدی پرداختند. همچنین وانگ و همکاران [۱۴] به مقایسه عملکردی یخچال جذبی سطحی خورشیدی با کلکتور سهموی مرکب پرداختند. فادر [۱۵] نیز یک فرایند جدید برای بهبود عملکرد سیستم سرمایشی جذبی سطحی پیوسته معرفی نمود. کلکتور / جاذب یکی از مهم‌ترین قسمت‌های این سیستم‌ها محسوب می‌شود که نیازمند بررسی دقیق می‌باشد. بهبود سیستم‌های تبرید جذب سطحی فیزیکی همچنان از نظر هزینه ساخت اجزاء کلکتور جاذب خورشیدی دارای محدودیت می‌باشند [۱۶] و اخیراً از همین هزینه‌ی بالای کلکتورهای خورشیدی به عنوان مانع تولید انبوه و تجاری سازی سیستم‌های تبرید جذب سطحی فیزیکی یاد شده است [۱۷]. با این وجود می‌توان با افزایش ضریب عملکرد سیستم و یا کاهش دمای کاری سیستم، هزینه‌ی کلکتور را کاهش داد [۱۸].

در این پژوهش از کلکتور خورشیدی سهموی<sup>۱</sup> شکل به عنوان جایگزین منطقی انواع قبلی خود استفاده شده است. این نوع کلکتور با بازدهی بالای خود ضریب عملکرد سیستم را افزایش می‌دهد. کلکتورهای سهموی شکل پیشرفته‌ترین و فراگیرترین کلکتورهای متمرکز کننده خورشیدی هستند [۱۹] که با تکیه بر آزمایشات متعدد صورت گرفته [۲۰] تکنولوژی آن‌ها مورد تأییدترین تکنولوژی در میان انواع دیگر کلکتورهای متمرکز کننده خورشیدی است. ختاب [۲۱] یک مدل یخچال جذب سطحی فیزیکی ارائه داد و تأثیر آب و هوا در طول سال و افزودن ذرات فلزی درون جاذب زغال چوب برای افزایش انتقال حرارت را بر ضریب عملکرد سیستم بررسی نمود. فادار و همکاران [۲۲] یخچال جذب سطحی فیزیکی ممتد با دو بستر و جفت کاری کربن فعال / آمونیوم را شبیه‌سازی و تأثیر ضخامت بستر و دمای منبع گرم را بر ضریب عملکرد و توان تبرید ویژه سیستم بررسی نمودند. چکیرو و همکاران [۲۳] تأثیر چندین عامل مهم را بر ضریب عملکرد ماشین سرمایشی با نه جاذب استوانه‌ای حاوی کربن فعال / متانول و کلکتور مسطح با مساحت یک متر مربع را شبیه‌سازی کردند. هونگ و همکاران [۲۴] چیلر جذب سطحی فیزیکی لوله‌ای فین دار را شبیه‌سازی و با استفاده از نتایج تحلیل تأثیر ده عامل مختلف، حالت بهینه‌ای برای این نوع چیلر ارائه دادند.

<sup>1</sup> Parabolic Trough Collector

چکیرو و همکاران [۲۵] ماشین سرمایشی جذب سطحی فیزیکی با دو بستر جاذب و یک بازیاب حرارتی را شبیه‌سازی و تأثیر چندین عامل مهم بر ضریب عملکرد آن را بررسی کردند. با توجه به تحقیقات انجام شده در زمینه سیستمهای سرمایشی جذبی سطحی و لزوم بهبود عملکرد آنها همچنان انجام مطالعه در راستای بهبود عملکرد این نوع سیستمهای سرمایشی ضرورت دارد.

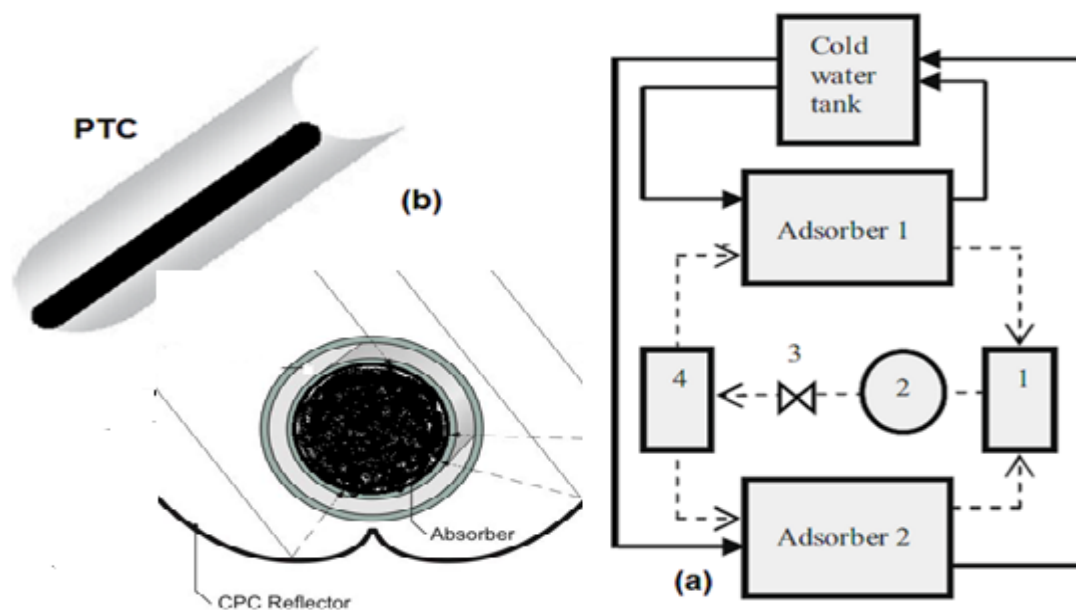
به همین منظور نویسندگان این مقاله در پی دستیابی به یک چیلر جذب سطحی فیزیکی دو بستره با حداکثر کارایی می باشند. برای این منظور پس از طراحی و ساخت این سیستم، در گام دوم به بهینه سازی آن به کمک شبیه سازی و روش عددی پرداخته شده است. بنابراین در این مقاله یک چیلر جذب سطحی فیزیکی دارای دو بستر جاذب با سیکل پیوسته و حاوی کربن فعال/ متانول به عنوان جفت کاری جذب (که در یک کلکتور سهموی مرکب شکل قرار گرفته‌اند) شبیه‌سازی می شود. در این سیستم برای اولین بار از کلکتور سهموی مرکب استفاده می شود. همچنین به بررسی تأثیر قطر بستر جاذب، میزان تشعشع خورشیدی، دمای منبع سرد، دما و فشار (فشار اشباع مطابق با دما) اواپراتور و کندانسور بر روی ضریب عملکرد خورشیدی<sup>۱</sup> و توان تبرید ویژه<sup>۲</sup> سیستم پرداخته می شود.

