

مجموعه مقالات هشتمین همایش ملی مبدل گرمایی

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

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجربان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم‌اندیشان انرژی کیمیا

ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام ISC

www.Mobadel.ir



چگونگی استفاده از قانون دوم ترمودینامیک در بهینه‌سازی پمپ‌حرارتی زمین‌گرمایی توسط الگوریتم تکامل تفاضلی

صادق مجتهدی: . کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، دانشکده فنی و مهندسی

سیروس آفانجفی: استاد دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مکانیک

Sadegh.mojtahedi@gmail.com

چکیده

در این مقاله به چگونگی استفاده از قانون دوم ترمودینامیک برای یک سیکل پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با مبدل حرارتی عمودی می‌پردازیم. سیال عامل این سیستم مبرد R134a می‌باشد. برای بهینه‌سازی این سیستم از الگوریتم تکاملی ذرات (DE) استفاده کرده‌ایم. توابع هدف این مطالعه بهینه‌سازی بازگشت‌ناپذیری و هزینه‌های سرمایه‌گذاری بر روی سیستم می‌باشد. پارامترهای طراحی سیستم عبارت‌انداز فشار اواپراتور و کندانسور، دمای آب ورودی و خروجی از مبدل حرارتی زمین‌گرمایی می‌باشد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد با بهینه‌سازی انجام شده توسط الگوریتم DE میزان بازگشت‌ناپذیری و هزینه سرمایه‌گذاری به ترتیب ۲۱.۹ درصد و ۴.۵ درصد کاهش یافته است.

واژگان کلیدی: پمپ حرارتی زمین‌گرمایی، الگوریتم تکامل تفاضلی، قانون دوم ترمودینامیک.

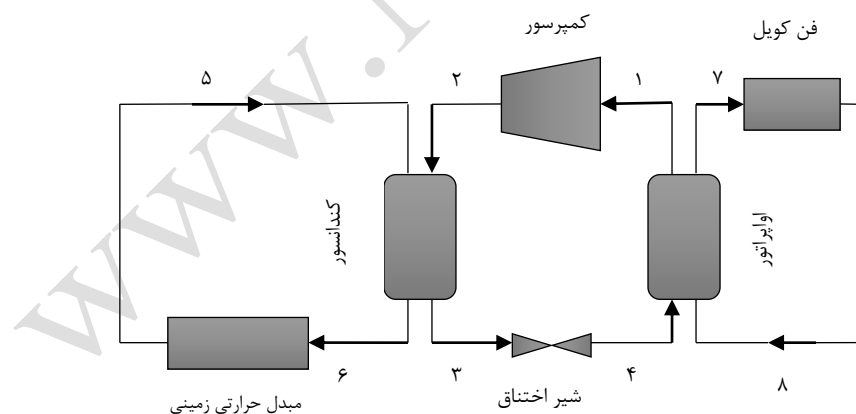
۱. مقدمه

پمپ‌های حرارتی زمین گرمایی به عنوان یکی از انواع روشهای استفاده از انرژی زمین گرمایی جهت سرمایه‌گذاری و گرمایش ساختمان‌های مسکونی، تجاری و اداری می‌شود. میزان سرمایه‌گذاری کشورها بر روی انرژی زمین گرمایی در سال ۲۰۱۵ نسبت به ۲۰۱۰ حدود ۲ برابر و میزان مصرف این انرژی تجدیدپذیر ۴۵٪ افزایش داشته است [۱].

کارهای نوینی در زمینه بهینه‌سازی ترموآکونومیک پمپ حرارتی زمین گرمایی 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، انتروپی و اگرژی، تحلیل ترمودینامیکی سیستم‌های GSHP با یک مبدل حرارتی U شکل را برای کاربرد گرمایش منطقه ای ارائه کرد [۳]. صیادی و همکارانش [۴-۵]، در دو تحقیق به بهینه‌سازی پمپ‌حرارتی با استفاده از الگوریتم فرگشتی پرداخته‌اند. وی در تحقیق اول ۸ و در تحقیق دوم ۱۲ متغیر تصمیم برای تابع هدف بازگشت‌ناپذیری سیستم و هزینه کل تولید محصول در نظر گرفته‌اند.

