



تحلیل فنی و اقتصادی یک سیستم تهویه مطبوع ترموالکتریک

¹علیرضا ناجی : دکتر اباذر وحدت ازاد

¹دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب : دانشکده فنی : گروه مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی

استاد یار گروه مکانیک : دانشکده فنی و مهندسی : دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب :
تهران - ایران

چکیده

بدلیل مغایرت دمای آب و هوادر اکثر مناطق با سطح آسایش انسان، کار در چنین محیط‌هایی مستلزم سیستم‌های تهویه مطبوع است. هزینه‌های تهویه مطبوع در اتاق کمک قابل توجهی به هزینه‌های برق خانه می‌کند. آسیب آب و هوایی نه تنها به دلیل مصرف برق برای مقاصد تبرید و تهویه مطبوع، بلکه توسط مبردهایی مانند کلروفلوئوروکربن‌ها یا هیدروکلروفلوئوروکربن‌ها نیز ایجاد می‌شود، که اثر گلخانه‌ای را افزایش می‌دهند. مصرف انرژی در شهرها زیاد و بسیار متاثر از تعداد خانوارها تا اندازه جمعیت است. لذا تلاش برای کاهش مصرف برق ضروری است. استفاده از دستگاه‌های ترموالکتریک در ساختمان‌های با آلاینده‌گی صفر، در نقش تهویه مطبوع، مهم می‌باشد.

این تحقیق یک سیستم تهویه مطبوع بر اساس ماژول‌های ترموالکتریک را ارائه کرده است. سیستم پیشنهادی دارای ساختار بسیار ساده، کنترل آسان، مقیاس‌پذیر، بی‌صدا و بی‌ضرر برای محیط می‌باشد. این سیستم با معیارهای اقتصادی برای دستیابی به بالاترین ظرفیت خنک‌کننده بهینه شده است. مهم‌ترین پارامترهای مورد بررسی، تعداد ماژول‌ها، جریان الکتریکی و اندازه مبدل‌های حرارتی می‌باشد. سیستم تهویه مطبوع از نظر ظرفیت خنک‌کننده و COP آن تجزیه و تحلیل شده است. چون ضریب عملکرد یا COP^1 که شاخصی جهت تعیین میزان بهینه بودن مصرف انرژی یخچال، کولرگازی و به‌طور کلی وسایل سرمایشی است، فقط اطلاعاتی در مورد کارایی سیستم ارائه می‌دهد، یک شاخص جدید به نام $ETCC^2$ یا ظرفیت کل خنک‌کننده اقتصادی معرفی شده است تا هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی را در یک

¹ - Coefficient of Performance

² - Economic Total Cooling Capacity

دوره زمانی معین در برگیرد و با معیارهای اقتصادی برای دستیابی به بالاترین ظرفیت خنک‌کننده یک دلار از هزینه کل (برق و سرمایه‌گذاری) در یک دوره معینی از طول عمر دستگاه (ETCC - ظرفیت خنک‌کننده کل اقتصادی) بهینه‌سازی شده است. سیستم ترموالکتریک تهویه مطبوع ارائه شده با قدرت خنک‌کننده قابل توجه، به طور قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با راه‌حل‌های مبتنی بر کمپرسور معمولی، گران‌تر است و دارای COP و همچنین ETCC کمتر است. ولی دارای تعدادی مزیت از جمله سادگی طراحی، عملکرد بی صدا، عدم وجود کمپرسور، و امکان استفاده از هر گونه (دوستدار محیط زیست و ایمن) مایع انتقال گرما است.

واژه‌های کلیدی: سیستم تهویه مطبوع ترموالکتریک، تحلیل فنی و اقتصادی، ماژول‌های ترموالکتریک

۱- مقدمه

آب و هوا در بسیاری از مناطق جهان منجر به دمای هوایی می‌شود که به‌طور قابل ملاحظه‌ای از سطح آسایش انسان فراتر می‌رود. فراهم کردن شرایط زندگی راحت و به‌ویژه کار در چنین محیط‌هایی مستلزم تهویه مطبوع اتاق‌هایی است که افراد در آن قرار دارند و وقت خود را در آن صرف می‌کنند. حفظ دمای آسایش حرارتی تأثیر مثبتی بر رفاه و بهره‌وری انسان دارد.

کنترل آب و هوا نیز در ماشین‌آلات سنگین و حمل و نقل بسیار مهم است که در آن کارکنان برای مدت طولانی در معرض شدید شرایط آب و هوایی قرار دارند. برای راحتی کارکنان آن، سیستم کنترل آب و هوا به‌طور کلی باید جمع و جور، قابل حمل و بدون صدا باشد، که می‌تواند با استفاده از یک خنک‌کننده ترموالکتریک به دست آید. این الزامات از صنعت خودروهای برقی است. هزینه‌های تهویه مطبوع در اتاق کمک قابل توجهی به هزینه‌های برق خانه می‌کند. تأثیر استفاده از کولرگازی در مورد گرمایش جهانی نیز نقش بسزایی دارد.

آسیب آب و هوایی نه تنها به دلیل مصرف برق برای مقاصد تبرید و تهویه مطبوع، بلکه توسط مبردهایی مانند کلروفلوئوروکربن‌ها یا هیدروکلروفلوئوروکربن‌ها نیز ایجاد می‌شود، که اثر گلخانه‌ای را افزایش می‌دهند. مصرف انرژی در شهرها بالاتر و بسیار متأثر از تعداد خانوارها تا اندازه جمعیت است.

لذا تلاش برای کاهش مصرف برق ضروری است. تلاش برای تخمین کمی تقاضا برای توان خنک‌کننده و منطقی کردن استفاده از آن، به‌ویژه با در نظر گرفتن شاخص‌های رفاه انجام می‌شود. برخی از استراتژی‌های کنترل پیچیده و الگوریتم‌ها می‌توانند در به‌دست آوردن راندمان خنک‌کننده بهتر سودآور باشند. همین امر نه تنها در مورد برنامه‌های ثابت صدق می‌کند بلکه به وسایل نقلیه مسافربری نیز صادق است. راه‌حل‌های کلاسیک به کار رفته در خنک‌کننده اتاق (قابل حمل یا دیواری) سیستم‌های تهویه مطبوع مبتنی بر کمپرسور هستند که در چرخه تبرید کار می‌کنند.

استفاده از ماژول‌های ترموالکتریک می‌تواند جایگزین امیدوارکننده‌ای باشد. در یک ماژول ترموالکتریک با انرژی الکتریکی، اختلاف دما با جذب گرمای پلتیر در یک انتهای اتصال ترموالکتریک و آزاد کردن آن در انتهای دیگر ایجاد می‌شود. ماژول‌های ترموالکتریک معمولاً از دو ماده مختلف با خواص مناسب ساخته می‌شوند که به صورت الکتریکی به صورت سری موازی به هم متصل می‌شوند. از نظر حرارتی به صورت موازی به هم متصل می‌شوند. این ماژول از پایه‌های ساخته شده از دو ماده مختلف تشکیل شده است که در بین سطوح سرامیکی پوشش قرار گرفته‌اند. دستگاه‌های ترموالکتریک در ساختمان‌های با آلاینده‌گی صفر، در نقش تهویه مطبوع، مهم می‌باشد.

