



توسعه طراحی واحد تهویه مطبوع سازگار با محیط زیست و دارای نیروی خودکار

¹عرفان محبوب: دکتر اباذر وحدت آزاد

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:

از مهم‌ترین شاخصه‌های زندگی مطلوب، داشتن محیط مناسب از همه جوانب می‌باشد که یکی از این جوانب شرایط آسایش محیط می‌باشد. سیستم HVAC یعنی سیستم تهویه مطبوع، شرایط مطلوب را برای افراد همراه با کیفیت هوای داخلی فراهم می‌کند. هدف از طراحی آن برقراری تعادل میان آسایش در محیط‌های داخل ساختمان با عوامل دیگری چون هزینه نصب و راه‌اندازی، سهولت نگهداری و بهره‌وری انرژی است. وجود دستگاه‌های سیستم تهویه مطبوع که هوای باکیفیت با دمای مناسب ارائه کند، و نسبت به روش‌های موجود کارایی بالایی داشته باشد در این پایان‌نامه یک سیستم تهویه مطبوع کم مصرف و مقرون به صرفه بنام سیستم تهویه مطبوع زمین گرمایی - ترموالکتریک با راندمان انرژی بالا و بدون مبرد مضر از طریق ترکیب هم افزایی مزایای اثر ترموالکتریک و گرمای منبع زمین پیشنهاد شده است. این سیستم با واحدهای ترمینال در سه حالت مجزا، یعنی سرمایش، گرمایش و حالت تهویه کار می‌کند و اتصالات زمینی آن بسته به شرایط جغرافیایی دارای اشکال مختلفی است. از مازول‌های ترموالکتریک برای جبران گرمای زمین گرمایی درجه پایین استفاده شده است.

نتایج شبیه سازی نشان داد که سیستم پیشنهادی دارای ضرایب عملکرد بالا در هر دو حالت خنک کننده و حالت گرمایش بوده و کارآمدی بهتری از خود نشان داد. این سیستم سازگار با محیط زیست با رتبه بازده انرژی بالا می تواند مصرف انرژی را کاهش داده و خنک کننده تمیزتر ارائه دهد و سبب کاهش هزینه انرژی شود. در کل نتایج نشان داد که با استفاده از مدل پیشنهادی می توان به کاهش توان مورد نیاز برای راه اندازی سیستم، کاهش توان مورد نیاز برای خنک کردن هوا و حفظ هوای خنک و انرژی برای استفاده مجدد در آینده دست یافت.

واژه های کلیدی: سیستم تهویه مطبوع HVAC، زمین گرمایی - ترموالکتریک، سازگار با محیط زیست

1- مقدمه :

بهترین نوع سیستم های تهویه مطبوع ساختمان به عوامل مختلفی از جمله نوع کاربری دستگاه، بحث بودجه مورد نظر برای تهیه دستگاه، انرژی های مصرفی آن مانند برق، گاز و آب، شرایط آب و هوایی محل نصب بستگی دارد که می توان مناسب ترین دستگاه را برای هر پروژه پیشنهاد داد. به طور کلی اکثر دستگاه های سرمایشی که با مصرف انرژی الکتریسیته کار می کنند در دو نوع کمپرسور دار و بدون کمپرسور هستند که نوع بدون کمپرسور مانند کولر آبی، دستگاه زنت و ایرواشر کمترین مصرف برق را دارند ولی فقط در برخی کاربری ها می توان از این دستگاه ها استفاده کرد.

سیستم های گرمایش، تهویه و خنک سازی که در اصطلاح دیگر به آن سیستم های تهویه مطبوع می گویند، بخشی جدایی ناپذیر از ساختمان های مدرن می باشند. سیستم های تهویه مطبوع وظیفه حفظ راحت دما معمولاً حدود ۷۲ درجه، رطوبت سازگار یعنی ما بین ۴۰ - ۶۰ درصد و نگهداری کیفیت هوای داخل به اندازه کیفیت مطلوب نگه داشتن مقدار مطلوب دی اکسید کربن را دارند.