## ۲- توصیف سیستم و اصول کار

در شکل (۱) نمایی از سیستم تبرید جذب سطحی فیزیکی ممتد با دو بستر جذب آمده است. این سیستم شامل کلکتور خورشیدی سهموی، مخزن آب خنک، کندانسور، مخزن متانول، شیرهای مبرد و بستر استوانه‌ای جذب حاوی کربن فعال/ متانول و غیره است. هر جاذب در مرکز کانونی کلکتور خورشیدی سهموی قرار دارد که شامل یک لوله در داخل حاوی جفت کاری کربن فعال/ متانول و لوله خارجی هم محور با لوله جاذب برای عبور دادن آب خنک جهت سرد کردن بسترها است. در هنگام عمل گرمایش بسترها آب خنک در لوله بیرونی ساکن شده و بسترها تحت اثر مستقیم تشعشع خورشید گرم می‌شوند و به هنگام عمل سرمایش محافظی روی سطح هر کلکتور خورشیدی سهموی قرار می‌گیرد و آب سرد در سیستم شروع به حرکت می‌کند. برای تولید سرمایش به صورت ممتد دو جاذب به صورت عکس یکدیگر عمل می‌کنند. برای مثال هنگامی که جاذب ۱ در حال پیش گرمایش و دفع مبرد در کندانسور تحت دما و فشار بالا (فشار اشباع در دمای کندانسور) است. جاذب ۲ در حال سرد شدن و جذب مبرد در دما و فشار پایین (فشار اشباع در دمای اواپراتور) می‌باشد. هنگامی که جاذب ۱ متانول را دفع می‌کند متانول در کندانسور چگالیده می‌شود و سپس متانول مایع با عبور از شیر کنترل به سمت اواپراتور می‌رود. در همین حین جاذب ۲ به وسیله آب سرد خنک می‌شود. به محض خنک شدن بستر تا دمای اواپراتور و رسیدن به فشار آن جاذب ۲ به اواپراتور متصل شده و مبرد درون اواپراتور تبخیر می‌شود و سپس درون بستر جذب و در نتیجه در محفظه اطراف آن سرمایش حاصل می‌شود.

<sup>1</sup> solar coefficient of performance

<sup>2</sup> specific cooling power



**شکل ۱- (a)** شکل هندسی سیکل سیستم تبرید جذب سطحی فیزیکی؛ کلکتور خورشیدی سهموی، مخزن آب خنک، اواپراتور (4)، کندانسور (1)، مخزن متانول (2)، شیرهای مبرد (3) و بستر استوانه‌ای جذب حاوی کربن فعال/ متانول (b) نمای کلی و برشی جاذب

### ۳- مدل سازی عددی

مدل ریاضی حاکم بر مسأله بر اساس معادلات بقاء جرم، بقاء انرژی و ترمودینامیک فرایند جذب سطحی فیزیکی درون واسط متخلخل به روش اختلاف محدود کاملاً ضمنی گسسته سازی و توسط برنامه کامپیوتری فورترن<sup>۱</sup> شبیه‌سازی شده است. فرضیات مورد نظر در این شبیه‌سازی به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- در هر بستر فشار به صورت یکنواخت فرض می‌شود.
- ۲- بستر به صورت یک محیط متخلخل پیوسته فرض می‌شود.
- ۳- انتقال حرارت هدایتی در بستر متخلخل به وسیله‌ی یک ضریب هدایت حرارتی معادل  $\lambda_e$  مشخص می‌شود.
- ۴- عمل جذب/ دفع سطحی فیزیکی به صورت فشار ثابت در نظر گرفته می‌شود.
- ۵- بستر متخلخل و خواص آن دارای تقارن محوری است.
- ۶- تمامی فازها در تعادل حرارتی، مکانیکی و شیمیایی پیوسته فرض می‌شوند.
- ۷- انتقال حرارت به صورت شعاعی است و از انتقال حرارت جابجایی در راستای شعاعی به واسطه‌ی انتقال جرم صرف نظر می‌شود.
- ۸- دمای منبع سرد یکنواخت فرض می‌شود.
- ۹- کندانسور و اواپراتور را ایده‌آل فرض می‌کنیم از این رو در هر فاز هم فشار  $T_{ev}$  و  $T_{con}$  ثابت می‌باشند.
- ۱۰- فاز گاز به صورت گاز کامل رفتار می‌کند.

<sup>1</sup> FORTRAN

## ۳-۱- معادلات ریاضی مدل

با در نظر گرفتن فرضیات گفته شده مدلی یک بعدی بر پایه‌ی انتقال جرم و حرارت و ترمودینامیک فرایند جذب در درون بستر جاذب بسط داده شده است. معادلات حاکم شامل معادلات انتقال جرم و حرارت درون بستر جاذب به شرح زیر می باشد:

معادله بقاء جرم:

با نوشتن بقاء جرم متانول در یک حجم کنترل (یک لایه از بستر به ضخامت  $dr$  در موقعیت شعاعی  $r$  از محور بستر استوانه‌ای)؛

$$\frac{\partial}{\partial t} [2\pi r dr L_r ((\varepsilon - \theta)\rho_g + \theta\rho_a)] = q(r, t) - q(r + dr, t) = -\frac{\partial q}{\partial r} dr \quad (1)$$

که  $q$  نرخ جریان متانول درون لایه‌ای از بستر جاذب است.

معادله بقاء انرژی:

به صورت مشابه با نوشتن بقاء انرژی درون یک حجم کنترل از بستر جاذب،

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [2\pi r dr L_r ((1 - \varepsilon)\rho_s u_{s+} + (\varepsilon - \theta)\rho_g u_g + \theta\rho_a u_a)] \\ + q(r + dr, t)H_g(T(r + dr), P) - q(r, t)H_g(T(r), P) \\ = 2\pi r \lambda_e dr L_r \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$H_g(T) = H_a(T) + \Delta H_{ads} \quad (3)$$

که در آن  $H_g(T)$  و  $H_a(T)$  به ترتیب آنتالپی ویژه متانول در فاز گاز و فاز جذب شده می باشد. گرمای نهان جذب  $\Delta H_{ads}$  با استفاده از معادله کلازیوس-کلاپیرون [۲۶] محاسبه می گردد.

$$\Delta H_{ads} = RT^2 \left( \frac{\partial \ln P}{\partial T} \right)_x \quad (4)$$

در این رابطه  $R$  ثابت ویژه جذب شونده،  $x$  جرم جذب شده‌ی میرد بر واحد جرم جاذب ( $\text{kgkg}^{-1}$ ) و تابعی از دما ( $T$ ) و فشار ( $P$ ) بستر جاذب است.

