

تحلیل انرژی و انرژی عملکرد یک سیستم ترموالکتریک دومرحله‌ای با اهداف گرمایش و سرمایش

آرش نعمتی، حسین نامی، مرتضی یاری، فرامرز رنجبر*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲ آبان ۱۳۹۵

بازنگری: ۵ بهمن ۱۳۹۵

پذیرش: ۱۵ اسفند ۱۳۹۵

ارائه آنلاین: ۲۳ اسفند ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

ترموالکتریک دو مرحله‌ای

گرمایش

سرمایش

انرژی

انرژی

چکیده: در مقاله حاضر یک سیستم ترموالکتریک دومرحله‌ای که برای اهداف گرمایش و سرمایش مورد استفاده قرار می‌گیرد از دیدگاه قوانین اول و دوم ترمودینامیک مورد بررسی قرار گرفته است. طبق نتایج بدست آمده از تحلیل قانون اول ترمودینامیک در هر دو حالت گرمایش و سرمایش مقدار ضریب عملکرد سیستم با تغییرات جریان الکتریسیته بهینه می‌گردد که با افزایش اختلاف دمای بین سطوح سرد و گرم مقدار بیشینه ضریب عملکرد کاهش یافته و در مقادیر بالاتری از جریان الکتریسیته رخ می‌دهد. بعلاوه، طبق نتایج قانون دوم ترمودینامیک، در حالت گرمایش، با افزایش اختلاف دمای بین سطح سرد و گرم دما بازده انرژی افزایش می‌یابد درحالی‌که در حالت سرمایش، افزایش اختلاف دمای بین سطح سرد و گرم مقدار بازده انرژی را کاهش می‌دهد. محدوده مقادیر بدست آمده برای بازده انرژی ترموالکتریک دومرحله‌ای کولر بسیار پایین‌تر از ترموالکتریک دومرحله‌ای هیتر می‌باشد. مطابق نتایج، مقدار راندمان انرژی بهینه با تغییر جریان الکتریسیته برای حالت گرمایش به ترتیب برابر ۰/۱۸۱، ۰/۱۹۳ و ۰/۲۰۸ به‌زای اختلاف دماهای سطح سرد و گرم ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه می‌باشد. همچنین مقدار بهینه راندمان انرژی برای حالت سرمایش به ترتیب برابر ۰/۰۹۶، ۰/۰۷۳ و ۰/۰۴ به‌زای اختلاف دماهای سطح سرد و گرم ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه می‌باشد.

۱- مقدمه

مقدار معیار شایستگی^۱ آن دارد. در کنار تلاش برای یافتن ماده مناسب برای استفاده در ترموالکتریک با مقدار معیار شایستگی بالا، تلاش‌های فراوانی هم در زمینه بهبود عملکرد خود سیستم ترموالکتریک با دست‌یابی به بهترین شرایط کاری مانند هندسه، جریان الکتریسیته و... انجام شده است. سیستم ترموالکتریک دومرحله‌ای که از دو لایه ترموکوپل از لحاظ انتقال حرارت به‌صورت سری پشت سر هم قرار گرفته‌اند تشکیل شده است. از مزیت‌های مهم سیستم ترموالکتریک دومرحله‌ای گرمایشی/سرمایشی نسبت به سیستم تک مرحله‌ای، ایجاد اختلاف دمای بالاتر بین دو سطح سرد و گرم می‌باشد. به طوری که یک ترموالکتریک سرمایشی تک مرحله‌ای زمانی که سطح گرم آن در دمای محیط قرار دارد حداکثر می‌تواند کاهش دمای ۷۰ درجه‌ای ایجاد کند [۵]، در حالی که این مقدار کاهش دما برای یک ترموالکتریک دومرحله‌ای می‌تواند تا ۱۰۰ درجه نیز برسد [۶].

ترموالکتریک‌های دومرحله‌ای را می‌توان با توجه به نحوه اتصال الکتریکی آن‌ها به دو دسته سری و موازی تقسیم‌بندی کرد که در نوع سری هر دو لایه دارای جریان الکتریسیته یکسان بوده ولی در حالت موازی می‌توان با دو منبع الکتریکی مختلف جریان‌های الکتریکی متفاوتی را به هر یک از لایه‌ها اعمال کرد [۷]. در سالهای اخیر تحقیقات فراوانی در راستای بهبود عملکرد سیستم‌های ترموالکتریک دومرحله‌ای انجام گرفته

در سال‌های اخیر استفاده از ترموالکتریک‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است که کاربرد فزاینده آن‌ها در صنایع الکتریک، نظامی و فضایی گواه این ماجراست [۱]. ترموالکتریک‌ها را می‌توان به دو دسته کلی ترموالکتریک‌های گرمایشی/سرمایشی و ترموالکتریک‌های ژنراتور تقسیم‌بندی کرد. در ترموالکتریک‌های گرمایشی/سرمایشی بنا به اثر پلتیر^۱ ایجاد اختلاف پتانسیل الکتریکی در دو سر یک سیم نیمه‌هادی باعث ایجاد اختلاف دما در دو سر آن خواهد شد [۲] که این اختلاف دما ممکن است برای هدف گرمایش (گرمایشی) یا سرمایش (سرمایشی) مورد استفاده قرار گیرد. از طرف دیگر در ترموالکتریک‌های ژنراتور بر اساس اثر سبک^۲، وجود اختلاف دما در دو سر نیمه‌هادی باعث ایجاد اختلاف پتانسیل در آن می‌شود [۳]. از مزایای مهم دیگر ترموالکتریک‌ها که موجب توجه محققین به این سیستم‌ها شده است می‌توان به عدم وجود قطعه متحرک، عملکرد بدون صدا، سایز کوچک، وزن پایین و عدم نیاز به هزینه نگهداری اشاره کرد [۴]. مشکل اصلی و اساسی ترموالکتریک‌های گرمایشی/سرمایشی، مقدار پایین ضریب عملکرد (COP) این سیستم‌ها نسبت به سیستم‌های متداول سرمایش و گرمایش است که مقدار ضریب عملکرد ترموالکتریک رابطه مستقیم با جنس ترموالکتریک و

