

استفاده از بازدهی و کارایی اکسرژی در تبیین عملکرد پمپ حرارتی جذبی

مجتبی سمنانی رهبر

تهران، دانشگاه امام حسین(ع)، دانشکده علوم و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

پیام‌نگار: msrahbar@yahoo.com

چکیده

امروزه استفاده از انرژی‌هایی که به هدر می‌روند و بازیابی آنها با استفاده از پمپ‌های حرارتی که می‌توانند گرما و سرمای مفید ایجاد کنند، یکی از راه‌های مطرح برای رفع مشکلات مربوط به نیاز روزافزون به انرژی است. استفاده بهینه از پمپ‌های حرارتی، مستلزم آن است که شاخص‌های متقن و کاربردی برای بررسی عملکرد آنها موجود باشد تا بر اساس آن بتوان درباره‌ی چگونگی عملکرد و افزایش بازدهی آنها قضاوت نمود. شاخص‌های سنتی متداول که مبتنی بر قوانین اساسی ترمودینامیک می‌باشند امروزه در حال تغییر و تحول‌اند و نیاز به استفاده از شاخص‌های مؤثرتر که با شفافیت بیشتری بتوانند عملکرد پمپ‌های حرارتی را بیان نمایند روز بروز افزایش می‌یابد. تبیین پمپ حرارتی جذبی به شکل قطب‌های اکسرژی و استفاده از بازدهی و کارایی اکسرژی یکی از شاخص‌هایی است که می‌تواند در این راه مورد استفاده قرار گیرد. در این مقاله ابتدا به یک پمپ حرارتی به عنوان یک دوقطبی یا چهارقطبی اکسرژی نگریسته شده و سپس به چگونگی عملکرد پمپ‌های حرارتی جذبی، انواع و شاخص‌های ارزیابی آنها پرداخته شده و ارتباط بین بازدهی و کارایی اکسرژی پمپ‌های حرارتی با شاخص‌های دیگر، تبیین گشته‌اند.

کلمات کلیدی: پمپ حرارتی جذبی، اکسرژی، عملکرد، بازدهی، قطب

۱- مقدمه

در تمامی فعالیتهای اجتماعی با همه تنوع و گوناگونی آنها، انسان نیازمند به تولید حرارت و برودت برای اهداف زیر است:

هدف از گرم کردن آب شهر در یک سیکل باز و رساندن

دمای آن از 20°C به 60°C استفاده می‌شود.

۳. اجرای تهویه مطبوع در ساختمان، که برای این کار دمای

یک سیال از 12°C به 7°C کاهش داده می‌شود و سپس،

سیال وارد سیستم تهویه مطبوع می‌گردد.

۴. تولید برودت برای انجماد مواد غذایی، که در آن دمای یک

سیال از 0°C به -5°C تقلیل داده می‌شود.

۱. گرم کردن ساختمانها، که برای این کار غالباً از جریان سیال

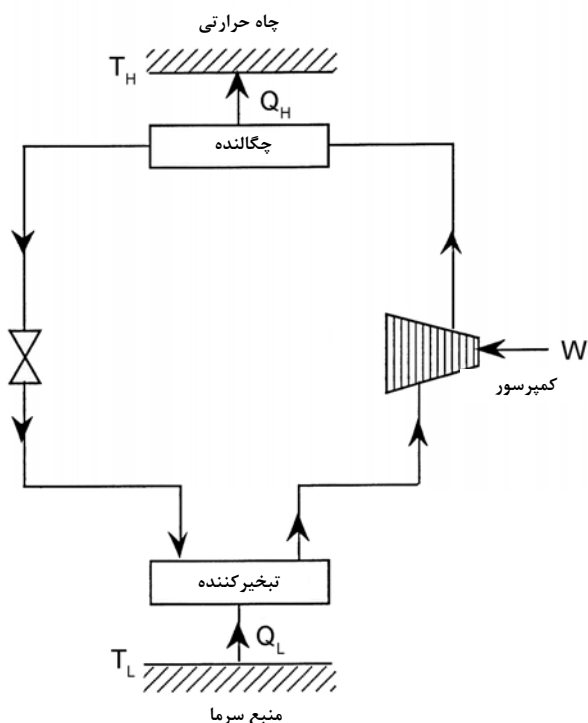
گرم در یک سیکل بسته با دمای 40°C - 70°C استفاده

می‌شود.