این پارامتر با استفاده از رابطه دابینین-آستاخوف (D - A) [۲۷] تخمین زده می شود.

$$x = W_0 \rho_l(T) \exp \left[ -D \left( T \ln \left( \frac{P_{sat}}{P} \right) \right)^n \right] \quad (5)$$

$\rho_l$  در این رابطه چگالی جذب شونده در حالت مایع؛  $W_0$  حجم کل میکرو منافذ قابل دسترس جذب شونده در حالت بخار؛  $D$  ضریب مجاورت و  $n$  از مشخصه جفت جذب شونده/ جاذب است. برای جفت کربن فعال/ متانول استفاده شده در این پژوهش، مقادیر عددی  $D$ ،  $W_0$  و  $n$  به ترتیب برابر  $0.425 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ،  $\text{K}^{-n}$  و  $5.02 \times 10^{-7}$  و  $2.15$  می باشد [۲۸].

ترکیب معادلات انتقال جرم و حرارت در واسط متخلخل:

از ترکیب معادلات انتقال جرم و انتقال حرارت (۱) و (۲) به معادله کوپل انتقال جرم و حرارت به شکل زیر به دست می آید.

$$\begin{aligned} & \left[ \left( (1 - \varepsilon) \rho_s C_{p_s} + (\varepsilon - \theta) \rho_g C_{p_g} + \theta \rho_a C_{p_a} \right) \right] \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6) \\ & = \lambda_e \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial t} \left( (\varepsilon - \theta) \rho_g \right) \frac{P}{\rho_g} \\ & + \frac{1}{2\pi r dr L_r} \left( \frac{P}{\rho_a} + \Delta H_{ads} \right) \left( \frac{\partial m_a}{\partial t} \right) \end{aligned}$$

### ۳-۲- شرایط اولیه و مرزی

در ادامه برای تکمیل مدل ریاضی شرایط اولیه و مرزی به صورت زیر تعریف شده‌اند.  
شرایط اولیه:

$$T_1(t = 0) = T_{\min} \quad (7) \text{ برای جاذب (۱)}$$

$$P_1(t = 0) = P_{ev} = P_{sat}(T_{ev})$$

$$T_2(t = 0) = T_{\max} \quad (8) \text{ برای جاذب (۲)}$$

$$P_2(t = 0) = P_{con} = P_{sat}(T_{con})$$

شرایط مرزی فشار در هر جاذب هر گاه به اواپراتور/کندانسور متصل باشند:

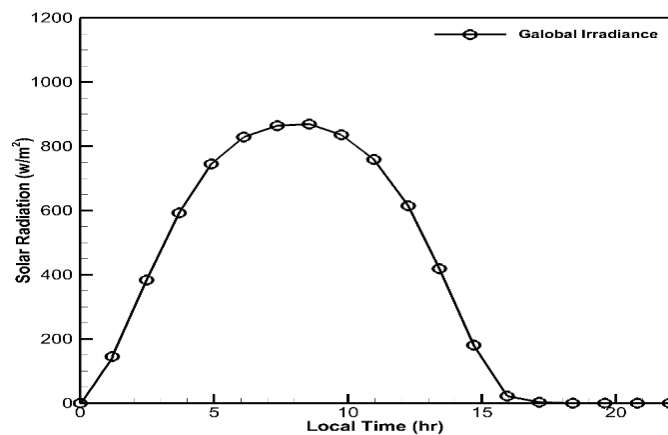
$$P(t) = P_{ev/con} \quad (9)$$

شرایط مرزی دما:

$$r = R_o; \quad -\lambda_e \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=R_o} = h_{gl}(T_{HTF} - T) \quad \text{در جذب} \quad (10)$$

$$r = R_o; \quad -\lambda_e \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=R_o} = Irr \quad \text{در دفع} \quad (11)$$

$h_{gl}$  ضریب انتقال حرارت کلی بین سیال ناقل حرارت و بستر جاذب و  $Irr$  میزان تشعشع خورشیدی دریافتی در فرایند دفع توسط بستر درون کلکتور است که یک نمونه از آن در شکل (۲) نشان داده شده است. سایر خواص جفت جاذب کربن فعال / متانول از کتاب راهنمای مهندسی شیمی پری [۲۶] اقتباس شده است. شرایط آب و هوایی مطابق با روزهای پاک فروردین ماه یاسوج می‌باشد. این شرایط آب و هوایی در شکل (۲) و سایر اطلاعات ورودی به کار رفته در برنامه شبیه‌سازی در جدول (۱) آورده شده است.



شکل ۲- میزان تابش خورشید بر واحد سطح جاذب در طول روز

## جدول ۱- اطلاعات اصلی ورودی در شبیه‌سازی

نشانه	مشخصه	اندازه	واحد
$L_r$	طول جاذب	0.5	m
$e\lambda$	ضریب انتقال حرارت جابجایی جاذب	0.431	$Wm^{-1}K^{-1}$
$\varepsilon$	میزان تخلخل	0.65	---
$L(T_{ev})$	گرمای نهان متانول در دمای اواپراتور ( $0^\circ C$ )	9	$kJkg^{-1}$
$\rho$	چگالی جاذب	500	$kgm^{-3}$
$C_{ps}$	گرمای ویژه جاذب	0.836	$kJkg^{-1}K^{-1}$
$T_{ads}$	دمای جذب	297.15	K
$T_{con}$	دمای کنداسور	303.15	K
$T_{ev}$	دمای اواپراتور	273.15	K

## ۳-۳- تحلیل عملکرد

مشخصه‌های ارزیابی عملکرد سیستم چیلر جذب سطحی خورشیدی در این پژوهش ضریب عملکرد خورشیدی و توان تبرید ویژه می‌باشد. ضریب عملکرد خورشیدی کسب شده به صورت نسبت بین سرمایش تولید شده و انرژی خورشیدی بر خوردی به صفحه‌ی کلکتور در طول کل روز تعریف شده است.

$$COP_s = \frac{Q_c}{\int_{sunrise}^{sunset} A_c Irr(t) dt} \quad (12)$$

$Q_c$  سرمایش تولید شده در اواپراتور در طول سیکل جذب است. این مشخصه برابر حرارت نهان تبخیر مبرد منهای حرارت محسوس سرد کردن مبرد از دمای کنداسور تا دمای اواپراتور است.

