

مجموعه مقالات ششمین کنفرانس انرژی و محیط زیست

دوم دی ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران

و هم اندیشان انرژی کیمیا

www.Energyconf.ir



مدل‌سازی ترمواکونومیک و بهینه‌سازی یک پمپ حرارتی زمین‌گرمایی در شرایط آب و هوایی تهران توسط الگوریتم ازدحام ذرات

صادق مجتهدی^۱، سیروس آقاجفی^۲

^۱دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، دانشکده فنی و مهندسی

^۲دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مکانیک

Sadegh.mojtahedi@gmail.com

چکیده

فرآیند طراحی بهینه یک پمپ حرارتی زمین‌گرمایی شامل مدل‌سازی ترمودینامیکی و انتخاب بهترین پارامترهای طراحی که بر عملکرد سیستم و هزینه اولیه آن تاثیرگذار است. در این مقاله، مدل‌سازی و بهینه‌سازی یک پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با مبدل حرارتی زمینی عمودی در شرایط آب و هوای تهران مورد مطالعه قرار گرفته است. برای مدل‌سازی ترمودینامیکی از نرم افزار حل معادلات دیفرانسیل (EES) و برای بهینه‌سازی ترمواکونومیک این سیستم از الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) استفاده کرده‌ایم. پارامترهای طراحی سیستم عبارت‌اند از دمای تبخیر و چگالش در اواپراتور و کندانسور، میزان مافوق گرم شدن و مادون سرد شدن مبرد در اواپراتور و کندانسور، دمای آب ورودی و خروجی از مبدل حرارتی زمین‌گرمایی می‌باشد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد با بهینه‌سازی انجام شده توسط الگوریتم PSO هزینه سرمایه گذاری ۴٫۲۶٪ نسبت به مطالعات پیشین کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با مبدل حرارتی زمینی عمودی، الگوریتم ازدحام ذرات، تحلیل

ترمواکونومیک.

۱- کارشناسی ارشد مکانیک

۲- استاد دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

مجموعه مقالات ششمین کنفرانس انرژی و محیط زیست

دوم دی ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران

و هم‌اندیشان انرژی کیمیا

www.Energyconf.ir



۱. مقدمه:

محیط اطراف ما یک منبع نامحدود انرژی با سطح اکسرژی پایین است که عمدتاً رایگان می‌باشد. یکی از راه‌های بهره‌برداری از این منابع انرژی استفاده از پمپ‌حرارتی زمین‌گرمایی است. این تجهیزات برای گرمایش و سرمایش ساختمان‌های مسکونی و تجاری از مبدل حرارتی زمینی به جای هوا استفاده می‌کند. در این سیستم خاک به عنوان چشمه و چاه حرارتی دمایش در طول سال ثابت و نزدیک دمای اتاق می‌باشد.

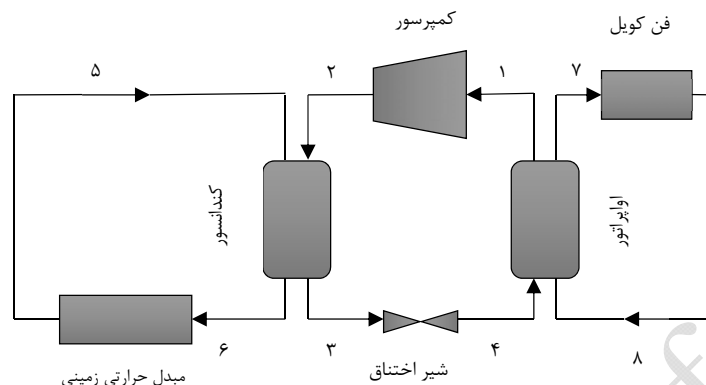
مهمترین مزایای این سیستم عبارتند از [۱]:

- مصرف انرژی بسیار کم.
- استفاده از یک منبع انرژی عظیم با دمای نسبتاً ثابت در طول سال.
- استفاده از مبرد کمتر نسبت به سیستم‌های مشابه.
- طراحی ساده و هزینه تعمیرات و نگهداری پایین.