اهمیت و ضرورت تحقیق

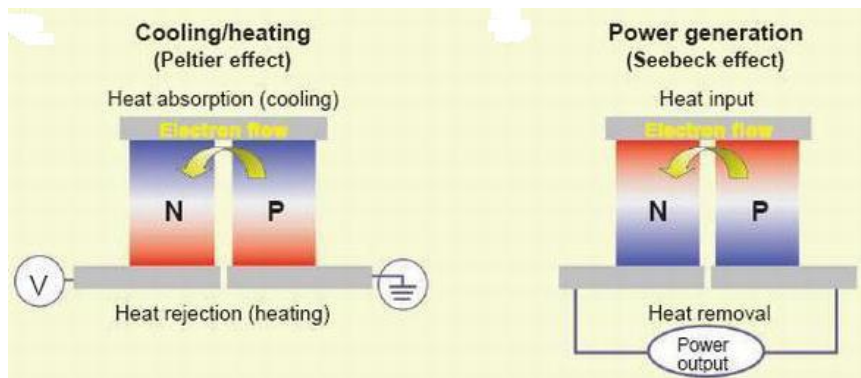
به علت گسترش زندگی ماشینی و افزایش آلاینده‌ها و ویروس‌های متعدد، سلامت هوای محیط تاثیر مهمی بر زندگی انسان داشته و بسیار حائز اهمیت است. به همین منظور استفاده از تهویه مطبوع در هوای ساختمان، محل کار، مجتمع‌ها می‌تواند بر بهبود سبک زندگی و سلامتی انسان‌ها تاثیر زیادی داشته باشد.

تهویه مطبوع از روش‌های مختلف این شرایط را در محیط‌های مسکونی، صنعتی، تجاری، پزشکی، اداری و بدون در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی برای انسان فراهم می‌کند که در ادامه ذکر شده است:

- کنترل کننده‌ی سرعت وزش هوا
- از بین برنده‌ی گازها و بوهای سمی
- تصفیه کننده هوا و ایجاد کننده هوای پاک و سالم
- کنترل کننده رطوبت به کمک خشک کردن و رطوبت دهی
- ضد عفونی و ایزوله کننده هوا در بیمارستان‌ها و کلینیک‌ها
- کنترل کننده دمای محیط به کمک سرمایش و گرمایش دهی

۲- اصول ترموالکتریک

اختلاف دمای دو فلز غیرمشابه در تماس با یکدیگر، نیروی محرکه الکتریکی ولتاژ ایجاد می‌کند. این ولتاژ از آنجایی ایجاد می‌شود که اختلاف دما باعث می‌شود که الکترون‌ها یا سایر حامل‌های باردار از سمت گرم به سمت سرد فلز حرکت کنند که جریانی را ایجاد می‌کند و به اثر Seebeck معروف است، که در شکل شماره ۱ نشان داده شده است.

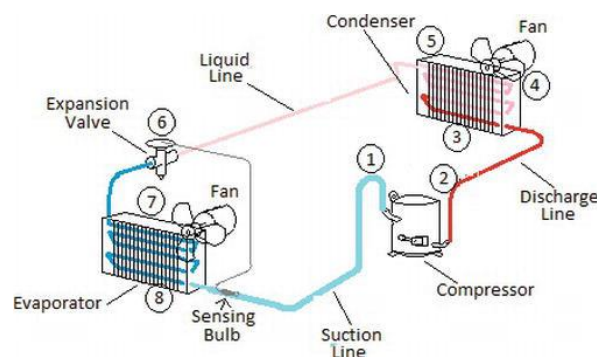


شکل شماره ۱: عناصر ترموالکتریک

در شکل شماره ۱ عناصر ترموالکتریک همراه با اجزاء نشان داده شده است. عکس اثر Seebeck نیز صادق است. اگر جریانی از فلزات مختلف عبور کند، دمای یک طرف فلز افزایش می‌یابد در حالی که در سمت دیگر دما کاهش می‌یابد. این اثر به اثر پلنتیه معروف است. ماژول Peltier به‌عنوان یک پمپ حرارتی کار می‌کند، به‌طوری که در سمت سرد ماژول، گرما را جذب می‌کند تا با اعمال ولتاژ DC به سمت دیگر ماژول حذف شود.

اصل عملکرد چرخه تبرید

تهویه مطبوع از دو سیم پیچ متصل تشکیل شده است که درون آن مبرد جریان پیوسته وجود دارد. سیستم‌های اسپلیت یونیت رایج‌ترین نوع تهویه مطبوع هستند که در آن کویل واقع در داخل اتاقی که قرار است خنک شود تبخیرکننده و سیم‌پیچی که در خارج از اتاق قرار دارد کندانسور^۱ نامیده می‌شود. اصل کار سیکل تبرید این است که تبخیرکننده سردتر از دمای اتاق و دمای کندانسور بالاتر از محیط اطراف همانطور که در شکل شماره ۲ نشان داده شده است.



شکل شماره ۲: روند چرخه تبرید

در شکل شماره ۲ روند چرخه تبرید نشان داده شده است. این شرایط به سیال جریان مداوم اجازه می‌دهد تا گرمای اتاق را جذب کند و سپس گرما را به محیط اطراف منتقل کند.

برای دستیابی به این شرایط از کمپرسور و شیر انبساط استفاده می‌شود. کمپرسور که معمولاً یک کمپرسور رفت و برگشتی است برای افزایش فشار مبرد استفاده می‌شود. مبرد در حالت گازی وارد کمپرسور شده و فشرده می‌شود که باعث افزایش دما و فشار مبرد می‌شود. دمای خروجی کمپرسور بسیار بیشتر از اتمسفر خواهد بود. بنابراین، هنگامی که گاز داغ از کندانسور عبور می‌کند، گرما به راحتی با کمک فن دفع می‌شود.

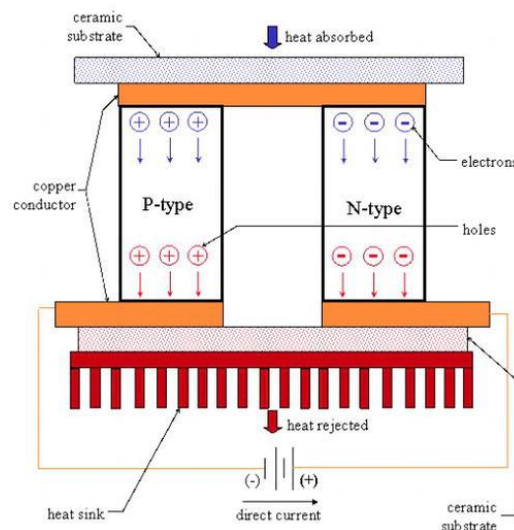
¹ - Condenser

در مرحله جهش گرما، گاز متراکم می‌شود و به مایع تبدیل می‌شود. در خروجی کندانسور از شیر انبساط برای کاهش فشار سیال و همچنین افت دما که کمتر از دمای اتاق است استفاده می‌شود. به این ترتیب مبرد سرد در داخل کولر گازی تولید می‌شود.