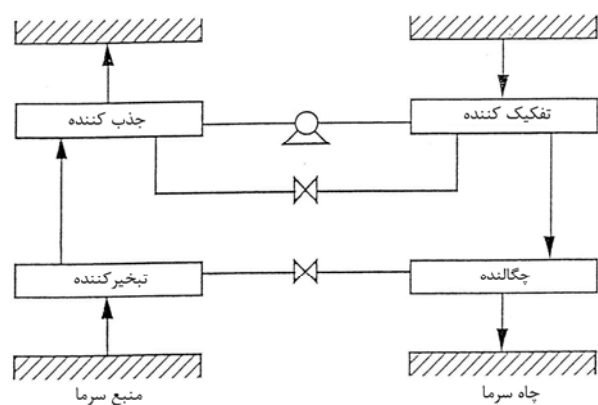
۲. تولید آب گرم برای خدمات بهداشتی - غذایی، برای این

می‌توانند سبب تولید برودت از یک منبع حرارتی و یا افزایش سطح حرارتی آن گردد. یک پمپ حرارتی جذبی شامل دو قسمت عمده است:

۱- جداکننده: که توسط آن یک محلول دو جزئی به دو فاز، شامل یک جزء فرار سبک و یک فاز سنگین در طی یک فرایند تقطیر، تفکیک می‌گردد. این عمل بین دو دمای T_c و T_h که، به ترتیب، دمای جوش‌آور و دمای کندانسور است صورت می‌پذیرد.



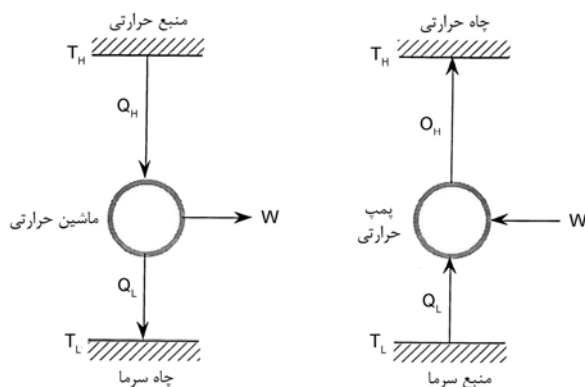
شکل ۲- طرح اجمالی یک پمپ حرارتی تراکمی



شکل ۳- طرح اجمالی یک پمپ حرارتی جذبی

مقدار انرژی مصرفی برای تولید حرارت همانند تولید برودت حدود ده‌ها کیلووات تخمین زده می‌شود، خصوصاً در صنایع کشاورزی - غذایی که این مقدار مصرف به چندین مگاوات افزایش می‌یابد [۱].

برای حداکثر استفاده از انرژی می‌توان حرارت و برودت مورد نیاز را توسط سیستم‌های مختلف پمپ‌های حرارتی تأمین کرد. پمپ حرارتی سیستمی است که سطح حرارتی یک منبع انرژی را افزایش می‌دهد. به عبارت دیگر، سیستم مزبور با استفاده از یک منبع انرژی دیگر، سطح انرژی منبع اولیه را افزایش می‌دهد. این عمل کاملاً برخلاف یک ماشین حرارتی است که با استفاده از حرارت، کار ایجاد می‌کند، زیرا با استفاده از کار مکانیکی، سطح انرژی حرارتی افزایش می‌یابد (شکل (۱)).



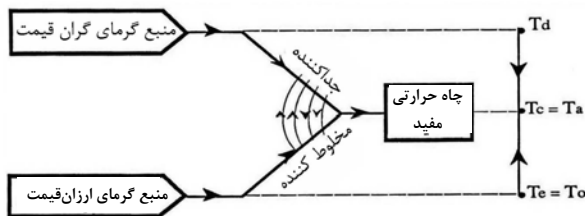
شکل ۱- طرح اجمالی یک ماشین حرارتی و یک پمپ حرارتی

یکی از روشهای متداول در پمپ‌های حرارتی استفاده از یک سیکل (چرخه) مکانیکی با تراکم بخار است (شکل (۲))، که در این صورت به این نوع پمپ، پمپ حرارتی تراکمی^۱ اطلاق می‌گردد.

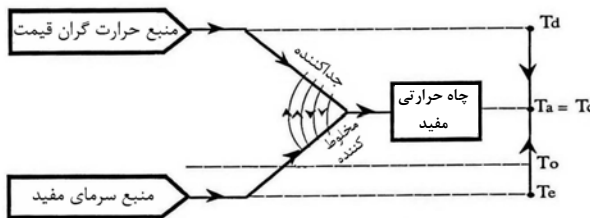
عمل افزایش ارزش حرارتی را می‌توان توسط یک سیکل جذبی نیز انجام داد که در این صورت از پمپ حرارتی جذبی^۲ استفاده خواهد شد (شکل (۳)) [۲].