کارهای نوینی در زمینه بهینه‌سازی ترموآکونومیک پمپ حرارتی زمین‌گرمایی توسط گوران وال انجام شده است. وی در مطالعه خود، از روش ضرایب لاگرانژ برای به حداقل رساندن هزینه چرخه عمر شامل هزینه برق و هزینه سرمایه‌گذاری سیستم استفاده کرد [۲]. هپاسلی با استفاده از روابط بقای جرم، انرژی، انترپی و اگزرژی، تحلیل ترمودینامیکی سیستم‌های GSHP با یک مبدل حرارتی U شکل را برای کاربرد گرمایش منطقه ای ارائه کرد [۳]. صیادی و همکارانش [۴]، در تحقیق خود بهینه‌سازی پمپ‌حرارتی با استفاده از الگوریتم فرگشتی پرداخته‌اند. تابع هدف آن‌ها بازگشت‌ناپذیری سیستم و هزینه کل تولید محصول بوده است.

۲. مشخصات سیستم مورد مطالعه

پمپ حرارتی این تحقیق، یک پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با مبدل حرارتی عمودی با سیال عامل R134a و ظرفیت سرمایشی ۵/۳ کیلووات است. در شکل ۱ نمای شماتیک از پمپ حرارتی و اجزای آن را مشاهده می‌کنید. کندانسور و اواپراتور از نوع مبدل حرارتی پوسته و لوله می‌باشد که مبرد در پوسته و آب در لوله جریان دارد. دمای آب ورودی و خروجی از اواپراتور به ترتیب 15°C و 10°C می‌باشد. دمای متوسط زمین 22°C فرض شده است. دمای حباب خشک و تر استان تهران 40°C و دمای طراحی 22°C در نظر گرفته شده است [۴]. بازدهی فن کویل ۰/۷۵ فرض شده است.



شکل ۱: سیکل پمپ حرارتی زمین گرمایی مورد مطالعه

۳. مدل‌سازی انرژی

۳-۱. فرضیات سیستم

فرضیات حاکم بر سیستم عبارتند از:

- تمامی فرآیندهای سیستم به صورت حالت پایدار و جریان پایدار در نظر گرفته می‌شود.
- از اثرات انرژی جنبشی و پتانسیل چشم‌پوشی می‌شود.
- جهت انتقال حرارت به سیستم و انتقال کار از سیستم مثبت در نظر گرفته شده است.
- از اثر افزایش دمای زمین به علت حرارت تجمعی ناشی از مبدل‌های حرارتی زمینی صرف نظر شده است.

۳-۲. معادله تعادل انرژی

در حالت کلی معادله تعادل انرژی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\dot{Q}_{net} + \sum \dot{m}_{in} h_{in} = \dot{W}_{net} + \sum \dot{m}_{out} h_{out} \quad (1)$$

نرخ جذب حرارت توسط زمین از اعمال رابطه تعادل انرژی در مبدل حرارتی زمین گرمایی محاسبه می‌شود.

$$\dot{Q}_{ghex} = \dot{m}_{br} c_{p_{br}} (T_6 - T_5) \quad (2)$$

در رابطه فوق \dot{m}_{br} ، T_6 و T_5 به ترتیب دبی جرمی آب و دمای آب ورودی و خروجی از مبدل حرارتی زمینی می‌باشد. دبی جرمی مبرد جاری در سیستم و هوای عبوری از فن کویل با استفاده از معادله انرژی به ترتیب از روابط (۳) و (۴) قابل محاسبه است:



$$\dot{m}_r = \frac{\dot{Q}_{evap}}{(h_4 - h_1)} \quad (۳)$$

$$\dot{m}_{air} = \frac{\dot{Q}_{fan}}{C_{p,air}(T_{o,air} - T_{i,air})} \quad (۴)$$

در روابط فوق \dot{Q}_{evap} ، h_1 و h_4 به ترتیب بار سرمایشی ساختمان و آنتالپی مبرد ورودی و خروجی از اواپراتور می باشد. $T_{o,air}$ و $T_{i,air}$ به ترتیب دمای هوای ورودی و خروجی از فن کویل می باشد.