1 Peltier

2 Seebeck

دومرحله‌ای کردن سیستم ترموالکتریک سعی کردند مقدار اختلاف دمای بین سطوح سرد و گرم را در یک سیستم ترموالکتریک افزایش دهند. با این روش آن‌ها توانستند به محدوده دماهای پایین‌تری برای سرمایه‌گذاری دست یابند. مطابق پیشینه پژوهش آورده شده در مورد تحلیل ترموالکتریک‌های دومرحله‌ای، تحلیل مقایسه‌ای از دیدگاه انرژی و انرژی برای حالت گرمایش و سرمایه‌گذاری ارائه نشده است. در این مطالعه عملکرد ترموالکتریک‌های دومرحله‌ای برای حالت گرمایش و سرمایه‌گذاری از دیدگاه انرژی و انرژی مورد مطالعه قرار گرفته و اثر تغییر جریان الکتریسیته اعمالی به ترموالکتریک‌ها در عملکرد انرژی و انرژی برای حالت گرمایش و سرمایه‌گذاری مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اثر تغییر اختلاف دمای سطح سرد و گرم ترموالکتریک‌ها در عملکرد انرژی و انرژی برای حالت گرمایش و سرمایه‌گذاری مورد بررسی شده است.

۲- مدل‌سازی ترمودینامیکی

شکل ۱ (الف) نشان دهنده طرح‌واره یک ترموالکتریک دومرحله‌ای است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود این سیستم ترموالکتریک از دو لایه ترموکوپل تشکیل شده است. همچنین شکل ۱ (ب) یک ترموالکتریک دومرحله‌ای واقعی را نشان می‌دهد. این سیستم ترموالکتریک می‌تواند با هدف گرمایش و سرمایه‌گذاری مورد استفاده قرار گیرد.

در تحقیق حاضر از ماده بیتموس تلوراید^۱ با خواص وابسته به دما به عنوان نیمه‌هادی استفاده شده است که می‌توان خواص مختلف این ماده را که وابسته به دما هستند با روابط زیر محاسبه کرد [۶]:

$$\alpha = [\alpha_p - (-\alpha_n)] = 2(22224.0T_m + 930.6T_m - 0.9905T_m^2)10^{-9} \quad (1)$$

$$\rho_n = \rho_p = (5112.0 + 163.4T_m + 0.6279T_m^2)10^{-10} \quad (2)$$

$$k_n = k_p = (62605.0 - 277.7T_m + 0.413T_m^2)10^{-4} \quad (3)$$

در روابط بالا، زیرنویس‌های p و n به ترتیب نشانگر الکترودهای مثبت و منفی می‌باشند. همچنین، α ، ρ و k به ترتیب ضریب سیبک، مقاومت الکتریکی و رسانش گرمایی بوده و T_m دمای میانگین قسمت‌های سرد و گرم ترموالکتریک است.

مقادیر انتقال حرارت در بخش‌های مختلف یک ترموالکتریک دومرحله‌ای می‌تواند به کمک قانون پایستگی انرژی به صورت زیر محاسبه شوند [۱۶]:

$$Q_{C1} = n(\alpha IT_2 - 0.5RI^2 - K(T_m - T_2)) \quad (4)$$

$$Q_{H1} = n(\alpha IT_m + 0.5RI^2 - K(T_m - T_2)) \quad (5)$$

$$Q_{C2} = m(\alpha IT_m - 0.5RI^2 - K(T_1 - T_m)) \quad (6)$$

است. خوان^۱ و همکاران [۸] به بررسی و مقایسه دو پیکربندی مختلف برای ترموالکتریک‌های دومرحله‌ای پرداختند. با مقایسه پیکربندی‌های هرمی و مکعبی، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که عملکرد این دو پیکربندی مشابه یکدیگر می‌باشد. همچنین طبق نتایج آن‌ها محدوده اختلاف دمای بین سطوح سرد و گرم برای ترموالکتریک دومرحله‌ای سرمایه‌گذاری بسیار فراتر از سیستم تک مرحله‌ای سرمایه‌گذاری می‌باشد. بهینه‌سازی نحوه چیدمان ترموکوپل‌ها در یک ترموالکتریک سرمایه‌گذاری دومرحله‌ای به وسیله الگوریتم ژنتیک توسط چنق و شی^۲ [۹] انجام گرفت. بر اساس نتایج آنها الگوریتم ژنتیک توانایی بالایی برای طراحی سیستم‌های پیچیده ترموالکتریک دارد که منجر به دست‌یابی به بهترین شرایط عملکردی برای سیستم می‌شود. یو^۳ و همکاران [۱۰] به بررسی تأثیر طول ترموکوپل و تعداد ترموکوپل در لایه اول روی عملکرد یک سیستم سرمایه‌گذاری ترموالکتریک دومرحله‌ای پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با در نظر گرفتن اختلاف دمای ثابت بین دو سمت ترموالکتریک، کاهش طول ترموکوپل و تعداد ترموکوپل در لایه اول ضریب عملکرد سیستم را بهبود می‌دهد. روبلز^۴ و همکاران [۱۱] ساختار و بازده انرژی یک سیستم سرمایه‌گذاری ترموالکتریک دومرحله‌ای را بررسی کردند. طبق نتایج آن‌ها در پیکربندی هرمی یک ترموالکتریک دومرحله‌ای بهترین نسبت تعداد ترموکوپل‌ها در لایه اول به لایه دوم برابر ۸ می‌باشد. ما و یو^۵ [۱۲] به بررسی یک ترموالکتریک دومرحله‌ای با هدف سرمایه‌گذاری پرداختند و طبق نتایج آن‌ها سیستم دومرحله‌ای نسبت به سیستم تک مرحله‌ای می‌تواند اختلاف دما را به طور قابل توجهی افزایش دهد. وانق^۶ و همکاران [۱۳] عملکرد یک سیستم ترموالکتریک دومرحله‌ای سرمایه‌گذاری را بررسی کرده و پارامترهای مهم طراحی آن را بهینه کردند. مهم‌ترین پارامترهای مورد بررسی آن‌ها، نسبت مساحت جانبی پایه‌های مثبت ترموکوپل به تعداد ترموکوپل‌ها و نسبت طول پایه‌های قسمت سرد ترموکوپل به ناحیه دوم آن بود. نتایج آن‌ها نشان داد که در اختلاف دماهای صفر، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ کلوین، ظرفیت سرمایه‌گذاری به ترتیب به مقدار ۱۹/۶۲٪، ۲۱/۳۰٪، ۲۵/۴۹٪ و ۴۳/۸۳٪ نسبت به حالت اولیه بهبود یافته است. یک ترموالکتریک سرمایه‌گذاری دومرحله‌ای با استفاده از دو منبع انرژی توسط چن^۷ و همکاران [۱۴] به صورت عددی بررسی شد. آن‌ها دو لایه موجود در ترموالکتریک را از لحاظ الکتریکی به صورت موازی به هم متصل کردند که با توجه به این نحوه اتصال توانستند از دو منبع مختلف با مقادیر جریان الکتریسیته مختلف برای هر یک از لایه‌ها استفاده کنند و مقدار بهینه برای هر یک از جریان‌ها به دست آورند. لو^۸ و همکاران [۱۵] با ترکیب دو روش استفاده از جریان الکتریسیته گذرا و

