

تحلیل اگزرژی چیلر جذب سطحی با چهار بستر جاذب

رحیم سهرابی^۱، محسن قاضی‌خانی^{۲*}، حمید نیازمند^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد

۳- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد

* مشهد، صندوق پستی ۹۱۷۷۹۴۸۹۷۴، Ghazikhani@um.ac.ir

چکیده

استفاده از چیلرهای جذب سطحی یک روش مناسب برای تولید سرمایش با استفاده از انرژی حرارتی در گستره وسیع دمایی است و در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه با استفاده از پروفیل‌های دمایی به دست آمده از مدل‌سازی چیلر جذب سطحی با چهار بستر جاذب در نرم‌افزار MATLAB و استفاده از جداول خواص ترمودینامیکی نرم‌افزار REFPROP، سیکل از نقطه‌نظر اگزرژی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در مدل‌سازی چیلر جذب سطحی به‌منظور بررسی بهتر فرایند انتقال حرارت، سیال ناقل حرارت گذرنده از بسترهای جاذب، اواپراتور و کندانسور و همچنین لوله ارتباطی بین بسترهای اصلی و فرعی نیز در حالت‌های جذب و احیا با توجه به انتقال حرارت با محیط در امتداد محور لوله شبکه‌بندی شده است. نتایج نشان می‌دهد بیشترین نرخ تخریب اگزرژی مربوط به بستر جاذب و به‌ترتیب در مراحل گرمایش و سرمایش جرم ثابت، می‌باشد. همچنین انتگرال‌گیری از تلفات اگزرژی لحظه‌ای در هر فرایند نشان می‌دهد، بیشترین تلفات اگزرژی در محفظه‌ها مربوط به فرایند جذب در بستر فرعی و کمترین تلفات مربوط به فرایند پیش‌سرد شدن است. در اواپراتور و کندانسور نیز زمانی که بسترها در حال پیش‌سرد شدن و پیش‌گرم شدن هستند، تلفات اگزرژی به حداقل می‌رسد.

کلیدواژگان

اگزرژی، تبرید، جذب سطحی، سیلیکاژل

۱- مقدمه

پایدار سیکلی، کندانسور کمترین و بستر جاذب بیشترین نرخ تولید انتروپی را دارد به طوری که سهم اعظم آن مربوط به فرایند انتقال حرارت و در مراحل جرم ثابت می‌باشد. واسیلیسکو و همکاران [۳] نیز با فرض دما و فشار یکنواخت در بستر بدون پره و ایده‌آل فرض نمودن کندانسور و اواپراتور به تحلیل تخریب اگزرژی در قسمت‌های مختلف سیکل جذب سطحی پرداخته‌اند. نتایج مربوط به این مطالعه نشان می‌دهد که بیشترین نرخ تخریب اگزرژی مربوط به بستر جاذب و به‌ترتیب در مراحل سرمایش و گرمایش جرم ثابت رخ می‌دهد که دلیل اصلی آن وجود اختلاف دمایی زیاد در فرایند انتقال حرارت می‌باشد.

در این مقاله با استفاده از پروفیل‌های دمایی به دست آمده از مدل‌سازی چیلر جذب سطحی با چهار بستر جاذب در نرم‌افزار متلب و فراخوانی خواص ترمودینامیکی از جداول نرم‌افزار REFPROP^۳، سیکل از نقطه‌نظر اگزرژی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در مدل‌سازی چیلر جذب سطحی به‌منظور بررسی بهتر فرایند انتقال حرارت، سیال ناقل حرارت گذرنده از بسترهای جاذب، اواپراتور و کندانسور و همچنین لوله ارتباطی بین بسترهای اصلی و فرعی نیز در حالت‌های جذب و احیا با توجه به انتقال حرارت با محیط در امتداد محور لوله شبکه‌بندی شده است.

