

# مروری بر پارامترهای کاربردی در خنک‌کن‌های ترموالکتریک

سعید کامران‌فر<sup>۱</sup>، نادر رهبر<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- استادیار، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

\* صندوق پستی: ۳۵۱۴۱-۱۷۹، پست الکترونیکی: [Rahbar@semnaniau.ac.ir](mailto:Rahbar@semnaniau.ac.ir)

## چکیده

در این مقاله مروری، به بررسی پارامترهای مؤثر بر ضریب عملکرد و ویژگی‌های دستگاه‌های خنک‌کننده ترموالکتریک به کمک تعدادی از مقاله‌های ارائه شده اخیر در این زمینه پرداخته شده است. جنبه‌های خاص مورد بررسی شامل کارهای عملی بر روی ضریب شایستگی، ظرفیت سرمایشی و برآورد ضریب کارایی می‌باشد. این مقاله با دسته‌بندی موضوعی از مقاله‌های ارائه شده اخیر آغاز می‌گردد و سپس به جزئیات پارامترهای ظرفیت سرمایشی و ضریب کارایی می‌پردازد. علاوه بر این، به ظرفیت سرمایشی برای خنک‌کن‌های ترموالکتریک تک‌مرحله‌ای و چندمرحله‌ای اشاره شده است. تعریف اختصاصی برای ضریب کارایی با ارائه فرمول کلاسیک آن آغاز شده و سپس فاکتورهای اضافی و اصلاحی به منظور در برگرفتن مقدار ضریب تامسون معرفی شده‌اند. در پایان به بررسی ضریب کارایی در کاربردهای مختلف خنک‌کننده‌های ترموالکتریک پرداخته شده است.

## کلیدواژگان

ضریب عملکرد، ترموالکتریک، ضریب شایستگی، ظرفیت سرمایشی، ضریب تامسون

## An overview of the functional parameters of thermoelectric cooling

Saeed Kamranifar<sup>1</sup>, Nader Rahbar<sup>2\*</sup>

1- Graduate Student, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

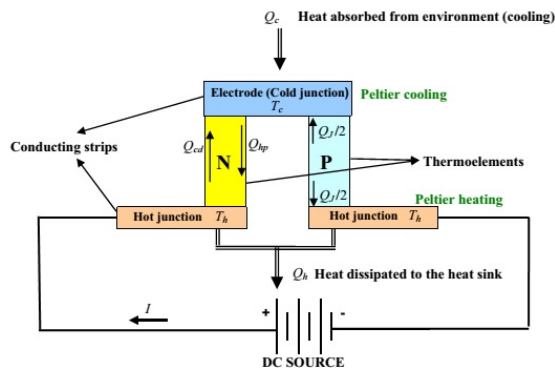
\* P.O.B. 35141-179 Semnan, Iran, [Rahbar@semnaniau.ac.ir](mailto:Rahbar@semnaniau.ac.ir) Abstract

In this paper, investigation the parameters that affect the coefficient of performance (COP) and features of thermoelectric cooling devices to help a number of recent research in this field has been provided. Specific aspects included practical considerations on figure of merit, cooling capacity and coefficient of performance respectively. This paper starts by thematic categories from recent articles, and then describes in detail the parameters of cooling capacity and coefficient of performance. In addition, the cooling capacity for single-stage and multi-stage thermoelectric cooler is mentioned. Concerning the COP, its dedicated expressions are constructed starting from the classical formulation and introducing additional factors or modifications in order to take into account the Thomson effect. Finally, has been investigated the coefficient of performance in different applications of thermoelectric cooling.

### Keywords

Coefficient of performance, Thermoelectric, Figure of merit, Cooling capacity, Thomson effect

درحالی‌که الکترون‌ها به سطح انرژی پایین در نیمه‌هادی نوع P بازمی‌گردند (اثر پلتیر) این گرما در چاه حرارتی ۱ دفع می‌گردد. در صورتی‌که اختلاف دما بین اتصال سرد و گرم در عناصر N و P وجود داشته باشد، ولتاژی (ولتاژ سیبک) به صورت مستقیم متناسب با اختلاف دما تولید می‌شود [۴، ۵].



شکل ۱ طرحی از یخچال ترموالکتریک [۳]

## ۱- مقدمه

تجهیزات ترموالکتریکی که در یخچال‌ها و یا خنک‌کن‌های ترموالکتریک استفاده می‌شوند بر پایه اثر پلتیر جهت تبدیل انرژی الکتریکی به گرادیان دما می‌باشند [۱]. یک خنک‌کن ترموالکتریک معمولی، ترکیبی از تعدادی نیمه‌هادی از نوع P و N بوده که به لحاظ الکتریکی به صورت سری توسط اتصالات فلزی و به لحاظ گرمایی به صورت موازی به یکدیگر متصل شده‌اند [۲]. چنانچه ولتاژ ضعیفی از یک منبع DC به خنک‌کن ترموالکتریک اعمال گردد، گرما از یک‌سوی خنک‌کن ترموالکتریک به سمت دیگر آن منتقل می‌شود؛ بنابراین یک سطح از خنک‌کن ترموالکتریک سرد و سطح دیگر آن گرم خواهد شد.

Error! Reference source not found.

ترموالکتریک را در یک یخچال ترموالکتریک نشان می‌دهد که در آن جریان الکتریکی از سمت N به سوی P در جریان می‌باشد [۳]. دمای T<sub>c</sub> (سمت اتصال سرد) کاهش می‌یابد و در یک دمای پایین گرما از محیط به طرف اتصال سرد منتقل شده است. این فرآیند در زمان انتقال الکترون‌ها از سطح انرژی پایین در P به سطح انرژی بالاتر در N رخ می‌دهد. در همان زمان الکترون‌های حامل، گرمای جذب‌شده را به سمت اتصال گرم منتقل می‌کنند.

