



مقایسه‌ی عملکرد ترموالکتریک کولر و ترموالکتریک هیتر تک مرحله‌ای از دیدگاه انرژی و انرژی

حسین نامی^۱، علی صابری مهر^۲

^۱ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه h.nami@maragheh.ac.ir

^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بناب ali.saberi07@gmail.com

چکیده - در این تحقیق تحلیل انرژی و انرژی ترموالکتریک‌های تک مرحله‌ای ارائه شده و عملکرد آن‌ها برای هر دو حالت گرمایش و سرمایش مورد مقایسه قرار گرفته است. مانند سیستم‌های حرارتی و برودتی متداول از تعریف ضریب عملکرد برای بررسی تحلیل انرژی و تعریف راندمان انرژی برای بررسی تحلیل انرژی استفاده شد. با در نظر گرفتن قسمت‌های مختلف ترموالکتریک هیتر و ترموالکتریک کولر به عنوان یک حجم کنترل، تخریب انرژی و راندمان انرژی آن‌ها محاسبه شده و مورد مقایسه قرار گرفت. اثر جریان اعمالی به ترموالکتریک و اختلاف دمای سطوح سرد و گرم در ضریب عملکرد و راندمان انرژی ترموالکتریک برای هر دو حالت گرمایش و سرمایش مورد بررسی قرار گرفت. حل همزمان معادلات ناشی از شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار EES صورت گرفته است. نتایج تحلیل انرژی نشان می‌دهد که تغییر جریان اعمالی به ترموالکتریک، ضریب عملکرد را هم برای حالت ترموالکتریک کولر و هم برای حالت ترموالکتریک هیتر بهینه می‌کند ولی به ازای اختلاف دمای سطوح سرد و گرم یکسان، ضریب عملکرد حالت گرمایش بیشتر از حالت سرمایش می‌باشد. همچنین نتایج تحلیل انرژی نشان می‌دهد، افزایش اختلاف دمای سطوح سرد و گرم، راندمان انرژی ترموالکتریک هیتر را افزایش می‌دهد ولی راندمان انرژی ترموالکتریک کولر را کاهش می‌دهد.

کلیدواژه - ترموالکتریک کولر، ترموالکتریک هیتر، ضریب عملکرد، راندمان انرژی

صورت گرفته است. امروزه با توجه به پیشرفت دانش مهندسی مواد و توانایی معرفی مواد نیمه‌هادی با خاصیت ترموالکتریکی بالا، استفاده از قطعات ترموالکتریک به عنوان کولر، هیتر و ژنراتور رشد سریعی به خود گرفته است.

از طرف دیگر با توجه به افزایش نیاز به انرژی در کشورهای رو به توسعه و مسأله‌ی محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی، اهمیت استفاده از سیستم‌های تبدیل مستقیم انرژی بیشتر شده است [3]. در این میان، ترموالکتریک‌ها از جمله پرکاربردترین سیستم‌های تبدیل مستقیم انرژی برای تبدیل مستقیم حرارت به الکتریسیته و نیز الکتریسیته به حرارت محسوب می‌شود. از جمله مزایای ترموالکتریک‌ها در مقایسه با سیستم‌های تبدیل انرژی رایج عبارت است از [4]:

- عملکرد بدون آلاینده‌ی محیطی و صوتی

- دارا بودن عمر مفید بالا بدلیل عدم استفاده از قطعات

۱- مقدمه

در نیمه‌ی نخست قرن ۱۹ میلادی خاصیت ترموالکتریکی مواد نیمه‌هادی توسط پلتیر، سیبک و تامسون مشاهده گردید [1]. اثر پلتیر بیانگر این است که ایجاد اختلاف پتانسیل الکتریکی در دو سر یک سیم نیمه‌هادی باعث ایجاد اختلاف دما در دو سر آن خواهد شد. از طرف دیگر ایجاد اختلاف پتانسیل الکتریکی در دو سر یک سیم نیمه‌هادی ناشی از اختلاف دمای دو سر آن اثر سیبک خوانده می‌شود [2]. عملکرد یک قطعه‌ی ترموالکتریک در واقع به پارامتری به نام فیگورافمریت بستگی دارد که تابع جنس ماده‌ی نیمه‌هادی آن می‌باشد. با توجه به نبود تکنولوژی‌های لازم برای تولید و معرفی مواد نیمه‌هادی با فیگورافمریت بالا، گسترش استفاده از ترموالکتریک‌ها به کندی