در این روش، فرایند تفکیک و میعان باعث جداسازی اجزای یک مخلوط دو جزئی می‌گردد که اجزای مزبور در فرایند دیگری شامل تبخیر و جذب، یک مخلوط دو جزئی ایجاد می‌نمایند. این تحولات،

1. Compression Heat-pump
2. Absorption Heat-pump

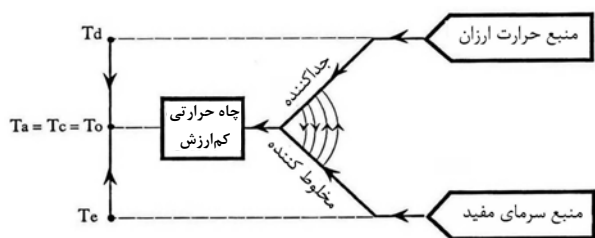


شکل ۵- طرح اجمالی پمپ حرارتی جذبی نوع I



شکل ۶- طرح اجمالی پمپ حرارتی جذبی نوع II

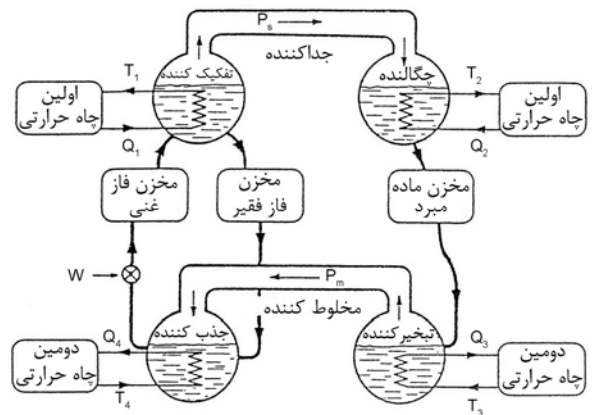
ج - پمپ حرارتی جذبی نوع III: در این نوع پمپ حرارتی، تبخیرکننده، برودت مفید ایجاد می‌کند و برای انجام این کار، تفکیک‌کننده گرمای خود را از یک منبع حرارتی گران‌قیمت (با دمای بسیار بالا)، یا ارزان قیمت یا کم ارزش (با دمای متوسط)، دریافت می‌کند. در این نوع، کندانسور و جذب‌کننده، حرارت غیر مفید خود را (که دارای دمای پائینی است) در محیط تخلیه می‌کند (شکل (۷)).



شکل ۷- طرح اجمالی پمپ حرارتی جذبی نوع III

د - پمپ حرارتی جذبی نوع IV: در این نوع، جذب‌کننده و چگالنده، حرارت مفید، و تبخیرکننده، برودت مفید، تولید می‌کند و تفکیک‌کننده حرارت خود را از منبع حرارتی گران‌قیمت با دمای بالا تأمین می‌نماید (شکل (۸)).

۲- مخلوط‌کننده: که توسط آن دو فاز مبرور طی فرایند تبخیر و جذب گازی مخلوط می‌شوند. این اختلاط بین دمای T_e که دمای تبخیرکننده و T_a که دمای جذب است صورت می‌گیرد (شکل (۴)).



شکل ۴- نمایش اجزای یک پمپ حرارتی جذبی

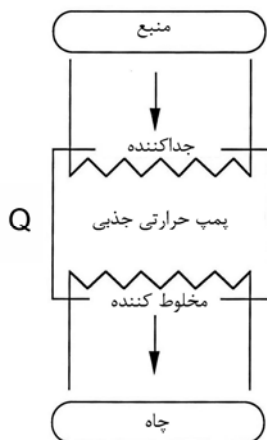
۲- انواع پمپ‌های حرارتی جذبی

پمپ‌های حرارتی جذبی را می‌توان با توجه به دمای قطب‌های اکسرژی دسته‌بندی کرد. بعنوان مثال اگر T_c و T_d از T_e و T_a بزرگتر باشند. پمپ حرارتی جذبی از نوع اول خواهد بود. در این نوع، فشار در جداکننده بیشتر از فشار در مخلوط‌کننده است. در شکل‌های (۵) تا (۸) انواع پمپ‌های حرارتی جذبی ارائه شده‌اند [۴۳].

الف - پمپ حرارتی جذبی نوع I: در این نوع پمپ حرارتی جذبی، یک منبع انرژی در دمای پائین و منبع انرژی دیگر در دمای بسیار بالا وجود دارد که در نهایت، انرژی در دمای متوسط ایجاد می‌شود. در این نوع پمپ حرارتی، کندانسور (چگالنده) و جذب‌کننده گرمای مفید به محیط می‌دهند و تفکیک‌کننده گرما را در دمای بالا (منبع حرارتی گران قیمت) و تبخیرکننده گرما را از منبع حرارتی با دمای مرجع (منبع حرارتی بدون ارزش) می‌گیرند (شکل (۵)).