۲- عملکرد چیلر جذب سطحی

چیلر جذب سطحی مانند چیلر تراکمی از چهار قسمت اصلی تشکیل شده است. کندانسور، شیر اختناق و اواپراتور در هر دو مشترک هستند اما در چیلر جذب سطحی، محفظه‌های جاذب نقش کمپرسور را ایفا می‌کنند. محفظه جاذب از مواد جامدی پر شده است که می‌توانند سیالات خاصی را جذب کرده و مجدداً احیا کنند. این مواد متخلخل هنگامی که سرد شوند سیال را جذب کرده و با گرم شدن آن را احیا می‌کنند و این فرایند می‌تواند به صورت تکرارپذیر برای مدت طولانی انجام شود. به‌منظور بهبود عملکرد چیلر و

چیلرهای تراکمی یکی از پرمصرف‌ترین تجهیزات برقی در صنعت تهویه مطبوع می‌باشند که برای کاهش هزینه انرژی در این صنعت، بهینه‌سازی چیلرهای تراکمی در اولویت قرار دارد. در همین راستا شروع به جایگزینی چیلرهای جذبی با چیلرهای تراکمی با ظرفیت بالا شده است. ایده این جایگزینی تقریباً موفقیت‌آمیز بوده و توانسته است هزینه‌ها را کاهش دهد. ولی چیلرهای جذبی^۱ با جاذب مایع خود نیز معایبی دارد که زمینه‌سازی آن را محدود می‌کند. لذا برای به حداقل رساندن مشکلات و محدودیت‌های چیلرهای جذبی با جاذب مایع، می‌توان از جایگزینی این چیلر با نوع جامد^۲ آن بهره برد. چرا که گرمای مورد نیاز برای چیلر جذبی با جاذب جامد در محدوده دمایی پایین‌تری می‌باشد که این امر موجب می‌شود تا بسیاری از معایب و محدودیت‌های چیلر جذبی با جاذب مایع ضمن حفظ مزیت برطرف شود. مطالعات اندکی در خصوص بررسی کمی بازگشت‌ناپذیری‌های مربوط به فرایندهای سیستم جذب سطحی و محاسبه تولید انتروپی در قسمت‌های مختلف این سیستم موجود است.

مونیر و همکاران [۱] با ارائه مدلی ترمودینامیکی و فرض دمای یکنواخت برای تمامی اجزای سیستم جذب سطحی، تولید کل انتروپی حرارتی را بررسی کرده‌اند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که اتصال حرارتی منبع گرمایی با دمای ثابت به بستر جاذب، قسمت عمده بازگشت‌ناپذیری‌های مربوط به این سیکل را به خود اختصاص داده است به طوری که در سیکل‌هایی که فاقد بازیابی حرارت هستند، تا ۹۰٪ تفاوت COP سیستم از هم‌تای آن در سیکل کارنو ناشی از این اتصال حرارتی می‌باشد. چوا و همکاران [۲] تولید انتروپی را در قسمت‌های مختلف چیلر جذبی سیلیکاژل-آب که شامل دو بستر و فاقد سیکل بازیابی حرارت است به صورت کمی و در حالت گذرا بررسی کرده‌اند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که در حالت

¹ Absorption chiller

² Adsorption chiller

³ Refrigeration property software (REFPROP)

پیش سرد شدن قابل استخراج خواهند بود. بنابراین تخریب آگرژی در بستر در حال جذب مطابق رابطه ۴ بدست می آید.

$$i = \dot{m}_{cw}c_{pw} \left[(T_{cin} - T_{cout}) - T_0 \ln \left(\frac{T_{cin}}{T_{cout}} \right) \right] - \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \left[m_a c_{pw} q_{ads} \frac{dT}{dt} + (m_{Hex}c_{al} + m_a c_a) \frac{dT}{dt} - m_a \frac{dq_{ads}}{dt} \Delta H_{ads} \right] - m_a c_{pwv} \frac{dq_{ads}}{dt} [(T - T_e)] - T_0 \ln \left(\frac{T}{T_e} \right) \quad (4)$$