$$Q_c = m_{AC} \Delta x \left[ L(T_{ev}) - \int_{T_{ev}}^{T_{con}} C_{pl}(T) dT \right] \quad (13)$$

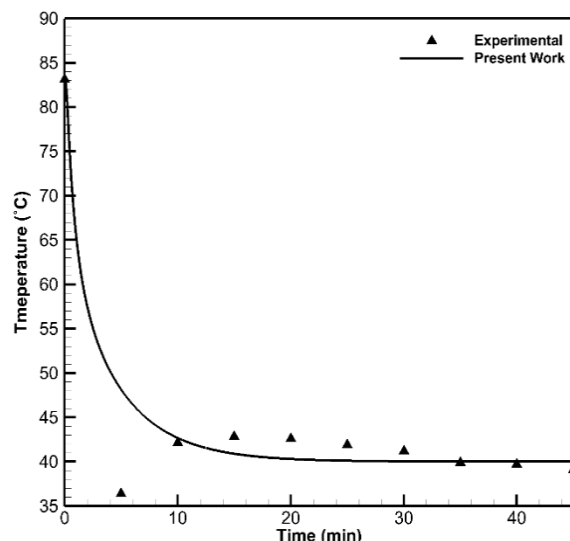
توان تبرید ویژه به صورت نسبت بین سرمایش تولید شده و زمان سیکل بر واحد جرم جاذب بیان می‌شود.

$$SCP = \frac{Q_c}{t_{cycle} \times m_{AC}} \quad (14)$$

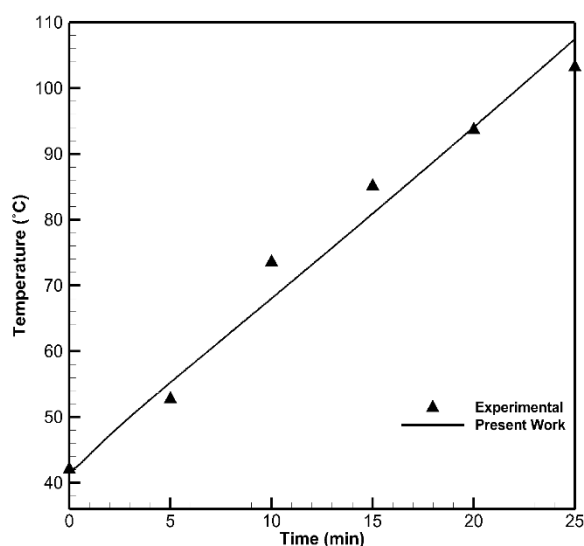
## ۴- روش حل عددی

برای حل معادلات بستر جاذب از روش عددی اختلاف محدود به صورت کاملاً ضمنی استفاده شد. معادلات گسسته شده به کمک الگوریتم ماتریس سه قطری<sup>۱</sup> و معادلات غیرخطی نیز از روش تکرار حل شدند. در انتها برای شبیه‌سازی رفتار سیستم تبرید جذب سطحی از برنامه‌ی کامپیوتری فورترن بر اساس مدل ریاضی آورده شده استفاده شد.

<sup>1</sup> TDMA



شکل ۳- دماهای اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده برای جاذب ۲



شکل ۴- دماهای اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده برای جاذب ۱

## ۵- اعتبارسنجی

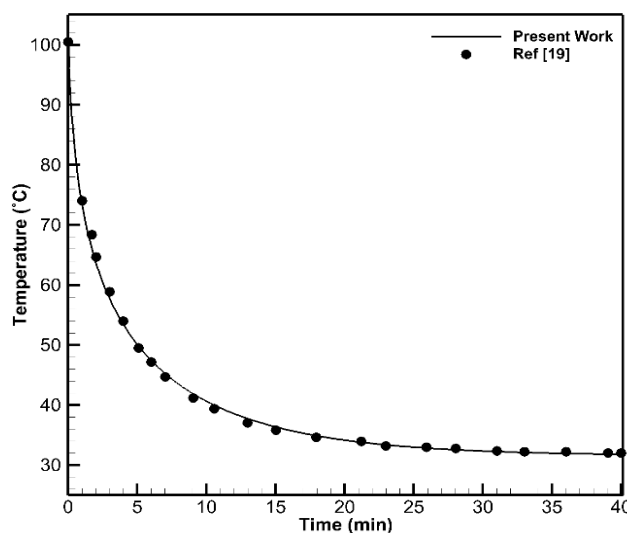
به منظور اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی ارائه شده انتقال جرم و انرژی درون جاذب؛ آزمایش لازم بر روی یک سیستم تبرید جذبی سطحی فیزیکی دو بستره انجام گرفته است. هر بستر شامل یک جاذب استوانه‌ای شکل توپر به شعاع 17.625 میلی متر مطابق مدل ساخته شده در آزمایشگاه حاوی 200 گرم کربن فعال با جفت کاری جذب شونده‌ی متانول، دمای شروع فرایند دفع  $42^{\circ}\text{C}$  و حداکثر دمای قابل دسترسی  $103^{\circ}\text{C}$  در بین ساعات 11:30 تا 12:30 روز شبیه‌سازی و نتایج آن در شکل (۳) و شکل (۴) آمده است. آزمایش‌ها در شهر یاسوج در ماه‌های بهمن و اسفند سال (۱۳۹۶) صورت گرفت.



اطلاعات کامل دستگاه آزمایش در مرجع [۱۳] آمده است. همچنین مدل هندسی دیگری به صورت دو لوله ای استوانه‌ای هم محور که از درون لوله داخلی سیال ناقل حرارت گرم<sup>۱</sup> و سرد و درون فضای بین دو لوله کربن فعال با جفت کاری آمونیوم و دیواره‌ی بیرونی عایق شده مطابق پژوهش عددی فادار [۲۲] در شعاع یکسانی شبیه‌سازی شد و نتایج آن در شکل (۵) آورده شده است. در این شکل تغییرات دمای بستر طی فرایند جذب سطحی فیزیکی در این پژوهش و پژوهش عددی فادار مقایسه شده است. چنانچه در شکل‌ها مشاهده می‌شود نتایج بدست آمده از این تحقیق تطابق بسیار خوبی با نتایج نمونه آزمایشگاهی و مرجع دیگر دارد.