ب - پمپ حرارتی جذبی نوع II: در این نوع پمپ حرارتی، دو منبع حرارتی با دمای متوسط (منبع حرارتی نه چندان گران‌قیمت) به سیستم در تبخیرکننده و تفکیک‌کننده حرارت می‌دهند و در جذب‌کننده گرمای مفید (با دمای مناسب) ایجاد می‌شود (شکل (۶)).

تمامی پمپ حرارتی جذبی را می‌توان سیستمی دانست که در آن دو تبدیل‌کننده اکسرژی وجود دارند که در "جداکننده" اکسرژی حرارتی به اکسرژی شیمیایی و در "مخلوط‌کننده" اکسرژی شیمیایی به اکسرژی حرارتی تبدیل می‌شود (شکل (۱۰)).



شکل ۱۰- طرح اجمالی یک پمپ حرارتی جذبی به مثابه یک سیستم دو قطبی اکسرژی

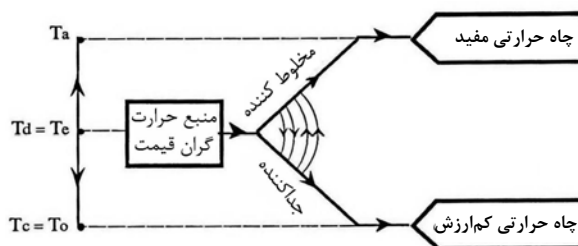
۴- معیارهای ارزیابی عملکرد پمپ حرارتی جذبی

بصورت کلی، عملکرد یک پمپ حرارتی را می‌توان با توجه به قانون اول ترمودینامیک که بر اساس آن، همه انرژی‌ها هم‌ارزش هستند و یا قانون دوم ترمودینامیک که بر طبق آن انرژی‌ها دارای ارزش‌های متفاوتی هستند ارزیابی کرد.

۴-۱ ضریب عملکرد (COP): ضریب عملکرد، رایج‌ترین معیار برای ارزیابی یک پمپ حرارتی است. این پارامتر مبتنی بر اصل اول ترمودینامیک و بر طبق تعریف نسبت حرارت (یا برودت) مفید بدست آمده بر مجموع انرژی‌های با ارزش (گران‌قیمت) مصرف شده است که در اینصورت:

$$COP = \frac{\text{شدت جریان انرژی مفید بدست آمده}}{\text{شدت جریان انرژی گران قیمت مصرف شده}} \quad (1)$$

این معیار نمی‌تواند کیفیت انرژی‌های داده شده و اخذ شده را ارائه کند زیرا طبق قانون اول ترمودینامیک ارزش همه انرژی‌ها یکسان است [۵]. این معیار برای انواع مختلف پمپ حرارتی جذبی به

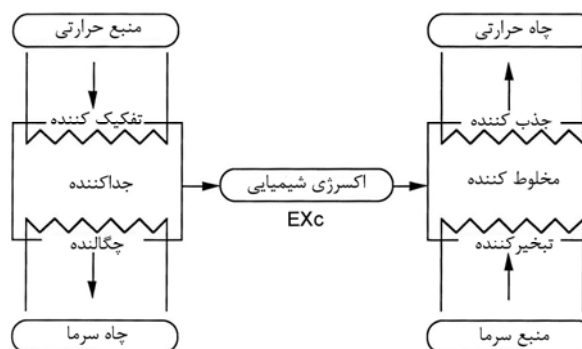


شکل ۸- طرح اجمالی پمپ حرارتی جذبی نوع IV

۳- چند قطبی اکسرژتیک

یک سیستم پمپ حرارتی را می‌توان بصورت قطب‌های اکسرژی یا به عبارت دیگر دارای منبع تولید اکسرژی و چاه مصرف اکسرژی در نظر گرفت. از آنجائیکه تعداد قطب‌های اکسرژی اساساً بستگی به تعداد جعبه‌هایی دارد که می‌توان در آنالیز سیستم بدست آورد، برای یک پمپ حرارتی جذبی می‌توان به دو شیوه این قطب‌ها را تعیین کرد:

الف - یک سیستم چهار قطبی اکسرژی که در آن هر یک از اجزای پمپ حرارتی (تفکیک‌کننده، چگالنده، تبخیرکننده و جذب‌کننده) به منزله یک قطب اکسرژی در نظر گرفته می‌شود.
ب - یک سیستم دو قطبی اکسرژی که در آن مجموعه تفکیک‌کننده - چگالنده به صورت یک جعبه با عنوان "جداکننده"، و تبخیرکننده - جذب‌کننده به صورت یک جعبه دیگر با عنوان "مخلوط‌کننده" بصورت دو قطب اکسرژی در نظر گرفته می‌شوند (شکل (۹)).