هنگامی که هوا از سیم پیچ اواپراتور عبور می‌کند، دمای اتاق کاهش می‌یابد و مبرد طی فرآیند جذب گرما به بخار تبدیل می‌شود. بنابراین قانون کلی کولر گازی به دست می‌آید که در آن دما در کویل داخل اتاق کمتر از دمای اتاق باشد و در کویل خارج از اتاق دما بیشتر از دمای اتمسفر باشد.

ماژول ترموالکتریک

برخلاف سیستم‌های تهویه مطبوع معمولی، اثر Seebeck یک فرآیند برگشت‌پذیر است به طوری که گرمایش و سرمایش را می‌توان از هر دو طرف بسته به جهت جریان اعمال شده به دستگاه به دست آورد. در شکل شماره ۳ اصل ماژول ترموالکتریک نشان داده شده است.

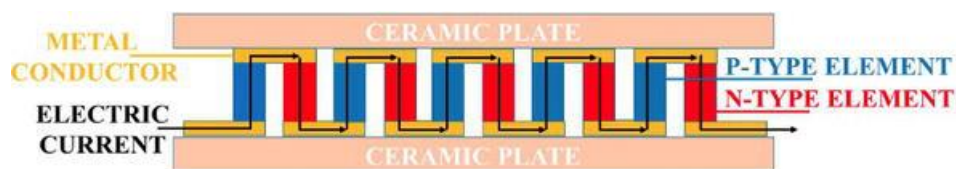


شکل شماره ۳: اجزاء ماژول ترموالکتریک

در شکل شماره ۳ اجزاء ماژول ترموالکتریک قابل مشاهده می‌باشد. هنگامی که جریان الکتریکی به دستگاه داده می‌شود، الکترون‌ها و سوراخ‌ها از طریق عناصر نوع P و N حرکت می‌کنند و در نتیجه باعث گرما و سرمایش در طرف‌های مربوطه ماژول می‌شوند. این عناصر آلیاژی به نام بیسموت و تلوریوم

هستند و هنگامی که در معرض دمای یکسان قرار می‌گیرند، چگالی الکترون آزاد متفاوتی دارند. عنصر نوع P دارای کمبود الکترون و عنصر نوع N دارای الکترون اضافی است و هنگامی که جریان وارد می‌شود، ماژول سعی می‌کند تعادل برقرار کند و در نتیجه گرمایش و سرمایش اتفاق می‌افتد. زیرلایه‌های سرامیکی آلومینا در دو طرف ماژول استفاده می‌شود که در آن گرمایش در یک طرف و خنک‌سازی در طرف دیگر رخ می‌دهد. این ماده به دلیل عایق خوب الکتریسیته و همچنین رسانایی حرارتی انتخاب شده است. ضریب عملکرد این دستگاه به عنوان نسبت توان سرمایشی یا گرمایشی به توان عرضه شده به ماژول تعریف می‌شود.

برای پمپاژ مقدار زیادی گرما، دستگاه ترموالکتریک معمولاً از چندین عنصر P و N تشکیل شده است. یک دستگاه ترموالکتریک معمولی شامل حدود ۲۵۰ عنصر نوع P و N است که به صورت سری در شکل شماره ۴ نشان داده شده است.



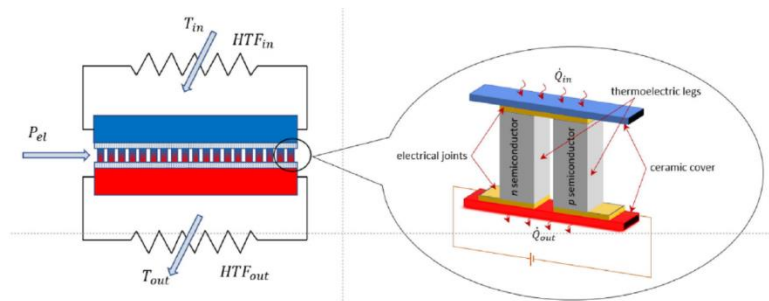
شکل شماره ۴: عناصر نوع P و N متصل به صورت سری دستگاه ترموالکتریک

در شکل شماره ۴ عناصر نوع P و N متصل به صورت سری دستگاه ترموالکتریک نشان داده شده است. در ادامه سیستم تهویه مطبوع بر اساس ماژول‌های ترموالکتریک مورد تجزیه تحلیل قرار گرفته است.

۳- روش پیشنهادی

در این بخش یک سیستم تهویه مطبوع بر اساس ماژول‌های ترموالکتریک ارائه شده است. در ابتدا مدل ریاضی آن بیان می‌شود. تجزیه و تحلیل مربوط به یک سیستم تهویه مطبوع مجهز به ماژول‌های ترموالکتریک است. فرض بر این است که مخازن حرارتی در دو طرف ماژول‌ها وجود دارد و گرما توسط یک مایع از رادیاتورها که با محیط تبادل گرما می‌کنند، تامین و منتقل می‌شود.

سیستم تهویه مطبوع تحلیل شده در شکل شماره ۵ نشان داده شده است.



شکل شماره ۵: نمودار سیستم تهویه مورد بررسی

در شکل شماره ۵ سیستم تهویه مورد بررسی قابل مشاهده می‌باشد. ماژول ترموالکتریک برای پمپاژ گرما از محیط داخلی (داخل) به محیط بیرون (خارج) با برق عرضه می‌شود. شدت تبادل حرارت بین سیستم و محیط از طریق ضریب انتقال حرارت^۱ یا HTF ها کنترل می‌شود. یک جفت ترموالکتریک در سمت راست این شکل نشان داده شده است.

بر اساس ساختار ارائه شده در شکل شماره ۵، یک مدل ریاضی سیستم تهویه مطبوع پیشنهاد شده است.

با توجه به پدیده ترموالکتریک Peltier، گرما با دمای داخل قلع با دمای بیرونی T_{out} به محیط منتقل می‌شود. جذب گرما از فضای خنک شده و انتقال حرارت به بیرون به ترتیب از طریق ضرایب انتقال

¹ - Heat Transfer Factor

حرارت HTF_{in} و HTF_{out} کنترل می‌شود. در عمل، این دو عامل اندازه و کارایی رادیاتورها را مشخص می‌کنند. گرمای جذب شده در قسمت بالایی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{Q}_{in} = HTF_{in}(T_{in} - T_u) \quad \text{رابطه (۱)}$$

و گرمای آزاد شده به محیط بیرون عبارت است از:

$$\dot{Q}_{out} = HTF_{out}(T_l - T_{out}) \quad \text{رابطه (۲)}$$

با فرض عدم تلفات حرارتی در خط لوله مایع، تعادل انرژی برای قسمت ترموالکتریک با روابطی که در ادامه ذکر شده است، تعریف می‌شود. یک ماژول ترموالکتریک معمولی از بسیاری از سلول‌هایی همانند شکل شماره ۵ ساخته شده است که به صورت و نیز سری به صورت الکتریکی به هم متصل شده‌اند. سلول‌ها از دو نیمه هادی تشکیل شده‌اند که به صورت الکتریکی سری و حرارتی موازی به هم متصل شده‌اند. جریانی که از طریق چنین جفت ترموالکتریکی می‌گذرد باعث جذب گرمای \dot{Q}_{in} در سطح بالایی و آزاد شدن گرما \dot{Q}_{out} در پایین می‌شود.