<sup>1</sup> Heat sink

خانگی ترموالکتریک در مقایسه با فن‌آوری تراکمی تبخیری رایج اشاره گردیده است. طی مطالعه دیگری توسط وین و آسترین<sup>۱۱</sup> [۱۵] در نتیجه نگهداری مواد غذایی در دمای ۵C مقدار COP برابر با ۰/۴۵ حاصل گردید. ساربو و سبارچیویسی<sup>۱۱</sup> [۱۶] بررسی گسترده‌ای بر روی یخچال و سیستم‌های خنک‌کننده خورشیدی جهت تأمین انرژی خنک‌سازی انجام گرفت. نتیجه‌گیری نویسندگان بدین ترتیب بود که یک سیستم خشک‌کن مایع (مشکل از یک تهویه و یک مولد) منجر به COP بالاتری نسبت به یک سیستم خشک‌کن جامد (ساخته‌شده توسط ذوب لایه نازکی از مواد خشک‌کن مانند ژل سیلیکا) می‌شود. علاوه بر این اشاره گردید که سیستم‌های خنک‌کننده هیبریدی خورشیدی شامل ظرفیت بالاتر و COP بهتری هستند. الشیخ<sup>۱۲</sup> و همکارانش [۱۷] در مورد انرژی تجدید پذیر ترموالکتریک بحث و بررسی انجام دادند که به‌طور عمده شامل پارامترهای اساسی که در راندمان ترموالکتریک تأثیرگذارند (عدد بی‌بعد ZT)، کاربردهای تجهیزات ترموالکتریک به‌عنوان خنک‌کننده (خنک‌کننده تجهیزات الکترونیکی، یخچال‌ها و تهویه مطبوع) و تجهیزات ترموالکتریک جهت تولید برق می‌شود. ژائو و تان<sup>۱۳</sup> [۱۸] مروری بر کاربردهای خنک‌کننده‌های ترموالکتریک برای یخچال، خنک کاری تجهیزات الکترونیکی، خنک کاری اتومبیل، تهویه مطبوع و ماژول‌های ترموالکتریک- فتوولتائیک هیبریدی داشتند.

## ۲-۲- مروری بر پارامترهای ترموالکتریک

با توجه به پیشرفت مواد جدید برای ماژول‌های ترموالکتریک، ریفات و ما<sup>۱۴</sup> [۳] در مورد بهبود مقدار COP سیستم‌های خنک‌کننده ترموالکتریک، بهینه‌سازی طراحی سیستم ماژول و توسعه راندمان انتقال حرارت فعالیت نمودند. تحقیق آن‌ها نشان داد که اندازه ترموالمنت بر مقدار COP ماژول ترموالکتریک تأثیرگذار بوده و مقدار COP بالا برای یک ترموالمنت بزرگ قابل حصول است. این نشان می‌دهد که کاهش مقاومت تماسی برای بهبود هر دو مقدار COP و ظرفیت خنک‌کنندگی الزامی است. علاوه بر این جنبه‌های طراحی توسط روش‌های جدید مشخصی جهت طراحی سیستم‌های خنک‌کننده ترموالکتریک با کارایی بالا مورد بحث قرار گرفته است. این روش‌ها شامل استفاده از معادلات جریان برای آنتروپی بی‌بعد جهت مشخص نمودن پارامترهای متناظر با حداکثر مقدار COP، مشخصات بازگشت‌ناپذیری داخلی و خارجی از طریق یک پارامتر خاص و همچنین استفاده از ماژول‌های ترموالکتریک چندمرحله‌ای که منجر به بهبود مقدار COP در اختلاف دماهای زیاد می‌گردد. موضوعات ارائه‌شده در مرجع [۱۷] به یادآوری مفاهیم اساسی و بررسی تعدادی از تحولات اخیر با اشاره به پیشرفت‌های تجربی و نظری در پارامترهای مشخص یخچال ترموالکتریک می‌پردازد.

## ۳- تعاریف عمومی

### ۳-۱- ضریب شایستگی ترموالکتریک

اگر یک ماده خنک‌کننده ترموالکتریک خوبی باشد، توسط ضریب شایستگی<sup>۱۵</sup> ترموالکتریک (Z) می‌توان میزان آن را نشان داد. این ضریب به

کیفیت خنک‌کن ترموالکتریکی به پارامترهایی از جمله جریان الکتریکی، دمای طرف‌های سرد و گرم، مقاومت تماسی الکتریکی بین طرف سرد و سطح دستگاه، هدایت گرمایی و الکتریکی و مقاومت گرمایی چاه حرارتی بر روی طرف گرم خنک‌کن ترموالکتریکی بستگی دارد [۱۶]. تعداد ترموالمنت‌ها در یک ماژول ترموالکتریک به ظرفیت سرمایشی و جریان الکتریکی ماکزیمم موردنیاز بستگی دارد [۱۷]. ویژگی‌ها و کارایی یخچال ترموالکتریک توسط پارامترهایی نظیر ضریب شایستگی<sup>۱</sup>، ظرفیت سرمایشی<sup>۲</sup> و ضریب کارایی<sup>۳</sup> تعریف می‌گردد [۱۸].

## ۲- بررسی اجمالی مقالات اخیر

### ۲-۱- مروری بر کاربردهای ترموالکتریک

در این قسمت مروری کلی از کاربردهای مختلف ترموالکتریک صورت گرفته است. سیمونز و چو<sup>۴</sup> [۹] در مقاله‌ای به‌مرور خنک‌کننده‌های ترموالکتریک و کاربرد آن‌ها جهت خنک کردن تجهیزات الکترونیکی پرداخته‌اند. آن‌ها به پیشرفت‌های جدیدی دست‌یافتند و به این نتیجه رسیدند که خنک‌کن‌های ترموالکتریک جهت کاربردهای خنک کاری با کارایی بالا برای تجهیزات الکترونیکی مناسب نبوده که این ناشی از پارامترهایی از مواد ترموالکتریک مانند ضریب شایستگی (Z) و ضریب کارایی (COP) می‌شوند که به‌اندازه کافی ایده آل نیستند. ریفات و ما<sup>۵</sup> [۱۰] به دستگاه‌های ترموالکتریک و کاربردهای آن‌ها پرداختند. آن‌ها اهمیت خنک‌کننده‌های ترموالکتریک را در کاربردهای قابل‌حمل (مانند جعبه‌های خنک‌کننده) یا مواردی که هزینه انرژی موضوعیت اصلی ندارد (مانند کاربردهای نظامی) تشریح نمودند. از این گذشته دستگاه‌های ترموالکتریک علی‌رغم مقدار کم COP، از آنجاکه تأثیرات زیست‌محیطی مؤثری دارد، جهت مصارف یخچال‌های خانگی موردتوجه قرار گرفته است. شی<sup>۶</sup> [۱۱] در مورد یخچال ترموالکتریک که توسط سلول‌های خورشیدی کار می‌کنند تحقیق و بررسی نمود. این تحقیق بیشتر بر روی مقدار راندمان نسبی کم به‌دست‌آمده برای کل سیستم (کمتر از ۱/۶) متمرکز شده است.