شکل ۹- طرح اجمالی یک پمپ حرارتی جذبی به مثابه

یک سیستم چهار قطبی اکسرژی

جدول ۲- ضریب عملکرد ماکزیمم انواع پمپ‌های حرارتی جذبی

ضریب عملکرد ماکزیمم	پمپ حرارتی جذبی
$COP_{max} = \frac{T_a(T_d - T_c)}{T_d(T_a - T_c)} = \frac{\theta_d - \theta_c}{\theta_a - \theta_c} \quad (6)$	نوع I
$COP_{max} = \frac{T_a(T_d - T_e)}{T_e(T_c - T_e)} = \frac{\theta_d - \theta_c}{\theta_a - \theta_e} \quad (7)$	نوع II
$COP_{max} = \frac{T_e(T_d - T_a)}{T_d(T_c - T_e)} = \frac{\theta_d - \theta_a}{\theta_c - \theta_e} \quad (8)$	نوع III
$COP_{max} = \frac{T_a(T_d - T_e) + T_e(T_d - T_a)}{T_d(T_a - T_e)} = \frac{\theta_d - \theta_c}{\theta_a - \theta_e} \quad (9)$	نوع IV

ماکزیمم را که بر اساس دمای سیال سرویس محاسبه می‌شود می‌توان بصورت زیر ارائه کرد. با در نظر گرفتن رابطه زیر:

$$COP_{max} = \frac{(T_d - T_a)T_e}{(T_c - T_e)T_d} = \frac{\theta_a - \theta_d}{\theta_e - \theta_c} \quad (10)$$

و با در نظر گرفتن اختلاف دمای ΔT یا $\Delta\theta$ بین سیال سرویس و سیال کار می‌توان نوشت:

$$COP_{max-int} = \frac{(\theta_a + \Delta\theta) - (\theta_d - \Delta\theta)}{(\theta_e - \Delta\theta) - (\theta_c + \Delta\theta)} \quad (11)$$

این رابطه بصورت کلی می‌تواند برای ضریب عملکرد ماکزیمم داخلی (با در نظر گرفتن دماهای سیال کار) بکار رود و برای هر یک از انواع پمپ‌های حرارتی با در نظر گرفتن شرایط آنها مورد استفاده قرار گیرد یا ارتباط آن با COP_{max} تبیین شود مثلاً در مورد پمپ حرارتی جذبی نوع III با توجه به $\theta_a = \theta_c = 0 \Rightarrow T_a = T_c = T_0$ می‌توان چنین نوشت:

صورت‌های متفاوت ارائه می‌شود که می‌توان آنرا با توجه به مقادیر ارائه شده در شکل‌های (۵) تا (۸)، بصورت جدول (۱) نمایش داد.

جدول ۱- ضریب عملکرد انواع پمپ‌های حرارتی جذبی

ضریب عملکرد	پمپ حرارتی جذبی
$COP = \frac{Q_c + Q_a}{Q_d} \quad (2)$	نوع I
$COP = \frac{Q_a}{Q_d + Q_e} \quad (3)$	نوع II
$COP = \frac{Q_e}{Q_a} \quad (4)$	نوع III
$COP = \frac{Q_e + Q_a + Q_c}{Q_d} \quad (5)$	نوع IV

ضریب عملکرد می‌تواند مقدار بیشتر از واحد را دارا باشد زیرا این پارامتر موازنه کلی آنتالپی سیستم را ارائه نمی‌کند.

۲-۴ ضریب عملکرد ماکزیمم COP_{max} : برای بررسی بازدهی عملیاتی پمپ‌های حرارتی، تخمین ضریب عملکرد ماکزیمم یک پمپ حرارتی در شرایط عملیاتی آن بسیار مفید خواهد بود زیرا با دانستن این مقدار می‌توان فاصله عملکرد واقعی سیستم از مقدار حداکثر را تعیین کرد. برای محاسبه ضریب عملکرد ماکزیمم، باید پمپ حرارتی در شرایط عملیاتی به مثابه یک سیستم برگشت‌پذیر در نظر گرفته شود. جدول (۲) مقادیر ضریب عملکرد ماکزیمم برای انواع پمپ‌های حرارتی جذبی را ارائه می‌کند، با ذکر این نکته که دماهای ارائه شده (دمای مطلق با T و دمای کارنو با $\theta = 1 - \frac{T_0}{T}$) دمای سیال سرویس در چهار نقطه پمپ حرارتی جذبی یعنی تفکیک‌کننده، کندانسور، تبخیرکننده و جذب‌کننده است.