بستر در حال پیش گرم شدن:

$$i = \dot{m}_{hw}c_{pw} \left[(T_{hin} - T_{hout}) - T_0 \ln \left(\frac{T_{hin}}{T_{hout}} \right) \right] - \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \left[m_a c_{pw} q \frac{dT}{dt} + (m_{Hex}c_{al} + m_a c_a) \frac{dT}{dt} \right] \quad (5)$$

بستر در حال احیا:

$$i = \dot{m}_{hw}c_{pw} \left[(T_{hin} - T_{hout}) - T_0 \ln \left(\frac{T_{hin}}{T_{hout}} \right) \right] - \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \left[m_a c_{pw} q \frac{dT}{dt} + (m_{Hex}c_{al} + m_a c_a) \frac{dT}{dt} - m_a \frac{dq}{dt} \Delta H_{ads} \right] \quad (6)$$

بستر در حال پیش سرد شدن:

$$i = \dot{m}_{cw}c_{pw} \left[(T_{cin} - T_{cout}) - T_0 \ln \left(\frac{T_{cin}}{T_{cout}} \right) \right] - \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \left[m_a c_{pw} q \frac{dT}{dt} + (m_{Hex}c_{al} + m_a c_a) \frac{dT}{dt} \right] \quad (7)$$

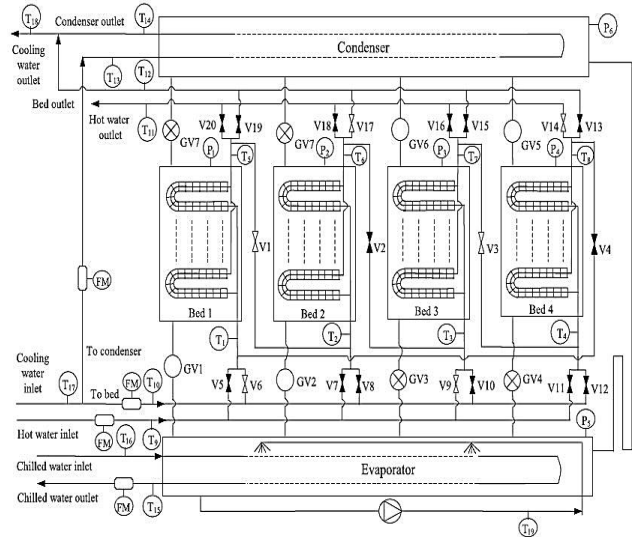
تخریب آگرژی در کندانسور:

$$i = - \left(1 - \frac{T_0}{T_c} \right) \frac{d}{dt} (m_c c_{cu} T_c) + m_a \frac{dq_{des}}{dt} c_{pwv} \left[T_c - T - T_0 \ln \left(\frac{T_c}{T} \right) \right] - \dot{m}_{chw}c_{pw} \left[(T_{ccin} - T_{ccout}) - T_0 \ln \left(\frac{T_{ccin}}{T_{ccout}} \right) \right] \quad (8)$$

تخریب آگرژی در اواپراتور:

$$i = \dot{m}_{chw}c_{pw} \left[(T_{chin} - T_{chout}) - T_0 \ln \left(\frac{T_{chin}}{T_{chout}} \right) \right] - \left(1 - \frac{T_0}{T_e} \right) \{ m_w(t) c_{pw} + m_e c_{cu} \} \frac{dT_e}{dt} + m_a \frac{dq_{des}}{dt} c_{pw} [T_e - T_c - T_0 \ln \left(\frac{T_e}{T_c} \right)] \quad (9)$$

افزایش میزان انتقال جرم و حرارت معمولاً از مبدل‌های حرارتی در محفظه استفاده می‌شود و ذرات جاذب روی سطوح مبدل حرارتی و بین پره‌ها قرار می‌گیرند. عملکرد چیلر جذب سطحی با چهار بستر جاذب به صورت کامل در مرجع [۴] تشریح شده است.



شکل ۱ چیلر جذب سطحی با چهار بستر جاذب مطابق نمونه آزمایشگاهی وانگ و همکاران [۴].