تاسو و لويس<sup>۷</sup> [۱۲] به‌طور خاص به ویژگی‌ها و COP یخچال‌های خانگی با ظرفیت بالا و یخچال فریزرها پرداختند. اخیراً یک مقاله مروری توسط راوات و چاتوپاد<sup>۸</sup> [۱۳] به طراحی و توسعه یخچال ترموالکتریک جدید و سیستم‌های تهویه مطبوع پرداخت که این سیستم‌های خنک‌کننده ترموالکتریک نسبت به سیستم‌های خنک‌کننده رایج مقرون به‌صرفه‌تر و دارای امکانات بیشتری هستند. نویسندگان این مقاله یک یخچال ترموالکتریک را طراحی نموده و ساخت آن را انجام داده‌اند که این یخچال ظرفیتی به حجم ۱ لیتر و COP به مقدار ۰/۱ دارد. این سیستم خنک‌کننده ترموالکتریک راندمانی در حدود ۵٪ تا ۱۵٪ دارد که در مقایسه با راندمان سیستم‌های خنک‌کننده تراکمی رایج که در حدود ۴۰٪ تا ۶۰٪ می‌باشند، کمتر است.

پیشرفت‌هایی در کاربردهای خانگی طی مقاله‌ای توسط بانسال و وینیاردا<sup>۹</sup> [۱۴] مرور شده است که در آن دوباره به کارایی بسیار پایین یخچال

<sup>1</sup> Figure of merit

<sup>2</sup> Cooling capacity

<sup>3</sup> Coefficient of performance

<sup>4</sup> Simons RE, Chu RC

<sup>5</sup> Riffat SB, Ma X

<sup>6</sup> Xi H,

<sup>7</sup> Tassou SA, Lewis J

<sup>8</sup> Rawat M, Chattopadhyay H

<sup>9</sup> Bansal P, Vineyard E

<sup>10</sup> Vian J, Astrain D

<sup>11</sup> Sarbu I, Sebarchievici C

<sup>12</sup> Elsheikh MH

<sup>13</sup> Zhao D, Tan G

<sup>14</sup> Riffat SB, Ma X

<sup>15</sup> Figure of merit

۴-۱- ملاحظات عملی بر روی ضریب شایستگی بی‌بعد

با توجه به رابطه (۱)، ضریب شایستگی بدون بعد به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$ZT = \frac{\alpha^2}{\rho k} = \frac{\alpha^2 \sigma T}{k} \quad (۶)$$

که در آن  $k = k_p + k_e$  میزان هدایت گرمایی کلی که شامل قسمت فونون<sup>۳</sup> ( $k_p$ ) و قسمت الکترونیکی ( $k_e$ ) می‌باشد. همچنین پارامتر  $\alpha^2 \sigma$  میزان ضریب توان الکتریکی را بیان می‌کند که وابسته به ضریب سیبک ( $\alpha$ ) و هدایت الکتریکی ( $\sigma$ ) است [۲۱].

در عمل،  $ZT$  میزان راندمان عناصر  $N$  و  $P$  که یک ترموالمنت را تشکیل می‌دهند را نشان می‌دهد. با داشتن مواد ترموالکتریک با ضریب شایستگی بالا راحت‌تر می‌توان به توان خنک‌کنندگی بالاتر و یا افت دمای بیشتری دست‌یافت.

مقدار ضریب شایستگی برای یک ماژول ترموالکتریک سرمایه‌گذاری/گرمایشی در حدود یک و برای کاربردهای تهویه مطبوع تقریباً ۰/۲۵ است که دارای کارایی مشابه یک سیستم رایج با سیال عامل R-134A، می‌باشد [۲۲].

جو<sup>۴</sup> و گوشال<sup>۵</sup> [۲۳] تحلیلی نظری به منظور توصیف رفتار میکرو یخچال‌های ترموالکتریک ارائه نمودند که در آن پارامترهای وابسته شامل مقاومت‌های تماسی الکتریکی و گرمایی، ضریب سیبک و ضریب هدایت چاه حرارتی می‌باشند. مطالعه آن‌ها در زمینه اینکه آیا مقاومت گرمایی اثرات مفید و یا مضر بر روی کارایی یخچال دارد انجام گرفته است. آن‌ها تعریف متداول در زمینه ضریب شایستگی را با توجه به دمای حدقلی که در اتصال سرد می‌باشد، به صورت زیر تغییر داده و تعریف جدیدی ارائه نمودند:

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{k} \frac{1 + COP}{1 + 2COP} T \quad (۷)$$

۴-۲- ضریب شایستگی و مواد

پژوهش‌های بسیاری درباره ضریب شایستگی در زمینه علم مواد انجام گرفته است. ضریب شایستگی یک ماده به ساختار الکترونی آن بستگی دارد. برای بهینه‌سازی مواد جهت کاربردهای ترموالکتریک، راهکارهایی کلیدی برای به حداکثر رساندن ضریب شایستگی و بهینه نمودن تعدادی از پارامترهای مواد وجود دارد. به طور خاص، حداکثر مقدار  $ZT$  زمانی حاصل می‌گردد که ضریب توان  $\alpha^2 \sigma$  حداکثر و هدایت گرمایی  $k$  حداقل گردد [۲۴].

ریفات<sup>۶</sup> و ما<sup>۷</sup> [۳] در مقاله‌ای مروری به نکات زیر اشاره می‌کنند:

- بیسموت تلورید ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) که پایین‌ترین دما را در بین مواد ترموالکتریک دارا است، حداکثر مقدار  $ZT=1$  را دارد.
- چنانچه مقدار  $ZT$  تا ۲ تا ۳ افزایش یابد، دستگاه خنک‌کننده ترموالکتریک می‌تواند با سیستم خنک‌کننده تراکمی تبخیری رقابت نماید.