متحرک در ساختمان آنها

- قابلیت استفاده از منابع حرارتی دما پایین
- قابلیت بسیار آسان در عوض کردن هدف نهایی استفاده از آنها (تولید حرارت یا برودت)
- عدم نیاز به نگهداری

- عدم نیاز به سیال کاری و خطوط توزیع سیال

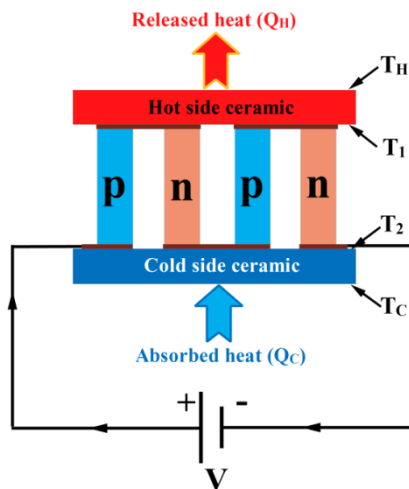
مطالعات بسیاری در مورد استفاده از ترموالکتریک‌ها به عنوان هیتر، کولر و ژنراتور انجام شده است که به مواردی از آنها اشاره می‌شود. ریفت و همکاران [5]، کاسنیر و همکاران [6] و آسترین و همکاران [7] از ترموالکتریک‌ها برای گرمایش و سرمایش هوا استفاده کردند و نتیجه گرفتند که ضریب عملکرد ترموالکتریک‌ها در مقایسه با سیستم‌های گرمایش و سرمایش سنتی بهتر است. میراندا و همکاران از ترموالکتریک‌ها برای سرمایش قطعات کوچک الکترونیکی استفاده کردند [8]. آنها گزارش کردند که ضریب عملکرد ترموالکتریک تا مقدار 1/7 قابل ارتقاء است. شن و همکاران مدل جدیدی از سیستم تهویه‌ی تشعشی با استفاده از ترموالکتریک‌ها ارائه کردند. آنها نشان دادند که ضریب عملکرد سیستم پیشنهادی نزدیک به ضریب عملکرد سیستم‌های تهویه‌ی سنتی بوده ولی سیستم پیشنهادی مزایای مربوط به استفاده از ترموالکتریک‌ها را داراست [9]. مینق و همکاران از یک ترموالکتریک ژنراتور برای تولید الکتریسیته از اگزوز خودرو استفاده کردند. طبق گزارش آنها، بهترین عملکرد ترموالکتریک ژنراتور در شرایط استفاده‌ی حداقل از مواد ترموالکتریک بود [10]. فن و همکاران یک مطالعه‌ی بسیار جامع روی ترموالکتریک ژنراتورها با در نظر گرفتن اثر زمان، طول الکترود و سطح مقطع الکترود انجام دادند. آنها نتیجه گرفتند که بیشینه توان خروجی ترموالکتریک ژنراتور با افزایش طول الکترود کاهش یافته و تقریباً رابطه‌ی خطی با سطح مقطع الکترودها دارد [11]. منگ و همکاران یک مطالعه‌ی پارامتریک روی ترموالکتریک ژنراتورها با استفاده از مواد مختلف به عنوان الکترود انجام دادند. آنها نشان دادند که هندسه‌ی ترموالکتریک اثر چندانی در عملکرد آنها ندارد و همچنین دو مقدار بهینه برای طول الکترود موجود است که توان خروجی و راندمان ترموالکتریک را بهینه می‌کند [12].