حاصل اعمال معادله تعادل انرژی برای کندانسور به صورت زیر است:

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_r(h_2 - h_3) \quad (۵)$$

کمپرسور از نوع اسکروول بوده است و کار انجام شده آن طبق رابطه (۶) محاسبه می شود:

$$\dot{W}_{comp} = \dot{m}_r(h_2 - h_1) \quad (۶)$$

در رابطه فوق h_1 و h_2 به ترتیب آنتالپی ورودی و خروجی مبرد از کمپرسور می باشد.

طبق رابطه (۷) ضریب عملکرد پمپ حرارتی از تقسیم بار سرمایشی ساختمان به کار انجام شده در کمپرسور بدست می آید:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{W}_{comp}} \quad (۷)$$

۴. تحلیل ترموآکونومیک

در تحلیل ترموآکونومیک با در نظر گرفتن پارامترهای ترمودینامیکی و اقتصادی به طور همزمان شرایط بهینه برای عملکرد سیستم از نظر ترمودینامیکی و اقتصادی حاصل می‌گردد. در این تحلیل هدف به حداقل رساندن هزینه تک تک اجزا سیستم GSHP مورد مطالعه می‌باشد. معادلات برای محاسبه هزینه خرید تجهیزات برای پمپ حرارتی زمین گرمایی با مبدل حرارتی عمودی به شرح زیر است:

۴-۱. کمپرسور

برای تابع هزینه کمپرسور (Z_{comp}) در مراجع مختلف توابع گوناگونی ذکر گردیده‌است. یکی از معروف‌ترین توابع به صورت معادله (۸) می‌باشد [۵].

$$Z_{Comp} = \frac{39 \cdot 5 \dot{m}_r}{0 \cdot 9 - \eta_{is}} \left(\frac{P_{cond}}{P_{evap}} \right) \ln \left(\frac{P_{cond}}{P_{evap}} \right) \quad (۸)$$

برای محاسبه بازده آیزنتروپیک (η_{is}) از رابطه (۹) که برای کمپرسور اسکروول ارائه شده‌است استفاده می‌کنیم.

مجموعه مقالات ششمین کنفرانس انرژی و محیط زیست
 دوم دی ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما
 ۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶
 مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران
 و هم‌اندیشان انرژی کیمیا
 www.Energyconf.ir



$$\eta_{is} = 0.85 - 0.046667 \left(\frac{P_{cond}}{P_{evap}} \right) \quad (9)$$

۴-۲. کندانسور و اواپراتور

معادله (۱۰) و (۱۱) را به عنوان تابع هزینه برای مبدل حرارتی کندانسور و اواپراتور در نظر می‌گیریم [۶].

$$Z_{cond} = 516.621 A_{cond} + 268.45 \quad (10)$$

$$Z_{evap} = 309.143 A_{evap} + 231.915 \quad (11)$$

۴-۳. شیر فشارشکن

هزینه سرمایه‌گذاری اولیه شیر فشارشکن از رابطه (۱۲) حاصل می‌شود [۷].

$$Z_{expv} = 114.5 \dot{m}_r \quad (12)$$

۴-۴. مبدل حرارتی زمینی

تابع هزینه مبدل حرارتی زمینی (Z_{ghex}) از رابطه (۱۳) حاصل می‌شود [۸-۱۰].

$$Z_{ghex} = C_p L_p + C_b L_b \quad (13)$$

در رابطه فوق C_p و C_b هزینه سرمایه‌گذاری بر روی لوله‌های مبدل حرارتی و هزینه حفر گودال می‌باشد. در این مطالعه مقدار C_p و C_b به ترتیب $1/1$ US\$/m و $19/1$ US\$/m در نظر گرفته شده است.