سه پارامتر از ماده بستگی دارد: مقاومت الکتریکی  $\rho$  (یا هدایت الکتریکی  $\sigma=1/\rho$ )، ضریب سیبک  $\alpha$  و هدایت گرمایی  $k$  بین طرف سرد و گرم:

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\rho k} = \frac{\alpha^2 \sigma}{k} \quad (۱)$$

با توجه به دمای مطلق  $T$  (که نشان دهنده میانگین درجه حرارت بین طرف سرد و گرم ماژول ترموالکتریک است) پارامتری که به صورت گسترده استفاده شده، پارامتر بدون بعد  $ZT$  می‌باشد [۱۹].  
تعریف دیگری از  $Z$  برای مقاومت الکتریکی  $R$  در حالت سری و هدایت گرمایی  $k$  در حالت موازی در ترموالمنت به صورت زیر می‌باشد: [۱۹]

$$Z = \frac{\alpha^2}{Rk} \quad (۲)$$

۳-۲- ظرفیت سرمایه‌گذاری

ظرفیت سرمایه‌گذاری  $Q_c$  از موازنه انرژی در طرف سرد یخچال ترموالکتریک حاصل می‌گردد:

$$Q_c = \alpha I T_c - k \Delta T - 1/2 R_e I^2 = Q_g - Q_{a-1/2} Q_g \quad (۳)$$

$Q_g$  میزان پمپاژ حرارتی در محل اتصال سرد می‌باشد که بستگی به ضریب سیبک ( $\alpha$ )، جریان ورودی  $I$  و دمای اتصال سرد  $T_c$  دارد.  
 $Q_a$  میزان جریان گرمایی است که در اثر اتصال طرف سرد و گرم جاری شده است و به هدایت گرمایی ( $k$ ) به صورت موازی و اختلاف دمای طرف گرم و سرد ( $\Delta T$ ) بستگی دارد.  
 $Q_g$  مقدار حرارتی است که در اثر جریان الکتریکی تولید شده است و وابسته به مقاومت حرارتی  $R_e$  ترموالمنت در حالت سری و جریان ورودی  $I$  می‌باشد.

۳-۲- ضریب کارایی

ضریب کارایی<sup>۲</sup>  $COP$  نسبت ظرفیت سرمایه‌گذاری  $Q_c$  به توان الکتریکی مصرفی  $P_e$  می‌باشد:

$$COP = \frac{Q_c}{P_e} \quad (۴)$$

که توان الکتریکی مصرفی یخچال ترموالکتریک به صورت زیر حاصل می‌گردد:

$$P_e = R_e I^2 + \alpha I \Delta T \quad (۵)$$

توان الکتریکی مصرفی  $P_e$  در ترموالمنت ناشی از گرمای مقاومت الکتریکی به اضافه کاری است که سبب به جریان افتادن الکترونیسته در ترموالمنت به دلیل تغییر دما رخ می‌دهد، می‌باشد [۲۰].

۴- ضریب شایستگی ترموالکتریک

<sup>۳</sup> Phonon

<sup>۴</sup> Ju YS

<sup>۵</sup> Ghoshal U

<sup>۶</sup> Riffat SB

<sup>۷</sup> Ma XL

<sup>۱</sup> Seebeck

<sup>۲</sup> Coefficient of performance

الکترونیکی را توسعه دادند. با توجه به کاربرد آن‌ها، دستگاه آب‌سردکن با خنک‌کن ترموالکتریک، هنگامی که بار حرارتی کمتر از مقدار حداکثر (در این مورد ۵۷ وات) باشد، کارایی خنک‌کنندگی افزایش می‌یابد. گوپتا<sup>۷</sup> و همکاران [۳۲] مشخص نمودند که با وجود ضریب سیبک بالا، هنگامی که ضریب شایستگی افزایش می‌یابد، ظرفیت سرمایشی خود می‌تواند یک مساله باشد. آن‌ها جهت افزایش ظرفیت سرمایشی خنک‌کن ترموالکتریک، استفاده از ماژول خنک‌کن ترموالکتریک بسیار نازک را پیشنهاد دادند.

**۵-۲- ظرفیت سرمایشی برای خنک‌کن‌های ترموالکتریک چندمرحله‌ای**  
 هنگامی که خنک‌کن ترموالکتریک تک‌مرحله‌ای قادر به کار با اختلاف دمای موردنیاز برای یک کاربرد خاص نمی‌باشد، می‌توان با استفاده از پیکر بندی چندمرحله‌ای اختلاف دما را تا حد موردنظر افزایش داد [۷، ۳۳، ۳۴]. مطالعات انجام‌گرفته بر روی ظرفیت سرمایشی میکرو خنک‌کن‌های ترموالکتریک یک و دومرحله‌ای بدون در نظر گرفتن اثر تامسون که در مرجع [۳۵] به آن اشاره شده است، نشان داد که روش تولید مدار مجتمع و میکرو الکترومکانیک جهت توسعه خنک‌کننده‌های ترموالکتریک موردنیاز است. به‌منظور کاهش اثر حرارتی ژول و افزایش ظرفیت سرمایشی یک خنک‌کن ترموالکتریک (که سبب بهبود کارایی خنک‌کننده می‌شود)، حرارت تامسون مثبت در نظر گرفته می‌شود. چنگ<sup>۸</sup> و شی<sup>۹</sup> با بهینه‌سازی پارامترهایی مانند جریان الکتریکی اعمال‌شده و تعداد جفت‌های ترموالمنت هر مرحله توانستند که حداکثر مقدار  $Q_c$  و COP را به دست آورند. رویکرد آن‌ها مقایسه پارامترهای بهینه به‌دست‌آمده آر یک روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک با پارامترهای حاصل از روش تحلیلی می‌باشد.

یو<sup>۱۰</sup> و وانگ<sup>۱۱</sup> [۳۷] بهینه‌سازی حداکثر مقدار COP ماژول‌های خنک‌کن ترموالکتریک آبشاری را با توجه به حداکثر مقدار ظرفیت سرمایشی انجام دادند. محاسبات آن‌ها نشان می‌دهد که واحد آبشاری با سه مرحله، سبب افزایش حدود ۳۵/۸٪ ظرفیت سرمایشی در مقایسه با ماژول ترموالکتریک تک‌مرحله‌ای می‌شود. آن‌ها در آن شرایط، افزایش ظرفیت سرمایشی را توسط افزایش جریان الکتریکی اعمال‌شده به دست آوردند.

همچنین، گلدسمیت<sup>۱۲</sup> [۷] اشاره دارد که در یک خنک‌کن چندمرحله‌ای که هر مرحله آن از منبع گرمایی تا چاه حرارتی در نظر گرفته‌شده است، می‌بایستی که ظرفیت سرمایشی بیشتری نسبت به مرحله قبل داشته باشد. درواقع، گرمای استخراج‌شده از مرحله قبل و گرمای ژول تولیدی در آن مرحله را خارج می‌کند.