در این مطالعه، روش مدل‌سازی و تحلیل انرژی و اگزرژی برای ترموالکتریک هیتر و ترموالکتریک کولر ارائه شده است. ترموالکتریک‌ها از دیدگاه ترمودینامیک و با استفاده از روابط موجود در ادبیات فن مورد مدل‌سازی قرار گرفتند. به منظور مقایسه‌ی عملکرد ترموالکتریک هیتر و ترموالکتریک کولر از

دیدگاه انرژی و اگزرژی، ضریب عملکرد و راندمان اگزرژی آنها به ازای جریان‌های الکتریکی مختلف و اختلاف دماهای سطح گرم و سرد متفاوت مورد مقایسه قرار گرفت.

۲- مدل‌سازی و تحلیل انرژی و اگزرژی ترموالکتریک‌ها

شکل ۱ دیاگرام شماتیک از یک ترموالکتریک تک مرحله‌ای را نشان می‌دهد که به لحاظ هندسی کاملاً مشخص بوده و می‌تواند به عنوان کولر یا هیتر عمل کند. همچنین تصویر یک ترموالکتریک واقعی نیز در شکل ۱ آورده شده است. همچنان که در قسمت مقدمه نیز اشاره شد، یک ترموالکتریک می‌تواند هم به عنوان هیتر و هم به عنوان کولر عمل کند که بستگی به جهت ولتاژ اعمالی دارد و این امر یکی از مهم‌ترین جنبه‌های مثبت ترموالکتریک‌ها می‌باشد. بنابراین یک ترموالکتریک مشخص می‌تواند هم به عنوان هیتر و هم به عنوان کولر مورد استفاده قرار گیرد. همچنان که در شکل ۱ دیده می‌شود، هر ترموالکتریک تک مرحله‌ای شامل یک جفت لایه‌ی سرامیک، فلزهای رابط و تعدادی جفت الکترود می‌باشد.



شکل ۱: شماتیک ترموالکتریک تک مرحله‌ای

در این قسمت با استفاده از قوانین اول و دوم ترمودینامیک، گرمای منقل شده و بالانس اگزرژی برای قسمت‌های مختلف ترموالکتریک اعمال می‌شود که به ترتیب زیر هستند:

$$Q_C + P_{in} = Q_H \quad (1)$$

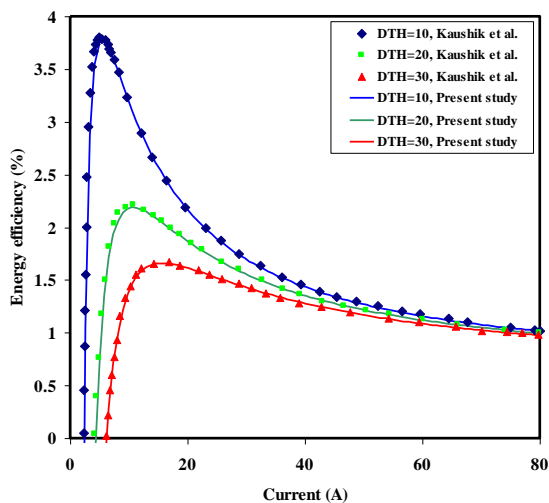
$$\sum_{in} \dot{E} = \sum_{out} \dot{E} + \dot{E}_D \quad (2)$$

در روابط فوق Q_C ، Q_H و P_{in} به ترتیب بیانگر گرمای جذب شده در قسمت سرد ترموالکتریک، گرمای دفع شده در قسمت گرم ترموالکتریک و توان الکتریکی مصرف شده توسط

- فقط انتقال حرارت یک بعدی در راستای طول الکترودها در نظر گرفته شده است.
- از اثر تامسون چشم پوشی شده است.
- برای ترموالکتریک هیتر دمای سطح سرد ۳۰۰ کلوین و دمای سطح گرم ۳۱۰، ۳۲۰ و ۳۳۰ کلوین فرض شده است.
- برای ترموالکتریک کولر دمای سطح گرم ۳۰۰ کلوین و دمای سطح سرد ۲۹۰، ۲۸۰ و ۲۷۰ 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 می باشد.
- دمای محیط ۲۹۸ کلوین در نظر گرفته شده است.