داشتن محیط مناسب از همه جوانب می‌باشد که یکی از این جوانب شرایط آسایش محیط می‌باشد. به همین منظور موضوعی تحت عنوان HVAC که به معنای سیستم تهویه مطبوع است، مطرح شده است. این سیستم به بررسی شرایط مطلوب و آسایش انسان و همچنین فراهم آوردن آن می‌پردازد. برقراری سرمایش و گرمایش و همچنین رطوبت زنی یا خشک کردن محیط بسته هدف اصلی سیستم های تهویه مطبوع می‌باشد و فراهم کردن شرایط مطلوب آن می‌باشد. سیستم های HVAC نقاط عطف ساخت سیستم های مکانیکی ساختمان هستند که راحتی کار را برای افراد همراه با کیفیت هوای داخلی فراهم می‌کنند.

رشد زیاد جمعیت، ارتقای استانداردهای سطح زندگی، کاهش میزان ذخایر و منابع انرژی، گرمایش زمین، اثرات و آلودگی های ناشی از مصرف انرژی های تجدید ناپذیر در محیط، آینده نگری و سرانجام برنامه ریزی برای هر کشور و منطقه را ضروری می‌دارد. نقش تهویه مطبوع در محیط زیست، بسیار حائز اهمیت است. تاسیسات مکانیکی چون چیلرها و برج های خنک کن، کولرهای آبی و گازی نقشی انکارناپذیر در تهویه مطبوع

ساختمانها دارند. باید تلاش بر آن باشد تا استفاده از این سیستم ها در برخی جهات با محیط زیست سازگار باشد.

1-2- سوال اصلی تحقیق :

استفاده از منبع زمین گرمایی برای سیستم های تهویه مطبوع مناسب است یا خیر؟

1-2-2- فرضیه های تحقیق :

- دسترسی به منابع زمین گرمایی وجود دارد و حفر چاه قایل اجرا می‌باشد.

- فضای کافی بابت اجرا و نصب دستگاه های زمین گرمایی وجود دارد و فن کوپل ها در محیط نصب میشوند .
- در این تحقیق مدت استفاده و تعداد دستگاه ها نیز به صورت پیش فرض در نظر گرفته ایم
- زمانی که در مورد اندازه و بزرگی سیستم صحبت می شود (تن تبرید BTU/hr , TR و یا KW) ، منظور ظرفیت خنک کنندگی سیستم می باشد و برای این کار نیاز به توان الکتریکی است . توان الکتریکی مصرفی بر مبنای KW کمتر از سرمایش تولید شونده توسط سیستم بر حسب KW خواهد بود .
- تعداد ماژول ها ۱۶ بوده و در شرایط شبیه سازی ، دمای محیط برای حالت سرمایش ۲۵ درجه سانتی گراد و برای حالت گرمایش ۲۰ درجه سانتی گراد در نظر گرفته میشود .
- رطوبت به قدری پایین نگه داشته شده است ، که در کل طول شبیه سازی ، تراکم وجود نداشته است ، بنابراین تأثیر رطوبت ناچیز است . نرخ جریان هوا برای حالت سرمایش و گرمایش به ترتیب $287 m^3h^{-1}$ و $300 m^3h^{-1}$ است.

روش پیشنهادی :

از انرژی زمین گرمایی که در دسته‌ی انرژی‌های جایگزین^۱ دسته‌بندی می‌شود ، برای کاربردهایی مانند گرم کردن ساختمان‌های شهری و صنعتی یا تولید برق استفاده می‌کنند .

چهار روش اصلی برای استفاده از انرژی زمین گرمایی وجود دارد :

^۱ - Alternative Energies

- نیروگاه زمین گرمایی
- پمپ حرارتی زمین گرمایی
- استفاده مستقیم
- سیستم‌های تقویت‌شده‌ی زمین گرمایی