۴-۵. فن کویل

هزینه فن کویل از رابطه (۱۴) می‌توان بدست‌آورد [۱۱].

$$Z_{fan} = \frac{39.5 V_{air}}{0.9 - \eta_{fan}} \left(\frac{P_8}{P_7} \right) \ln \left(\frac{P_8}{P_7} \right) \quad (14)$$

در رابطه فوق V_{air} دبی حجمی هوای عبوری از فن کویل می‌باشد.

۵. تابع هدف و متغیرهای تصمیم‌گیری

۵-۱. تابع هدف

هزینه‌های سرمایه‌گذاری بر روی پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمای بسیار بالا می‌باشد به همین دلیل در این مطالعه هزینه سرمایه‌گذاری بر روی این سیستم توسط کدهای نوشته‌شده در نرم‌افزار متلب با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) کمینه می‌کنیم.

$$Obj = CRF(Z_{comp} + Z_{cond} + Z_{evap} + Z_{expv} + Z_{ghex} + Z_{fan}) \quad (15)$$



برای بدست آوردن هزینه سرمایه‌گذاری نیاز به دانستن عمر تجهیزات و بهره سالیانه پول می‌باشد. برای بدست آوردن هزینه سرمایه‌گذاری در یک سال از تعریف ضریب بازیافت سرمایه‌گذاری به صورت زیر استفاده می‌شود.

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (16)$$

در این مطالعه طول عمر سیستم ۱۵ سال و نرخ بهره ۱۲٪ در نظر گرفته شده است [۴].

۵-۲. متغیرهای تصمیم

متغیرهای تصمیم‌گیری دارای یک محدوده تغییرات می‌باشد که با کمینه‌سازی همزمان آن‌ها رابطه (۱۵) نیز کمینه می‌شود. متغیرهای تصمیم‌گیری و محدوده تغییرات به قرار زیر است.

۱. دمای اشباع مبرد در اواپراتور (T_{evap}) ، °C

$$T_{evap} < T_{w,o_{evap}} \quad (17)$$

۲. دمای اشباع مبرد در کندانسور (T_{cond}) ، °C

$$T_{cond} > T_{w,o_{ghex}} \quad (18)$$

۳. میزان فافوق گرم شدن مبرد در اواپراتور (T_{sup}) ، °C

$$T_{sup} \geq 0 \quad (19)$$

۴. میزان مادون سرد شدن مبرد در کندانسور (T_{sub}) ، °C

$$T_{sub} \geq 0 \quad (20)$$

۵. دمای آب ورودی به مبدل حرارتی زمین گرمایی $(T_{w,i_{ghex}})$ ، °C

$$T_{w,i_{ghex}} > T_{soil} \quad (21)$$

۶. دمای آب خروجی از مبدل حرارتی زمین گرمایی $(T_{w,o_{ghex}})$ ، °C

$$T_{w,o_{ghex}} < T_{cond} \quad (22)$$

۶. الگوریتم‌های بهینه‌ساز

در دهه گذشته از الگوریتم‌های بهینه‌ساز به طور گسترده‌ای برای سیستم‌های انرژی استفاده شده است. در این مقاله ما از الگوریتم PSO که توسط جیمز کندی و راسل ابرهارت پیشنهاد شده است استفاده کرده‌ایم [۱۲]. این الگوریتم از حرکت دسته جمعی پرندگان که به دنبال غذا می‌باشند الهام گرفته شده است. گروهی از پرندگان در فضایی به صورت تصادفی به دنبال غذا می‌گردند تنها یک تکه غذا در فضای مورد بحث وجود دارد. هیچ یک از پرندگان محل غذا را نمی‌دانند. یکی از بهترین استراتژی‌ها می‌تواند دنبال کردن پرندگانی باشد که کمترین فاصله را تا غذا داشته باشند. این استراتژی در واقع جان مایه الگوریتم است.