می‌توان ضریب عملکرد ماکزیمم را بر اساس دمای سیال کار نیز بیان کرد که در اینصورت دماهای سیستم داخلی^۱ پمپ حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد در این حالت، ضریب عملکرد ماکزیمم داخلی COP_{max-in} را خواهیم داشت که ارتباط این پارامتر با ضریب عملکرد

1. Internal System

$$COV = \frac{\sum E_{out} \cdot V_{out}}{\sum E_{in} \cdot V_{in}} \quad (15)$$

که E_{in} و E_{out} به ترتیب بر حسب واحد انرژی شدت جریان‌های انرژی‌های خروجی و ورودی و V_{in} و V_{out} به ترتیب ارزش انرژی‌های خروجی و ورودی خواهند بود. اگر در این ارزش‌گذاری معیار آنتالپی بعنوان ارزش انرژی حرارتی تعیین شود COV به COP تبدیل می‌شود. در صورتیکه اکسرژی بعنوان ارزش مطرح شود COV به ضریب عملکرد اکسرژی η تبدیل می‌شود که بصورت زیر تعریف می‌شود [۷ و ۶]:

$$\eta = \frac{\text{شدت جریان اکسرژی مفید بدست آمده}}{\text{شدت جریان اکسرژی با ارزش مصرف شده}} \quad (16)$$

با توجه به تعریف اکسرژی حرارتی طبق رابطه (۳) می‌توان نوشت:

$$Ex = Q \left(1 - \frac{T}{T_m} \right) = Q \cdot \theta$$

در جدول (۳) کارایی اکسرژی انواع پمپ‌های حرارتی ارائه شده است.

جدول ۳- کارایی اکسرژی انواع پمپ‌های حرارتی جذب

بازدهی اکسرژی	پمپ حرارتی جذبی
$\eta = \frac{Q_a \theta_a + Q_c \theta_c}{Q_d \theta_d}$ (۱۷)	نوع I
$\eta = \frac{Q_c \theta_c}{Q_d \theta_d}$ (۱۸)	نوع II
$\eta = \frac{Q_e \theta_e + Q_a \theta_a + Q_c \theta_c}{Q_d \theta_d}$ (۱۹)	نوع III
$\eta = \frac{Q_a \theta_a}{Q_d \theta_d + Q_c \theta_c}$ (۲۰)	نوع IV

$$COP_{\max \text{ int}} = \frac{\Delta \theta_a + \Delta \theta_d - \theta_d}{\Delta \theta_e - \Delta \theta_a - \Delta \theta_c} = \left[\frac{1 - \frac{\Delta \theta_a + \Delta \theta_d}{\theta_d}}{1 - \frac{\Delta \theta_e + \Delta \theta_c}{\theta_e}} \right] \left(-\frac{\theta_d}{\theta_e} \right) \quad (12)$$

با در نظر گرفتن رابطه (۸) می‌توان برای پمپ حرارتی نوع III چنین نوشت:

$$COP_{\max \text{ -int}} = COP_{\max} \left[\frac{1 - \frac{\Delta \theta_a + \Delta \theta_d}{\theta_d}}{1 - \frac{\Delta \theta_e + \Delta \theta_c}{\theta_e}} \right] \quad (13)$$

استفاده از COP_{\max} یا $COP_{\max \text{ -int}}$ بستگی به سیستم انتخاب شده و مرزهای آن دارد در صورتیکه مرز سیستم انتخابی بیرون از قطبهای اکسرژی باشد می‌توان از COP_{\max} استفاده کرد.

۳-۴ افزایش دما: افزایش دما یک معیار کیفی برای ارزیابی عملکرد پمپ حرارتی و برابر با اختلاف دمای بین چاه اکسرژی در جذب‌کننده و منبع اکسرژی در تبخیرکننده است که بر حسب دما یا فاکتور کارنو بصورت زیر ارائه می‌شود [۴].

$$\Delta T = T_a - T_c, \quad \Delta \theta = \theta_a - \theta_c$$

با توجه به این معیار کیفی می‌توان گفت که در عمل، امکان افزایش دما در پمپ حرارتی از 80°C به 120°C بسیار محتمل تر از افزایش دما از 20°C به 60°C است.