سه پدیده اصلی در ماژول‌های ترموالکتریک وجود دارد که بر پمپ حرارتی بین دو طرف بالا و پایین تأثیر می‌گذارد:

- اثر پلتیه
- گرما ژول
- هدایت گرما

اما تنها اولین مورد فرآیند هدایت پمپ حرارتی است. از آنجایی که گرمای پلتیه جذب شده در اتصال ترموالکتریک بالایی در قسمت پایینی آزاد می‌شود، یک گرادیان دما در پاها رخ می‌دهد که مسئول اثر Seebeck (تولید ولتاژ) است و با اثر پلتیه مخالف است. گرادیان حرارتی نیز مستقیماً با رسانش گرما از طریق پاها متناسب است که در نتیجه بر ضد پمپاژ گرما عمل می‌کند. علاوه بر این، جریان عبوری از پاها باعث آزاد شدن گرمای ژول (ناشی از مقاومت الکتریکی) در کل حجم آن‌ها می‌شود که تأثیر منفی

بر عملکرد ماژول دارد. تمام فرآیندهای ذکر شده در بالا در معادلات تعادل برای قسمت بالایی و پایینی ماژول به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\alpha IT_{ju} - \frac{I^2 R}{2} + k(T_{ju} - T_{jl}) = \frac{(T_u - T_{ju})}{r_u} = \dot{Q}_{in} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\alpha IT_{jl} + \frac{I^2 R}{2} + k(T_{ju} - T_{jl}) = \frac{(T_{jl} - T_l)}{r_l} = \dot{Q}_{out} \quad \text{رابطه (۴)}$$

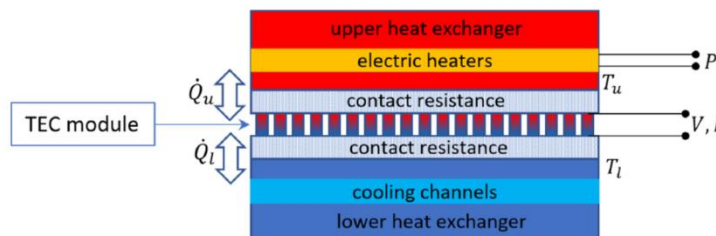
T_{ju} و T_{jl} به ترتیب دمای بالا و پایین اتصالات ترموالکتریک است، k هدایت حرارتی پا، α مخفف ضریب Seebeck، R مقاومت الکتریکی و I جریان الکتریکی است.

در ادامه پارامترهای TEC یا همان کولر ترموالکتریک تعیین شده و شرایط تماس حرارتی بین سلول‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی عملکرد سیستم تهویه مطبوع مورد بررسی توضیح داده شده است.

پایه تست:

ماژول در نظر گرفته شده برای سیستم‌های تبرید مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرض بر این است که یک ماژول منفرد با تعداد پایه‌های ماژول $n=100$ با ارتفاع پا $h_{ref} = 3\text{mm}$ میلی‌متر تشکیل شده است. تمام پارامترهای مورد استفاده در محاسبات بر اساس این فرض تعیین شدند. این فرض بر نتایج تأثیری ندارد.

پارامترهای کولر ترموالکتریک با استفاده از یک پایه هدفمند شکل شماره ۶ ایجاد شده است.



شکل شماره ۶: سیستم اندازه‌گیری شامل مبدل حرارتی بالایی با دمای (T_u) با بخاری‌های برقی نصب

شده و

مبدل حرارتی پایینی با دما (TI) با کانال‌های خنک‌کننده

در شکل شماره ۶ سیستم اندازه‌گیری شامل مبدل حرارتی بالایی با دمای (Tu) با بخاری‌های برقی نصب شده و مبدل حرارتی پایینی با دما (TI) با کانال‌های خنک‌کننده نشان داده شده است. ماژول ترموالکتریک بین مبدل‌های حرارتی نصب شده و با برق (V, I) تامین می‌شود و مقاومت حرارتی در سطوح تماس بین ماژول و مبدل‌ها ایجاد می‌شود.

سیستم ارائه شده، مجهز به دو مبدل حرارتی به شکل بلوک‌های مسی است که یک ماژول ترموالکتریک با استفاده از نیروی کنترل شده بین آن‌ها قرار داده شده و گیره شده است. بخاری‌های الکتریکی در بلوک بالایی (جایی که گرما جذب می‌شود) نصب می‌شوند، و در مبدل حرارتی پایینی (جایی که گرما به محیط آزاد می‌شود) کانال‌های خنک‌کننده با جریان آب با سرعت جریان دقیق کنترل شده وجود دارد.

این پایه برای ثبت مقادیر حرارتی و الکتریکی به وفور اندازه‌گیری می‌شود. طراحی پایه اندازه‌گیری، از جمله، امکان انجام در حالت اختلاف دمای تنظیم شده را فراهم می‌کند، بخاری‌ها در بلوک بالایی قرار دارند و توسط یک کنترل‌کننده برنامه PID کنترل می‌شوند، و اختلاف دمای ثابتی را بین بلوک‌ها در یک سطح تنظیم شده حفظ می‌کنند.

شرایط تماس بین مبدل‌ها و ماژول، مقاومت حرارتی را در سطح مشترک این عناصر تعیین می‌کند و بنابراین به طور قابل توجهی بر پارامترهای عملیاتی به دست آمده تأثیر می‌گذارد.

بنابراین، در طول مونتاژ سیستم، یک لایه گریس مسی روی سطح ماژول‌ها اعمال می‌شود و کل آن با نیروی یک کیلو نیوتن فشرده می‌شود و تا دمای ۸۰ درجه سانتیگراد گرم می‌شود. سپس به مدت ۲۴ ساعت باقی می‌ماند. نیرو (۰.۵٪) برای تمام موارد تست حفظ می‌شود.