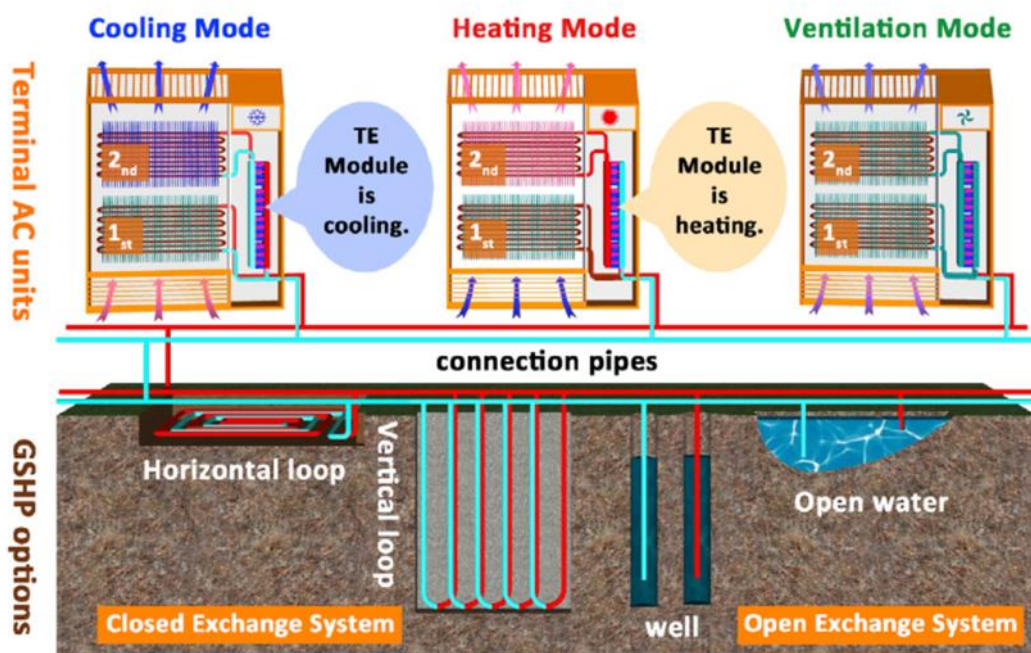
این نوع انرژی در مقیاس زیاد، به شکل مطمئن و به عنوان یک نوع منبع تجدیدپذیر^۲ در دسترس است که به شرایط آب و هوایی وابستگی ندارد. با استفاده از گرمای زمین، وابستگی به سوخت‌های فسیلی کاهش می‌یابد و اگر بهره‌برداری از منبع مورد نظر بیش از ظرفیت نباشد، منجر به کمترین آسیب به محیط زیست می‌شود.

یک سیستم HVAC (گرمای، تهویه و تهویه مطبوع) معرفی شده است که وسیله‌ای برای تولید تهویه مطبوع با استفاده از منابع طبیعی است. سیستم تهویه مطبوع پیشنهادی بصورت زمین گرمایی - ترموالکتریک بوده و ساختار و جزئیات آن شرح داده شده است. طراحی سیستم تهویه مطبوع کم مصرف و انرژی کارآمدتر و مقرون به صرفه ارائه شده است. یک سیستم تهویه مطبوع زمین گرمایی - ترموالکتریک با راندمان انرژی بالا و بدون میرد از طریق ترکیب هم افزایی مزایای اثر ترموالکتریک و گرمای منبع زمین پیشنهاد شده است.

روش پیشنهادی سیستم تهویه مطبوع زمین گرمایی - ترموالکتریک می‌باشد. انرژی زمین گرمایی کم عمق زیرزمینی که یک مخزن انرژی گرمایی و وسیع با دمای تقریباً ثابت حدود هجده درجه سانتیگراد در تمام طول سال است می‌تواند یک منبع تبادل گرما ایده آل برای تهویه مطبوع ترموالکتریک باشد.

² - Renewable Resource

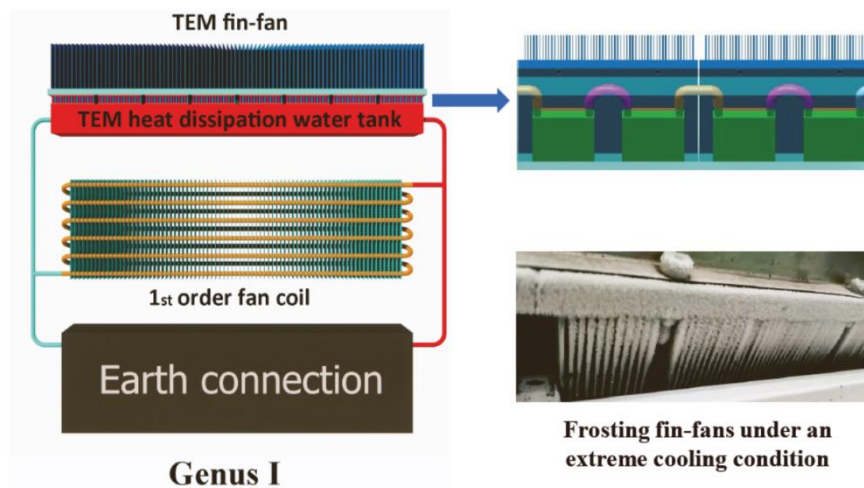
می توان با استفاده از پمپ حرارتی منبع زمینی برای بهره برداری از انرژی زمین گرمایی کم عمق استفاده نمود که دارای ضریب عملکرد یا COP غنی نسبت به پمپ حرارتی منبع هوا است. با این حال، پمپ‌های حرارتی منبع زمینی موجود نیاز به یک کمپرسور یا تکنیک فشرده سازی بخار مبتنی بر مبرد برای جبران انرژی زمین گرمایی درجه پایین دارند. در این پایان نامه، نوع جدیدی از سیستم تهویه مطبوع ساختمان، با ترکیب ویژگی‌های تهویه مطبوع ترموالکتریک با پمپ حرارتی منبع زمینی پیشنهاد شده است که یک سیستم تهویه مطبوع دو مرحله‌ای که در آن انرژی زمین گرمایی تجدیدپذیر به صورت هم افزایی عمل می‌کند، می‌باشد.



