

## بررسی سیستم‌های تبرید ترکیبی با میکروتوربین و چیلر جذبی

زینب صیفوری<sup>۱\*</sup>، مهران عامری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری دانشکده فنی و مهندسی و پژوهشکده انرژی و محیط زیست- دانشگاه شهید باهنر- کرمان- ایران

z.e.seifoori@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده فنی و مهندسی و پژوهشکده انرژی و محیط زیست- دانشگاه شهید باهنر- کرمان- ایران

ameri-mm@mail.uk.ac.ir

دریافت مقاله: ۹۰/۷/۵ اصلاحیه: ۹۱/۶/۱۴

پذیرش مقاله: ۹۱/۷/۱

**چکیده:** در این تحقیق، یک سیستم ترکیبی خنک‌کننده شامل چیلر جذبی و تراکمی که با یک میکروتوربین همراه شده، مورد بررسی قرار گرفته است. میکروتوربین، توان مورد نیاز سیستم را که شامل توان کمپرسور سیکل تراکمی، توان فن‌ها و توان پمپ سیکل جذبی است، تأمین می‌کند و گرمای گازهای خروجی آن در ژنراتور سیکل جذبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سیستم در چهار ساختار مختلف با سیستم تبرید معمولی که شامل چیلر تراکمی و میکروتوربین است، مقایسه و اثر تغییر دمای محیط بر روی آن بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از سیستم ترکیبی نسبت به سیستم معمولی، کاهش مصرف سوخت را به همراه دارد.

**واژه‌های کلیدی:** سیستم ترکیبی خنک‌کننده، سیستم تولید هم‌زمان توان و حرارت، چیلر تراکمی، چیلر جذبی، میکروتوربین.

میکروتوربین را نیز خنک می‌کند و در حالت سوم، چیلر جذبی، هوای خنک‌کننده کندانسور سیستم تراکمی را چند درجه خنک‌تر می‌کند. این سیستم‌ها به ترتیب موجب ۱۲، ۱۹ و ۳ درصد صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌شوند.

عامری و همکاران [۳] یک سیستم تولید سه‌گانه را مورد بررسی قرار دادند. این سیستم شامل میکروتوربین ۲۰۰ کیلوواتی و یک ژنراتور بخار برای بازیافت حرارت از گازهای خروجی است. در این سیستم، در فصل تابستان از گرمای بازیافت شده برای سرمایش و در فصل زمستان از این گرما برای گرمایش استفاده می‌شود.

بسرایی و همکاران [۴] اثر دمای ورودی به میکروتوربین را در یک سیستم تولید هم‌زمان مورد بررسی قرار دادند. بررسی آن‌ها بر پایه آزمایش‌های قبل و داده‌های استاندارد یک کارخانه، در دماهای ورودی مختلف است.

گاریملا و همکاران [۵] یک سیستم خنک‌کننده ترکیبی شامل یک سیکل جذبی و یک سیکل تراکمی را که سرمایش در دو دمای مختلف را تولید می‌کند و در یک کشتی نیروی دریایی کاربرد دارد، مورد بررسی قرار دادند. این سیستم، آب گرم مورد استفاده در دمای ۴۸ درجه سانتی‌گراد را نیز تأمین می‌کند. سیکل جذبی، گرمای خروجی یک توربین بخار را مورد استفاده قرار می‌دهد.

در این پژوهش، یک سیستم خنک‌کننده ترکیبی در چهار ساختار مختلف مورد بررسی قرار گرفته است و بازدهی انرژی کل سیستم در این ساختارها با سیستم معمولی که شامل میکروتوربین و چیلر تراکمی است، مقایسه شده است. انرژی اولیه این سیستم به وسیله یک میکروتوربین تأمین می‌شود. توان تولید شده در میکروتوربین در یک چیلر تراکمی و انرژی گرمایی گازهای خروجی در ژنراتور یک چیلر جذبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بازده و میزان مصرف انرژی در این چهار ساختار با هم مقایسه شده است.

## ۲. خصوصیات سیستم مورد بررسی

اگر هر کدام از چیلرهای جذبی و تراکمی به طور جداگانه کار کنند، استفاده هم‌زمان از آن‌ها تأثیری بر بهبود عملکرد سیستم نخواهد داشت. در سیستم خنک‌کننده ترکیبی مورد نظر، چیلرهای جذبی و تراکمی با داشتن اجزای مشترک، عملکرد کل سیستم را بهبود می‌بخشند.