۴- تجزیه و تحلیل نتایج

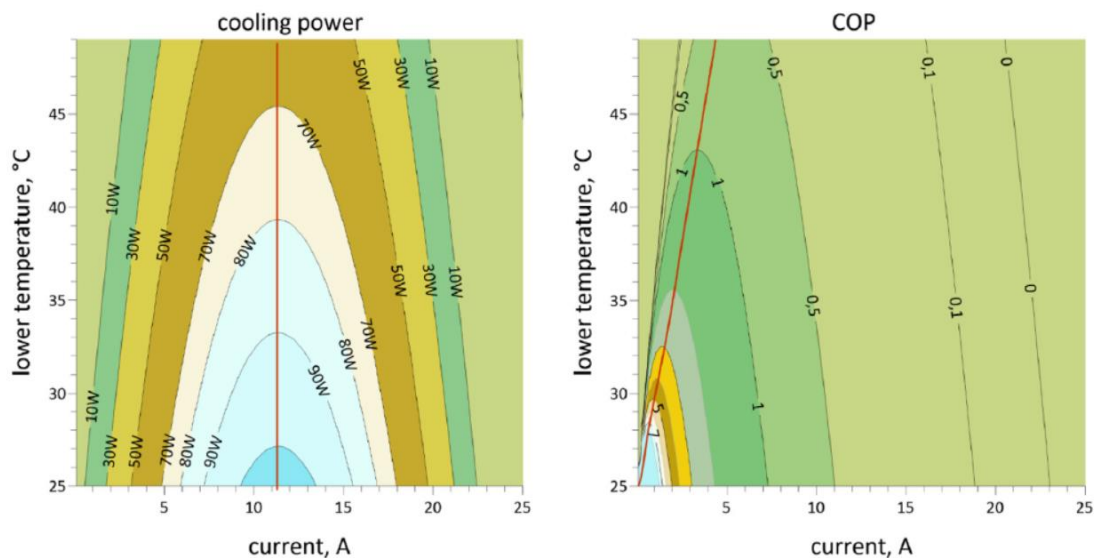
در سیستم مورد بررسی، مهم ترین پارامترهای قابل تغییر، تعداد ماژول ها، جریان الکتریکی و اندازه مبدل های حرارتی است. آنالیزها برای یک ماژول ترموالکتریک تجاری در دسترس که پارامترهای آن مشخص است، انجام شده است. سیستم تهویه مطبوع از نظر ظرفیت خنک کننده و COP آن تجزیه و تحلیل گردیده است. علاوه بر این، با معیارهای اقتصادی برای دستیابی به بالاترین ظرفیت خنک کننده یک دلار از هزینه کل (برق و سرمایه گذاری) در یک دوره معینی از طول عمر دستگاه (ETCC - ظرفیت خنک کننده کل اقتصادی) بهینه سازی شده است. برای ۲۴۰۰ ساعت کارکرد دستگاه، با اختلاف دمای 5K و میانگین هزینه برق، ETCC بهینه شده در مجموع حدود 0.58 W/\$ است. با امکان تغییر هندسه داخلی ماژول های ترموالکتریک، این ضریب به 0.64 W/\$ افزایش می یابد. دستگاه بهینه سازی شده از نظر ETCC با حداکثر توان خنک کننده کار نمی کند و می تواند در شرایط کار حدود ۳۰ درصد اضافه بار شود.

شبیه سازی

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه سازی عملکرد سیستم نشان داده شده است. شبیه سازی با استفاده از نرم افزار MATLAB انجام شده است. در ابتدا منحنی های مشخصه ماژول TEC بررسی می شود. ابتدا، ویژگی های ماژول ترموالکتریک مستقل تجزیه و تحلیل شده مشخص می شود. برای این منظور، فرض بر این است که دمای رادیاتورها برای هر نقطه از تعیین مشخصه، ثابت و از قبل تنظیم شده است. دمای بالای رادیاتور ثابت و در هر مورد برابر با ۲۵ درجه سانتیگراد است. همچنین فرض بر این است که در سطح مشترک بین اتصال ترموالکتریک و مایع انتقال دهنده گرما، مقاومت حرارتی در واحد

سطح، در سطح $rsu = rsl = 42 \mu\text{Km}^2 / \text{W}$ تخمین زده می‌شود، که برای آن $27 \mu\text{Km}^2 / \text{W}$ سهم مقاومت حرارتی روی سطح تماس TEC و دیگر ۱۵ $\mu\text{Km}^2 / \text{W}$ شامل مقاومت حرارتی بین مبدل و جریان مایع است. این مقدار نیز برای شبیه‌سازی‌های بیشتر به کار گرفته می‌شود. توان خنک کننده و COP برای طیف گسترده‌ای از جریان‌ها در مدار تامین کننده حرارت محاسبه می‌شود. این مقدار نیز برای شبیه‌سازی‌های بیشتر به کار گرفته می‌شود. توان خنک کننده و COP برای طیف وسیعی از جریان‌ها در مدار تامین کننده مازول ترموالکتریک در دماهای مختلف رادیاتور پایین محاسبه می‌شود.

نمودارهای ارائه شده در نمودار شماره ۱ نتایج شبیه سازی های حالت پایدار انجام شده را نشان می‌دهد.



نمودار شماره ۱: توان خنک کننده و COP بسته به جریان مازول و دمای تخلیه رادیاتور مبدل حرارتی (پایین تر)

برای دمای ثابت بالای رادیاتور ۲۵ درجه سانتیگراد.

در نمودار شماره ۱ توان خنک کننده و COP بسته به جریان مازول و دمای تخلیه رادیاتور مبدل حرارتی (پایین تر) برای دمای ثابت بالای رادیاتور ۲۵ درجه سانتیگراد نشان داده شده است. خطوط قرمز از حداکثر عبور می‌کنند. حداکثر توان برای هر دمای پایین‌تر تقریباً در امتداد یک خط جریان ثابت رخ می‌دهد.

نمودار شماره ۱ نشان می‌دهد که اثر مفید از نظر توان خنک‌کننده با افزایش اختلاف دما بین مبدل‌ها کاهش می‌یابد. افزایش در اختلاف همچنین شامل کاهش دامنه جریان‌هایی است که می‌توان به سطح مثبت توان خنک‌کننده دست یافت. مشاهده می‌شود که خط قرمزی که از حداکثر توان خنک‌کننده برای یک اختلاف دمای معین عبور می‌کند، با مقدار جریان تقریباً ثابتی مطابقت دارد که کمی بالاتر از 11A است. با تجزیه و تحلیل منحنی حداکثر COP (خط قرمز عبور از حداکثر)، که در آن COP به عنوان نسبت خنک‌کننده به برق است، می‌توان دریافت که ماکزیمم‌ها به سمت جریان‌های کم جابه‌جا می‌شوند و مقادیر COP بالاتر از ۳ را فقط می‌توان برای اختلاف دمایی کمتر از 8K در جریان‌های کمتر از 3A بدست آورد.

بر اساس نتایج ارائه شده، می‌توان مشاهده کرد که برای یک ماژول ترموالکتریک منفرد ($n = 100$) عملکرد سیستم در اختلاف دمای مبدل‌های حرارتی در سطح K10 با مقدار COP حداقل ۱ (نمودار سمت راست) دستیابی به توان خنک‌کنندگی در حد ۳۰ الی ۵۰ وات (نمودار سمت چپ) را ممکن می‌سازد.