شکل ۱-۱: فلوچارت کلی سیستم تهویه مطبوع پیشنهادی

در شکل ۱-۱ فلوچارت کلی سیستم تهویه مطبوع پیشنهادی قابل مشاهده می‌باشد. این سیستم با واحدهای ترمینال AC (قسمت بالایی) در سه حالت مجزا، یعنی سرمایش، گرمایش و حالت تهویه کار می‌کند. اتصالات زمین (قسمت پایینی) بسته به شرایط جغرافیایی اشکال مختلفی دارد و به طور کلی به دو نوع سیستم مبادله بسته و سیستم مبادله باز تقسیم می‌شود.

از ماژول‌های ترموالکتریک برای جبران گرمای زمین گرمایی درجه پایین استفاده شده است. در اکثر سیستم‌های تهویه مطبوع ترموالکتریک از طراحی بادبزن‌های رادیاتوری برای پراکنده کردن بار گرما (سرم) ماژول‌های ترموالکتریک به هوا و یک مخزن آب برای تزریق (خارج کردن) گرمای مربوطه استفاده می‌شود. بر اساس این طرح، سیستمی طراحی می‌شود که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.



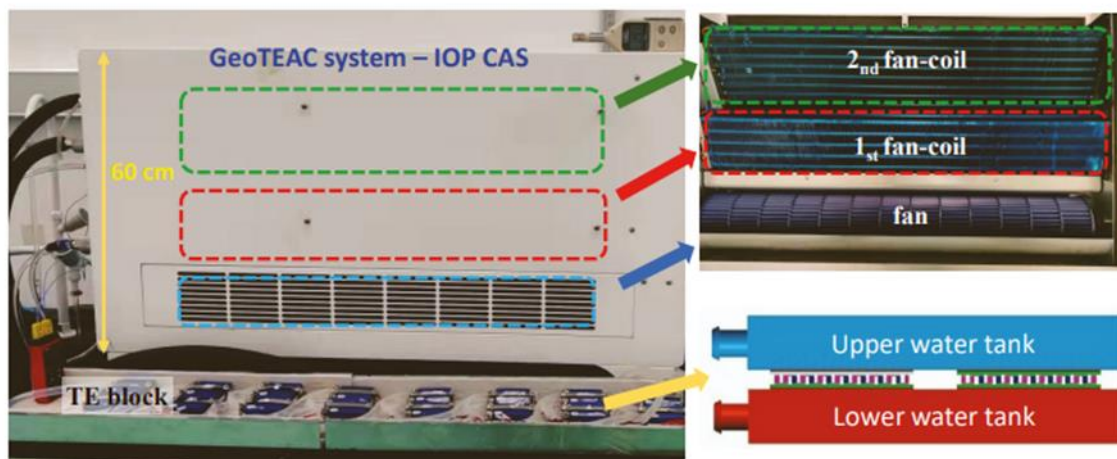
شکل ۱-۲: ساختار سیستم تهویه مطبوع زمین گرمایی-ترموالکتریک

در شکل ۱-۲ ساختار سیستم تهویه مطبوع زمین گرمایی - ترموالکتریک، نشان داده شده است. واحد ترمینال آن شامل یک فن کوئل درجه یک است که با آب زیرزمینی متصل می‌شود و یک واحد مبدل حرارتی^۳ درجه دو بلوک TE (در مجموع ۸ ماژول TE در سیستم تهویه مطبوع زمین گرمایی - ترموالکتریک) که بین قسمت بالایی قرار می‌گیرند. با این طراحی، هوای گرم / سرد ابتدا با فن کوئل درجه یک پیش‌خنک یا گرم

³ - Heat Exchanger

می‌شود و سپس سرمایش یا گرمایش جبرانی را از طریق بادبزن‌های رادیاتوری بلوک TE درجه دو دریافت می‌کند .