۳- مدل‌سازی چیلر جذب سطحی

در مدل‌سازی سیستم تبرید جذب سطحی به منظور ساده‌سازی مدل، فرضیاتی در نظر گرفته می‌شود که عبارتند از:

- دمای جاذب، محفظه جذب و مبرد جذب شده در بستر جاذب یکسان فرض می‌شود.
- در اواپراتور و کندانسور، دمای مبرد موجود در مبدل‌ها و بدنه مبدل یکسان فرض می‌شود.
- فشار در سراسر محفظه جذب، اواپراتور و کندانسور یکنواخت فرض می‌شود.
- گرمای جذب (ΔH_{ads}) برابر مقدار ثابت 2800 kJ/kg فرض می‌شود [۵].
- از اختلاف فشار بین محفظه‌های جذب با اواپراتور و کندانسور در زمان اتصال با هر یک، صرف نظر می‌شود.
- از تلفات حرارتی در محفظه‌های جذب، اواپراتور و کندانسور صرف نظر می‌شود.

با استفاده از روابط جذب سطحی و موازنه انرژی حاکم بر اجزا سیکل در مرجع [۶] و اعمال شرایط مرزی و پارامترهای عملکردی مطابق نمونه آزمایشگاهی وانگ و همکاران [۴] پروفیل‌های دمایی استخراج شدند. موازنه آگرژی برای یک حجم کنترل کلی از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

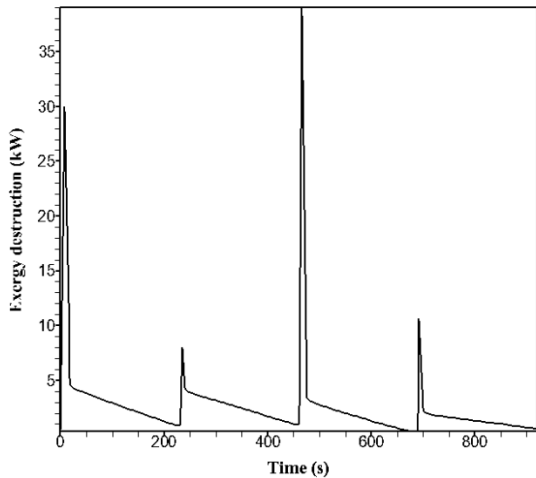
$$\dot{W}_X + \dot{W}_{CSN} = - \frac{dE}{dt} + \dot{E}_i - \dot{E}_e + \dot{E}_Q - \dot{i} \quad (1)$$

$$E = E_{CR} + P_0 V_{CR} - T_0 S_{CR} \quad (2)$$

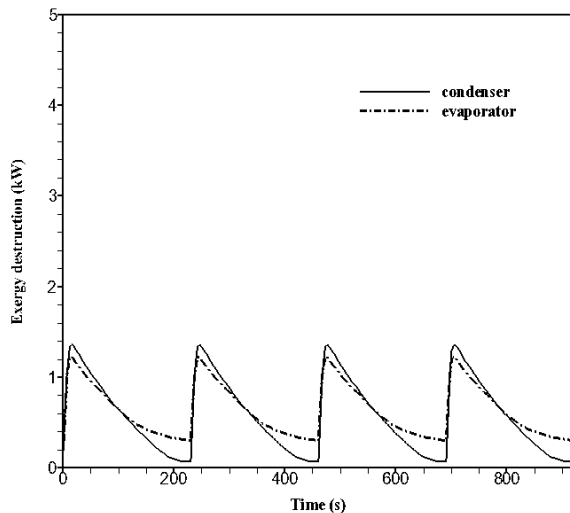
$$\dot{E} = \sum [\dot{m}(h_T - T_0 s)] \quad (3)$$

با توجه به روابط ارائه شده، رابطه موازنه آگرژی برای اواپراتور، کندانسور و محفظه‌های جذب در هنگام جذب سطحی، پیش گرم شدن، احیا و

کمترین مقدار را دارد. بیشترین مقدار تخریب نیز در محفظه‌های جذب صورت می‌گیرد.