مراحل اصلی الگوریتم PSO به شرح زیر است:

مجموعه مقالات ششمین کنفرانس انرژی و محیط زیست

دوم دی ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران

و هم‌اندیشان انرژی کیمیا

www.Energyconf.ir



- مرحله آماده‌سازی اولیه: در این مرحله جمعیتی از ذرات ایجاد می‌شوند و برای هر ذره یک بردار مکان و یک بردار جابه‌جایی در نظر گرفته می‌شود.
- مرحله تکرار:
 - تعیین بردار جابه‌جایی (سرعت) برای پرنده آم.
 - تعیین بردار مکان جدید پرنده آم براساس بردار جابه‌جایی.
 - در صورت خروج از فضای پاسخ پرنده آم به فضای پاسخ بازگشت داده شود.
 - ارزیابی موقعیت جدید پرنده آم.
 - مقایسه موقعیت جدید با بهترین تجربه شخصی پرنده آم و در صورت بهتر بودن جایگزین شود.
 - مقایسه بهترین تجربه شخصی پرنده آم با بهترین تجربه سراسری و در صورت بهتر بودن جایگزین شود.
 - ذخیره سازی و نمایش بهترین پاسخ در بین اعضای جمعیت.
 - تکرار تا برآورده شدن شرایط خاتمه الگوریتم.

پارامترهای الگوریتم PSO به قرار زیر است:

– پارامتر بردار سرعت

$$V_i(t+1) = \omega V_i(t) + C_1 \times \text{rand}_1(pbest_i(t) - X_i(t)) + C_2 \times \text{rand}_2(gbest_i(t) - X_i(t)) \quad (23)$$

– پارامتر بردار مکان

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (24)$$

– محاسبه ضرایب اینرسی (ω) ، یادگیری شخصی (C_1) و جمعی (C_2)

$$\begin{aligned} \omega &= \chi & C_1 &= \chi \phi_1 & C_2 &= \chi \phi_2 \\ \phi &= \phi_1 + \phi_2 \geq 4 \\ \chi &= \frac{2}{\phi - 2 + \sqrt{\phi^2 - 4\phi}} \end{aligned} \quad (25)$$

فلوجارت الگوریتم PSO در شکل (۲) به نمایش در آمده است.

جدول ۱: پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی PSO

مقادیر	پارامترهای الگوریتم
۱۰۰	اندازه جمعیت
۲۰۰	تعداد دفعات تکرار
۰٫۴	اینرسی
۰٫۷	ضریب C_1 و C_2
چرخ رولت	فرآیند انتخاب

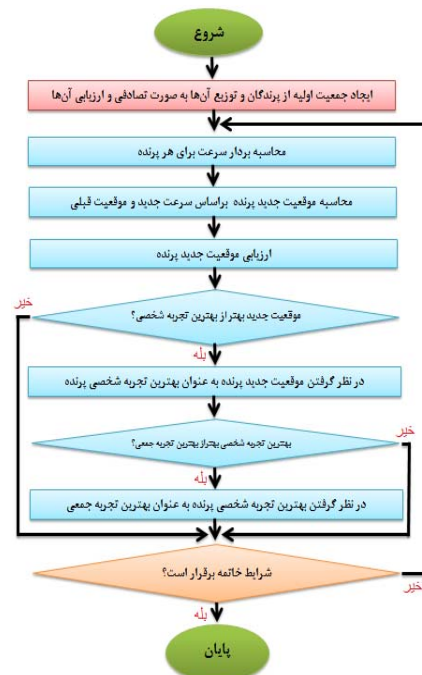
مجموعه مقالات ششمین کنفرانس انرژی و محیط زیست

دوم دی ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما
 ۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران

و هم اندیشان انرژی کیمیا

www.Energyconf.ir



شکل ۲: فلوچارت الگوریتم PSO

۷. نتایج

پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با مبدل حرارتی عمودی شکل (۱) با شش متغیر تصمیم‌گیری که محدوده تغییرات قابل قبول هر کدام در رابطه (۱۷) تا (۲۲) بیان شد و با پارامترهای تنظیم الگوریتم PSO در جدول (۱) نشان داده‌ایم بهینه‌سازی را انجام می‌دهیم. به منظور محاسبه خواص ترمودینامیکی سیکل پمپ حرارتی زمین‌گرمایی از نرم‌افزار EES استفاده شده‌است. با توجه به فرضیات مطرح شده برای سیکل خواص تک تک نقاط در جدول (۲) درج شده‌است.