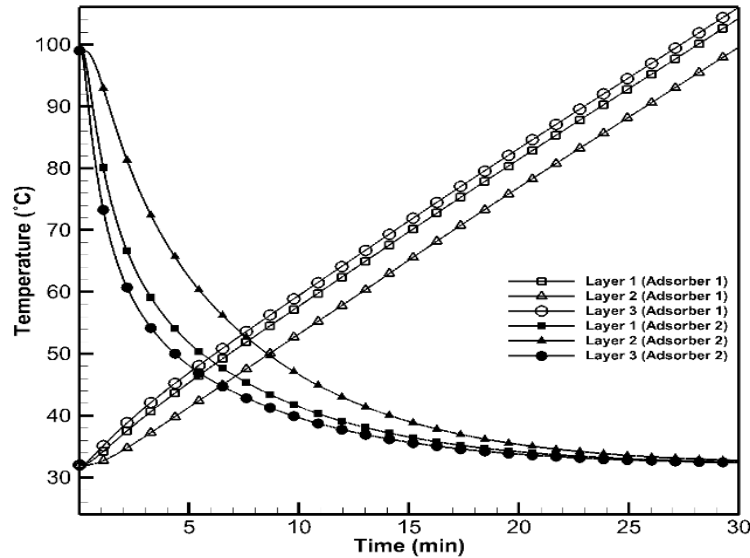
## ۶- نتایج و تحلیل

در این قسمت تأثیر چندین مشخصه بر عملکرد سیستم تحت شرایط کاری آورده شده در بالا به صورت عددی شبیه‌سازی و مورد بررسی واقع شده است. قطر بستر جاذب، میزان تشعشع خورشیدی، دمای منبع سرد، دما و فشار (فشار اشباع مطابق با دما) اواپراتور و کندانسور مشخصه‌های مورد بررسی می‌باشند که نتایج آن‌ها در قالب ضریب عملکرد و توان تبرید ویژه به صورت شکل در ادامه آورده شده است.



شکل ۵- دماهای مرجع [۱۹] و شبیه‌سازی شده

<sup>1</sup> Heat Transfer Fluid

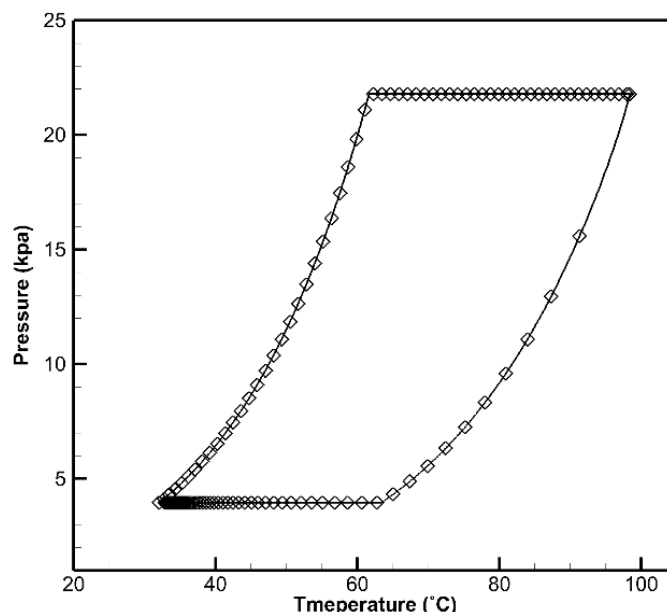


شکل ۶- دماهای شبیه‌سازی شده در لایه‌های مختلف هر بستر

#### ۶-۱- دما، فشار و مقدار جرم مبرد جذب شده در بستر

شکل (۶) نشان دهنده تغییرات دمای بستر در چندین شعاع متفاوت در فرایندهای جذب و دفع سطحی فیزیکی است. همان گونه که در شکل (۶) یعنی تغییرات دمایی جاذب ۲ که در حال سرمایش و جذب سطحی فیزیکی است مشاهده می‌شود حدود ۲۰ دقیقه اول بین لایه‌های مختلف بستر تفاوت دمایی آشکاری وجود دارد که نشان می‌دهد هنوز سیستم به مرحله تعادلی جذب نرسیده است و بعد از این مدت سیستم فرایند جذب را به صورت تعادلی طی می‌کند. اما جاذب ۱ که در حال پیش گرمایش و دفع سطحی فیزیکی است به علت دریافت ممتد شار حرارتی از خورشید تا انتهای فرایند دفع و رسیدن به حداکثر دمای میانگین ممکن جاذب بین تمام لایه‌ها اختلاف دما حفظ می‌شود.

نمودار تغییرات فشار بر حسب دمای میانگین بستر جاذب بین محدوده‌ی فشار پایین اواپراتور (فشار اشباع متناظر با دمای اواپراتور) و فشار بالای کندانسور (فشار اشباع متناظر با دمای کندانسور) در شکل (۷) ترسیم شده است. در قسمت سرمایش و پیش گرمایش مبرد فرایند تغییر دما و فشار در جرم ثابت و به اصطلاح فرایند ایزواستریک و در فرایندهای جذب و دفع سطحی فیزیکی به صورت فشار ثابت (با جرم در حال تغییر) را طی می‌کند. تغییرات جرم جذب شونده درون هر بستر در شکل (۸) نشان داده شده است. همانگونه که از شکل مشخص است در قسمت‌های سرمایش و پیش گرمایش که دما و فشار مبرد از اواپراتور تا کندانسور و یا بالعکس تغییر می‌کند جرم ثابت بوده و به محض شروع فرایندهای جذب و دفع سطحی فیزیکی جرم مبرد جذب شده بر واحد جرم جاذب شروع به تغییر می‌کند. در بستر شماره ۱ با توجه به اینکه فرایند جذب در حال انجام است، با گذشت زمان مقدار جرم مبرد جذب شده با نرخ نسبتاً زیاد در حال افزایش و پس از گذشت ۲۰ دقیقه با نرخ کمتری افزایش می‌یابد. در بستر شماره ۲ نیز به دلیل اینکه فرایند دفع انجام می‌گیرد، جرم مبرد جذب شده بصورت خطی کاهش می‌یابد.