- 1 Xuan
- 2 Cheng and Shih
- 3 Yu
- 4 Robles
- 5 Ma and Yu
- 6 Wang
- 7 Chen
- 8 Lv

$$R = \left[\frac{\rho_n L_n}{A_n} + \frac{\rho_p L_p}{A_p} \right] + R_{conducting} + R_{contact} \quad (9)$$

همچنین، توان مصرفی در ترموالکتریک دومرحله‌ای را با کمک قانون پایستگی انرژی می‌توان بصورت زیر محاسبه کرد:

$$P_{in} = P_1 + P_2 = (Q_{H1} - Q_{C1}) + (Q_{H2} - Q_{C2}) \quad (10)$$

به کمک بالانس انرژی و با در نظر گرفتن مقادیر ثابت برای T_H و T_C می‌توان مقادیر T_1 و T_2 را بصورت زیر محاسبه کرد:

$$Q_{C1} = U_C A_C (T_C - T_2) \quad (11)$$

$$Q_{H2} = U_h A_h (T_1 - T_h) \quad (12)$$

زمانی که هدف گرمایش است یعنی از ترموالکتریک گرمایشی استفاده می‌کنیم مقدار Q_{H2} برای ما مهم است و در حالت سرمایشی و ترموالکتریک سرمایشی بار سرمایشی Q_{C2} هدف اصلی می‌باشد. بنابراین در حالت گرمایش و سرمایش مقادیر ضریب عملکرد و بازده انرژی سیستم از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

-گرمایش:

$$COP_{HEATER} = \frac{Q_{H2}}{P_{in}} \quad (13)$$

$$\varepsilon_{HEATER} = \frac{Ex_{QH2}}{P_{in}} \quad (14)$$

-سرمایش:

$$COP_{COOLER} = \frac{Q_{C1}}{P_{in}} \quad (15)$$

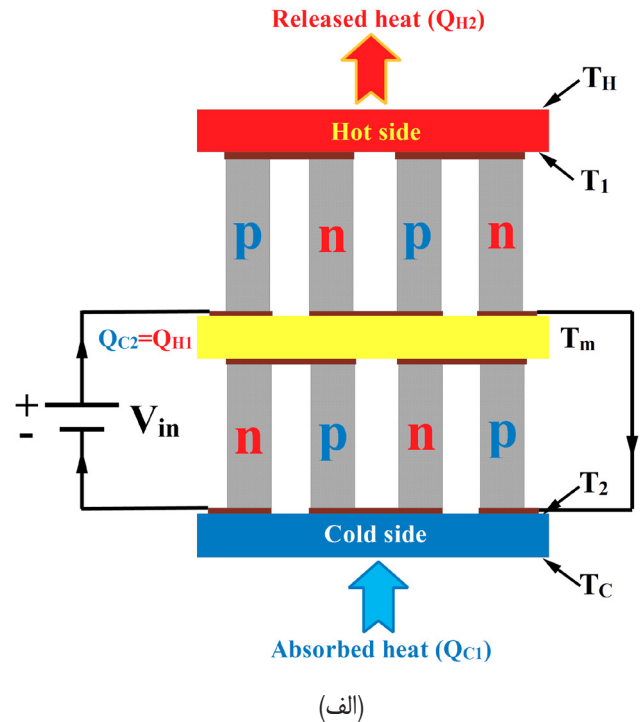
$$\varepsilon_{COOLER} = \frac{Ex_{QC1}}{P_{in}} \quad (16)$$

در رابطه فوق Ex_{QH2} و Ex_{QC1} به ترتیب بیانگر انرژی بار گرمایشی و سرمایشی سیستم می‌باشند که بصورت زیر تعریف می‌شوند که در این روابط مقادیر $(1 - T_0/T_h)$ و $(T_0/T_c - 1)$ به فاکتور کارنو در حالت گرمایش و سرمایش معروف هستند:

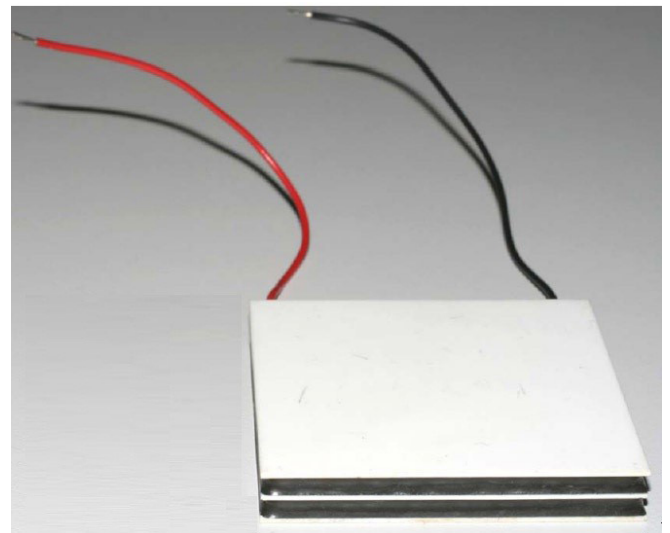
$$Ex_{QH2} = Q_{H2} \left(1 - \frac{T_0}{T_H} \right) \quad (17)$$

$$Ex_{QC1} = Q_{C1} \left(\frac{T_0}{T_C} - 1 \right) \quad (18)$$

با حل همزمان معادلات فوق در نرم‌افزار EES می‌توان عملکرد ترمودینامیکی یک سیستم ترموالکتریک دومرحله‌ای را تحلیل کرد. فرضیاتی که در مورد معادلات بالا در نظر گرفته شده‌اند را می‌توان



(الف)



(ب)

Fig. 1. Schematic and real diagram of a two-stage thermoelectric devise

شکل ۱: طرح‌واره و شکل واقعی یک ترموالکتریک دومرحله‌ای

$$Q_{H2} = m(\alpha IT_1 + 0.5RI^2 - K(T_1 - T_m)) \quad (19)$$

در روابط فوق m و n تعداد ترموکوپل‌ها در لایه اول و دوم ترموالکتریک، R بیانگر مقاومت الکتریکی، I جریان الکتریکی و K رسانش گرمایی است. محل رخداد هر یک از این انتقال حرارت‌ها در شکل (الف) نشان داده شده است. در روابط فوق K و R را بصورت زیر محاسبه می‌کنیم [۱۷]:

$$K = \left[\frac{k_n A_n}{L_n} + \frac{k_p A_p}{L_p} \right] + K_{conducting} \quad (20)$$

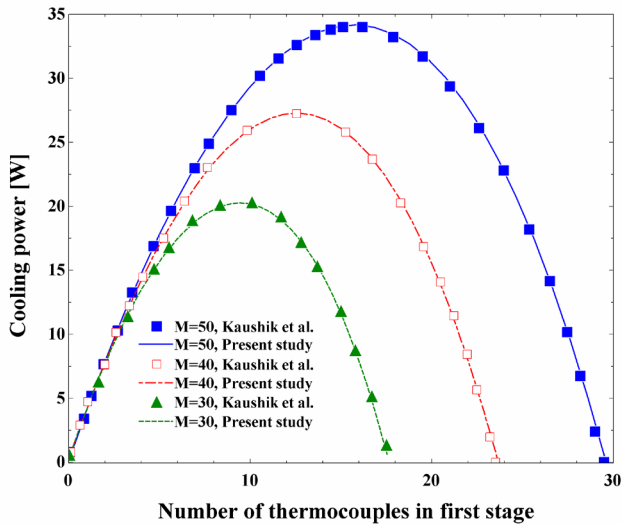


Fig. 2. Comparison of the results obtained from present modeling and those of reported in [16]

شکل ۲: مقایسه نتایج ناشی از مدل‌سازی حاضر و نتایج موجود در منبع [۱۶]

ترمودینامیک در حالت سرمایش و گرمایش با هم مقایسه می‌شود. تأثیر دماهای مختلف بین قسمت‌های سرد و گرم ترموالکتریک در جریان‌های مختلف الکتریکی بر روی ضریب عملکرد مورد بررسی قرار می‌گیرند.

شکل ۳ نشان‌دهنده تأثیر هم‌زمان تغییرات دمای بخش گرم (T_H) ترموالکتریک گرمایشی در جریان‌های الکتریسیته مختلف اعمالی بر ترموالکتریک با در نظر گرفتن دمای ثابت ۳۰۰ کلوین برای قسمت سرد ترموالکتریک می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با تغییر مقدار جریان الکتریسیته، مقدار ضریب عملکرد گرمایشی به مقدار ماکزیمم می‌رسد. همچنین با توجه به شکل، افزایش دمای سطح گرم ترموالکتریک گرمایشی منجر به کاهش ضریب عملکرد می‌شود به طوری که مقدار ماکزیمم ضریب عملکرد در دماهای سطح گرم ۳۱۵، ۳۳۰ و ۳۴۵ کلوین به ترتیب برابر ۳/۳۸، ۱/۹۹ و ۱/۵۳ است. از سوی دیگر مقدار جریان الکتریکی که منجر به ماکزیمم شدن ضریب عملکرد می‌شود با افزایش اختلاف دمای قسمت سرد و گرم ترموالکتریک افزایش می‌یابد. مقدار جریان الکتریسیته بهینه در دماهای سطح گرم ۳۱۵، ۳۳۰ و ۳۴۵ کلوین به ترتیب ۴/۰۸، ۷/۶۹ و ۱۰/۹۵ آمپر می‌باشد. در جریان‌های الکتریکی بیشتر از ۴۰ آمپر مقدار ضریب عملکرد ترموالکتریک دومرحله‌ای گرمایشی تقریباً مستقل از دما بوده و برای هر سه دمای مورد بررسی برای سطح گرم در حدود ۰/۹ می‌باشد.