یکی از ابزارهای مناسب برای به دست آوردن عملکرد صحیح سامانه تبریدی اندازه گیرهای دقیق اختلاف دما یا همان ΔT ها می‌باشد . منشا ΔT بزرگ در سراسر ماژول های ترموالکتریک در طراحی تبادل حرارتی ساختار بادبزن های رادیاتوری در بالای ماژول های TE نهفته است . این بادبزن ها معمولاً از آلیاژ آلومینیوم ساخته شده‌اند و راندمان تبادل حرارت پایینی دارند ، بنابراین نگهداری ΔT کوچک تر در آنها دشوار است . با توجه به این موضوع ، یک سیستم تهویه مطبوع زمین گرمایی - ترموالکتریک با استفاده از یک مخزن آب متصل داخلی و فن کویل برای جایگزینی آن ها ارائه می‌شود. سیستم پیشنهادی شامل دو فن کویل با اندازه های مختلف که یکی به آب زیرزمینی و دیگری به یک بلوک ترموالکتریک متصل است که در مجموع از ۱۶ ماژول ترموالکتریک تشکیل شده است که توسط مخازن آب بالایی و پایینی بسته شده اند .



شکل ۱-۳: ساختار سیستم تهویه مطبوع زمین گرمایی-ترموالکتریک ارائه شده

مخزن آب پایین به مبدل های حرارتی موجود در ناحیه تبادل حرارتی زیرزمینی متصل است ، مخزن آب بالایی به یکی از فن کویل ها متصل می شود و حرارت را بین هوا و آب تبادل می کند که در شکل ۱-۳ می توان مشاهده کرد . هنگامی که سیستم پیشنهادی کار می کند ، هوای سرد یا گرم اتاق ابتدا از فن کویل

اول پر از آب زیرزمینی ۱۸ درجه سانتیگراد می دمد تا پیش گرم یا سرد شود ، سپس فن کویل دوم که با آب پر شده و در قسمت بالایی دایر شده است عبور می کند .

ضریب عملکرد خنک کننده (COP) یک ماژول ترموالکتریک مورد استفاده در سیستم تهویه مطبوع زمین گرمایی - ترموالکتریک را می توان به صورت زیر محاسبه کرد :

$$COP_{TE-cooling} = \frac{Q_{c,TE}}{P} = \frac{S_{np}T_i l - \frac{1}{2}l^2 R - K(\Delta T)}{\zeta R + S_{np}(\Delta T)l} \quad \text{معادله (۱-۱)}$$

در رابطه فوق S_{np} ضریب Seebeck موثر است ، K هدایت حرارتی کل ، R مقاومت کل ، I جریان الکتریکی ورودی و T_h دمای سمت داغ ماژول ترموالکتریک است . مجموع توان ورودی ماژول TE یعنی PTE بصورت زیر محاسبه می شود :

$$P_{TE} = Np = N(\zeta R + \alpha_{n,p} \Delta T l) \quad \text{معادله (۲-۱)}$$

COP خنک کننده سیستم تهویه مطبوع زمین گرمایی-ترموالکتریک را می توان به صورت بیان کرد :

$$COP_{System-cooling} = \frac{Q_{c,TE} + Q_{c,1st} - (P_{fan} - P_{water pump})}{P_{TE} + P_{fan} + P_{water pump}} \quad \text{معادله (۳-۱)}$$

در رابطه فوق ، Q_{c1} سهم فن کویل است که بر روی ۳۵۱.۸ وات تنظیم شده است . P_{fan} و $P_{water pump}$ توان فن و پمپ آب هستند .

به طور مشابه ، COP گرمایش یک ماژول ترموالکتریک مورد استفاده در سیستم تهویه مطبوع زمین گرمایی - ترموالکتریک را می توان با رابطه زیر محاسبه کرد :

$$COP_{TE-heating} = \frac{S_{np}T_i l - \frac{1}{2}l^2 R - K(\Delta T)}{l^2 R + S_{np}(\Delta T)l} \quad \text{معادله (۴-۱)}$$

سپس ، COP گرمایش سیستم تهویه مطبوع زمین گرمایی - ترموالکتریک را می توان به صورت زیر بیان کرد :

$$COP_{System-cooling} = \frac{Q_{b,TE} + (P_{fan} - P_{water pump})}{P_{TE} + P_{fan} + P_{water pump}} \quad \text{معادله (۵-۱)}$$

در رابطه فوق ، $Q_{b,TE}$ سهم ماژول TE است که شامل گرمای جذب شده از آب و توان ورودی ماژول TE PTE است .