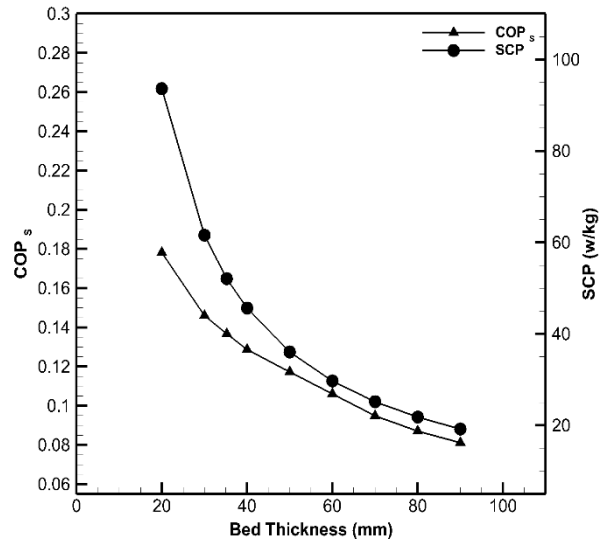
شکل ۷ - فشار بستر شبیه‌سازی شده‌ی در کل سیکل

#### ۲-۶- قطر بستر جاذب

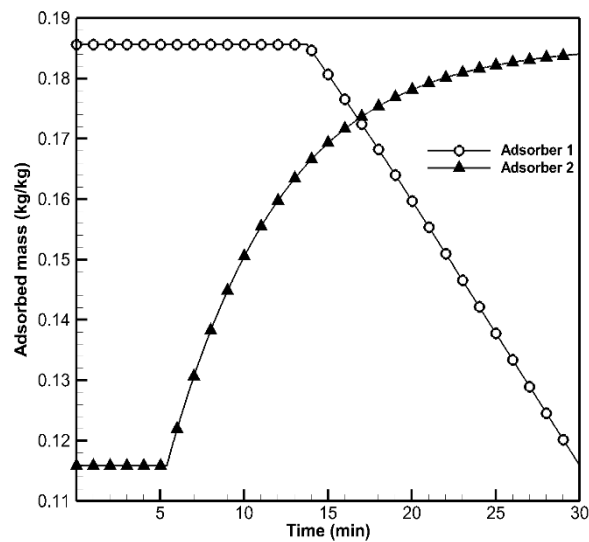
تأثیر قطر بستر در شرایط کاری سیستم دمایی اواپراتور  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ، دمایی منبع سرد  $32\text{ }^{\circ}\text{C}$  و حداکثر دمایی ممکن سیستم  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  بررسی شده است. همانگونه که در شکل (۹) مشاهده می‌شود با افزایش قطر بستر از ضریب عملکرد و توان تبرید ویژه‌ی سیستم کاسته می‌شود. علت این امر افزایش مدت زمان فرایند جذب و دفع سطحی فیزیکی و به دنبال آن کاهش تعداد دفعات تکرار سیکل در طول مدت تابش خورشید است. بدین ترتیب از میزان سرمایه‌ی تولید شده کاسته می‌شود.

#### ۳-۶- شار حرارتی خورشیدی

شکل (۱۰) تأثیر میزان تابش خورشیدی بر دو مشخصه ضریب عملکرد خورشیدی و توان تبرید ویژه سیستم را نشان می‌دهد. مطابق این شکل افزایش شار حرارتی به کاهش ضریب عملکرد خورشیدی منتج می‌شود. به واسطه افزایش شار حرارتی، مدت زمان سیکل کاهش یافته و از این رو تعداد دفعات تکرار سیکل افزایش می‌یابد اما میزان شار حرارتی دریافتی جاذب در طول روز نیز بیشتر شده که نهایتاً تأثیر ترکیب این دو تغییر منجر به کاهش ضریب عملکرد خورشیدی می‌شود. همانطور که اشاره شد با افزایش شار حرارتی خورشیدی تعداد دفعات تکرار سیکل افزایش یافته و در نتیجه میزان سرمایه‌ی تولیدی در طول روز افزایش می‌یابد. از این رو مطابق شکل (۱۰) توان تبرید ویژه سیستم افزایش می‌یابد.



شکل ۸- میزان جرم مبرد جذب شده در هر بستر در شبیه‌سازی



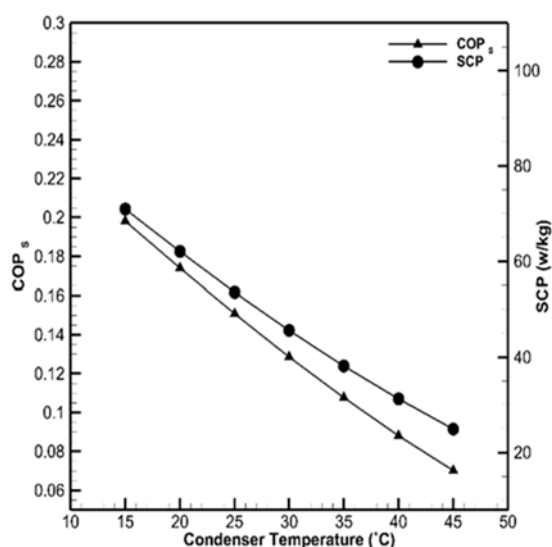
شکل ۹- تأثیر قطر بستر بر ضریب عملکرد خورشیدی و توان تبرید ویژه

#### ۴-۶- دمای منبع سرد

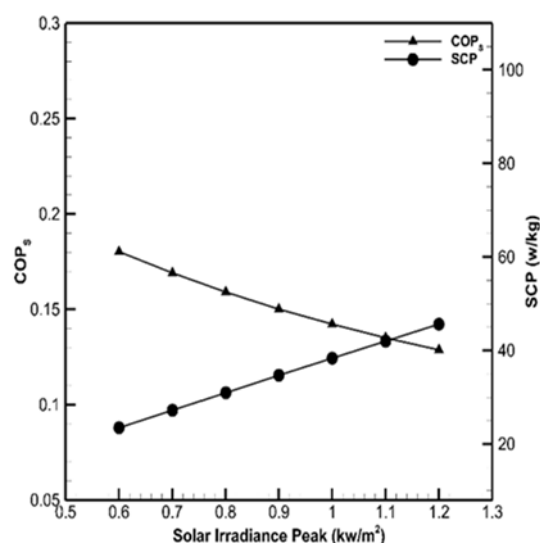
کاهش دمای منبع سرد منجر به افزایش اختلاف جرم جذب شده‌ی مبرد  $\Delta x$  در طول هر فرایند و سیکل می‌شود. از سوی دیگر افزایش بازه تغییرات دمایی سیستم باعث افزایش زمان سیکل و کاهش تعداد دفعات تکرار سیکل در طول روز می‌شود. مطابق شکل (۱۱) در مجموع تأثیر افزایش  $\Delta x$  بیشتر بوده و ضریب عملکرد خورشیدی و توان تبرید ویژه‌ی سیستم افزایش می‌یابد.