شکل ۳ تلفات انرژی در یکی از محفظه‌های جذب



شکل ۴ تلفات انرژی در اواپراتور و کندانسور

مقادیر کل تخریب و راندمان انرژی طی ۴ مرحله سیکل در هر محفظه جذب، اواپراتور و کندانسور مطابق مقادیر جدول ۱ می‌باشند.

جدول ۱ مقادیر کل تخریب و راندمان انرژی در بسترهای جذب، اواپراتور و کندانسور

محفظة	فرایند	تخریب انرژی (kJ)
جذب	پیش سرد شدن	427.6
	جذب (بستر فرعی)	481.3
	جذب (بستر اصلی)	467.8
	پیش گرم شدن	438.3
	احیا (بستر فرعی)	453.9
	احیا (بستر اصلی)	449.7
کندانسور		473.4
اواپراتور		487.3
راندمان انرژی		0.26

$$m_w(t) = m_{w0} - m_a \frac{dq_{ads}}{dt} - m_a \frac{dq_{des}}{dt} \quad (10)$$

راندمان انرژی برای کل چیلر جذب سطحی به عنوان یک سیستم، به صورت رابطه ۱۱ تعریف می‌شود.

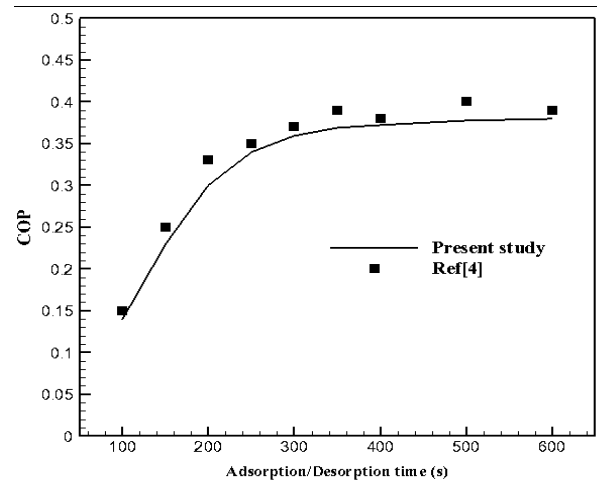
$$\eta_{ex} = \frac{\dot{m}_{chw}[(h_T - T_0S)_{chin} - (h_T - T_0S)_{chout}]}{\dot{m}_{hw}[(h_T - T_0S)_{hin} - (h_T - T_0S)_{hout}]} \quad (11)$$

ضریب عملکرد چیلر جذب سطحی نسبت سرمایه‌گذاری متوسط تولیدی به حرارت ورودی سیستم است که بر اساس رابطه ۱۲ تعریف می‌شود.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{Q}_{hot}} \quad (12)$$

۴- اعتبارسنجی

برای بررسی صحت و دقت مدل‌سازی نیاز است تا نتایج با داده‌های یک نمونه تجربی مقایسه شود، لذا اعتبارسنجی این مطالعه با تطبیق شرایط عملکردی سیکل با نمونه آزمایشگاهی وانگ و همکارانش [۴] انجام شده است. با توجه به ساده‌سازی‌ها، فرضیات اعمال شده و نیز تعداد زیاد پارامترهای مؤثر در مدل‌سازی، انطباق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی دیده می‌شود.



شکل ۵ مقایسه مقادیر ضریب عملکرد سیکل در مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی

۵- نتایج

شکل‌های ۳ و ۴ تغییرات تلفات انرژی در محفظه‌های جذب، اواپراتور و کندانسور را نشان می‌دهند. همان‌طور که از شکل ۳ مشخص است، نرخ تخریب انرژی در محفظه‌ها در شروع جابجایی بین محفظه‌ها با شیب زیادی افزایش می‌یابد و سپس تقریباً با همان شیب کاهش می‌یابد و زمانی که فرایندهای جذب سطحی و احیا شروع می‌شوند، با روند نزولی ملایمی تغییر می‌کند تا جایی که در پایان این فرایندها تقریباً به صفر میل می‌کند. دلیل افزایش ناگهانی تخریب انرژی هنگام فرایندهای پیش سرد و پیش گرم شدن اختلاف دمای بسیار زیاد در هنگام انتقال حرارت است.