جدول ۲: مشخصات ترمودینامیکی نقاط GSHP

نقاط سیکل	دما (° C)	انتالپی (kJ/kgK)	انترپی (kJ/kg)
۱	۹٫۹	۲۵۷	۰٫۹۴
۲	۵۱٫۹	۲۸۶	۰٫۹۲
۳	۲۷٫۲	۸۹٫۶	۰٫۳۳
۴	۶٫۲	۸۹٫۶	۰٫۳۴
۵	۲۵	۱۰۵	۰٫۳۷
۶	۳۵	۱۴۷	۰٫۵۱
۷	۱۱	۴۴٫۸	۰٫۱۶
۸	۱۵	۶۳٫۵	۰٫۲۲



با حل تابع هدف و همگرا شدن پاسخ، مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم نیز بدست می‌آید. جدول (۳) نشان دهنده این مقادیر می‌باشد.

جدول ۳: مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم در الگوریتم PSO

متغیر تصمیم	T_{evap} (°C)	T_{cond} (°C)	T_{sup} (°C)	T_{sub} (°C)	$T_{w,ighex}$ (°C)	$T_{w,oghex}$ (°C)
مقادیر بهینه	۱۱	۲۶	۳/۶	۹/۸	۲۴	۳۵

همانطور که در جدول (۴) مشاهده می‌کنید بیشترین هزینه سرمایه‌گذاری به برای مبدل حرارتی زمین‌گرمایی می‌باشد سپس بیشترین هزینه‌ها برای اواپراتور، کندانسور، کمپرسور، فن کوپل و کمترین آن برای شیرفشارشکن می‌باشد. میزان هزینه سرمایه‌گذاری با استفاده از الگوریتم PSO به میزان ۴/۷٪ نسبت به رفرنس [۴] کاهش یافته است.

جدول ۴: نتایج تحلیل ترمواکونومیک

نتایج رفرنس [۴]	نتایج GSHP مورد مطالعه	
۱/۳۳	۱/۸	مساحت اواپراتور (m ²)
۲/۱۳	۰/۸	مساحت کندانسور (m ²)
۱۶۲	۱۶۰	طول چاه مبدل حرارتی زمینی (m)
۵۱۲	۲۵۷	هزینه کمپرسور (\$)
۷۵۱	۷۰۸	هزینه کندانسور (\$)
۷۹۶	۸۰۳	هزینه اواپراتور (\$)
۳۳۹۵	۳۴۱۱	هزینه مبدل حرارتی زمین‌گرمایی (\$)
-	۳/۶	هزینه شیر اختناق (\$)
۱۵۶	۱۶۳	هزینه فن کوپل
۵۶۱۰	۵۳۴۵/۶	کل هزینه سرمایه‌گذاری (\$)

۸. نتیجه گیری

در این مقاله به تحلیل ترمواکونومیک یک پمپ حرارتی زمین‌گرمایی که در حالت سرمایه‌گذاری عمل می‌کند پرداختیم. برای اعتبارسنجی مطالعه خود نتایج حاصل شده را با نتایج مطالعه صیادی و همکاری‌اش [۴] مقایسه کردیم. به طور کلی می‌توان نتایج حاصل از این مقاله را به صورت زیر بیان کرد:

- ❖ بیشترین هزینه سرمایه‌گذاری بر روی سیستم به مبدل حرارتی زمینی ۳۴۱۱ دلار امریکا تعلق دارد.
- ❖ میزان هزینه سرمایه‌گذاری با استفاده از الگوریتم PSO نسبت به نتایج مطالعه صیادی و همکاری‌اش با الگوریتم EA ۴/۷٪ کاهش یافته است.
- ❖ بیشترین کاهش هزینه‌ها نسبت به مطالعه [۴] مربوط به کندانسور و کمپرسور با ۶۲/۴۴٪ و ۴۹/۸٪ می‌باشد.