### ۱.۲. میکروتوربین

میکروتوربین‌ها، توربین‌های گازی ساده و در ابعاد کوچک هستند که

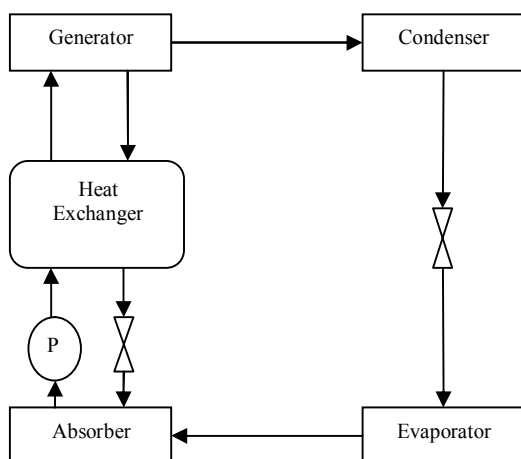
نیروگاه‌های حرارتی که توان مورد نیاز مصارف صنعتی و خانگی را تأمین می‌کنند، از محل مصرف فاصله دارند. انتقال توان نیروگاه‌ها از محل تولید به محل مصرف به وسیله شبکه توزیع باعث هدر رفتن درصدی از انرژی خواهد شد. در سیستم‌های تولید پراکنده انرژی تلفات انتقال وجود ندارد، زیرا این سیستم‌ها در محل مصرف یا نزدیک آن قرار دارند. یکی از تکنولوژی‌های مورد استفاده در تولید پراکنده، سیستم‌های تولید هم‌زمان توان و حرارت است. سیستم‌های تولید هم‌زمان، سیستم‌هایی هستند که در آن‌ها علاوه بر تولید توان، از گرمای خروجی واحد تولید توان برای مصارف گرمایشی و حتی سرمایشی، در ساختمان‌ها یا واحدهای صنعتی استفاده می‌شود. راندمان این سیستم‌ها به بالای ۸۰ درصد می‌رسد؛ بنابراین، سیستم‌های تولید هم‌زمان که در محل مصرف قرار دارند، هم از نقطه نظر انتقال انرژی و هم از لحاظ بازیافت گازهای خروجی موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌شوند.

در اثر سوختن سوخت‌های فسیلی، گاز دی‌اکسیدکربن تولید می‌شود، افزایش این گاز در جو به علت خاصیت گلخانه‌ای در گرم‌تر شدن زمین تأثیر دارد. در کشورهای توسعه‌یافته برای کاهش ورود آلاینده‌ها به جو، قوانین خاصی وجود دارد. یکی از راه‌های رسیدن به اهداف این قوانین، استفاده از سیستم‌هایی با مصرف سوخت کمتر و بازدهی انرژی بالاتر است؛ بنابراین، استفاده از سیستم‌های تولید هم‌زمان رو به افزایش است.

یکی از کاربردهای سیستم تولید هم‌زمان، استفاده از آن‌ها در سردخانه‌هاست. استفاده از این سیستم‌ها در سردخانه‌ها علاوه بر کاهش مصرف انرژی، قابلیت اعتماد بالایی را باعث می‌شود، زیرا تولید انرژی به وسیله سیستم تولید هم‌زمان می‌تواند بدون وابستگی به شبکه توزیع برق صورت بگیرد؛ در نتیجه خطر قطع برق وجود ندارد.

کیت ای. هرولد و همکاران [۱] یک سیستم خنک‌کننده ترکیبی را مورد آنالیز ترمودینامیکی قرار دادند. این سیستم شامل یک چیلر جذبی و یک چیلر تراکمی است که در آن، کندانسور چیلر تراکمی توسط چیلر جذبی خنک می‌شود و یک موتور احتراق داخلی انرژی اولیه چیلرها را تأمین می‌کند.

یانگهو هوانگ [۲] یک سیستم خنک‌کننده ترکیبی را مورد بررسی قرار داده که در آن، چیلر جذبی در سه حالت مختلف در کنار سیستم تراکمی قرار می‌گیرد. در حالت اول، چیلر جذبی، سیال خروجی از کندانسور سیستم تراکمی را خنک می‌کند؛ در حالت دوم، چیلر جذبی علاوه بر خنک کردن سیال خروجی از کندانسور، هوای ورودی به



شکل (۱): پیکره‌بندی سیکل جذبی

اجزای اصلی یک چیلر جذبی شامل تبخیرکننده، کندانسور، شیر انبساط، پمپ، جذب‌کننده و ژنراتور است. کندانسور و جذب‌کننده چیلر جذبی می‌تواند توسط آب یا هوا خنک شود. در این پژوهش، جذب‌کننده کندانسور چیلر جذبی با هوا خنک می‌شود و فن‌های جذب‌کننده و کندانسور به ازای هر کیلووات انتقال حرارت  $0.537 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  هوا را جایجا می‌کند و به ازای هر متر مکعب هوا  $775$  وات توان مصرف می‌کند [۲]:

$$W_{fan} = 0.537 \times 775 \times Q \quad (4)$$

در رابطه (۴)،  $Q$  وابسته به محل استفاده فن، میزان انتقال حرارت منتقل شده در جذب‌کننده یا کندانسور را نشان می‌دهد. دما در تبخیرکننده چیلر جذبی لیتیم بروماید-آب نمی‌تواند از ۲ درجه سانتی‌گراد کمتر باشد، زیرا فشار در جذب‌کننده باید با فشار تبخیرکننده برابر شود و با پایین آمدن دما در تبخیرکننده فشار آن نیز کاهش می‌یابد. در جذب‌کننده تنها راه پایین آمدن فشار، بالا رفتن غلظت محلول است و با بالا رفتن غلظت محلول، کریستالیزاسیون (ایجاد بلورهای یخی) به وجود می‌آید. شکل (۲)، یک سیکل جذبی تک‌اثره را در نمودار دو خاصیتی محلول لیتیم بروماید-آب نشان می‌دهد. خطوط کریستالیزاسیون در قسمت پایین سمت راست قرار دارند. ناحیه سمت راست و زیر این خطوط انجماد لیتیم بروماید را نشان می‌دهد. در این ناحیه، بلورهای یخی ایجاد شده و جریان در لوله‌ها را مسدود می‌کند و به این ترتیب، کار واحد جذبی مختل می‌شود.

ضریب عملکرد سیستم جذبی به صورت رابطه (۵) است:

$$COP = \frac{Q_{eva}}{Q_G + W_P} \quad (5)$$

توان خروجی آن‌ها بین ۳۰ تا ۵۰۰ کیلووات است. راندمان الکتریکی میکروتوربین‌ها با افزایش دمای محیط کاهش می‌یابد. رابطه (۱)، چگونگی تغییر راندمان یک نمونه میکروتوربین را با تغییر دما نشان می‌دهد [۶]:

$$\eta_T = 30.8 - (0.12 \times T_{amb}) \quad (1)$$

$T_{amb}$  دمای محیط بر حسب درجه سانتی‌گراد است.

مطابق رابطه (۲) در هر میکروتوربین، راندمان الکتریکی نشان‌دهنده نسبت توان خروجی به انرژی ورودی آن است:

$$\eta_T = \frac{W}{Q_{in,MGT}} \quad (2)$$

در این رابطه،  $W$  توان خروجی و  $Q_{in,MGT}$  میزان انرژی ورودی به میکروتوربین را نشان می‌دهد.

مقدار انرژی حرارتی که از گازهای خروجی میکروتوربین برای استفاده در ژنراتور چیلر جذبی بازیافت می‌شود، در سیستم‌های مختلف متفاوت است؛ برای مثال، در یک سیستم که راندمان الکتریکی آن ۳۰ درصد است، ۷۰ درصد از انرژی اولیه ورودی به میکروتوربین به صورت حرارت از سیستم خارج می‌شود، ولی تنها بخشی از این انرژی برای استفاده‌های دیگر قابل بازیافت است. معمولاً تنها ۴۰-۵۰ درصد از انرژی اولیه برای استفاده در چیلرهای جذبی قابل بازیافت است. در سیستم مورد نظر، ۴۲ درصد از انرژی ورودی به میکروتوربین برای استفاده در ژنراتور چیلر جذبی بازیافت می‌شود:

$$Q_G = 0.42 \times Q_{in,MGT} \quad (3)$$

در رابطه (۳)،  $Q_G$  انرژی ورودی به ژنراتور چیلر جذبی است.

## ۲.۲. چیلر جذبی

چیلر جذبی، یک سیستم خنک‌کننده است که منبع انرژی آن حرارت است. سیال عامل در سیستم‌های جذبی از دو نوع ماده، ماده جاذب و ماده مبرد تشکیل شده است. لیتیم بروماید-آب و آب-آمونیاک، دو سیال عاملی هستند که در حال حاضر در سیستم‌های جذبی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش، سیستم لیتیم بروماید-آب برای بررسی در نظر گرفته شده است. سیستم‌های جذبی لیتیم بروماید-آب نسبت به سیستم‌های آب-آمونیاک ساده‌ترند و به نگهداری کمتری نیاز دارند. شکل (۱)، پیکره‌بندی یک چیلر جذبی را نشان می‌دهد.

### ۴.۲. سیستم خنک‌کننده ترکیبی

در سیستم‌های خنک‌کننده ترکیبی، دو سیکل تبرید جذبی و تراکمی به گونه‌های مختلف در کنار هم قرار می‌گیرند. در این پژوهش، چهار ساختار مختلف از سیستم خنک‌کننده ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است. این ساختارها با یک سیستم ساده که شامل میکروتوربین و چیلر تراکمی است، مقایسه شده‌اند. در ساختار اول و دوم، کندانسور سیکل تراکمی به وسیله تبخیرکننده سیکل جذبی خنک می‌شود. در این ساختارها کندانسور سیکل تراکمی و تبخیرکننده سیکل جذبی در یک مبدل حرارتی قرار گرفته‌اند و به این ترتیب، ظرفیت تبرید سیکل جذبی برابر با کل گرمایی است که باید در کندانسور سیکل تراکمی دفع شود. در ساختار اول، میکروتوربین فقط توان مورد نیاز سیستم را تولید می‌کند، اما انرژی گرمایی بازیافت شده از آن برای سیکل جذبی کافی نخواهد بود؛ بنابراین، یک بویلر اضافه، مابقی گرمای مورد نیاز سیکل جذبی را تأمین می‌کند. بازده کل سیستم در این ساختار با رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