#### ۶- ارزیابی ضریب عملکرد

##### ۶-۱- تعریف کلاسیک ضریب عملکرد

بیانی کلاسیک از COP توسط رابطه **Error! Reference source not found.** ارائه شده است. به‌طورکلی مقادیر COP به دمای دو طرف ترموالکتریک وابسته است. مقدار COP در سیکل کارنو (سیکل ایده آل) وابسته به دو دمای منبع سرد و گرم می‌باشد که عبارت است از:

- چنانچه مقدار ZT تا ۶ افزایش یابد، دستگاه ترموالکتریک قادر به خنک‌سازی دمای اتاق می‌باشد.
- دستگاه‌های ترموالکتریک رایج:
- هنگامی که ZT حدود ۱ می‌باشد، ناکارآمد هستند.
- هنگامی که ZT=2 است، قادر به بازیابی حرارت اتلافی می‌باشند.
- هنگامی که ZT=4/5 است، قادر به رقابت با یخچال هستند.
- مواد ترموالکتریک با ضریب شایستگی بالا ( $ZT \geq 1$ ) را می‌توان به‌عنوان مواد حجیم<sup>۱</sup> و مواد با ساختار نانو<sup>۲</sup> دسته‌بندی نمود. این مواد دارای خواص الکتریکی مناسب و هدایت گرمایی پایینی می‌باشند [۲۶]. به‌منظور بهبود ضریب شایستگی، مراجع [۲۷] و [۲۸] به برخی از پژوهش‌های انجام‌گرفته بر روی ابر شبکه‌ها<sup>۳</sup> و آلیاژهای مواد مختلف اشاره می‌کنند. چودری<sup>۴</sup> و همکاران [۲۹] با ترکیب ماده ترموالکتریک با ضریب شایستگی بالا ( $ZT \geq 2$ ) مقاومت تماسی الکتریکی پایین موفق شدند که دمای یک تراشه آزمایش با نقطه داغ ۱۳۰۰ وات بر سانتی‌متر مربع را حدود ۷/۳ درجه سانتی‌گراد پایه کاهش دهند. در سال‌های اخیر پیشرفت‌هایی در زمینه ضریب شایستگی حاصل آمده است (همانند  $ZT=2/4$  در لایه‌نازکی از  $Sb_2Te_3$  و  $Bi_2Te_3$ ) [۳۰]. ژنگ<sup>۵</sup> [۲۴] با مقایسه خواص ترموالکتریکی فلزات، نیمه‌هادی‌ها و عایق‌ها در دمای ۳۰۰ درجه کلوین به این نتیجه رسید که عایق‌ها کوچک‌ترین ضریب شایستگی ( $ZT=5 \times 10^{-17} k^{-1}$ ) را در مقایسه با فلزات ( $ZT=3 \times 10^{-6} k^{-1}$ ) و نیمه‌هادی‌ها ( $ZT=2 \times 10^{-3} k^{-1}$ ) دارند.

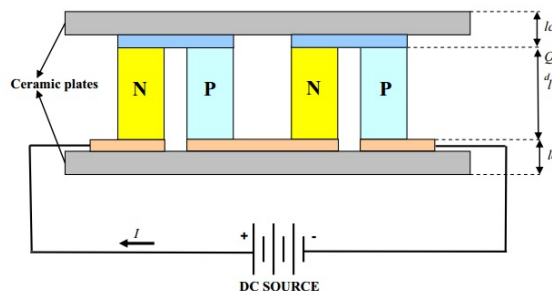
#### ۵- ویژگی‌های سرمایشی ترموالکتریک

##### ۵-۱- ظرفیت سرمایشی برای خنک‌کن ترموالکتریک واحد

ظرفیت سرمایشی بر واحد سطح (q)، با توجه به مقاومت‌های تماسی الکتریکی و گرمایی به طول ترموالمنت (L) ماژول بستگی دارد [۲، ۱۹].

$$q = \frac{Q_c}{S} = \frac{k(\Delta T_{max} - \Delta T)}{1 + 2xy + (x^2y/COP)} \quad (8)$$

که  $y$  ضخامت لایه تماسی،  $x$  نسبت هدایت گرمایی ترموالمنت به هدایت گرمایی لایه تماسی و  $\Delta T_{max} = ZT_c^2 / 2$  حداکثر اختلاف دمای ماژول هنگامی که ظرفیت سرمایشی صفر است، می‌باشد.



شکل ۲ نمای کلی از ماژول ترموالکتریک با علائمی از طول [۲]

هوانگ<sup>۶</sup> و همکاران [۳۱] مدلی جدید جهت پیش‌بینی ظرفیت سرمایشی توسط تحلیل کارایی دستگاه آب‌سردکن ترموالکتریک برای تجهیزات

<sup>7</sup> Gupta  
<sup>8</sup> Cheng YH  
<sup>9</sup> Shih C  
<sup>10</sup> Yu J  
<sup>11</sup> Wang B  
<sup>12</sup> Goldsmid JH

<sup>1</sup> Bulk  
<sup>2</sup> Nanostructure  
<sup>3</sup> Super\_lattice  
<sup>4</sup> Chowdhury  
<sup>5</sup> Zheng  
<sup>6</sup> Huang

۶-۲- اثر تامسون

اثر تامسون با جذب یا تولید مقداری گرما در یک هادی همگن که در آن جریان الکتریکی و اختلاف دما داشته باشیم، حاصل می‌گردد. جذب گرما هنگامی صورت می‌گیرد که جهت جریان از یک‌سو در هادی برقرار باشد و با معکوس شدن جهت جریان تولید گرما حاصل می‌شود. هنگامی که طرف گرم ولتاژ بالا و طرف سرد ولتاژ پایینی داشته باشد اثر تامسون مثبت و چنانچه طرف گرم ولتاژ پایین و طرف سرد ولتاژ بالایی داشته باشد اثر تامسون منفی خواهد بود. برخی فلزات ضریب تامسون منفی دارند. (مانند: Co, Bi, Fe, Hg, ... [۳۸])