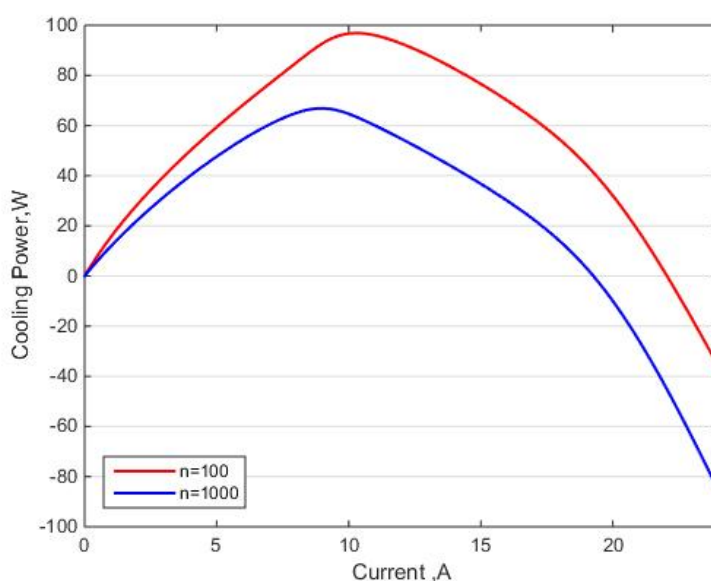
ویژگی‌های سیستم تهویه مطبوع

در این مرحله مشخصات رادیاتورها در نظر گرفته می‌شود. در ابتدا فرض بر این بود که در سمت تخلیه گرما (در فضای باز)، رادیاتور دو برابر بزرگتر از سمت جذب گرما (داخلی) است. هر دو رادیاتور علاوه بر این توسط فن‌ها کمک می‌کنند. بنابراین، شرایط انتقال حرارت در سطوح $HTF_{in} = 100W/K$ و $HTF_{out} = 200W/K$ تخمین زده می‌شود، که در آن معادل یک خنک‌کننده منفرد است. تجزیه و تحلیل بر روی عملکرد حالت پایدار یک سیستم تهویه مطبوع با استفاده از TEC بررسی شده در بالا تحت شرایط انتقال حرارت خاص ($HTF_{in} = 100W/K$ و $HTF_{out} = 200W/K$) می‌شود. شبیه‌سازی‌ها برای بررسی توان خنک‌کننده و COP بدست‌آمده بسته به جریان تامین‌کننده ماژول ترموالکتریک برای دو دمای انتخابی مخزن حرارتی پایین‌تر (در فضای باز) $T_{out} = 25 C$ (اختلاف صفر K)

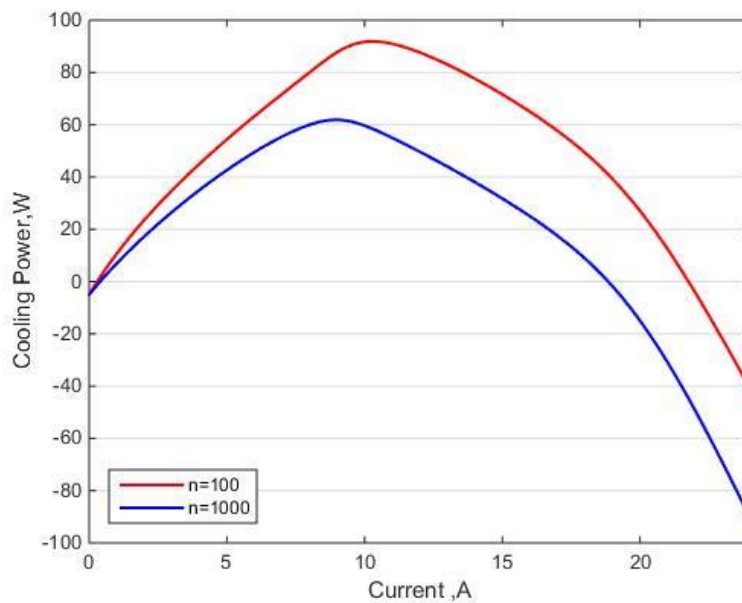
و 30C (تفاوت 5K) انجام می‌شود، در حالی که دمای قسمت بالایی (داخلی) ویژگی های سیستم تهویه مطبوع در این مرحله مشخصات رادیاتورها در نظر گرفته می‌شود. در ابتدا فرض بر این بود که در سمت تخلیه گرما (در فضای باز)، رادیاتور دو برابر بزرگتر از سمت جذب گرما (داخلی) است.

تجزیه و تحلیل بر روی عملکرد حالت پایدار یک سیستم تهویه مطبوع شرح داده شده با استفاده از TEC بررسی شده در بالا تحت شرایط انتقال حرارت خاص ($HTF_{in}=100W/K$ و $HTF_{out}=200W/K$) متمرکز شده است. شبیه‌سازی‌ها برای بررسی توان خنک‌کننده و COP بدست‌آمده بسته به جریان تامین‌کننده ماژول ترموالکتریک برای دو دمای انتخابی مخزن حرارتی پایین‌تر (در فضای باز) $T_{out} = 25\text{ C}$ (اختلاف صفر K) و 30C (تفاوت 5K) انجام می‌شود. دمای مخزن حرارتی بالایی (داخلی) ثابت است ($T_{in}=25\text{C}$). نتایج ارائه شده فوق به توان خنک‌کنندگی نسبتاً پایین یک ماژول ترموالکتریک منفرد اشاره دارد. به همین دلیل، گزینه دیگری با اتصال حرارتی موازی ۱۰ ماژول ($n = 1000$) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

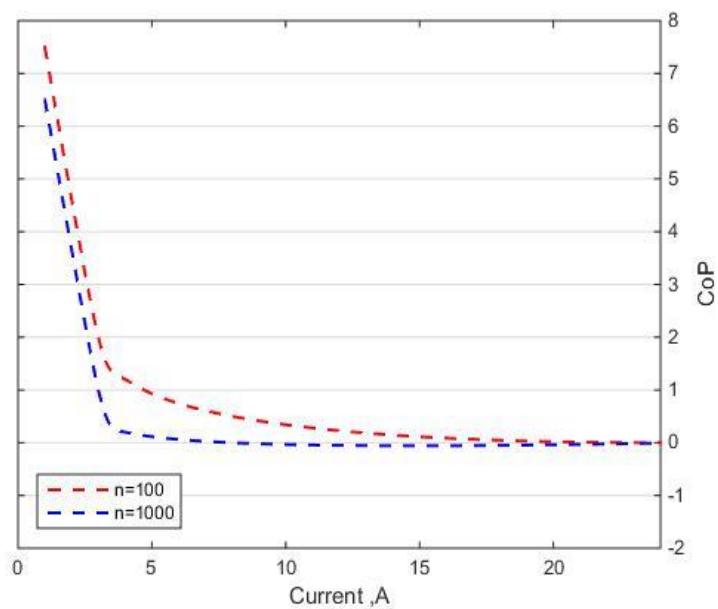
نمودارهای زیرین، توان خنک‌کننده و COP را برای یک سیستم ترموالکتریک با یک ماژول واحد ($n=100$) و برای یک سیستم با ده ماژول یکسان ($n=1000$) نشان می‌دهد.