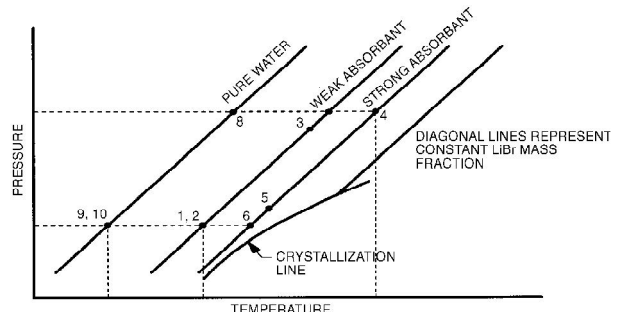
$$EUF = \frac{Q_{eva}}{Q_{in,MGT} + Q_{in,Boiler}} \quad (8)$$

که  $Q_{eva}$  ظرفیت تبرید سیستم،  $Q_{in,MGT}$  انرژی اولیه ورودی به میکروتوربین و  $Q_{in,Boiler}$  انرژی ورودی به بویلر اضافه است. در ساختار دوم، میکروتوربین همه گرمای مورد نیاز سیکل جذبی را تأمین می‌کند و به این ترتیب، توان تولیدی آن مازاد بر نیاز سیستم خواهد بود. توان اضافی سیستم در یک چیلر تراکمی دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این چیلر تراکمی با هوای محیط خنک می‌شود. بازده کل سیستم به صورت رابطه (۹) است:

$$EUF = \frac{Q_{eva,cc1} + Q_{eva,cc2}}{Q_{in,MGT}} \quad (9)$$

در رابطه بالا،  $Q_{cc2}$  ظرفیت تبرید چیلر تراکمی دوم است که با هوای محیط خنک می‌شود.  $Q_{cc1}$  نیز ظرفیت تبرید چیلر تراکمی اول است که با تبخیرکننده چیلر جذبی خنک می‌شود؛ بنابراین، ظرفیت تبرید کل سیستم با جمع ظرفیت تبرید دو چیلر تراکمی برابر است. در ساختار سوم، سیال خروجی از کندانسور چیلر تراکمی توسط چیلر جذبی خنک می‌شود. این عمل در یک مبدل حرارتی با جریان همسو انجام می‌گیرد. در ساختار ۴ دو سیکل جذبی و تراکمی به طور جداگانه، در یک محدوده دمایی مشترک کار می‌کنند. دمای تبخیرکننده در این ساختار، به دلیل محدودیت دمایی در سیکل جذبی لیتیم بروماید، نمی‌تواند از ۲ درجه سانتی‌گراد کمتر باشد؛ بنابراین، این سیستم برای استفاده در تهویه مطبوع مناسب است. شکل‌های (۳) تا (۶) شماتیک ساختارهای ۱ تا ۴ را نشان می‌دهد.

در این رابطه،  $Q_{eva}$  ظرفیت تبرید سیستم جذبی است و  $W_p$  توان مورد نیاز پمپ است.



شکل (۲): نمودار دو خاصیتی لیتیم بروماید - آب [۷]

### ۳.۲. چیلر تراکمی

چیلر تراکمی بر اساس سیکل تراکمی بخار کار می‌کند. فرئون‌ها، آمونیاک و دی‌اکسید کربن از جمله سیالاتی هستند که امکان استفاده از آن‌ها در سیستم تبرید تراکمی وجود دارد. در این پژوهش، R22 به عنوان سیال عامل سیستم تراکمی در نظر گرفته شده است. سیکل تراکمی بخار شامل تبخیرکننده، کمپرسور، کندانسور و شیر انبساط است. فرضیه‌های در نظر گرفته شده برای چیلر تراکمی در این پژوهش به شرح زیر است:

- ظرفیت تبرید آن، ۱۰۰ کیلووات است.
- راندمان آیزنتروپیک کمپرسور بر طبق رابطه (۶) بر حسب نسبت فشار در کمپرسور تغییر می‌کند [۲]:

$$\eta_{is} = 0.85 - 0.0467 \times PR \quad (6)$$

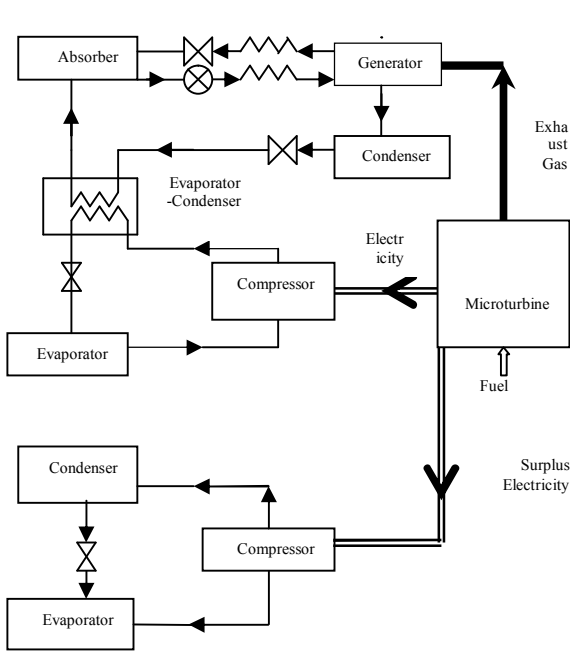
در این رابطه،  $PR$  نسبت فشار تبخیرکننده به فشار کندانسور را نشان می‌دهد.

- سیال خروجی از تبخیرکننده ۵ درجه سانتی‌گراد فوق داغ و سیال خروجی از کندانسور ۵ درجه سانتی‌گراد مادون سرد می‌شود.
- افت فشار در کندانسور و تبخیرکننده ۵۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است.
- دمای تبخیرکننده ۱۰ درجه کمتر از محیط سرد شونده و دمای کندانسور ۱۰ درجه بیشتر از محیط است (زمانی که کندانسور سیکل تراکمی با تبخیرکننده سیکل جذبی خنک می‌شود، ۱۰ درجه بیشتر از دمای تبخیرکننده سیکل جذبی است).

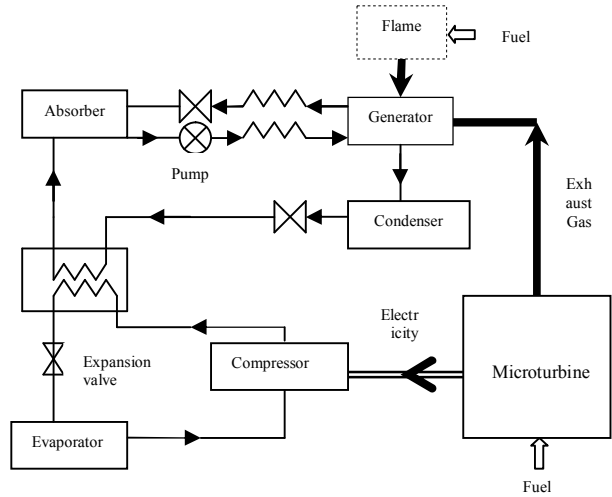
ضریب عملکرد چیلر تراکمی به صورت رابطه (۷) است:

$$COP = \frac{Q_L}{W_c} \quad (7)$$

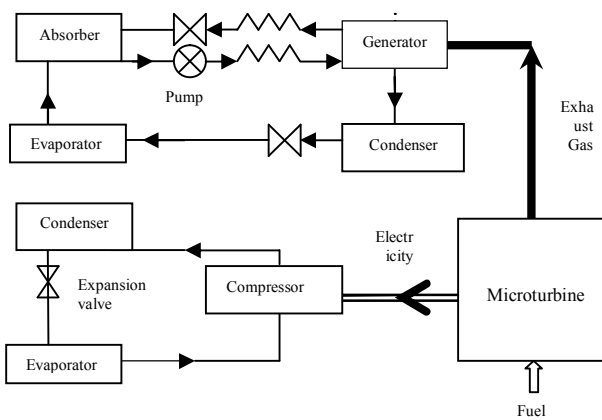
در این رابطه،  $Q_L$  ظرفیت تبرید سیکل تراکمی و  $W_c$  توان مورد نیاز کمپرسور است.