### ۶-۵- دمای اواپراتور و کندانسور

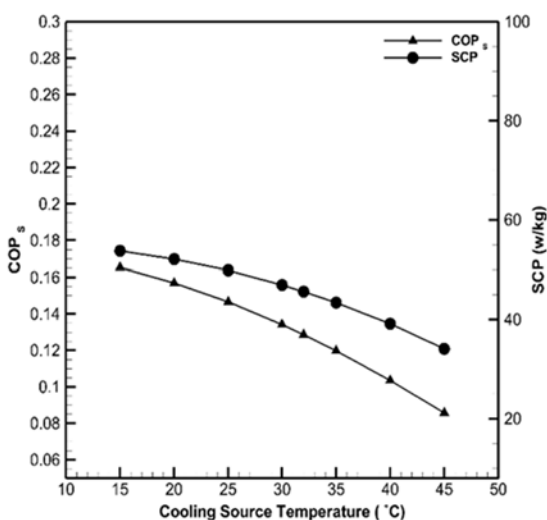
در شکل های (۱۲) و (۱۳) تغییرات ضریب عملکرد خورشیدی و توان تبرید ویژه سیستم بر حسب تغییرات دما و فشار اواپراتور و کندانسور نشان داده شده است. با افزایش دما و فشار اواپراتور و نیز ثابت ماندن دما و فشار کندانسور، ضریب عملکرد خورشیدی و توان تبرید ویژه سیستم افزایش می یابد. علت آن کاهش میزان حرارت محسوس جذب و آسان تر شدن فرایند تبخیر مبرد درون اواپراتور است. در نتیجه ای این دو امر بازه تغییرات جرم جذب شده مبرد افزایش یافته و از این رو میزان سرمایش بیشتری تولید می شود. همچنین با افزایش دما و فشار کندانسور و ثابت ماندن دما و فشار اواپراتور، ضریب عملکرد خورشیدی و توان تبرید ویژه سیستم کاهش می یابد. علت آن افزایش گرمای محسوس جذب است. در نتیجه ای این امر بازه تغییرات جرم مبرد جذب شده کاهش می یابد و از این رو میزان سرمایش کمتری تولید می شود.



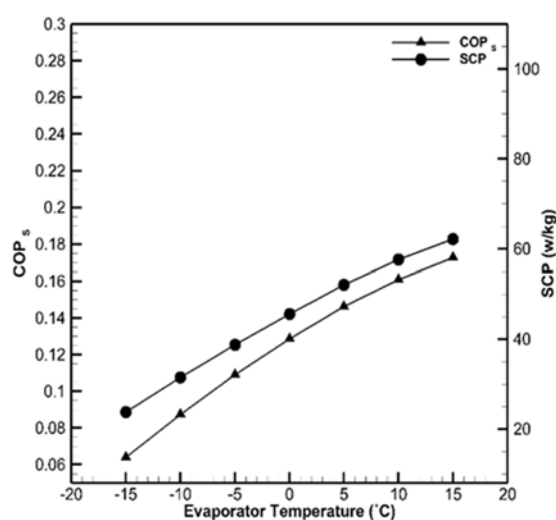
شکل ۱۰- تأثیر میزان تابش خورشیدی بر ضریب عملکرد خورشیدی و توان تبرید ویژه



شکل ۱۱- تأثیر دمای منبع سرد بر ضریب عملکرد خورشیدی و توان تبرید ویژه



شکل ۱۲- تأثیر دمای اواپراتور بر ضریب عملکرد خورشیدی و توان تبرید ویژه



شکل ۱۳- تأثیر دمای کندانسور بر ضریب عملکرد خورشیدی و توان تبرید ویژه

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله و در راستای بهینه سازی و بهبود عملکرد یک سیستم تبرید جذبی سطحی دو بستره و متصل به کلکتور سهموی شکل خورشیدی و سیکل پیوسته، شبیه سازی بکمک یک کد عددی توسط برنامه کامپیوتری برای بررسی، تحلیل و بهینه سازی سیستم های تبرید جذبی سطحی فیزیکی انجام گرفت. نتایج تأثیر مشخصه های بررسی شده روشن کننده چندین موضوع است. کلکتور سهموی شکل خورشیدی با بازدهی بالایی که دارد ضریب عملکرد و توان تبرید ویژه سیستم تبرید جذب سطحی فیزیکی با سیکل پیوسته را به ترتیب تا مقدار 0.22 و 95 بالا می برد. در ضخامت های پایین بستر ضریب عملکرد و توان تبرید ویژه سیستم مقدار قابل توجهی بیشتر از ضخامت های بالاتر است. افزایش میزان تابش خورشیدی با ثابت بودن میزان حداکثری دمای ممکن سیستم با وجود کاهش منطقی ضریب عملکرد خورشیدی سیستم اما میزان توان تبرید ویژه سیستم و مقدار سرمایه گذاری تولید شده را تا دو برابر افزایش می دهد.

## مراجع

- [1] Douss, N., Meunier, F., and Sun, L.M., "Predictive Model and Experimental Results for a Two Absorber Solid Adsorption Heat Pump", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 27, No. 2, pp. 310-316, (1988).
- [2] Critoph, R.E., "Forced Convection Enhancement of Adsorption Cycles", *Heat Recovery Systems and CHP*, Vol. 14, No. 4, pp. 343-350, (1994).
- [3] Anyanwu, E.E., "Review of Solid Adsorption Solar Refrigerator I: An Overview of the Refrigeration Cycle", *Energy Conversion and Management*, Vol. 44, pp. 301-312, (2003).
- [4] Meunier, F., "Adsorptive Cooling: a Clean Technology", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 3, pp. 8-20, (2001).
- [5] Hildbrand, C., Dind, P., Pons, M., and Buchter, F., "A New Solar Powered Adsorption Refrigerator with High Performance", *Solar Energy*, Vol. 77, No. 3, pp. 311-318, (2004).
- [6] Li, M., Sun, C.J., Wang, R.Z., and Ca, W.D., "Development of No Valve Solar Ice Maker", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, pp. 865-872, (2004).
- [7] Khattab, N.M., "A Novel Solar-powered Adsorption Refrigeration Module", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, pp. 2747-2760, (2004).
- [8] Anyanwu, E.E., and Ezekwe, C.I., "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, pp. 2879-2892, (2003).
- [9] Lemmini, F., and Errougani, A., "Building and Experimentation of a Solar Powered Adsorption Refrigerator", *Renewable Energy*, Vol. 30, pp. 1989-2003, (2005).