۲. مشخصات سیستم مورد مطالعه

پمپ حرارتی این تحقیق، یک پمپ حرارتی زمین گرمایی با مبدل حرارتی عمودی با سیال عامل R134a و ظرفیت سرمایه‌گذاری 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 [۵]. بازدهی فن کویل ۰/۷۵ فرض شده است.



شکل ۱: سیکل پمپ حرارتی زمین گرمایی مورد مطالعه

فرضیات حاکم بر سیستم عبارتند از:

- تمای فرآیندهای سیستم به صورت حالت پایدار و جریان پایدار در نظر گرفته می‌شود.
- از اثرات انرژی جنبشی و پتانسیل چشم پوشی می‌شود.
- در این سیستم فرض شده‌است هیچ‌گونه واکنش شیمیایی و هسته ای وجود ندارد.



- جهت انتقال حرارت به سیستم و انتقال کار از سیستم مثبت در نظر گرفته شده است.

۳. تحلیل قانون اول و دوم ترمودینامیک

۳-۱. معادله تعادل انرژی

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

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

طبق رابطه (۲) ضریب عملکرد پمپ حرارتی از تقسیم بار سرمایشی ساختمان به کار انجام شده در کمپرسور برست می‌آید:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{W}_{comp}} \quad (2)$$

۳-۲. معادله تعادل انرژی

انرژی کل \dot{E}_x را می‌توان به چهار مولفه تقسیم کرد؛ انرژی فیزیکی \dot{E}_x^{PH} ، جنبشی \dot{E}_x^{KN} ، پتانسیل \dot{E}_x^{PT} و انرژی شیمیایی \dot{E}_x^{CH} تقسیم کرد.

$$\dot{E}_x = \dot{E}_x^{PH} + \dot{E}_x^{CH} + \dot{E}_x^{KN} + \dot{E}_x^{PT} \quad (3)$$

در این تحقیق از انرژی شیمیایی، هسته‌ای، مغناطیسی، پتانسیل و جنبشی صرف نظر می‌کنیم. در نتیجه معادله بالانس انرژی در حالت کلی به صورت نشان داده می‌شود:

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum \dot{m} e_{x,in} - \sum \dot{m} e_{x,out} = \dot{E}_x d_{cv} \quad (4)$$

$$e_x = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (5)$$

در رابطه فوق \dot{Q}_k نرخ انتقال حرارت از لایه مرزی T_k در موقعیت k ، e_x انرژی فیزیکی ویژه و زیر نویس 0 بیانگر خواص مواد در حالت مرده یا تعادل با محیط می‌باشد.

معادلات تعادل انرژی و بازگشت‌ناپذیری تک تک مولفه‌های سیستم GSHP در جدول (۱) نشان داده شده است.

۴. تحلیل ترمواکونومیک

در تحلیل ترمواکونومیک با در نظر گرفتن پارامترهای ترمودینامیکی و اقتصادی به طور همزمان شرایط بهینه‌ای 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.

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

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (6)$$

در این مطالعه طول عمر سیستم ۱۵ سال و نرخ بهره ۰.۱۲ در نظر گرفته شده است.

معادلات برای محاسبه هزینه خرید تجهیزات برای پمپ حرارتی مبدل حرارتی عمودی در جدول (۲) شرح داده شده است.