پارامتر مشخص‌کننده ضریب تامسون  $\tau$  می‌باشد که بر طبق شار حرارتی تولیدشده (Q)، متناسب با گرادیان دمایی ( $\Delta T$ ) و جریان الکتریکی (I) که از هادی عبور می‌کند، می‌باشد: [۳۸]

$$Q = -\tau I \Delta T \quad (12)$$

رو<sup>۱</sup> [۵] بیانی از COP بدون در نظر گرفتن اثر تامسون و با فرض اینکه خواص مواد وابسته به دما نمی‌باشند ارائه نموده است. اثر تامسون برای عناصر ترموالکتریک، طی یک مطالعه تحلیلی ساده در نظر گرفته شده است که در نتیجه تأثیر آن بر COP حدود ۲٪ بوده است [۳۸]. هوانگ<sup>۲</sup> و همکاران [۳۹] تأثیر اثر تامسون را توسط شبیه‌سازی توزیع دمایی و COP برای دستگاه‌ها ترموالکتریک یک مرحله‌ای با فرض مشخص بودن دماهای طرف گرم و سرد تشریح نموده‌اند. در مرجع [۳۹]، اثر تامسون با کاهش گرمای ژول و فوریه بر روس سطح سرد همراه می‌گردد. طی بررسی تحلیلی که بر روی توزیع دما و توان سرمایشی انجام شد، ملاحظه گردید که هر دو آن‌ها توسط اثر تامسون تحت تأثیر قرار می‌گیرند. هوانگ و همکاران [۴۰] مشخص کرده‌اند همان‌طور که کارایی خنک‌کن ترموالکتریک توسط افزایش ضریب شایستگی مواد ترموالکتریک بهبود می‌یابد به همان نسبت با مقادیر اثر تامسون نیز می‌توان این کار را انجام داد. فریس<sup>۳</sup> و همکاران [۴۱] بخشی از اثر تامسون را به‌عنوان عبارتی در معادلات ظرفیت سرمایشی و توان الکتریکی اضافه نموده‌اند که برای شرایطی که دما تابعی از ضریب سیبک باشد دارای اعتبار است.

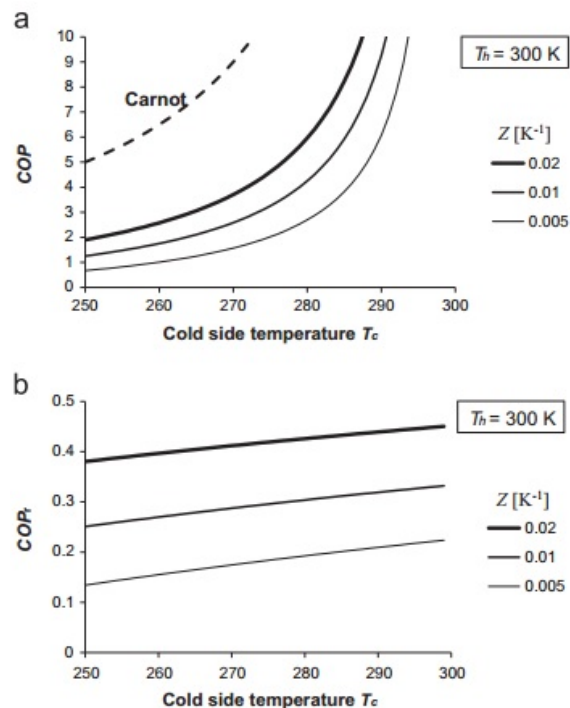
در مرجع [۴۲] وابستگی COP به اثر تامسون توسط ارائه یک نمودار دوبعدی با ارجاع به شار آنتروپی بی‌بعد (متناسب با توان خروجی یا ظرفیت سرمایشی) نشان داده شده است. برای ضریب تامسون مثبت، اثر تامسون سبب کاهش حداکثر مقدار COP در حدود ۷/۱٪ و به همان نسبت باعث کاهش ظرفیت سرمایشی حدود ۷٪ می‌گردد. به‌طور عکس، با ضریب تامسون منفی هر دو مقدار COP و ظرفیت سرمایشی می‌توانند بهبود یابند [۴۳]. یاماشیتا<sup>۴</sup> [۴۴] اعلام نموده است که برخی از خواص مواد تابعی از دما نمی‌باشند و تأثیر عمده خواص وابسته به دما در طراحی کارایی بالای دستگاه خنک‌کن ترموالکتریک است. چرکز<sup>۵</sup> [۴۵] به برخی موارد جهت بهبود COP تهویه مطبوع ترموالکتریک با کارکردی ترکیبی از اثرات ترموالکتریک و اثر ژول تامسون اشاره کرده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که COP در مقایسه با سیستم ترموالکتریک معمولی (ترموالمنت های خنک‌کن غیرقابل

$$COP_c = \frac{T_c}{T_h - T_c} \quad (9)$$

بیان کلاسیک COP، مربوط به حداکثر مقدار COP می‌گردد [۳] که برای اندازه‌های مختلف ترموالکتریک مورد استفاده قرار می‌گیرد. می‌توان با معرفی یک پارامتر نسبی جدید به نام  $COP_r$  که شامل ضریب شایستگی ماژول Z و دمای متوسط  $\bar{T} = ((T_h + T_c)/2)$  می‌شود، عبارت زیر را تعریف نمود: [۳۷، ۱۹]

$$COP = COP_c COP_r \quad (10)$$

$$COP_r = \left( \frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - (T_h/T_c)}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} + 1} \right) \quad (11)$$



شکل ۳ مقادیر COP و COP<sub>r</sub> برای ضرایب شایستگی ترموالکتریک مختلف با دمای [۳۷] T<sub>h</sub>=300 k

شکل ۳. Error! Reference source not found. مقادیر COP، COP<sub>r</sub> و کارنو را برای یک دستگاه ترموالکتریک که در دمای طرف گرم ثابت T<sub>h</sub>=300 k به‌صورت تابعی از دمای طرف سرد T<sub>c</sub> کار می‌کند، با استفاده از مقادیر مختلف Z را نمایش می‌دهد. پارامترهای تأثیرگذار در بیان کلاسیک COP به‌صورت ساده شده در زیر آمده است:

- اثر تامسون
- وابستگی ویژگی‌های مواد به دما
- اثرات مقاومت تماسی الکتریکی
- اثرات مقاومت گرمایی

<sup>1</sup> Rowe DM  
<sup>2</sup> Huang M  
<sup>3</sup> Fraisse G  
<sup>4</sup> Yamashita O  
<sup>5</sup> Cherkez R

جهت کاربردهای بسیار کوچک، شبیه‌سازی انجام گرفته طی مقاله‌ای توسط لی و کیم<sup>۲</sup> [۴۹] مربوط به ارزیابی کارایی میکرو خنک‌کن ترموالکتریک (با ضخامت ۵ تا ۲۰ μm) با مدل سه‌بعدی می‌باشد. افزایش COP با کاهش اختلاف دما و افزایش ضخامت به‌دست‌آمده و مقدار COP ماکزیمم در جریانی کمتر از یک متناظر با نرخ سرمایش ماکزیمم حاصل شده است. هنگامی که اختلاف دما افزایش می‌یابد، جریان در COP ماکزیمم نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، کارایی خنک‌کننده به ضخامت عنصر ترموالکتریک بستگی دارد. چنانچه ضخامت افزایش یابد، مقدار COP ماکزیمم نیز افزایش و جریان کاهش می‌یابد. بلعکس با کاهش ضخامت مقدار COP نسبتاً کم می‌شود.