۳- نتایج

به منظور اعتباردهی و صحت‌سنجی نتایج مطالعه‌ی حاضر، از نتایج گزارش شده در منبع [13] که تحلیل انرژی و واگرزژی ترموالکتریک هیتر را ارزیابی کرده است، استفاده شده است. شکل ۲ مقایسه‌ی نتایج بدست آمده در این مطالعه و نتایج ارزیابی شده توسط منبع [13] را نشان می‌دهد. در این شکل راندمان انرژی و واگرزژی به ازای اختلاف دماهای مختلف سطح سرد و گرم ترموالکتریک هیتر رسم شده است. همانطور که از شکل ۲ مشخص است، همخوانی خوبی بین نتایج ناشی از شبیه‌سازی و نتایج گزارش شده در منبع وجود دارد.



(a)

ترموالکتریک می‌باشد. همچنین $\sum_{out} \dot{E}$ و $\sum_{in} \dot{E}$ به عنوان آهنگ واگرزژی ورودی و خروجی بیان می‌گردند. \dot{E}_D نیز بیانگر واگرزژی هدر رفت و واگرزژی تخریب شده می‌باشد. از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک، ۱۰۰ درصد توان الکتریکی را می‌توان همان واگرزژی الکتریکی در نظر گرفت. بنابراین تمام توان الکتریکی مصرفی توسط ترموالکتریک به عنوان واگرزژی ورودی در نظر گرفته می‌شود. واگرزژی مربوط به گرمای جذب شده و دفع شده توسط ترموالکتریک توسط روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{E}_{QH} = Q_H \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) \quad (3)$$

$$\dot{E}_{QC} = Q_C \left(\frac{T_0}{T_C} - 1\right) \quad (4)$$

در روابط بالا T_0 ، T_C و T_H به ترتیب دمای محیط، دمای قسمت سرد ترموالکتریک و دمای قسمت گرم ترموالکتریک می‌باشد.

ضریب عملکرد و نیز راندمان واگرزژی ترموالکتریک در حالت عملکرد هیتر (TEH) و کولر (TEC) به قرار روابط زیر است:

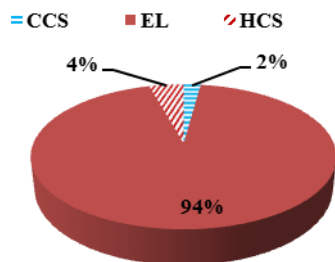
$$COP_{TEH} = \frac{Q_H}{P_{in}} \quad (5)$$

$$COP_{TEC} = \frac{Q_C}{P_{in}} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{TEH} = \frac{\dot{E}_{QH}}{P_{in}} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{TEC} = \frac{\dot{E}_{QC}}{P_{in}} \quad (8)$$