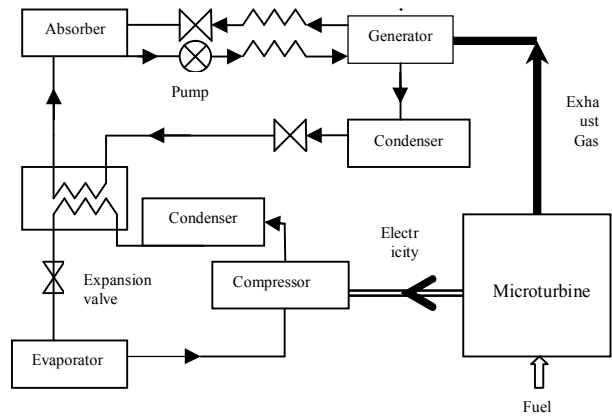
شکل (۴): پیکره‌بندی ساختار ۲



شکل (۳): پیکره‌بندی ساختار ۱



شکل (۶): پیکره‌بندی ساختار ۴



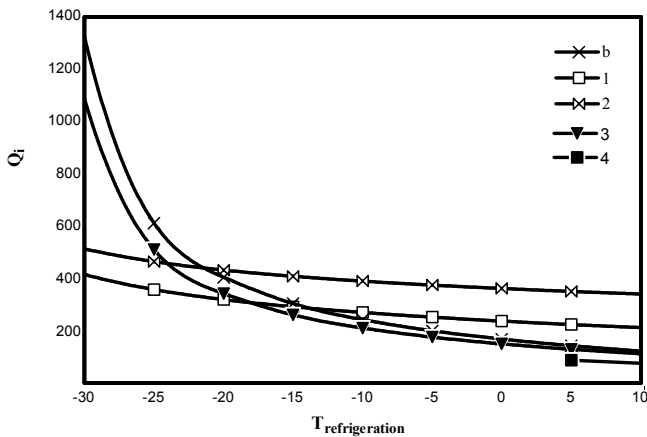
شکل (۵): پیکره‌بندی ساختار ۳

### ۳. نتایج

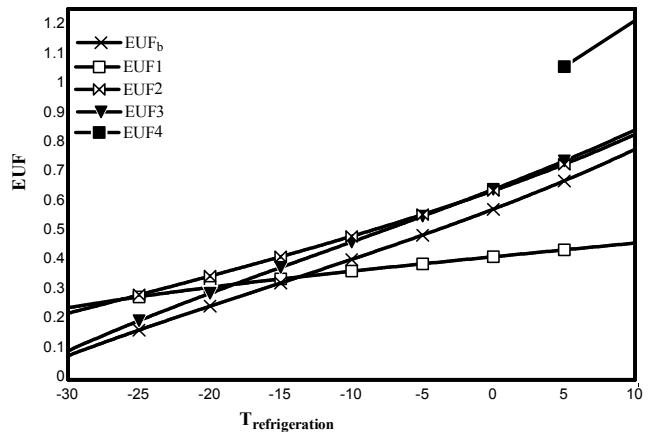
#### ۱.۳. اثر دمای محیط خنک‌شونده

برای بررسی اثر دمای محیط خنک‌شونده (T<sub>refrigeration</sub>), در شکل (۷) بازه چهار ساختار ۱ تا ۴ نشان داده شده است.

سیستم مورد بررسی در محیط نرم‌افزار EES شبیه‌سازی شده و اثر تغییر دماهای مختلف بر روی بازده آن، با استفاده از این نرم‌افزار رسم شده است. در همه موارد مورد بررسی، ظرفیت تبرید برابر با ۱۰۰ کیلووات در نظر گرفته شده است.



شکل (۸): میزان مصرف انرژی ساختارهای ۱ تا ۴ بر حسب دمای محیط خنک‌شونده و مقایسه با ساختار ساده بدون چیلر جذبی ( $T_G=90^{\circ}C$ ,  $T_{amb}=30^{\circ}C$ )



شکل (۷): بازده ساختارهای ۱ تا ۴ بر حسب دمای محیط خنک‌شونده و مقایسه با ساختار ساده بدون چیلر جذبی ( $T_G=90^{\circ}C$ ,  $T_{amb}=30^{\circ}C$ )

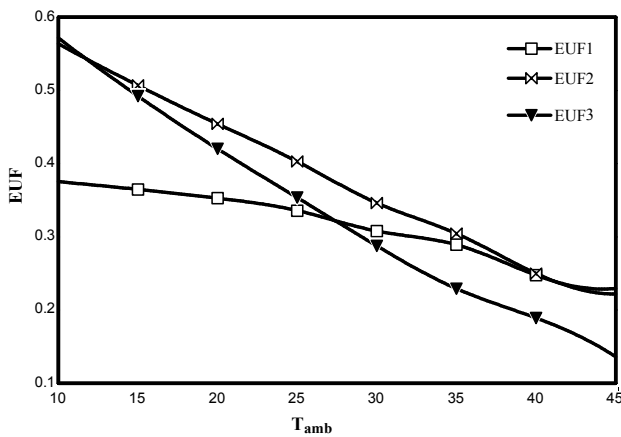
بالاتر بودن مصرف انرژی ساختار ۲ از ۱ و همچنین بالاتر بودن بازده آن به این دلیل است که در ساختار ۲، میکروتوربین توان مازاد بر نیاز تولید می‌کند و این توان اضافه در یک چیلر تراکمی به تبرید تبدیل می‌شود.