یکی از کاربردهای خنک‌کن ترموالکتریک جهت خنک‌سازی تجهیزات الکترونیکی توسط چین و هوانگ<sup>۳</sup> [۶] ارائه گردیده است، که در آن به این مطلب اشاره شده که ظرفیت سرمایشی و COP در اثر افزایش دمای طرف سرد و کاهش اختلاف دما بین طرف سرد و گرم خنک‌کن ترموالکتریک افزایش می‌یابد. امکان دستیابی به مقادیر بالا از ظرفیت سرمایشی توسط دمای طرف سرد و مقاومت گرمایی در طرف گرم محدود شده است. در این مورد، چاه‌های حرارتی میکرو کانال جهت دستیابی به ظرفیت سرمایشی ماکزیمم خنک‌کن ترموالکتریک طراحی شده است.

برای کاربردهای خانگی، بانسال<sup>۴</sup> و مارتین<sup>۵</sup> [۴۸] به بررسی کارایی خنک‌کنندگی سیستم تراکمی تبخیری، سیستم یخچال ترموالکتریک و سیستم یخچال جذبی با توجه به اختلاف دمای ۱۱/۶ درجه سانتی‌گراد (که در این مورد دمای یخچال ۵ درجه سانتی‌گراد و دمای محیط ۱۶/۶ درجه سانتی‌گراد بوده است) پرداخته‌اند. آن‌ها بهترین مقادیر COP برای سیستم تراکمی تبخیری را ۲/۵۹، سیستم یخچال ترموالکتریک ۰/۶۹ و سیستم یخچال جذبی را ۰/۴۷ به دست آورده‌اند. جهت افزایش کارایی سیستم تراکمی تبخیری رایج، یانگ<sup>۶</sup> و همکاران [۵۰] استفاده از سیستم ترموالکتریک هیبریدی با خنک‌کنندگی مایع را پیشنهاد دادند.

نمونه‌های یخچال ترموالکتریک با مبدل‌های حرارتی مختلف که در مرجع [۴] مورد تحلیل قرار گرفته‌اند (نمونه اولی با انتقال حرارت جابجایی اجباری، نمونه دوم با انتقال حرارت جابجایی اجباری در طرف سرد و گردش مایع در طرف گرم، نمونه سوم با گردش مایع)، با اختلاف دمایی از ۹ تا ۱۸ کلون کار می‌کنند. مقادیر COP مختلفی که در **Error! Reference source not found.** نمایش داده شده مربوط به نمونه اولی با توان ورودی مختلف، نمونه دومی با توان ورودی اسمی و نمونه سومی با روش تجربی می‌باشد.

تعدادی از یخچال‌های هیبریدی (ترکیبی از عناصر ترموالکتریک و یخچال‌های تراکمی تبخیری) در مراجع [۱۵] و [۵۱] مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند. ایده اصلی این یخچال‌ها از مزایای COP بالای یخچال‌های تراکمی تبخیری و کنترل دمایی تجهیزات ترموالکتریکی گرفته شده است. انواع مختلف آن‌ها در نحوه قرارگیری تجهیزات ترموالکتریک در داخل محفظه یخچال به‌منظور خنک‌سازی محفظه در صفر درجه سانتی‌گراد متفاوت بوده است. طرف سرد ترموالمنت در داخل محفظه یخچال قرار گرفته است. طرف گرم آن، به قسمت خارجی یخچال متصل شده است.

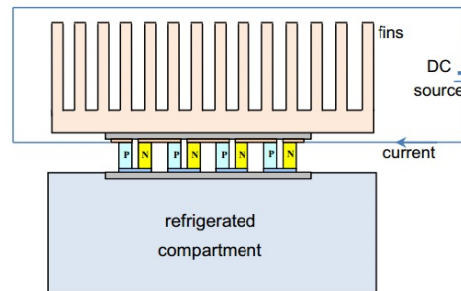
نفوذ) ۶۰-۷۰٪ و در مقایسه با ترموالمنت‌های نفوذپذیر با اثر ژول تامسون کوچک ۵-۸٪ افزایش می‌یابد.

چن<sup>۱</sup> و همکاران [۴۶] بر روی توزیع توان سرمایشی و COP برای سه ماژول ترموالکتریک متفاوت و در دو دمای مختلف، با احتساب و با چشم‌پوشی از اثر تامسون مطالعه نموده‌اند. تأثیر عمده‌ای از اثر تامسون بر توزیع دمایی مشاهده شده است. به‌طور خاص، اثر تامسون تأثیر بیشتری بر عنصر P نسبت به عنصر N از خنک‌کن ترموالکتریک داشته است. هم‌چنین مقایسه عددی ارائه شده در مرجع نشان می‌دهد که باوجود اثر تامسون مقدار COP بهبودیافته است که مشابه با بهبود در توان سرمایشی بر اساس افزایش تعداد خنک‌کن‌های مینیاتوری ترموالکتریک در یک ماژول می‌باشد.

#### ۲-۶- بررسی ضرب کارایی کاربردهای خنک‌کننده ترموالکتریک

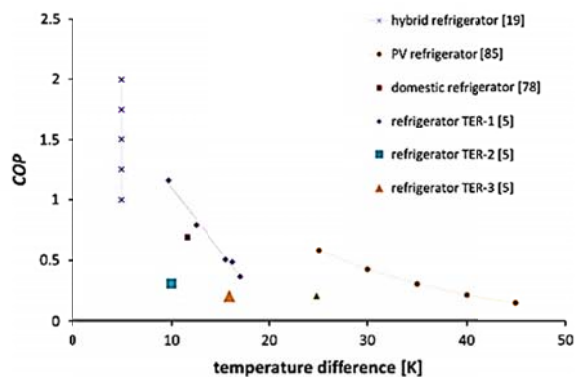
خنک‌کننده‌های ترموالکتریک کاربردهای مختلفی جهت خنک‌سازی تجهیزات الکترونیکی [۶] و سلول‌های فتوولتائیک [۴۷] و یخچال و تهویه مطبوع خانگی [۴۸] دارد. بسیاری از کاربردهای عملی با بهره‌گیری از تکامل فن‌آوری‌ها در دوره‌های اخیر، در سایزهای مختلف ساخته شده‌اند.