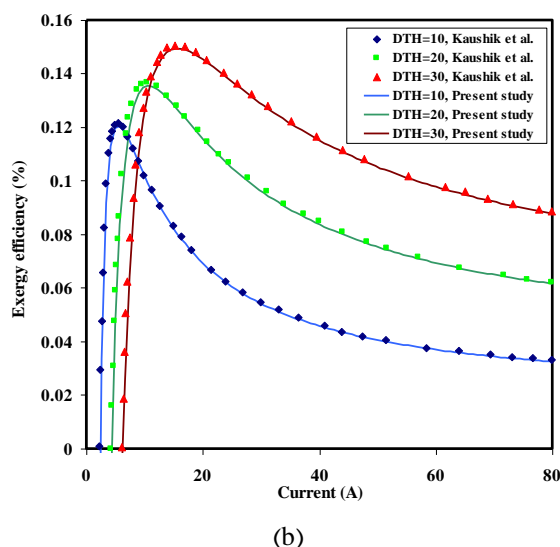
به منظور ارائه‌ی مدل نزدیک‌تری به یک ترموالکتریک واقعی، برگشت‌ناپذیری‌های داخلی و خارجی در نظر گرفته شده‌اند. برگشت‌ناپذیری‌های خارجی عمدتاً به خاطر انتقال حرارت با اختلاف دمای محدود و برگشت‌ناپذیری‌های داخلی به خاطر اتصال فلزهای رابط و خاصیت مواد تشکیل دهنده‌ی الکترودها می‌باشد. بیتموس تلوراید با خواص وابسته به دما به عنوان ماده نیمه‌هادی تشکیل دهنده‌ی الکترودها در نظر گرفته شده است. سایر روابط لازم برای مدل‌سازی ترموالکتریک‌ها در رفرنس [13] آورده شده است. به منظور ساده‌سازی محاسبات فرضیات زیر در نظر گرفته شده است [14]:



شکل ۴: سهم هر جزء از ترموالکتریک کولر در تخریب انرژی

مطابق شکل‌های ۳ و ۴، بالانس انرژی به ازای جریان ۱۵ آمپر و اختلاف دمای ۱۰ درجه دقیقاً برای حالت هیتر و کولر یکسان است. در هر دو حالت عملکرد هیتر و کولر، بیشترین تخریب انرژی مربوط به الکترودهای ترموالکتریک می‌باشد. در واقع دلیل این امر خاصیت نیمه‌هادی بودن جنس الکترودها می‌باشد که بخش اعظم توان ورودی به ترموالکتریک را تخریب می‌کند.

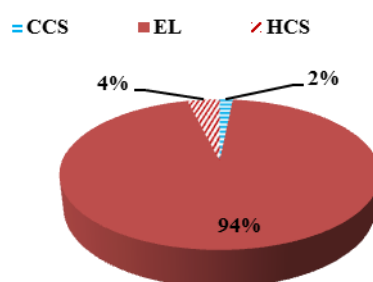
راندمان انرژی کل و قسمت‌های مختلف ترموالکتریک هیتر و کولر به ازای جریان عبوری ۱۵ آمپر و اختلاف دمای سطح سرد و گرم ۱۰ کلون در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده اند. برخلاف بالانس انرژی در قسمت‌های مختلف ترموالکتریک هیتر و کولر که دقیقاً مانند هم بودند، راندمان انرژی برای قسمت‌های یکسان ترموالکتریک برای اهداف گرمایش و گرمایش متفاوت می‌باشد. زمانیکه از ترموالکتریک برای اهداف گرمایش استفاده شود، سرامیک سمت گرم بیشترین راندمان انرژی را خواهد داشت و زمانیکه از ترموالکتریک به عنوان وسیله‌ای برای سرمایش استفاده شود، سرامیک سمت سرد بیشترین راندمان انرژی را خواهد داشت. مطابق شکل‌های ۵ و ۶، در هر دو حالت کمترین راندمان انرژی مربوط به الکترودها می‌باشد که دارای بیشترین تخریب انرژی بودند ولی راندمان انرژی کلی برای حالت گرمایش (در این حال خاص: جریان ۱۰ آمپر و اختلاف دمای ۱۰ درجه) بیشتر از حالت سرمایش است.