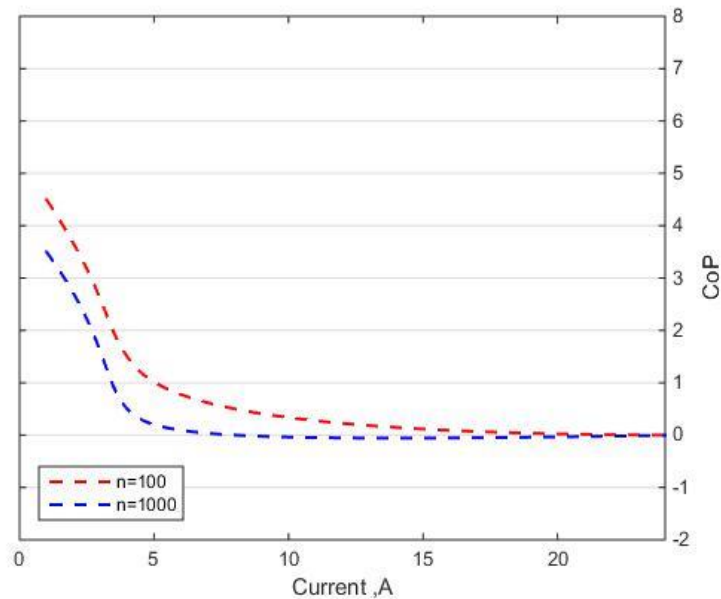
نمودار شماره ۲: توان خنک کننده برای دمای بیرونی ۲۵ درجه سانتیگراد.



نمودار شماره ۳: توان خنک کننده برای دمای بیرونی ۳۰ درجه سانتیگراد.



نمودار شماره ۴: مقادیر COP برای دمای بیرونی ۲۵ درجه سانتیگراد.



نمودار شماره ۵: مقادیر COP برای دمای بیرونی ۳۰ درجه سانتیگراد.

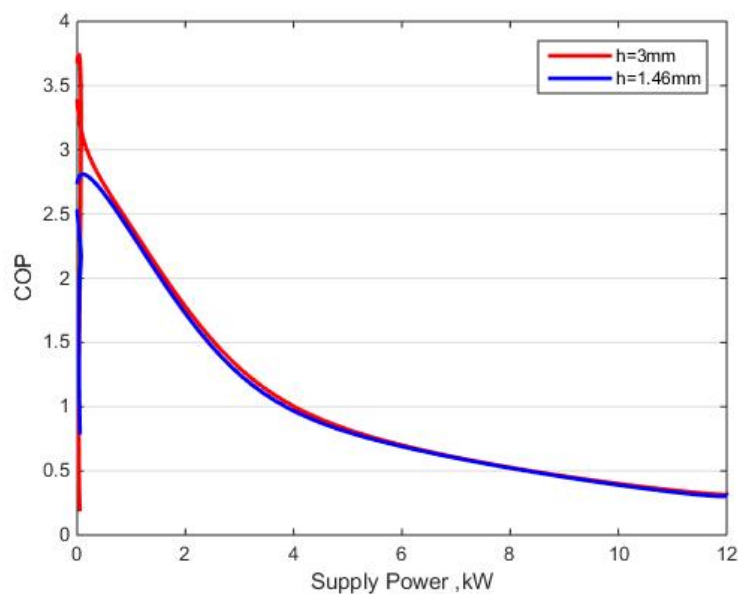
در نمودارهای فوق توان خنک کننده و مقادیر COP برای دمای بیرونی ۲۵ درجه سانتیگراد و ۳۰ درجه سانتیگراد نشان داده شده است. دمای داخلی برای سیستم ارائه شده در شکل ۳-۵ در نمودار سیستم تهویه ثابت است (۲۵ درجه سانتیگراد). خطوط مشخص شده با $n=100$ نتایج را برای یک سیستم واحد نشان می دهد، در حالی که خطوط مشخص شده با $n=1000$ نشان دهنده یکی از ماژول ها در ۱۰ ماژول سیستم است. $HTF_{in} = 100W/K$, $HTF_{out} = 200W/K$.

حداکثر توان خنک کنندگی سیستم

نتایج بهینه سازی مربوط به دستیابی به حداکثر ETCC در شرایط داده شده بود. در هر پیکربندی طراحی، سیستم می تواند با توان خنک کنندگی بسیار بالاتری نسبت به مقدار حاصل از ETCC بهینه کار کند، مشروط بر اینکه توسط جریان به اندازه کافی قوی تر تامین شود.

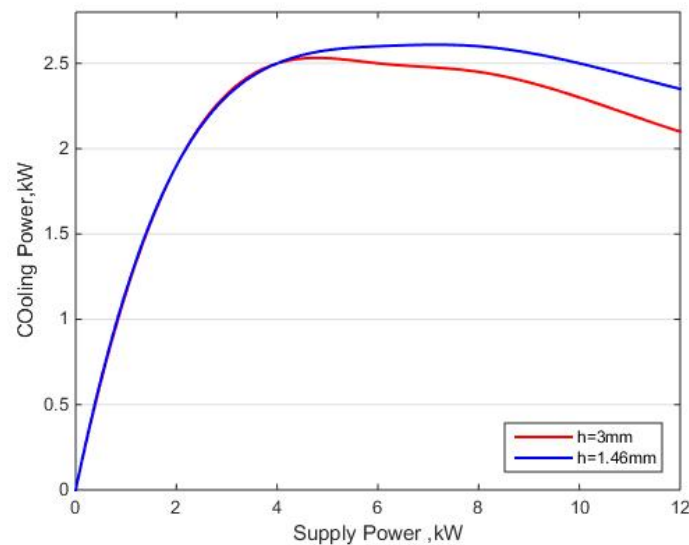
برای مشاهده محدوده کنترل چنین دستگاهی، تاثیر جریان تغذیه بر توان خنک کننده و ETCC مربوط به عملکرد در چنین شرایطی بررسی شده است. محاسبات برای یک سیستم بهینه شده انجام شده است. شبیه سازی برای ماژولها ($h=3$ میلی متر) و برای ماژول هایی با ارتفاع بهینه شده پا ($h=1.46$ میلی متر) انجام گردیده است.

نمودار شماره ۶ تاثیر توان منبع تغذیه و مقادیر COP را نشان می دهد.



نمودار شماره ۶: تاثیر توان منبع تغذیه بر مقادیر COP

نمودار شماره ۶ تاثیر توان منبع تغذیه بر مقادیر COP را نشان می دهد که نتیجه برای دو ارتفاع $h=3$ میلی متر و $h=1.46$ میلی متر است.



نمودار شماره ۷: توان خنک کننده دستگاه بسته به توان منبع تغذیه سیستم ترموالکتریک

نمودار شماره ۷ توان خنک کننده دستگاه بسته به توان منبع تغذیه سیستم ترموالکتریک را نشان می-

دهد. که نتایج حاصل برای دو ارتفاع $h=3$ میلی متر و $h=1.46$ میلی متر قابل مشاهده است.

سیستم مورد تجزیه و تحلیل شامل ماژول‌های ترموالکتریک به صورت موازی، مبدل‌های حرارتی در تماس با TEC و رادیاتورهایی بود که با محیط‌ها گرما را مبادله می‌کردند. فرض بر این بود که گرما از مبدل‌ها به رادیاتورهای فن دار توسط یک محیط مایع منتقل می‌شود. مشاهده شد که اگر اندازه رادیاتورهای دوطرف سیستم ثابت بماند، افزایش اندازه قطعه ترموالکتریک منجر به قدرت خنک‌کننده کمتر و COP کمتر در هر ماژول می‌شود. این، اثر گرمای بیشتر است که توسط ماژول‌ها هدایت می‌شود. یک شار حرارتی بزرگتر با همان رادیاتورها باعث ایجاد گرادیان دمایی بیشتر بین اتصالات ترموالکتریک می‌شود و منجر به کاهش ظرفیت خنک‌کننده و ETCC می‌شود.