### ۲.۲. اثر دمای تبخیرکننده چیلر جذبی

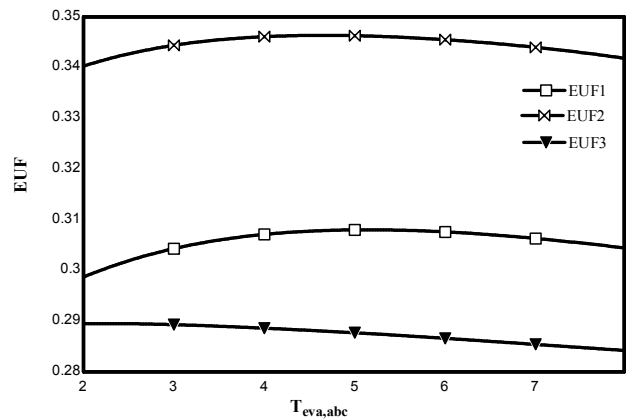
در ساختارهای ۱ و ۲، کندانسور چیلر تراکمی توسط تبخیرکننده چیلر جذبی خنک می‌شود و دمای آن، همواره ۱۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر از دمای تبخیرکننده چیلر جذبی است. در ساختار ۳ نیز با تغییر دمای تبخیرکننده چیلر جذبی، دمای سیال ورودی به شیر انبساط و در نتیجه دمای سیال ورودی به تبخیرکننده چیلر تراکمی تغییر می‌کند؛ بنابراین، تغییر دمای تبخیرکننده چیلر جذبی بر روی ساختارهای ۱ تا ۳ تأثیر می‌گذارد. اثر تغییر دمای تبخیرکننده چیلر جذبی بر بازده ساختارهای ۱ تا ۳ در شکل (۹) نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل (۹) نیز مشخص است، در محیط خنک‌شونده با دمای ۲۰- درجه، بازده ساختارهای ۱ و ۲ از بازده ساختار ۳ بیشتر است. با توجه به این شکل، مشخص است که بازده ساختار ۳ با افزایش دمای تبخیرکننده چیلر جذبی به طور مرتب کاهش می‌یابد، اما با افزایش دمای تبخیرکننده چیلر جذبی از ۲ تا ۵ درجه سانتی‌گراد بازده، افزایش و سپس کاهش می‌یابد، زیرا در افزایش دما از ۲ تا ۵ درجه، ضریب عملکرد سیکل جذبی افزایش می‌یابد و در نتیجه، میزان مصرف انرژی کاهش می‌یابد. اما در افزایش دمای تبخیرکننده بعد از ۵ درجه، ضریب عملکرد سیکل تراکمی کاهش می‌یابد.

در شکل (۷)،  $EUF_b$  بازده ساختار ساده بدون چیلر جذبی است.  $T_{amb}$  دمای محیط و  $T_G$  دمای ژنراتور چیلر جذبی است. در ساختار ۴، دمای محیط خنک‌شونده نمی‌تواند از ۲ درجه سانتی‌گراد کمتر باشد، زیرا دمای تبخیرکننده سیکل جذبی لیتیم‌پروماید نمی‌تواند کمتر از ۲ درجه سانتی‌گراد باشد؛ بنابراین در سیستم‌های تهویه مطبوع، سیستم ساختار ۴ مناسب‌ترین سیستم از نظر بازده انرژی است. سیستم ساختار ۲ برای ایجاد دماهای ۲۵- تا ۵- درجه سانتی‌گراد دارای بالاترین بازده است. همچنین برای ایجاد دماهای کمتر از ۲۵- درجه، بازده ساختار ۱ از ساختار ۲ بیشتر خواهد بود؛ به این علت که در این دماها ضریب عملکرد چیلر تراکمی دوم در ساختار ۲ که با هوا خنک می‌شود، به شدت کاهش پیدا می‌کند. برای ایجاد دماهای بیشتر از صفر درجه نیز بازده ساختار ۳ از ساختارهای ۱ و ۲ بیشتر است، زیرا در ساختارهای ۱ و ۲، کندانسور چیلر تراکمی توسط تبخیرکننده چیلر جذبی خنک می‌شود و در نتیجه، ظرفیت تبرید چیلر جذبی بالاست. در محیط خنک‌شونده با دماهای بیش از صفر درجه، افزایش مصرف انرژی به دلیل وجود چیلر جذبی بیشتر از کاهش مصرف انرژی به دلیل خنک شدن کندانسور چیلر تراکمی خواهد بود. افزایش مصرف انرژی به دلیل وجود چیلر جذبی تا اندازه‌ای است که بازده ساختار ساده بدون چیلر جذبی در محیط خنک‌شونده با دماهای بیشتر از ۱۴- درجه از ساختار ۱ بیشتر است. شکل (۸) میزان مصرف انرژی اولیه برای این ساختارها را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): بازده ساختارهای ۱ تا ۳ بر حسب دمای محیط  
خنک‌شونده و مقایسه با ساختار ساده بدون چیلر جذبی  
( $Q_L=100\text{kW}$ ,  $T_G=90^\circ\text{C}$ ,  $T_{refrigeration}=-20^\circ\text{C}$ )



شکل (۹): بازده ساختارهای ۱ تا ۳  
بر حسب دمای تبخیرکننده چیلر جذبی  
( $Q_L=100\text{kW}$ ,  $T_G=90^\circ\text{C}$ ,  $T_{amb}=30^\circ\text{C}$ ,  $T_{refrigeration}=-20^\circ\text{C}$ )