شکل ۲: مقایسه نتایج ناشی از مدل‌سازی حاضر و نتایج موجود در منبع [13] در مورد ترموالکتریک هیتر تک مرحله‌ای. (a): راندمان انرژی، (b): راندمان انرژی

۳-۱- بالانس انرژی

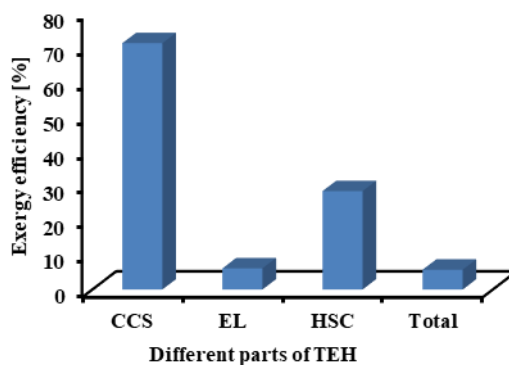
در این قسمت از نتایج، هدف از مطالعه بررسی تخریب انرژی و نیز راندمان انرژی هر جزء از ساختمان ترموالکتریک هیتر و کولر به ازای جریان عبوری ۱۵ آمپر و اختلاف دمای سطح سرد و گرم ۱۰ کلون می‌باشد. شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب بالانس انرژی را برای ترموالکتریک هیتر و ترموالکتریک کولر نشان می‌دهد. در واقع سهم هر یک از اجزاء در تخریب انرژی کل در این شکل‌ها آورده شده است.



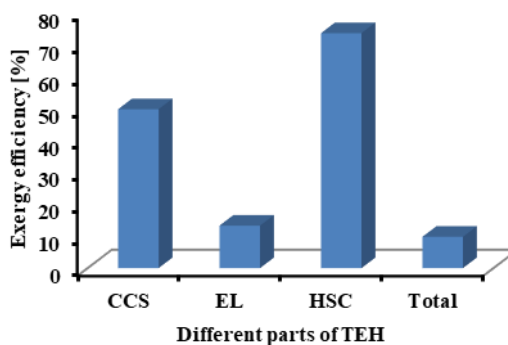
شکل ۳: سهم هر جزء از ترموالکتریک هیتر در تخریب انرژی

تشکیل دهنده‌ی آنها می‌باشد.

- به ازای یک جریان اعمالی و اختلاف دمای سطوح سرد و گرم یکسان، بیشترین راندمان انرژی برای حالت گرمایش مربوط به سرامیک سمت گرم و برای حالت سرمایش مربوط به سرامیک سمت سرد می‌باشد.
- تغییر در جریان اعمالی هم ضریب عملکرد و هم راندمان انرژی ترموالکتریک را برای هر دو حالت گرمایش و سرمایش بهینه می‌کند.
- افزایش اختلاف دمای سطوح سرد و گرم ضریب عملکرد را برای هر دو حالت ترموالکتریک هیتر و کولر افزایش می‌دهد ولی راندمان انرژی ترموالکتریک هیتر را افزایش داده و راندمان انرژی ترموالکتریک کولر را افزایش می‌دهد.



شکل ۵: راندمان انرژی قسمت‌های مختلف ترموالکتریک هیتر



شکل ۶: راندمان انرژی قسمت‌های مختلف ترموالکتریک کولر

فهرست علائم

A	سطح مقطع (m^2)
CCS	سرامیک سمت سرد
COP	ضریب عملکرد
EL	الکترو
Ex	آهنگ انرژی (W)
HCS	سرامیک سمت گرم
I	جریان (A)
K	رسانش گرمایی (W/K)
L	طول (m)
n	تعداد الکترونها
P	توان الکتریکی
Q	آهنگ گرما (W)
R	مقاومت الکتریکی (Ω)
T	دما (K)
TEC	ترموالکتریک کولر
TEH	ترموالکتریک هیتر
U	ضریب انتقال حرارت (W/m^2K)

حروف یونانی

α	ضریب سیبک (V/K)
ϵ	بازده انرژی (%)
η	بازده انرژی (%)