جدول ۱: معادلات تعادل انرژی و بازگشت ناپذیری انرژی مولفه‌های GSHP [۳]

مولفه‌های سیستم	تعادل انرژی	بازگشت ناپذیری انرژی
کمپرسور	$\dot{W}_{comp} = \dot{m}_r (h_2 - h_1)$	$\dot{I}_{comp} = T_0 \dot{m}_r (s_1 - s_2)$
کندانسور	$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_r (h_2 - h_3)$	$\dot{I}_{cond} = T_0 [\dot{m}_r (s_3 - s_2) + \dot{m}_{br} (s_6 - s_5)]$
اواپراتور	$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_r (h_4 - h_1)$	$\dot{I}_{evap} = T_0 [\dot{m}_r (s_1 - s_4) + \dot{m}_{br} (s_7 - s_8)]$
شیرفشارشکن	$h_3 = h_4$	$\dot{I}_{expv} = T_0 \dot{m}_r (s_4 - s_3)$
مبدل حرارتی زمینی	$\dot{Q}_{ghex} = \dot{m}_{br} c_{p_{br}} (T_6 - T_5)$	$\dot{I}_{ghex} = T_0 \left[\dot{m}_{br} (s_5 - s_6) + \frac{\dot{Q}_{ghex}}{T_{soil}} \right]$
فن کویل	$\dot{Q}_{fan} = \dot{m}_{air} c_{p_{air}} (T_{o,air} - T_{i,air})$	$\dot{I}_{fan} = T_0 \left[\dot{m}_w (s_8 - s_7) + \frac{\dot{Q}_{fan}}{T_{i,air}} \right]$

جدول ۲: معادلات هزینه سرمایه‌گذاری مولفه‌های GSHP [۱۲-۶]

مولفه‌های سیستم	معادلات هزینه سرمایه‌گذاری
کمپرسور	$Z_{comp} = \frac{39 \cdot 5 \dot{m}_r}{0 \cdot 9 - \eta_{is}} \left(\frac{P_{cond}}{P_{evap}} \right) \ln \left(\frac{P_{cond}}{P_{evap}} \right)$ $\eta_{is} = 0 \cdot 85 - 0 \cdot 046667 \left(\frac{P_{cond}}{P_{evap}} \right)$
کندانسور	$Z_{cond} = 516 \cdot 621 A_{cond} + 268 \cdot 45$
اواپراتور	$Z_{evap} = 309 \cdot 143 A_{evap} + 231 \cdot 915$
شیرفشارشکن	$Z_{expv} = 114 \cdot 5 \dot{m}_r$
مبدل حرارتی زمینی	$Z_{ghex} = 1 \cdot 1 L_p + 19 \cdot 1 L_b$ $L_p = 2 L_b$
فن کویل	$Z_{fan} = \frac{39 \cdot 5 V_{air}}{0 \cdot 9 - \eta_{fan}} \left(\frac{P_8}{p_7} \right) \ln \left(\frac{P_8}{p_7} \right)$



۵. تابع هدف و متغیرهای تصمیم‌گیری

۵-۱. تابع هدف

در این مطالعه دو تابع هدف با عنوان بازگشت ناپذیری و هزینه سرمایه‌گذاری سیستم را توسط کدهای نوشته‌شده در نرم‌افزار متلب با الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی کمینه می‌کنیم.

$$Obj1 = \dot{I}_{tot} = \dot{I}_{comp} + \dot{I}_{cond} + \dot{I}_{evap} + \dot{I}_{expv} + \dot{I}_{ghex} + \dot{I}_{fan} \quad (7)$$

$$Obj2 = CRF(Z_{comp} + Z_{cond} + Z_{evap} + Z_{expv} + Z_{ghex} + Z_{fan}) \quad (8)$$