تغییرات ضریب عملکرد یک سیستم ترموالکتریک دومرحله‌ای سرمایشی با جریان الکتریسیته تحت دماهای سطح سرد برابر با ۲۸۵، ۲۷۰ و ۲۵۵ کلوین در شکل ۴ نمایش داده شده است. در تمام حالات، دمای سطح گرم برابر با ۳۰۰ کلوین در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود همانند ترموالکتریک گرمایشی (شکل ۳) مقدار ضریب عملکرد در مقدار جریان الکتریسیته مشخصی ماکزیمم می‌شود. کاهش دمای سطح سرد

به‌صورت زیر خلاصه کرد [۱۷-۱۶]:

- فقط انتقال حرارت یک بعدی در راستای طول الکترودها در نظر گرفته شده است.
- از اثر تامسون چشم‌پوشی شده است.
- برای ترموالکتریک گرمایشی دمای سطح سرد ۳۰۰ کلوین و دمای سطح گرم ۳۱۵، ۳۳۰ و ۳۴۵ کلوین فرض شده است.
- برای ترموالکتریک سرمایشی دمای سطح گرم ۳۰۰ کلوین و دمای سطح سرد ۲۸۵، ۲۷۰ و ۲۵۵ کلوین فرض شده است.
- دمای طرفین سرد و گرم ترموالکتریک ثابت در نظر گرفته شده است.
- فقط یک مدل انتقال حرارت از سمت گرم الکترودها به سمت سرد آن در نظر گرفته شده است که همان هدایت یا انتقال حرارت فوریه است و به دلیل رسانش ناشی از ذات مواد می‌باشد.
- دمای محیط ۲۹۸ کلوین در نظر گرفته شده است.
- مقادیر ضریب انتقال U_C و U_H برابر $170 \text{ W/m}^2\text{K}$ در نظر گرفته شده است.
- تعداد ترموکوپل‌های هر دو لایه یکسان در نظر گرفته شده‌اند ($n=m$).

۳- نتایج

۳-۱- اعتباردهی نتایج

برای اعتباردهی و صحت‌سنجی نتایج مطالعه‌ی حاضر، از نتایج گزارش شده در مرجع [۱۶] که نتایج مربوط به بار سرمایشی یک سیستم ترموالکتریک دومرحله‌ای سرمایشی است، استفاده شده است. در شکل ۲ تغییرات میزان بار سرمایشی یک ترموالکتریک دومرحله‌ای با تغییر تعداد ترموکوپل‌های لایه اول نشان داده شده است. در این شکل M بیان‌گر تعداد مجموع ترموکوپل‌های موجود در لایه‌های اول و دوم می‌باشد و همان‌طور که می‌توان دید در هر حالت به ازای تعداد مشخصی از ترموکوپل در لایه اول بیشینه بار سرمایشی حاصل می‌گردد. شکل ۲ نشان‌دهنده مقایسه بین نتایج مطالعه حاضر و نتایج مرجع [۱۶] با در نظر گرفتن شرایط یکسان برای تمام پارامترها می‌باشد. در شکل ۲، نقطه چین‌های مشخص شده مربوط به نتایج مرجع [۱۶] و خطوط ممتد نشانگر نتایج به‌دست آمده از مطالعه حاضر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین نتایج مطالعه حاضر و نتایج گزارش شده در مرجع [۱۶] وجود دارد که بیانگر صحت مطالعه حاضر می‌باشد.

۳-۲- بررسی عملکرد ترموالکتریک دومرحله‌ای گرمایشی و سرمایشی

۳-۲-۱- دیدگاه قانون اول ترمودینامیک

در این قسمت عملکرد یک سیستم ترموالکتریک دو مرحله‌ای گرمایشی و سرمایشی از دیدگاه قانون اول ترمودینامیک با هم مقایسه می‌گردد. بدین منظور ضریب عملکرد سیستم (COP) به عنوان پارامتر اصلی قانون اول

که برای اختلاف دماهای یکسانی برای ترموالکتریک گرمایشی و سرمایشی محاسبه شده‌اند (۱۵، ۳۰ و ۴۵ کلوین) می‌توان به این نتیجه رسید که ضریب عملکرد سیستم گرمایشی بزرگ‌تر از سیستم ترموالکتریک سرمایشی است. علت این امر این است که همواره به ازای توان مصرفی یکسان (P_{in}) مقدار بار گرمایشی Q_H از مقدار بار سرمایشی Q_C بزرگ‌تر است.

۳-۲-۲ دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک

در این بخش عملکرد سیستم ترموالکتریک دومرحله‌ای با هدف گرمایش و سرمایش از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک بررسی و گزارش می‌شود. بدین منظور بازده انرژی سیستم که مهم‌ترین پارامتر از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک می‌باشد، برای سیستم‌های ترموالکتریک گرمایشی و سرمایشی تحت اختلاف دماهای مختلف سطوح سرد و گرم و جریان‌های مختلف بررسی می‌شود.

شکل ۵ نشان‌دهنده تغییرات بازده انرژی سیستم ترموالکتریک گرمایشی با تغییرات جریان الکتریسیته در دماهای سطوح گرم ۳۱۵، ۳۳۰، ۳۴۵ و ۳۶۰ کلوین با در نظر گرفتن دمای ثابت ۳۰۰ کلوین برای سطح سرد می‌باشد. همان‌طور که در شکل می‌توان مشاهده کرد، مقدار بازده انرژی در مقدار جریان الکتریسیته مشخصی بهینه می‌گردد که مقدار این جریان الکتریسیته بهینه با افزایش اختلاف دمای بین سطوح سرد و گرم افزایش می‌یابد.