زیرنویس

d	تخریب شده
in	ورودی
out	خروجی

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تحلیل انرژی و انرژی ترموالکتریک به عنوان وسیله‌ای برای سرمایش و گرمایش ارائه شد. ضریب عملکرد به عنوان نتیجه‌ی تحلیل انرژی و راندمان انرژی به عنوان تابع مورد هدف تحلیل انرژی در نظر گرفته شد. تخریب انرژی و همچنین راندمان انرژی قسمت‌های مختلف ترموالکتریک هم برای حالت گرمایش و هم برای حالت سرمایش به ازای جریان اعمالی و اختلاف دمای سطوح سرد و گرم یکسان محاسبه شد. اثر تغییر جریان و اختلاف دمای سطوح سرد و گرم در ضریب عملکرد و راندمان انرژی ترموالکتریک برای هر دو حالت گرمایش و سرمایش بررسی شد. نتایج مهم حاصل از این مطالعه به صورت زیر می‌باشند:

- الکترونها ترموالکتریک عامل اصلی تخریب انرژی هم برای ترموالکتریک هیتر و هم برای ترموالکتریک کولر می‌باشند که به دلیل خاصیت نیمه‌هادی بودن مواد

- Á. G. Miranda, T. S. Chen, and C. W. Hong, "Feasibility study of a green energy powered thermoelectric chip based air conditioner for electric vehicles," *Energy*, vol. 59, pp. 633–641, Sep. 2013.
- L. Shen, F. Xiao, H. Chen, and S. Wang, "Investigation of a novel thermoelectric radiant air-conditioning system," *Energy Build.*, vol. 59, pp. 123–132, Apr. 2013.
- J. H. Meng, X. D. Wang, and W. H. Chen, "Performance investigation and design optimization of a thermoelectric generator applied in automobile exhaust waste heat recovery," *Energy Convers. Manag.*, vol. 120, pp. 71–80, Jul. 2016.
- L. Fan, G. Zhang, R. Wang, and K. Jiao, "A comprehensive and time-efficient model for determination of thermoelectric generator length and cross-section area," *Energy Convers. Manag.*, vol. 122, pp. 85–94, Aug. 2016.
- J. H. Meng, X. X. Zhang, and X. D. Wang, "Characteristics analysis and parametric study of a thermoelectric generator by considering variable material properties and heat losses," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 80, pp. 227–235, Jan. 2015.
- S. C. Kaushik, S. Manikandan, and R. Hans, "Energy and exergy analysis of thermoelectric heat pump system," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 86, pp. 843–852, Jul. 2015.
- X. C. Xuan, K. C. Ng, C. Yap, and H. T. Chua, "The maximum temperature difference and polar characteristic of two-stage thermoelectric coolers," *Cryogenics (Guildf.)*, vol. 42, no. 5, pp. 273–278, May 2002.
- [8] J. Ramousse, D. Sgorlon, G. Fraisse, and M. Perier-Muzet, "Analytical optimal design of thermoelectric heat pumps," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 82, pp. 48–56, May 2015.
- [9] A. Montecucco and A. R. Knox, "Accurate simulation of thermoelectric power generating systems," *Appl. Energy*, vol. 118, pp. 166–172, Apr. 2014.
- [10] M. Ameri, P. Ahmadi, and A. Hamidi, "Energy, exergy and exergoeconomic analysis of a steam power plant: A case study," *Int. J. Energy Res.*, vol. 33, no. 5, pp. 499–512, Apr. 2009.
- [11] D. Zhao and G. Tan, "A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 66, no. 1–2, pp. 15–24, May 2014.
- [12] S. B. Riffat, X. Ma, and R. Wilson, "Performance simulation and experimental testing of a novel thermoelectric heat pump system," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 26, no. 5–6, pp. 494–501, Apr. 2006.
- [13] M. Cosnier, G. Fraisse, and L. Luo, "An experimental and numerical study of a thermoelectric air-cooling and air-heating system," *Int. J. Refrig.*, vol. 31, no. 6, pp. 1051–1062, Sep. 2008.
- [14] D. Astrain, J. G. Vián, and M. Domínguez, "Increase of COP in the thermoelectric refrigeration by the optimization of heat dissipation," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, no. 17, pp. 2183–2200, Dec. 2003.