۵-۲. متغیرهای تصمیم

متغیرهای تصمیم‌گیری و محدوده تغییرات به قرار زیر است:

$$1. \text{ فشار اواپراتور } (P_{evap}), kPa$$

$$(9)$$

$$360 < P_{evap} < 400$$

$$2. \text{ فشار کندانسور } (P_{cond}), kPa$$

$$(10)$$

$$940 < P_{cond} < 1000$$

$$3. \text{ دمای آب ورودی به مبدل حرارتی زمین گرمایی } (T_{w,i,ghex}), ^\circ C$$

$$(11)$$

$$T_{w,i,ghex} > T_{soil}$$

$$4. \text{ دمای آب خروجی از مبدل حرارتی زمین گرمایی } (T_{w,o,GHE}), ^\circ C$$

$$(12)$$

$$T_{w,o,ghex} < T_{cond}$$

۶. الگوریتم‌های بهینه‌ساز

در دهه گذشته از الگوریتم‌های بهینه‌ساز به طور گسترده‌ای برای سیستم‌های انرژی استفاده شده است. در این مقاله ما از الگوریتم DE که توسط استورن و پرایس در سال ۱۹۹۵ پیشنهاد شده است استفاده کرده ایم [۱۳].

مراحل الگوریتم تکامل تفاضلی به قرار زیر است:

- مرحله آماده‌سازی اولیه

ایجاد جمعیت اولیه از افرادو توزیع آن‌ها به صورت تصادفی در فضای پاسخ و ارزیابی آن‌ها.

- مرحله تکرار

○ عملیات جهش:

سه عضو x_{i_1} ، x_{i_2} و x_{i_3} به صورت تصادفی انتخاب می‌شود ($x_{i_1} \neq x_{i_2} \neq x_{i_3} \neq i$) و انجام

عمل جهش به کمک سه عضو و تولید فرزند جهش یافته u_i .

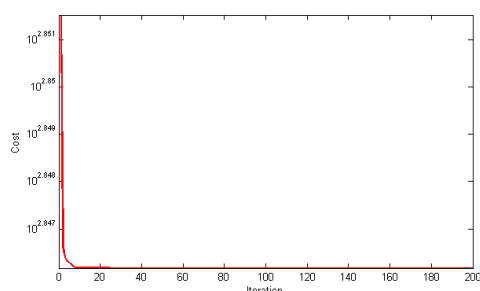
$$u_i = x_{i_1} + \beta(x_{i_3} - x_{i_2}) \quad (13)$$

$$0 < \beta < 1$$

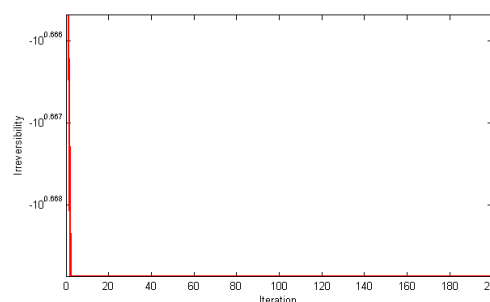
○ عملیات تولید مثل:

با توجه به والد x_{ij} (عضو نام جمعیت) و والد u_{ij} (عضو جهش یافته)، فرزند x'_{ij} تولید می‌شود. فرزند x'_{ij} حاصل شده در صورت خروج از فضای جستجو به فضای جستجو بازمی‌گردانیم. فرزند x'_{ij} ارزیابی می‌شود در صورت بهتر بودن x'_{ij} از x_{ij} جایگزینی انجام می‌شود.

○ یافتن و ذخیره و نمایش بهترین پاسخ یافته شده توسط الگوریتم



(ب)



(الف)

شکل ۲: نحوه همگرایی تابع هدف (الف) بازگشت‌ناپذیری و (ب) هزینه‌های سرمایه‌گذاری در الگوریتم DE

جدول ۳: پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی DE

مقادیر	پارامترهای الگوریتم
۵۰	اندازه جمعیت
۲۰۰	تعداد دفعات تکرار
[۰/۱ - ۰/۸]	ضریب مقیاس
۰.۲	احتمال تقاطع

۷. نتایج

پمپ حرارتی زمین گرمایی با مبدل حرارتی عمودی شکل (۱) با چهار متغیر تصمیم‌گیری که محدوده تغییرات قابل قبول هرکدام در روابط (۹) تا (۱۲) شد و با پارامترهای تنظیم الگوریتم DE در جدول (۳) نشان داده‌ایم بهینه‌سازی را انجام می‌دهیم. به منظور محاسبه خواص ترمودینامیکی سیکل پمپ حرارتی زمین گرمایی از نرم‌افزار EES استفاده شده است.