علامت و حروف اختصاری	توان (kW)	ضریب عملکرد
\dot{W}	توان (kW)	COP
Z	هزینه سرمایه‌گذاری (\$)	CRF
	زیرنویس‌ها	فاکتور بازیابی سرمایه

مجموعه مقالات ششمین کنفرانس انرژی و محیط زیست

دوم دی ۱۳۹۵، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران

و هم‌اندیشان انرژی کیمیا

www.Energyconf.ir



air	هوا	C_1	ضریب یادگیری شخصی
br	آب مبدل حرارتی زمینی	C_2	ضریب یادگیری جمعی
comp	کمپرسور	gbest	بهترین مکان تجربه جمعی
cond	کندانسور	GSHP	پمپ حرارتی زمین گرمایی
evap	اواپراتور	h	آنتالپی ویژه (kJ/kg)
fan	فن کویل	i	نرخ بهره
ghex	مبدل حرارتی زمینی	\dot{m}	نرخ جریان جرمی (kg/s)
r	مبرد	n	سال‌های عملکرد سیستم
sub	مادون سرد	P	فشار (kPa)
sup	مافوق گرم	Pbest	بهترین مکان تجربه شده توسط ذره
soil	خاک	PSO	الگوریتم ازدحام ذرات
w	آب	\dot{Q}	نرخ انتقال حرارت (kW)
		T	دما ($^{\circ}C$ K)

منابع

- [1]. Heating and cooling with a heat pump. The Office of Energy Efficiency (OEE), Canada; 1995.
- [2]. Wall, Göran. "Optimization of refrigeration machinery." International Journal of Refrigeration 14.6 (1991): 336-340.
- [3]. Hepbasli, A., and O. Akdemir. "Energy and exergy analysis of a ground source (geothermal) heat pump system." Energy conversion and management 45.5 (2004): 737-753.
- [4]. Sayyaadi, Hoseyn, Emad Hadaddi Amlashi, and Majid Amidpour. "Multi-objective optimization of a vertical ground source heat pump using evolutionary algorithm." Energy Conversion and Management 50.8 (2009): 2035-2046.
- [5]. Valero, Antonio, et al. "CGAM problem: definition and conventional solution." Energy 19.3 (1994): 279-286.
- [6]. Selbaş, Reşat, Önder Kızıllkan, and Arzu Şencan. "Thermoeconomic optimization of subcooled and superheated vapor compression refrigeration cycle." Energy 31.12 (2006): 2108-2128.
- [7]. Sanaye, Sepehr, and Ali Shirazi. "Thermo-economic optimization of an ice thermal energy storage system for air-conditioning applications." Energy and Buildings 60 (2013): 100-109.
- [8]. Bose, James Edwin. Closed-loop ground-coupled heat pump design manual. The University, 1984.
- [9]. Kavanaugh, Stephen Paul. Simulation and experimental verification of vertical ground-coupled heat pump systems. Oklahoma State Univ., Stillwater (USA), 1985.
- [10]. Philippacopoulos, Aristodimos J., and Marita L. Berndt. "Influence of debonding in ground heat exchangers used with geothermal heat pumps." Geothermics 30.5 (2001): 527-545.
- [11]. Bi, Yuehong, et al. "Comprehensive exergy analysis of a ground-source heat pump system for both building heating and cooling modes." Applied Energy 86.12 (2009): 2560-2565.
- [12]. James, Kennedy, and Eberhart Russell. "Particle swarm optimization." Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Neural Networks. 1995.