۴-۴ ضریب ارزش اکسرژی یا بازدهی اکسرژی - اقتصادی: بصورت کلی می‌توان ضریب ارزش^۱ را بصورت زیر ارائه کرد:

$$COV = \frac{\text{مجموع ارزش های مفید بدست آمده}}{\text{مجموع ارزش های مصرف شده}} \quad (14)$$

که در یک فرایند انرژی‌تیک این مفهوم بصورت زیر در می‌آید:

1. Coefficient of Value

۵- ارتباط بین بازدهی اکسرژی و ضریب عملکرد یک پمپ حرارتی جذبی

با در نظر گرفتن برخی فرضیات می‌توان بازدهی اکسرژی و ضریب عملکرد یک پمپ حرارتی جذبی را بصورت ریاضی بهم مرتبط ساخت. در صورتیکه انرژی نهان تبخیر در یک پمپ حرارتی جذبی در مقایسه با انرژی حرارتی ناشی از اختلاف دما ناچیز باشد می‌توان نوشت:

$$Q_a \approx Q_c, \quad Q_d \approx Q_c$$

و اگر پارامترهای زیر تعریف شوند:

$$\Delta\theta_{sep} = \theta_d - \theta_c, \quad \Delta\theta_{mix} = \theta_a - \theta_c \quad (23)$$

$$\varepsilon_g = \frac{Ex_a + Ex_c}{Ex_d + Ex_c} = \frac{Q_a \theta_a + Q_c \theta_c}{Q_d \theta_d + Q_c \theta_c}$$

جدول (۴) ارتباط بین بازدهی اکسرژی و ضریب عملکرد یک پمپ حرارتی جذبی را نشان می‌دهد.

جدول ۴- ارتباط بین بازدهی اکسرژی و ضریب عملکرد یک پمپ حرارتی جذبی

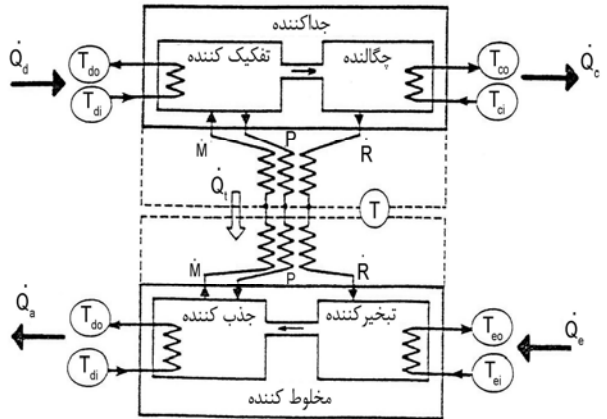
ارتباط بین معیارهای عملکرد	پمپ حرارتی جذبی
$COP = \eta \frac{\theta_d}{\theta_a} = 1 + \varepsilon_g \frac{\Delta\theta_{sep}}{\Delta\theta_{mix}} \quad (24)$	نوع I
$COP = \eta \frac{\theta_d}{\theta_c} = 1 + \varepsilon_g \frac{\Delta\theta_{sep}}{\Delta\theta_{mix}} \quad (25)$	نوع II
$COP = \frac{2(\theta_d \eta - \theta_a)}{\theta_c + \theta_a} + 1 = 2\varepsilon_g \frac{\Delta\theta_{sep}}{\Delta\theta_{mix}} + 1 \quad (26)$	نوع III
$COP = \eta \frac{\theta_d}{\theta_a} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\varepsilon_g} \left(\frac{\theta_a}{\theta_d} - 1 \right)} \quad (27)$	نوع IV

۴-۵ بازدهی اکسرژی: اگر یک پمپ حرارتی بصورت یک سیستم دو قطبی اکسرژی شامل، جداکننده و مخلوط‌کننده در نظر گرفته شود (مانند شکل (۱۱)) می‌توان موازنه اکسرژی حول آنرا بصورت زیر نوشت:

$$(Ex_d + Ex_c) - (Ex_a + Ex_c) = \Delta Ex_{irr} \quad (21)$$

که ΔEx_{irr} مقدار اتلاف اکسرژی در اثر برگشت‌ناپذیری سیستم خواهد بود. بدینصورت می‌توان بازدهی اکسرژی را بصورت نسبت اکسرژی خروجی به اکسرژی ورودی به سیستم، طبق رابطه زیر ارائه کرد [۵]:

$$\varepsilon_{ex} = \frac{Ex_a + Ex_c}{Ex_d + Ex_c} = \frac{Q_a \theta_a + Q_c \theta_c}{Q_d \theta_d + Q_c \theta_c} = 1 - \frac{\Delta Ex_{irr}}{Ex_d + Ex_c} \quad (22)$$



شکل ۱۱- دیاگرام جعبه‌ای یک پمپ حرارتی جذبی

بازدهی اکسرژی دارای مقادیر ما بین صفر و یک خواهد بود. این معیار کیفی می‌تواند دوری یا نزدیکی سیستم به حالت برگشت پذیر را تعیین کند. در حالتی که $\varepsilon_{ex} = 1$ باشد، $\Delta Ex_{irr} = 0$ خواهد بود که به معنای عدم اتلاف اکسرژی بدلیل غیر برگشتی بودن سیستم و تأییدی بر برگشت‌پذیری آن است.