- [10] Gonza'lez, M.I., and Rodri'guez, L.R., "Solar Powered Adsorption Refrigerator with CPC Collection System", *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, pp. 2587-2594, (2007).
- [11] Saha, B.B., Akisawa, A., and Kashiwagi, T., "Solar/waste Heat Driven Two-stage Adsorption Chiller: The Prototype", *Renewable Energy*, Vol. 23, No. 1, pp. 93-101, (2001).
- [12] Lu, Y.Z., Wang, R.Z., Zhang, M., and Jiangzhou, S., "Adsorption Cold Storage System with Zeolite-water Working Pair used for Locomotive Air Conditioning", *Energy Conversion and Management*, Vol. 44, pp. 1733-1743, (2003).
- [13] Hamrahi, Sh.E., Goudarzi, K., and Yaghoubib, M., "Experimental Study of the Performance of a Continues Solar Adsorption Chiller using Nano-activated Carbon/methanol as Working Pair", *Solar Energy*, Vol. 173, pp. 920-927, (2018).
- [14] Wang, Y., Li, Mi., Du, W., Yu, Q., Ji, X., and Ma, X., "Performance Comparative Study of a Solar-powered Adsorption Refrigerator with a CPC Collector/adsorbent Bed", *Energy Conversion and Management*, Vol. 173, pp. 499-507, (2018).
- [15] Fadar, A.E., "Novel Process for Performance Enhancement of a Solar Continuous Adsorption Cooling System", *Energy*, Vol. 114, pp. 10-23, (2016).
- [18] Leite, A.P.F., Grilo, M.B., Andrade, R.R.D., and Belo, F.A., "Dimensioning, Thermal Analysis Experimental Heat Loss Coefficients of an Adsorptive Solar", *Renewable Energy*, Vol. 29, pp. 1643-1663, (2004).
- [19] Baker, D.K., and Kaftanog'lu, B., "Predicted Impact of Collector and Zeolite Choice on Thermodynamic and Economic Performance of a Solar Powered Adsorption Cooling System", *Experimental Heat Transfer*, Vol. 20, pp. 103-122, (2007).
- [20] Baker, D.K., "Thermodynamic Limits to Thermal Regeneration in Adsorption Cooling Cycles", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 31, pp. 55-64, (2008).
- [21] Badran, O., and Eck, M., "The Application of Parabolic Trough Technology under Jordanian Climate", *Renewable Energy*, Vol. 31, pp. 791-802, (2006).
- [22] Price, H., and Hassani, V., "Modular Trough Power Plant, Cycle and Systems Analysis", NREL/TP-550-31240, (2002).
- [23] Khattab, N.M., "Simulation and Optimization of a Novel Solar-powered Adsorption Refrigeration Module", *Solar Energy*, Vol. 80, pp. 823-833, (2005).
- [24] Fadar, A.E., Mimet, A., and Pérez-García, M., "Modelling and Performance Study of a Continuous Adsorption Refrigeration System Driven by Parabolic Trough Solar Collector", *Solar Energy*, Vol. 83, pp. 850-861, (2009).
- [25] Chekirou, W., Chikouche, A., Boukheit, N., Karaali, A., and Phalippou, S., "Dynamic Modelling and Simulation of the Tubular Adsorber of a Solid Adsorption Machine Powered by Solar Energy", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 39, pp. 137-151, (2014).

- [26] Hong, S.W., Ahn, S.H., Kwon, O.K., and Chung, J.D., "Optimization of a Fin-tube Type Adsorption Chiller by Design of Experiment", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 49, pp. 49-56, (2015).
- [27] Chekirou, W., Boukheit, N., and Karaali, A., "Heat Recovery Process in an Adsorption Refrigeration Machine", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 17, pp. 7146-7157, (2016).
- [28] Teng, Y., Wang, R.Z.J., and Wu, Y., "Study of the Fundamentals of Adsorption Systems", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 327-338, (1997).
- [29] Dubinin, M.M., and Astakhov, V.A., "Development of the Concept of Volume Filling of Micropores in the Adsorption of Gases and Vapors by Microporous Adsorbents", *American Chemical Society, Washington DC, USA*, (1971).
- [30] Wang, R.L., and Wu, J., "*Adsorption Refrigeration Technology: Theory and Application*", John Wiley & Sons, Inc, Singapore Pte. Ltd, (2014).
- [31] H.Perry, R., and W. Green, D., "*Perry's Chemical Engineers' Handbook*", McGraw-Hill, 7th Edition, New York, (1997).

### فهرست نمادهای انگلیسی

$p$  : فشار ( $kgm - 1s - 2$ )

$T$  : دما (K)

$W_0$  : حجم کل میکرو منافذ قابل دسترس جذب شونده در حالت بخار ( $m^3kg - 1$ )

$r_0$  : شعاع خارجی بستر جاذب (m)

$L(T_{ev})$  : گرمای نهان متانول در دمای اواپراتور ( $0^\circ C$ )

$L_r$  : طول جاذب (m)

$T_{ads}$  : دمای جذب (K)

$T_{con}$  : دمای کندانسور (K)

$T_{ev}$  : دمای اواپراتور (K)

$Irr$  : میزان تابش خورشیدی ( $Wm^{-2}$ )

$Q_c$  : سرمایش تولیدی (J)

$COP_s$  : ضریب عملکرد خورشیدی

$SCP$  : توان تبرید ویژه ( $Wkg^{-1}$ )



$\lambda_e$  : ضریب انتقال حرارت جابجایی جاذب ( $Wm^{-1}K^{-1}$ )

$\varepsilon$  : میزان تخلخل

$\rho$  : چگالی ( $kgm^{-3}$ )

$\theta$  : کسر حجمی فاز جذب شده

s : جاذب

g : فاز گاز

a : جذب شده

ads : جذب

con : کندانسور

ev : اواپراتور

## Abstract

In this article an adsorption refrigeration system with Activated Carbon/Methanol as adsorption working pair placed in a parabolic trough solar collector have been studied. A one dimensional numerical model based on heat and mass transfer equation and adsorption thermodynamic within the porous medium is developed. Equations has been discretized through fully implicit finite difference method in cylindrical coordinate. Discretized equations is written in FORTRAN program. The simulated code has been validated by comparison via experimental work and former numerical results. The code at each point computes bed temperature, pressure and adsorbed mass of refrigerant inside the adsorbent bed. In additional effect of some parameters such as bed diameter, solar irradiance, cooling source temperature, evaporator and condenser temperature and pressure has been investigated. Effect of these parameters on the refrigeration adsorption system has shown through variation of the solar coefficient of performance (COPs) and specific cooling power (SCP). Under the operating conditions of evaporation temperature  $T_{ev} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , condensing temperature  $T_{con} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  and adsorption temperature  $T_{ads} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  according to the experimental model, COPs and SCP are found to be 0.12 and  $45.6\text{ w}^1\text{kg}^{-1}$  respectively.