همان‌طور که کوئاس در [۷] اثبات نموده، در انتقال حرارت با اختلاف دمای محدود، هرچه اختلاف دما بیشتر باشد، تخریب انرژی نیز بیشتر است. مطابق شکل‌های ۳ و ۴ در هر بستر جاذب، بیشترین نرخ تلفات انرژی مربوط به فرایند پیش گرم شدن است. همچنین نتایج بدست آمده نشان می‌دهد تخریب انرژی کل در طول یک سیکل کاری چیلر، در کندانسور

heat recovery scheme, *International journal of refrigeration*, Vol. 28, No. 5, pp. 756-765, 2005.

- [5] D. Wang, Z. Xia, J. Wu, R. Wang, H. Zhai, W. Dou, Study of a novel silica gel-water adsorption chiller. Part I. Design and performance prediction, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 28, No. 7, pp. 1073-1083, 2005.
- [6] H. Chua, K. Ng, A. Malek, T. Kashiwagi, A. Akisawa, B. Saha, Multi-bed regenerative adsorption chiller—improving the utilization of waste heat and reducing the chilled water outlet temperature fluctuation, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 24, No. 2, pp. 124-136, 2001.
- [7] T. J. Kotas, *The exergy method of thermal plant analysis*: Elsevier, 2013.

۶- نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله، چیلر جذب سطحی با چهار بستر جاذب و زوج کاری سیلیکاژل-آب مدل سازی شده است. انتگرال گیری از تلفات انرژی لحظه‌ای در هر فرایند نشان می‌دهد، بیشترین تلفات انرژی در محفظه‌ها مربوط به فرایند جذب در بستر فرعی و کمترین تلفات مربوط به فرایند پیش سرد شدن است. در اواپراتور و کندانسور نیز زمانی که محفظه‌ها در حال پیش سرد شدن و پیش گرم شدن هستند، تلفات انرژی به حداقل می‌رسد.

۷- فهرست علائم

c	ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
E	انرژی جریان (kJ)
h	انتالپی (kJkg^{-1})
\dot{I}	نرخ تخریب انرژی (kW)
\dot{m}	دبی جرمی (kgs^{-1})
P	فشار (kPa)
q	نسبت جرم مبرد جذب شده به جاذب (kgkg^{-1})
s	انتروپی ($\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
T	دما (K)
V	حجم (m^3)
\dot{W}	انرژی کار (kJ)

علائم یونانی

ε انرژی غیرجریانی

زیر نویس ها

a	جاذب
ads	جذب سطحی
al	آلومینیوم
c	کندانسور
ch	آب سرد
cw	آب خنک کن
cu	مس
des	احیا
e	اواپراتور
Hex	مبدل حرارتی
hw	آب گرم
v	بخار
w	آب

۸- مراجع

- [1] F. Meunier, F. Poyelle, M. LeVan, Second-law analysis of adsorptive refrigeration cycles: the role of thermal coupling entropy production, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 43-55, 1997.
- [2] H. Chua, K. Ng, A. Malek, T. Kashiwagi, A. Akisawa, B. Saha, Entropy generation analysis of two-bed, silica gel-water, non-regenerative adsorption chillers, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 31, No. 12, pp. 1471, 1998.
- [3] E. E. Vasilescu, R. Boussechain, M. L. Feidt, Exergy analysis of an adsorption refrigeration machine, *International Journal of Exergy*, Vol. 4, No. 2, pp. 197-215, 2007.
- [4] X. Wang, H. T. Chua, K. C. Ng, Experimental investigation of silica gel-water adsorption chillers with and without a passive