جریان الکتریکی را می توان با رابطه زیر به دست آورد :

$$l = \frac{-\alpha_{n,p}\Delta T + \sqrt{\alpha_{np}^2(\Delta T)^2 - 4Rnp}}{2R} \quad \text{معادله (۶-۱)}$$

می توان رابطه وابستگی TE COP را به تعداد ماژول های TE بدست آورد .

یک منطقه اتلاف گرمای موثر به صورت زیر تعریف می شود :

$$S_{eff} = N \times A_{single TE Module} \quad \text{معادله (۷-۱)}$$

به طوری که ، Single TE Module مساحت یک ماژول TE در حدود ۰.۰۰۳۸۴۴ متر مربع است. زمانی که ماژول TE حداکثر COP را به دست آورد ، Ih جریان الکتریکی است و بصورت زیر تعریف می شود :

$$l_{\eta} = \frac{(S_n - S_p)(\Delta T)}{R[\sqrt{1+Z\bar{T}} - 1]} \quad \text{معادله (۸-۱)}$$

می توان حداکثر COP های تهویه مطبوع ترموالکتریک ، COP_{max, cooling} و COP_{max, heating} را بدست آورد که در ادامه ذکر شده است :

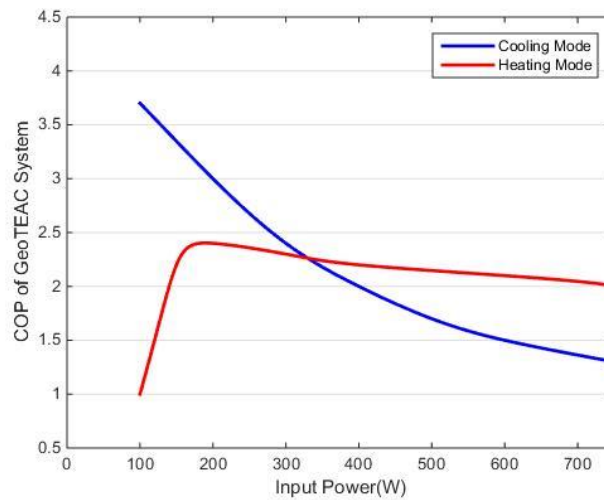
$$COP_{max, cooling} = \frac{T_i}{\Delta T} \frac{\sqrt{1+Z\bar{T}} - \frac{\Delta T + T_i}{T_i}}{\sqrt{1+Z\bar{T}} + 1} \quad \text{معادله (۹-۱)}$$

$$COP_{max, heating} = \frac{T_h}{\Delta T} \frac{\sqrt{1+Z\bar{T}} - \frac{T_i}{\Delta T + T_i}}{\sqrt{1+Z\bar{T}} + 1} \quad \text{معادله (۱۰-۱)}$$

نتایج شبیه سازی :

ساختار سیستم تهویه مطبوع زمین گرمایی - ترموالکتریک همراه با جزئیات بیان گردید . در این بخش نتایج حاصل از این روش پیشنهادی نشان داده شده و مورد تجزیه تحلیل قرار گرفته است . شبیه سازی با استفاده از نرم افزار MATLAB انجام گرفته است

جهت نشان دادن بازدهی و عملکرد سیستم پیشنهادی از ضریب عملکرد COP استفاده شده است که این عدد شاخصی جهت تعیین میزان بهینه بودن سیستم تهویه مطبوع زمین گرمایی- ترموالکتریک ارائه شده است . در نمودار ۱-۲ مقایسه ضرایب عملکرد یا COPها به عنوان توابع توان الکتریکی ورودی نشان داده شده است .