دو نکته قابل توجه از مقایسه شکل‌های ۳ و ۵ می‌توان نتیجه گرفت. اولاً این که در تمام مقادیر دماهای سطح گرم، مقدار جریان الکتریکی که منجر به بیشینه شدن بازده انرژی می‌گردد دقیقاً با مقدار جریانی که ضریب عملکرد را بهینه می‌کند برابر است. علت این امر این است که با توجه

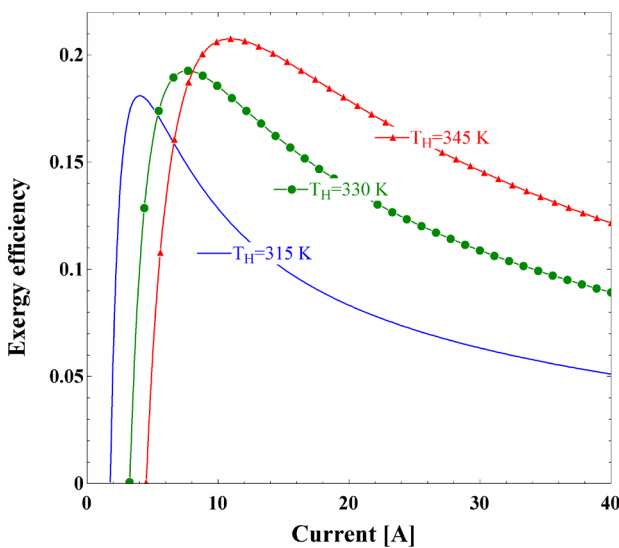


Fig. 5. Exergy efficiency of two-stage thermoelectric heater versus current in different values of T_H

شکل ۵: تغییرات بازده انرژی ترموالکتریک دومرحله‌ای گرمایشی با جریان الکتریکی تحت دماهای مختلف قسمت گرم

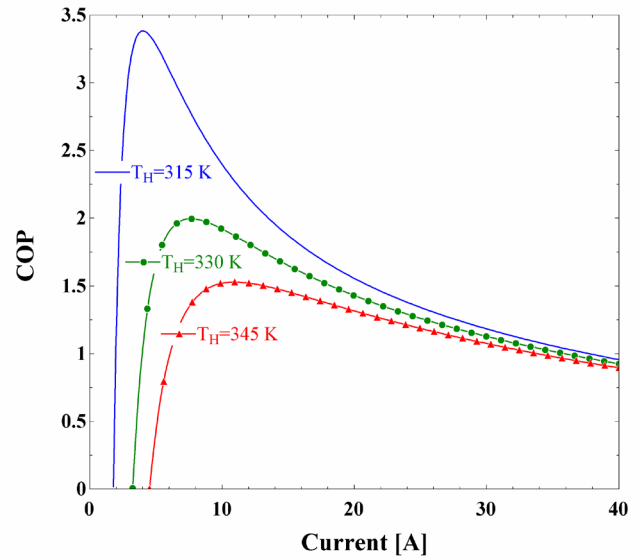


Fig. 3. COP of two-stage thermoelectric heater versus current in different values of T_H

شکل ۳: تغییرات ضریب عملکرد ترموالکتریک دومرحله‌ای گرمایشی با جریان الکتریکی تحت دماهای مختلف قسمت گرم

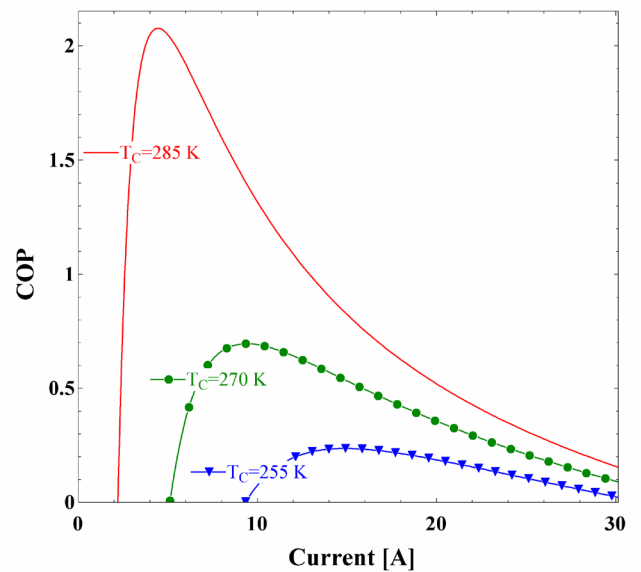


Fig. 4. COP of two-stage thermoelectric cooler versus current in different values of T_C

شکل ۴: تغییرات ضریب عملکرد ترموالکتریک دومرحله‌ای سرمایشی با جریان الکتریکی تحت دماهای مختلف قسمت سرد

که منجر به افزایش اختلاف دمای بین سطوح سرد و گرم می‌شود به شدت ضریب عملکرد ترموالکتریک سرمایشی را کاهش می‌دهد و چنانچه مشاهده می‌شود مقدار ضریب عملکرد برای دماهای ۲۸۵، ۲۷۰ و ۲۵۵ کلوین به ترتیب برابر با ۰/۲۰۸، ۰/۷ و ۰/۲۴ است.

همچنین همانند ترموالکتریک گرمایشی مقدار جریانی که در آن ضریب عملکرد سیستم سرمایشی ماکزیمم می‌گردد با افزایش اختلاف دمای بین سطوح سرد و گرم افزایش می‌یابد. علاوه بر این، با مقایسه نتایج شکل ۳ و ۴

اگرزری می‌گردد (شکل ۵). برای ترموالکتریک دومرحله‌ای سرمایشی افزایش اختلاف دمای بین سطوح سرد و گرم منجر به کاهش بازده اگرزری می‌شود (شکل ۶). علت این امر این است که در حالت سرمایشی بر خلاف حالت گرمایشی، پارامتر غالب کاهش ضریب عملکرد سیستم سرمایشی می‌باشد که منجر به کاهش بازده اگرزری می‌شود.