نحوه همگرایی الگوریتم DE برای بهینه‌سازی بازگشت‌ناپذیری و هزینه سرمایه‌گذاری بر روی سیستم پمپ حرارتی در شکل (۲) به نمایش در آمده است.

با همگرا شدن توابع هدف مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم بدست می‌آید. جدول (۴) نشان‌دهنده مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم جهت طراحی و بهینه‌سازی سیستم مورد مطالعه ما می‌باشد.



جدول ۴: مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم

$T_{w,o\ ghex} (^{\circ}C)$	$T_{w,i\ ghex} (^{\circ}C)$	$P_{cond} (kPa)$	$P_{evap} (kPa)$	متغیر تصمیم
۲۴	۳۵	۹۸۳	۴۰۰	مقادیر بهینه

جدول (۵) و (۶) بیانگر نتایج حاصل از تحلیل انرژی و مقادیر بهینه مبدل‌های حرارتی GSHP مورد مطالعه می‌باشد.

جدول ۵: نتایج تحلیل انرژی

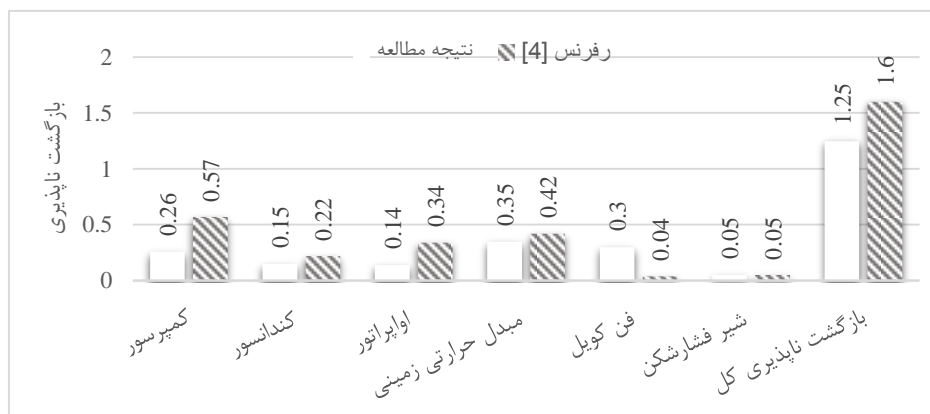
نتایج بهینه‌سازی با الگوریتم DE	
۰.۰۳۱۴	دبی جرمی مبرد R134a (kg/s)
۰.۱۵۰	دبی جرمی آب در مبدل حرارتی زمینی (kg/s)
۰.۳	دبی آب در فن کویل (kg/s)
۰.۹۱	کار کمپرسور (kW)
۶.۱۶	بار حرارتی در کندانسور (kW)
۵.۲۵	بار حرارتی در اواپراتور (kW)
۵.۸	ضریب عملکرد سیستم

جدول ۶: مقادیر بهینه مبدل‌های حرارتی

نتایج بهینه‌سازی مبدل‌های حرارتی	مبدل‌های حرارتی
۲.۰۴	مساحت اواپراتور (m^2)
۰.۸۵	مساحت کندانسور (m^2)
۱۶۰	طول چاه مبدل حرارتی زمین گرمایی (m)
۳۲۰	طول لوله مبدل حرارتی (m)

مطابق شکل (۳) بیشترین بازگشت‌ناپذیری (تخریب انرژی) به ترتیب در مبدل حرارتی زمینی، فن کویل، کمپرسور، کندانسور و اواپراتور رخ می‌دهد و کمترین میزان بازگشت‌ناپذیری در شیر اختناق صورت می‌پذیرد. میزان بازگشت‌ناپذیری با استفاده از الگوریتم DE به میزان ۲۱/۹٪ نسبت به رفرنس [۴] کاهش یافته است.

همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌کنید بیشترین هزینه سرمایه‌گذاری به برای مبدل حرارتی زمین گرمایی می‌باشد سپس بیشترین هزینه‌ها برای اواپراتور، کندانسور، کمپرسور، فن کویل و کمترین آن برای شیرفشارشکن می‌باشد. میزان هزینه سرمایه‌گذاری با استفاده از الگوریتم DE به میزان ۴/۵٪ نسبت به رفرنس [۴] کاهش یافته است.



شکل ۳: مقایسه بازگشت ناپذیری GSHP مورد مطالعه با [۴]



شکل ۴: مقایسه هزینه سرمایه‌گذاری GSHP مورد مطالعه با [۴]

۸. نتیجه‌گیری

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

- ❖ بیشترین میزان تخریب انرژی و بیشترین هزینه سرمایه‌گذاری بر روی سیستم به مبدل حرارتی زمینی با مقادیر ۰/۳۵ کیلووات ۳۴۱۱ دلار آمریکا تعلق دارد.
- ❖ کمترین میزان تخریب انرژی و بیشترین هزینه سرمایه‌گذاری بر روی سیستم به شیر فشارشکن با مقادیر ۰/۰۵ کیلووات و ۴ دلار آمریکا تعلق دارد.
- ❖ میزان بازگشت ناپذیری کل و هزینه سرمایه‌گذاری با استفاده از الگوریتم DE نسبت به نتایج مطالعه صیادی و همکارانش با الگوریتم EA به ترتیب ۲۱/۹٪ و ۴/۵٪ کاهش یافته است.

Z	هزینه سرمایه‌گذاری (\$) Z	علائم
---	---------------------------	-------



مبدل	زیرنویس ها	A	مساحت (m ²)
air	هوا	COP	ضریب عملکرد
br	آب مبدل حرارتی زمینی	CRF	فاکتور بازبایی سرمایه
comp	کمپرسور	\dot{E}_x	نرخ انرژی (kW/h)
cond	کندانسور	GSHP	پمپ حرارتی زمین گرمایی
dest	تخریب	h	آنتالپی ویژه (kJ/kg)
evap	اواپراتور	\dot{I}	نرخ بازگشت ناپذیری (kW/h)
fan	فن کویل	i	نرخ بهره
ghex	مبدل حرارتی زمینی	\dot{m}	نرخ جریان جرمی (kg/s)
r	مبرد	n	سال‌های عملکرد سیستم
soil	خاک	P	فشار (kPa)
w	آب	\dot{Q}	نرخ انتقال حرارت (kW)
0	حالت مرده (حالت اولیه)	T	دما (K و °C)
		W	توان (kW)

منابع

- [1]. Lund, John W., and Tonya L. Boyd. "Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review." *Geothermics* 60 (2016): 66-93.
- [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]. Sayyadi, Hoseyn, and Mostafa Nejatolah. "Thermodynamic and thermo-economic optimization of a cooling tower-assisted ground source heat pump." *Geothermics* 40.3 (2011): 221-232.
- [6]. Valero, Antonio, et al. "CGAM problem: definition and conventional solution." *Energy* 19.3 (1994): 279-286.
- [7]. Selbaş, Reşat, Önder Kızıllıkan, and Arzu Şencan. "Thermo-economic optimization of subcooled and superheated vapor compression refrigeration cycle." *Energy* 31.12 (2006): 2108-2128.
- [8]. 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.
- [9]. Bose, James Edwin. *Closed-loop ground-coupled heat pump design manual*. The University, 1984.
- [10]. Kavanaugh, Stephen Paul. *Simulation and experimental verification of vertical ground-coupled heat pump systems*. Oklahoma State Univ., Stillwater (USA), 1985.
- [11]. 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.
- [12]. 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.
- [13]. Storn, Rainer, and Kenneth Price. "Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces." *Journal of global optimization* 11.4 (1997): 341-359.