حداکثر ضریب عملکرد و ضریب عملکرد واقعی این پمپ که با استفاده از روابط (۸) و (۲۶) محاسبه شده‌اند، در جدول (۶) ارائه شده‌اند.

۶- نتیجه‌گیری

با وجود معیارهای مختلف برای سنجش عملکرد انواع پمپ‌های حرارتی جذبی، عملکرد و بازدهی اکسرژی می‌توانند معیار مناسب‌تر و دقیق‌تری برای تبیین عملکرد پمپ باشند. علاوه بر این، می‌توان یک پمپ حرارتی جذبی را بصورت قطب‌های اکسرژی در نظر گرفت که در اینصورت، ارتباط بین پارامترهای داخلی (مانند دما) و پارامترهای خارجی سیستم قابل ارائه خواهد بود. مثال ارائه شده نشان می‌دهد که می‌توان از یک پمپ حرارتی جذبی با بازدهی اکسرژی ۶۰٪، ضریب عملکرد واقعی حدود ۴/۵ را بدست آورد در حالیکه حداکثر ضریب عملکرد ۲/۸ است که این امر نشانگر تأثیر عملکرد اکسرتیک پمپ به ازای اتلاف اکسرژی به مقدار ۴۰٪ خواهد بود.

به منظور ارائه نقش بازدهی اکسرژی در تعیین ضریب عملکرد یک پمپ حرارتی می‌توان یک پمپ حرارتی جذبی نوع سوم را که با بازدهی اکسرژی ۶۰٪ کار می‌کند، در نظر گرفت. این پمپ می‌تواند با استفاده از بخار آب در فشار ۳ بار و دمای ۱۳۴ °C، دمای آب را که با شدت جریان ۶۰ m³/h گذر می‌کند از ۱۰/۹ درجه سانتیگراد به ۴ درجه سانتیگراد برساند و در این حالت، منبع تبرید، دارای دمای ۲۰ °C باشد. جدول (۵) اطلاعات مربوط به این پمپ را ارائه می‌کند:

جدول ۵- اطلاعات یک پمپ حرارتی جذبی

T_d (°C)	θ_d	$T_c = T_a$ (°C)	$\theta_c = \theta_a$	T_e (°C)	θ_e
۱۳۴	۰/۳۲	۲۰	۰/۰۵۵	۱۰/۹	٪۲۴

افزایش دما ($T_d - T_c$) در جداکننده و ($T_a - T_e$) در مخلوط‌کننده،

جدول ۶- افزایش دما در پمپ حرارتی

$T_d - T_c$	$\theta_d - \theta_c$	$T_a - T_e$	$\theta_a - \theta_e$	$COP = \frac{2(\theta_d \eta - \theta_a)}{\theta_e + \theta_a} = 4.47$
۱۱۴	۰/۲۶۵	۱۶	۰/۰۳۰۳	$COP_{max} = \frac{\theta_d - \theta_c}{\theta_a - \theta_e} = 8.23$

مراجع

- [1] Akpınar K. E., Hepbasli A., "A comparative study on exergetic assessment of two ground-source (geothermal) heat Pump systems for residential applications", Building and Environment, Vol. 42, pp. 2004-2013, (2007).
- [2] Seider D. W., Sead D. J., Lewin R. D., Product & Process design Principles, Chap. 10, 2nd ed., John Wiley, New York, (2004).
- [3] Brodyansky M. V., Sorin M., Legoff P., Efficiency of Industrial Processes; Exergy analysis and optimization, Elsevier Science Amsterdam, (1994).
- [4] Gong G., Zeng W., Chang S., He J., Li K., "Scheme-selection optimization of cooling and heating sources based on exergy analysis", Applied Thermal Engineering, Vol. 27, PP. 942-950, (2007).
- [5] Smith R., Chemical Process Design and integration, Chap. 20, 21, John Wiley, New York, (2005).
- [6] Lior N., Zhang N., "Energy, exergy and second law Performance criteria", Energy, Vol. 32, PP. 281-246, (2007).
- [7] سمنانی‌رهبر م. «تحلیل فرآیندها با استفاده از مفهوم اکسرژی»، مجله مهندسی شیمی ایران، شماره ۸، ۱۳۸۲.