در حالت سرمایش نیز مقدار جریانی که منجر به بیشینه شدن بازده اگرزری می‌گردد دقیقاً با جریان الکتریسیته بهینه ضریب عملکرد ترموالکتریک دومرحله‌ای سرمایشی یکسان است. همچنین با مقایسه نتایج شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان مشاهده کرد که بازده اگرزری برای ترموالکتریک دو مرحله‌ای سرمایشی کمتر از ترموالکتریک دو مرحله‌ای گرمایشی در اختلاف دماهای مشابه است.

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر عملکرد یک سیستم ترموالکتریک دومرحله‌ای با هدف استفاده به عنوان سیستم گرمایشی و سرمایشی از دیدگاه قوانین اول و دوم ترمودینامیک مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ضریب عملکرد به عنوان پارامتر کلیدی قانون اول ترمودینامیک و بازده اگرزری به عنوان پارامتر مهم قانون دوم ترمودینامیک برای ترموالکتریک دومرحله‌ای سرمایشی و گرمایشی محاسبه و با هم مقایسه شدند. مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده از مطالعه حاضر را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- در حالت گرمایش و سرمایش با تغییر جریان الکتریسیته مقدار ضریب عملکرد و بازده اگرزری بیشینه می‌شود که مقدار این جریان الکتریسیته بهینه برای بازده اگرزری و ضریب عملکرد یکسان است.
- با افزایش اختلاف دمای بین سطوح سرد و گرم ترموالکتریک دومرحله‌ای، مقدار جریان الکتریکی که منجر به بیشینه شدن ضریب عملکرد و بازده اگرزری می‌گردد در هر دو حالت گرمایش و سرمایش افزایش می‌یابد.
- افزایش اختلاف دمای بین سطوح سرد و گرم مقدار ضریب عملکرد هر دو سیستم ترموالکتریک دومرحله‌ای گرمایشی و سرمایشی را کاهش می‌دهد.
- مقدار ضریب عملکرد بهینه در حالت گرمایش، به ازای دماهای سطح گرم ۳۱۵، ۳۳۰ و ۳۴۵ کلون به ترتیب برابر ۳/۳۸۳، ۱/۹۹۷ و ۱/۵۲۲ می‌باشد که به ترتیب در جریان‌های ۴/۰۸، ۷/۶۹۵ و ۱۰/۹۵ آمپر رخ می‌دهد. همچنین در حالت سرمایش مقدار ضریب عملکرد بهینه، به ازای دماهای سطح سرد ۲۸۵، ۲۷۰ و ۲۵۵ کلون به ترتیب برابر ۲/۰۸، ۰/۶۹۶ و ۰/۲۳۶ می‌باشد که به ترتیب در جریان‌های ۴/۴۹، ۹/۳۵ و ۱۴/۹۱ آمپر اتفاق می‌افتد.
- مقدار بازده اگرزری با افزایش اختلاف دمای بین سطوح سرد و گرم در ترموالکتریک دومرحله‌ای گرمایشی افزایش می‌یابد ولی در ترموالکتریک دومرحله‌ای سرمایشی کاهش پیدا می‌کند.

به روابط (۱۳)، (۱۴) و (۱۷) بین ضریب عملکرد و بازده اگرزری سیستم ترموالکتریک دومرحله‌ای رابطه مستقیمی وجود دارد. ثانیاً، بر خلاف ضریب عملکرد که با افزایش دمای سطح گرم مقدار آن کاهش می‌یابد (شکل ۳)، مقدار بازده اگرزری ترموالکتریک گرمایشی دومرحله‌ای با افزایش دمای سطح گرم افزایش می‌یابد (شکل ۵). تفاوت موجود بین نتایج قوانین اول و دوم ترمودینامیک، اهمیت بررسی قانون دوم ترمودینامیک را بیشتر نمایان می‌کند.

علت افزایش بازده اگرزری سیستم ترموالکتریک دومرحله‌ای گرمایشی با افزایش دما این است که با توجه به روابط (۱۳)، (۱۴) و (۱۷) بازده اگرزری سیستم در حقیقت برابر با حاصل ضرب ضریب عملکرد در فاکتور کارنو می‌باشد که با افزایش دمای سطح گرم مقدار فاکتور کارنو افزایش یافته و مقدار ضریب عملکرد کاهش می‌یابد. از آنجایی که در حالت گرمایش فاکتور کارنو پارامتر غالب می‌باشد، افزایش دمای سطح گرم منجر به افزایش بازده اگرزری ترموالکتریک دو مرحله‌ای گرمایشی می‌گردد. نکته مهم دیگر که از مقایسه شکل‌های ۳ و ۵ می‌توان نتیجه گرفت این است که بر خلاف ضریب عملکرد که از محدوده مشخصی از جریان الکتریسیته، تغییرات دما تأثیر قابل توجهی بر ضریب عملکرد ندارد، بازده اگرزری در تمام محدوده جریان الکتریسیته قابل قبول، در دماهای بالاتر بیشتر است.

شکل ۶ تغییرات بازده اگرزری یک سیستم ترموالکتریک دومرحله‌ای سرمایشی را با تغییرات جریان الکتریسیته در دمای مختلف سطح سرد نشان می‌دهد.