نمودار ۱-۲: مقایسه ضرایب عملکرد با توان الکتریکی ورودی

در نمودار ۱-۲ ضرایب عملکرد با توان الکتریکی ورودی در دو حالت خنک کننده و حالت گرمایش مقایسه شده و قابل مشاهده می‌باشد. با دقت در نمودار مشخص است که در هر دو حالت سرمایش و گرمایش بازدهی سیستم بهتر می‌باشد. در نمودار فوق، ضرایب عملکرد بر اساس رابطه بین توان ورودی به سیستم در مقایسه با مقدار توان خروجی قابل مشاهده است و سیستم در هر دو حالت خنک کننده و حالت

گرمایش کارآمدی بهتری از خود نشان داده است. تاثیر گرمایش معادل کل یا همان TEWI با معادله زیر محاسبه می‌شود:

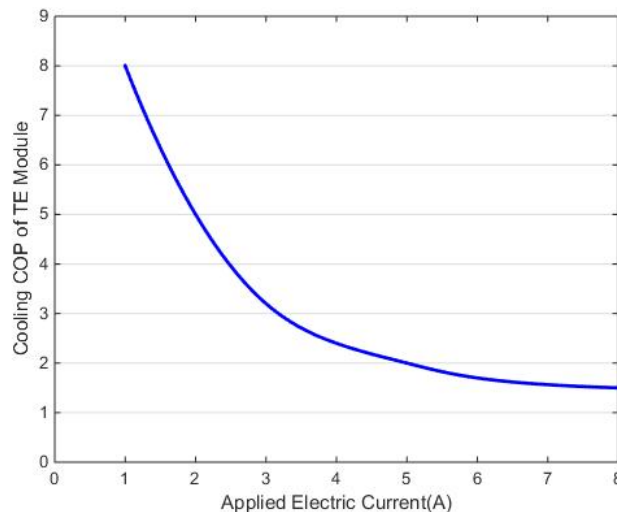
معادله (۱-۲)

$$TEWI = [Y \times L \times m \times GWP + (1 - \beta) \times GWP] + (Q/COP) \times n \times Y \times a_{CO_2}$$

Y به عنوان ۱۵ سال و L، β ، و نرخ نشت سالانه و درصد بازیابی در سیستم‌ها به ترتیب ۰.۵٪ و ۰.۹۰٪ در نظر گرفته شده است.

m جرم مورد استفاده در سیستم ها است . Q مجموع ظرفیت مورد نیاز برای تنظیم مکان ۲۵ کیلو وات است . n زمان اجرای سالانه ۳۶۰۰ ساعت در نظر گرفته شده است و α_{CO_2} ضریب انتشار دی اکسید کربن است که روی ۰.۷ کیلوگرم $0.7kgCO_2-eq/(kwh)$ تنظیم شده است . m و COP تکنیک های تبرید لیست شده

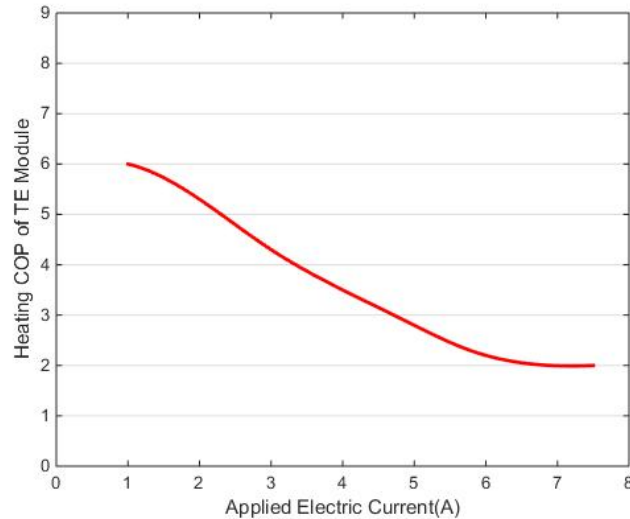
در ادامه نتایج حاصل از شبیه سازی کارایی سیستم تهویه مطبوع زمین گرمایی - ترموالکتریک نشان داده شده است . در نمودار ۲-۲ COP ماژول ترموالکتریک با جریان های الکتریکی اعمال شده در حالت خنک کننده نشان داده شده است .



نمودار ۲-۲: COP ماژول ترموالکتریک در مقابل جریان الکتریکی اعمال شده در حالت خنک کننده

با توجه به نمودار فوق مشخص است که سیستم پیشنهادی در حالت خنک کننده در ضریب عملکرد COP دارای مقدار مناسبی می باشد . این ضریب کارایی سیستم تهویه پیشنهادی را نشان می دهد . با توجه به این خروجی ، چون ضریب عملکرد پایین نیست به طور کلی تأثیر منفی بر هزینه عملیاتی دستگاه ندارد .