سپس سیستم برای به حداکثر رساندن ظرفیت خنک‌کننده به دست آمده از یک دلار کل هزینه سیستم در طول عمر دستگاه بهینه‌سازی گردید. تمام محاسبات با در نظر گرفتن هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیات انجام شد.

سیستم بهینه‌سازی شده از نظر بازده اقتصادی می‌تواند حدود ۳۰ درصد بارگذاری شود که شامل کاهش ۲.۵ برابری COP است.

عملکرد مداوم دستگاه (۲۴۰۰ ساعت) در شرایط حداکثر توان خنک کننده باعث کاهش حدود ۳۰ درصدی ETCC در کل چرخه فرضی عملکرد می‌شود.

هنگام مقایسه سیستم ترموالکتریک تهویه مطبوع ارائه شده با راه حل‌های مبتنی بر کمپرسور معمولی، می‌توان مشاهده کرد که با قدرت خنک کننده قابل مقایسه، به طور قابل ملاحظه‌ای گران‌تر است و دارای COP و همچنین ETCC کمتر است. با این حال، سیستم ترموالکتریک دارای تعدادی مزیت از جمله سادگی طراحی، عملکرد بی صدا، عدم وجود کمپرسور، و امکان استفاده از هر گونه (دوستدار محیط زیست و ایمن) مایع انتقال گرما است. چنین سیستمی می‌تواند با معکوس کردن جهت جریان‌های TEC ها را تامین می‌کند، به عنوان گرم کننده اتاق نیز کار کند. علاوه بر این، سیستم کنترل چنین دستگاهی در قالب یک منبع تغذیه DC تنظیم شده بسیار ساده به نظر می‌رسد و سلول‌های ترموالکتریک را می‌توان به صورت سری یا موازی الکتریکی متصل کرد تا مدار را با محدوده ولتاژ منبع تغذیه در یک سطح توان معین تطبیق دهد.

در کل می‌توان نتیجه گرفت که سیستم ترموالکتریک تهویه مطبوع پیشنهادی با قدرت خنک کننده قابل توجه، به طور قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با راه حل‌های مبتنی بر کمپرسور معمولی، دارای هزینه بیشتر است و دارای COP و همچنین ETCC کمتر است. ولی دارای مزیت‌هایی از جمله سادگی طراحی، عملکرد بی صدا، عدم وجود کمپرسور، و امکان استفاده از هر گونه (دوستدار محیط زیست و ایمن) مایع انتقال گرما است.

مراجع :

- [1] Bakthavatchalam B, Habib K, Saidur R, Saha BB. Cooling performance analysis of nanofluid assisted novel photovoltaic thermoelectric air conditioner for energy efficient buildings. *Applied Thermal Engineering*. 2022 May 21:118691.
- [2] Liu Q, Wei F, Li G, Kan Z, Yang J, Zhu H, Wang B, Zhao H. Highly efficient thermoelectric air conditioner with kilowatt capacity realized by ground source heat-exchanging system. *Iscience*. 2022 May 20;25(5):104296.
- [3] Almodfer R, Zayed ME, Abd Elaziz M, Aboelmaaref MM, Mudhsh M, Elsheikh AH. Modeling of a solar-powered thermoelectric air-conditioning system using a random vector functional link network integrated with jellyfish search algorithm. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022 Mar 1;31:101797.
- [4] Leite GD, Weschenfelder F, Araújo AM, Ochoa AA, Neto ND, Kraj A. An economic analysis of the integration between air-conditioning and solar photovoltaic systems. *Energy Conversion and Management*. 2019 Apr 1;185:836-49.
- [5] J. Mei, X. Xia, Energy-efficient predictive control of indoor thermal comfort and air quality in a direct expansion air conditioning system, *Applied Energy* 195 (2017) 439–452.
- [6] T. Randazzo, E. De Cian, M.N. Mistry, Air conditioning and electricity expenditure: The role of climate in temperate countries, *Economic Modelling* 90 (2020) 273–287.
- [7] M.M. Hurwitz, E.L. Fleming, P.A. Newman, F. Li, E. Mlawer, K. Cady-Pereira, R.Bailey, Ozone depletion by hydrofluorocarbons, *Geophys. Res. Lett.* 42 (20) (2015) 8686–8692.
- [8] A.M.R. Nishimwe, S. Reiter, Estimation, analysis and mapping of electricity consumption of a regional building stock in a temperate climate in Europe, *Energy and Buildings* 253 (2021) 111535.
- [9] UNEP. 2011. HFCs: A Critical Link in Protecting Climate and the Ozone Layer. United Nations Environment Programme (UNEP). 36pp.
- [10] D.K. Lim, B.H. Ahn, J.H. Jeong, Method to control an air conditioner by directly measuring the relative humidity of indoor air to improve the comfort and energy efficiency, *Applied Energy* 215 (2018) 290–299.

- [11] J. Mei, X. Xia, M. Song, An autonomous hierarchical control for improving indoor comfort and energy efficiency of a direct expansion air conditioning system, *Applied Energy* 221 (2018) 450–463.
- [12] M.S. Oh, J.H. Ahn, D.W. Kim, D.S. Jang, Y. Kim, Thermal comfort and energy saving in a vehicle compartment using a localized air-conditioning system, *Applied Energy* 133 (2014) 14–21.
- [13] M.Z. Yilmazoglu, Experimental and numerical investigation of a prototype thermoelectric heating and cooling unit, *Energy and Buildings* 113 (2016) 51–60.
- [14] S. Shittu, G. Li, X. Zhao, X. Ma, Review of thermoelectric geometry and structure optimization for performance enhancement, *Applied Energy* 268 (2020) 115075.
- [15] A. Fabián-Mijangos, G. Min, J. Alvarez-Quintana, Enhanced performance thermoelectric module having asymmetrical legs, *Energy Conversion and Management* 148 (2017) 1372–1381.
- [16] X. Wang, J.i. Qi, W. Deng, G. Li, X. Gao, L. He, S. Zhang, An optimized design approach concerning thermoelectric generators with frustum-shaped legs based on three-dimensional multiphysics model, *Energy* 233 (2021) 120810.
- [17] X.-X. Tian, S. Asaadi, H. Moria, A. Kaood, S. Pourhedayat, K. Jermisittiparsert, Proposing tube-bundle arrangement of tubular thermoelectric module as a novel air cooler, *Energy* 208 (2020) 18428.
- [18] A. Provensi, J.R. Barbosa, Analysis and optimization of air coolers using multiple-stage thermoelectric modules arranged in counter-current flow, *International Journal of Refrigeration* 110 (2020) 19–27.
- [19] A. Attar, H.S. Lee, Designing and testing the optimum design of automotive air-to-air thermoelectric air conditioner (TEAC) system, *Energy Conversion and Management* 112 (2016) 328–336.
- [20] H. Sun, B. Lin, Z. Lin, Y. Zhu, H. Li, H. Wu, Research on a radiant heating terminal integrated with a thermoelectric unit and flat heat pipe, *Energy and Buildings* 172 (2018) 209–220.