مطابق این شکل همانند حالت گرمایش، در این حالت نیز مقدار بازده اگرزری در جریان الکتریسیته مشخصی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. برخلاف حالت گرمایش که افزایش اختلاف دما منجر به افزایش بازده

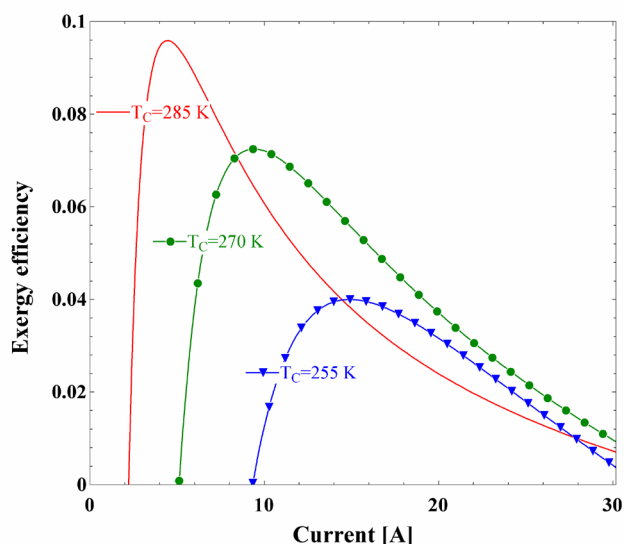


Fig. 6. Exergy efficiency of two-stage thermoelectric cooler versus current in different values of T_c

شکل ۶: تغییرات بازده اگرزری ترموالکتریک دومرحله‌ای سرمایشی با جریان الکتریکی تحت دماهای مختلف قسمت سرد

منابع

فهرست علائم

- [1] R. Arora, S. Kaushik, R. Arora, Thermodynamic modeling and multi-objective optimization of two stage thermoelectric generator in electrically series and parallel configuration, *Applied Thermal Engineering*, 103 (2016) 1312-1323.
- [2] J. Peltier, New experiments on calorificity of electric currents, *Ann. Chem. Phys.*, (1834) 371-386.
- [3] T. Seebeck, *About the magnetism of the galvanic chain*, Abh. Akad. Wiss., Berlin, Germany, (1821).
- [4] A.-N. Moh'd A, B.M. Tashtoush, A.A. Jaradat, Modeling and simulation of thermoelectric device working as a heat pump and an electric generator under Mediterranean climate, *Energy*, 90 (2015) 1239-1250.
- [5] X. Xuan, Analyses of the performance and polar characteristics of two-stage thermoelectric coolers, *Semiconductor science and technology*, 17(5) (2002) 414.
- [6] X. Xuan, K. Ng, C. Yap, H. Chua, The maximum temperature difference and polar characteristic of two-stage thermoelectric coolers, *Cryogenics*, 42(5) (2002) 273-278.
- [7] X.-D. Wang, Q.-H. Wang, J.-L. Xu, Performance analysis of two-stage TECs (thermoelectric coolers) using a three-dimensional heat-electricity coupled model, *Energy*, 65 (2014) 419-429.
- [8] X. Xuan, K. Ng, C. Yap, H. Chua, Optimization of two-stage thermoelectric coolers with two design configurations, *Energy Conversion and Management*, 43(15) (2002) 2041-2052.
- [9] Y.-H. Cheng, C. Shih, Optimizing the arrangement of two-stage thermoelectric coolers through a genetic algorithm, *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 49(3) (2006) 831-838.
- [10] J. Yu, H. Zhao, K. Xie, Analysis of optimum configuration of two-stage thermoelectric modules, *Cryogenics*, 47(2) (2007) 89-93.
- [11] M.A. Olivares-Robles, F. Vazquez, C. Ramirez-Lopez, Optimization of two-stage peltier modules: structure and exergetic efficiency, *Entropy*, 14(8) (2012) 1539-1552.
- [12] M. Ma, J. Yu, An analysis on a two-stage cascade thermoelectric cooler for electronics cooling applications, *International Journal of Refrigeration*, 38 (2014) 352-357.
- [13] T.-H. Wang, Q.-H. Wang, C. Leng, X.-D. Wang, Parameter analysis and optimal design for two-stage thermoelectric cooler, *Applied energy*, 154 (2015) 1-12.
- [14] J. Chen, J. Yu, M. Ma, Theoretical study on an

A	سطح مقطع (m^2)
COP	ضریب عملکرد
I	جریان الکتریسیته (A)
K	رسانش گرمایی (W/K)
k	رسانش گرمایی ویژه (W/m.K)
L	طول (m)
n	تعداد الکترودها در لایه اول
m	تعداد الکترودها در لایه دوم
P	توان الکتریکی (W)
Q	آهنگ گرما (W)
R	مقاومت الکتریکی (Ω)
T	دما (K)
T_C	دمای سطح سرد (K)
T_H	دمای سطح گرم (K)
T_m	دمای میانگین (K)
$TTEC$	ترموالکترونیک دومرحله‌ای سرمایه‌اشی
$TTEH$	ترموالکترونیک دومرحله‌ای گرمایشی
U	ضریب انتقال حرارت (W/m^2K)

علامت یونانی

α	ضریب سیبک (V/K)
ε	بازده انرژی
ρ	مقاومت الکتریکی ویژه (Ω/m)

زیرنویس

1	طرف سرد سرامیک گرم
2	طرف گرم سرامیک سرد
C	سرد
H	گرم
in	ورودی
0	محیط
out	خروجی
n	الکترون منفی
p	الکترون مثبت

- [16] S. Kaushik, S. Manikandan, R. Hans, Energy and exergy analysis of thermoelectric heat pump system, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 86 (2015) 843-852.
- [17] S. Kaushik, S. Manikandan, The influence of Thomson effect in the performance optimization of a two stage thermoelectric cooler, *Cryogenics*, 72 (2015) 57-64.
- integrated two-stage cascaded thermoelectric module operating with dual power sources, *Energy conversion and management*, 98 (2015) 28-33.
- [15] H. Lv, X.-D. Wang, J.-H. Meng, T.-H. Wang, W.-M. Yan, Enhancement of maximum temperature drop across thermoelectric cooler through two-stage design and transient supercooling effect, *Applied Energy*, 175 (2016) 285-292.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

A. Nemati, H. Nami, M. Yari, F. Ranjbar, Energy and Exergy Analysis of a Two-Stage Thermoelectric Used for Heating and Cooling, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(2) (2018) 377-384.
DOI: 10.22060/mej.2017.12073.5254