بازده هر سه ساختار با افزایش دما کاهش می‌یابد. در دماهای کمتر از ۲۷ درجه سانتی‌گراد، بازده ساختار ۳ از بازده ساختار ۱ بیشتر است، زیرا در ساختار ۱، در این دماها افزایش مصرف انرژی به دلیل وجود چیلر جذبی بیشتر از کاهش مصرف انرژی به دلیل خنک شدن کندانسور چیلر تراکمی است. در همین دماها، بازده ساختار ۲ با وجود چیلر جذبی از ساختار ۳ بیشتر است. علت آن است که در ساختار ۲، چیلر تراکمی دوم که با هوا خنک می‌شود به ظرفیت تبرید می‌افزاید و مصرف زیاد انرژی چیلر جذبی را جبران می‌کند. مقدار افزایش بازده ساختار ۳ در دمای محیط ۳۵ درجه سانتی‌گراد و دمای محیط خنک‌شونده ۲۰- درجه حدود ۲۰/۳۵٪ است که این مقدار در مرجع [۲] برابر ۱۹٪ است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد در محیط خنک‌شونده با دماهای کمتر از ۱۵- درجه سانتی‌گراد، سیستمی که در آن، کندانسور سیکل تراکمی به وسیله سیکل جذبی خنک می‌شود و علاوه بر میکروتوربین، بویلر اضافه هم وجود دارد (ساختار ۱)، مناسب است و از بازده بالاتری نسبت به سیستم ساده میکروتوربین و چیلر تراکمی برخوردار است. همچنین در محیط خنک‌شونده با دماهای بین ۲۵- و ۱۰- درجه سانتی‌گراد، سیستمی که دارای دو چیلر تراکمی است و کندانسور یکی از آنها به وسیله سیکل جذبی خنک می‌شود (ساختار ۲)، مناسب‌ترین ساختار از نظر بازده است. همین‌طور در سیستم‌های تهویه مطبوع، دو چیلر تراکمی و جذبی جدا از هم (ساختار ۴) مناسب‌تر از سایر سیستم‌های ترکیبی است.

#### ۳.۳. اثر دمای محیط

چیلر جذبی در ساختار ۱ تا ۳ با هوا خنک می‌شود، بنابراین با تغییر دمای محیط ممکن است کریستالیزاسیون در آن رخ دهد. برای جلوگیری از بروز کریستالیزاسیون باید با تغییر دمای محیط، دمای تبخیرکننده و ژنراتور چیلر جذبی نیز تغییر کند. در جدول (۱) برای هر دمای محیط، دمای تبخیرکننده و ژنراتور چیلر جذبی در حالتی که بازده کل سیستم حداکثر باشد و کریستالیزاسیون نیز رخ ندهد، آورده شده است.

جدول (۱): دمای تبخیرکننده و ژنراتور چیلر جذبی در هر دمای محیط  
( $T_{refrigeration} = -20^\circ\text{C}$ )

$T_{amb}$	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵
$T_{eva,abc}$	۲	۲	۲	۲	۵	۷	۱۴	۱۷
$T_G$	۷۰	۷۵	۸۰	۸۵	۹۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۱۰

در شکل (۱۰)، بازده ساختارهای ۱ تا ۳ بر حسب دمای محیط رسم شده است. در این شکل، دمای محیط خنک‌شونده ۲۰- درجه سانتی‌گراد است و دمای ژنراتور و تبخیرکننده چیلر جذبی، مطابق جدول (۱) تغییر می‌کند.

## مراجع

- [1] Herold, K. E., Lawrence, A., Howe and Reinhard Radermacher, "Analysis of a Hybrid Compression-Absorption Cycle Using Lithium Bromide and Water as the Working Fluid", Energy Concepts Co., USA, 1990
- [2] Hwang, Y., "Potential Energy Benefits of Integrated Refrigeration System with Microturbine and Absorption Chiller", International Journal of Refrigeration, Vol. 27, pp. 816-829, 2004.
- [3] Ameri, M., Behbahaninia, A., Tanha, A. A., "Thermodynamic Analysis of a Tri-Generation System Based on Micro-gas Turbine with a Steam Ejector Refrigeration System", Energy, Vol. 32, pp. 2203-2209, 2010.
- [4] Basrawi, F., Yamada, T., Nakanishi, K., Naing, S., "Effect of Ambient Temperature on the Performance of Micro Gas Turbine with Cogeneration in Cold Region", Applied Thermal Engineering, Vol. 31, pp. 1058-1067, 2011.
- [5] Garimella, S., Brown, A. M., Nagavarapu, A. N., "Waste Heat Driven Absorption/Vapor-Compression Cascade Refrigeration System for Megawatt Scale, High-Flux, Low-Temperature Cooling", International Journal of Refrigeration, Vol. 34, pp. 1776-1785, 2011.
- [6] www.capstoneturbine.com
- [7] Ashrae Handbook, 1997.