در نمودار ۳-۲ COP ماژول ترموالکتریک در مقابل جریان الکتریکی اعمال شده در حالت گرمایش نشان داده شده است .



نمودار ۳-۲: COP ماژول های ترموالکتریک با جریان های الکتریکی اعمال شده در حالت گرمایش

در نمودار ۳-۲ COP های مستقیم ماژول های ترموالکتریک با جریان های الکتریکی اعمال شده در حالت گرمایش قابل مشاهده می باشد . شکل ورودی تفاوت دما در ماژول TE در حالت گرمایش قابل مشاهده است. با دقت در نمودار می توان دریافت که سیستم پیشنهادی در حالت گرمایش نیز با جریان های الکتریکی اعمال شده در نهایت به ضریب عملکرد (COP) قابل قبولی دست یافته است.

مراجع

- [1] Elsaid AM, Mohamed HA, Abdelaziz GB, Ahmed MS. A critical review of heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems within the context of a global SARS-CoV-2 epidemic. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021 Nov 1;155:230-61.
- [2] Torres YD, Herrera HH, Plasencia MA, Novo EP, Cabrera LP, Haeseldonckx D, Silva-Ortega JI. Heating ventilation and air-conditioned configurations for hotels: an approach review for the design and exploitation. *Energy Reports*. 2020 Nov 1;6:487-97.
- [3] Matsuda Y, Ooka R. Development of a prediction model tuning method with a dual-structured optimization framework for an entire heating, ventilation and air-conditioning system. *Sustainable Cities and Society*. 2022 Apr 1;79:103667.
- [4] Zhang C, Zhao Y, Zhao Y, Li T, Zhang X. Causal discovery and inference-based fault detection and diagnosis method for heating, ventilation and air conditioning systems. *Building and Environment*. 2022 Mar 15;212:108760.
- [5] Vogt M, Buchholz C, Thiede S, Herrmann C. Energy efficiency of Heating, Ventilation and Air Conditioning systems in production environments through model-predictive control schemes: The case of battery production. *Journal of cleaner production*. 2022
- [6] Mattsson SE, Elmqvist H. Modelica-An international effort to design the next generation modeling language. *IFAC Proc Vol* 1997;30(4):151-5.

- [7] Wetter M, Benne K, Gautier A, Nouidui TS, Ramle A, Roth A, Tummescheit H, Mentzer S, Winther C. Lifting the garage door on Spawn, an open-source BEMcontrols engine. In: Proceedings of the 2020 building performance modeling conference and simbuild co-organized by ASHRAE and IBPSA-USA. 2020.
- [8] Coninck RD, Magnusson F, Kesson J, Helsen L. Toolbox for development and validation of grey-box building models for forecasting and control. *J Build Perform Simul* 2016;9(3):288–303.
- [9] Jorissen F, Boydens W, Helsen L. TACO, an automated toolchain for model predictive control of building systems: implementation and verification. *J Build Perform Simul* 2019;12(2):180–92.
- [10] Henze GP. Model predictive control for buildings: a quantum leap? *J Build Perform Simul* 2013;6(3):157–8. <http://dx.doi.org/10.1080/19401493.2013.778519>.
- [11] Sturzenegger D, Gyalistras D, Morari M, Smith RS. Model predictive climate control of a Swiss office building: Implementation, results, and cost-benefit analysis. *IEEE Trans Control Syst Technol* 2015;24(1):1–12.
- [12] West SR, Ward JK, Wall J. Trial results from a model predictive control and optimisation system for commercial building HVAC. *Energy Build* 2014;72:271–9.
- [13] Kim D, Braun J, Cai J, Fugate D. Development and experimental demonstration of a plug-and-play multiple RTU coordination control algorithm for small/medium commercial buildings. *Energy Build* 2015;107:279–93.

- [14] Li P, Vrabie D, Li D, Bengea SC, Mijanovic S, O'Neill ZD. Simulation and experimental demonstration of model predictive control in a building HVAC system. *Sci Technol Built Environ* 2015;21(6):721–32.
- [15] De Coninck R, Helsen L. Practical implementation and evaluation of model predictive control for an office building in Brussels. *Energy Build* 2016;111:290–8.
- [16] Miezis M, Jaunzems D, Stancioff N. Predictive control of a building heating system. *Energy Procedia* 2017;113:501–8.
- [17] Hilliard T, Swan L, Qin Z. Experimental implementation of whole building MPC with zone based thermal comfort adjustments. *Build Environ* 2017;125:326–