نمایی شماتیک از کاربرد خنک‌کننده ترموالکتریک در شکل ۴ نشان داده شده است که در آن ماژول ترموالکتریک در بالای محفظه یخچال نصب شده و یک مبدل حرارتی پره‌ای در بالای طرف گرم قرار داده شده است. این سیستم می‌تواند با گردش هوای اجباری از طریق نصب یک فن بر روی پره‌های مبدل حرارتی تکمیل گردد. هم‌چنین می‌توان مبدل حرارتی و فن را در کنار محفظه یخچال نصب نمود.



شکل ۴ نمایش شماتیک از کاربرد خنک‌کننده ترموالکتریک [۴۹]

برخی از مقادیر COP در کاربردهای مختلف در زیر ارائه شده است که به‌صورت ترکیبی در شکل ۵ آمده و در آن COP تابعی از اختلاف دما بین طرف گرم و سرد می‌باشد.



شکل ۵ مقادیر COP در کاربردهای خنک‌کننده ترموالکتریک [۴۹]

<sup>۲</sup> Lee K, Kim J

<sup>۳</sup> Chein R, Huang G

<sup>۴</sup> Bansal PK

<sup>۵</sup> Martin A

<sup>۶</sup> Yang B

<sup>۱</sup> Chen WH

کارایی متعلق به تهویه مطبوع تراکمی تبخیری با مقدار COP برابر با ۲/۶ تا ۳ بوده است، سپس تهویه مطبوع جذبی با مقدار COP برابر با ۰/۶ تا ۰/۷ و در نهایت سیستم ترموالکتریک با COP برابر با ۰/۳۸ تا ۰/۴۵ قرار داشته است. باین وجود، به دلیل کارکرد تهویه مطبوع ترموالکتریک با جریان DC و نیز اتصال مستقیم آن به منبع تغذیه هم چون سلول‌های فتوولتائیک و سلول‌های سوختی، تمایل به استفاده از آن بسیار بالا است. از مزایای دیگر تهویه مطبوع ترموالکتریک می‌توان به کاهش سروصدا در آن‌ها و نیز حذف کلروفلوروکربن نسبت به سیستم‌های تراکمی تبخیری اشاره نمود.

#### ۷- نتیجه‌گیری

خنک‌کنندگی ترموالکتریک یکی از کاربردهای اصلی دستگاه‌های ترموالکتریک می‌باشد. این مقاله به مرور فرمول‌های پارامترهای مشخصات و کارایی خنک‌کننده ترموالکتریک پرداخته است، به طوری که به منظور بررسی دقیق‌تر، فرمول‌های مختلفی از پارامترها توسط مقالات اخیر ارائه شده است. همچنین به مقادیر این پارامترها در کاربردهای مختلف اشاره شده است. توسط توسعه مواد ترموالکتریک با ضریب شایستگی بالاتر (حداکثر مقدار عملی ZT حدود ۳ در دمای ۵۵۰ کلوین گزارش شده است [۶۰]) و یا از طرفی با توسعه ساختار چندمرحله‌ای ترموالکتریک می‌توان سبب افزایش ظرفیت سرمایشی گردید. (به طور مثال با تغییر یک ماژول تک‌مرحله‌ای با یک ماژول سه مرحله‌ای می‌توان ظرفیت سرمایش را ۳۵٪ افزایش داد [۳۷]).

از نظر جنبه کارایی برای کاربردهای خانگی خنک‌کننده‌ها به روش معمول توسط دستگاه‌های ترموالکتریک، میزان COP معمولاً برای اختلاف دماهای ۲۰ کلوین و بیشتر از آن، کمتر از ۰/۵ می‌باشد. در این صورت، یخچال ترموالکتریک قابل رقابت با یخچال‌های تراکمی تبخیری با COP حدود ۲/۵ نخواهد بود. با این وجود استفاده از یخچال‌های ترموالکتریک به دلیل ویژگی‌های قابل کنترل آن‌ها به صورت روزافزون در حال افزایش است. در واقع با تغییر جریان الکتریکی، عملکرد بار جزئی در آن‌ها به راحتی قابل رویت می‌باشد.

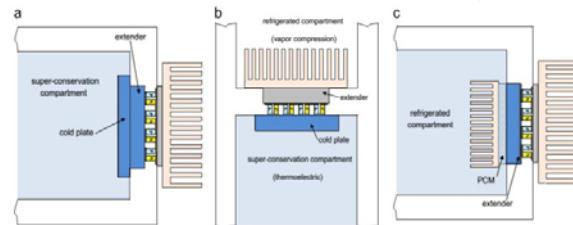
دستگاه‌های ترموالکتریک سروصدایی ایجاد نمی‌کنند بنابراین در بسیاری از موارد که سروصدا عامل آزار دهنده‌ای محسوب می‌شود از جمله در سیستم تهویه مطبوع خانگی و وسایل نقلیه مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر این مزیت کلیدی دیگر آن‌ها جایگزینی با سیستم‌های سرمایشی است که از مبردهایی که سبب آلودگی محیط زیست می‌شوند استفاده می‌کنند. همچنین با تعویض جهت جریان الکتریکی می‌توان بجای سیستم سرمایش از دستگاه‌های ترموالکتریک به عنوان یک پمپ حرارتی استفاده نمود. به دلیل مزایای فراوان ترموالکتریک در آینده نزدیک بیشتر از دستگاه‌های ترموالکتریک خواهیم شنید.

#### ۸- فهرست علائم

$COP$	ضریب کارایی
$k$	هدایت حرارتی (W/mK)
$q$	ظرفیت سرمایشی بر واحد سطح (W/m <sup>2</sup> )
$r$	مقاومت تماسی بر واحد سطح (Ω/m <sup>2</sup> )
$x$	مختصات خطی (m)
$y$	ضخامت لایه تماسی (m)
$z$	ضریب شایستگی مواد ترموالکتریک (K <sup>-1</sup> )
$I$	جریان الکتریکی (A)

هرمس<sup>۱</sup> و باربوسا<sup>۲</sup> [۵۲] بر روی خنک‌کن‌های قابل حمل پلتری، استرلینگ و تراکمی تبخیری، تحلیل ترمودینامیکی انجام داده‌اند. در آزمایش انجام شده که دمای محیط حدود ۲۱ درجه سانتی‌گراد بوده، خنک‌کن استرلینگ بیشترین مقدار COP در حدود یک را دارا بوده است. پس‌از آن سیستم تراکمی تبخیری (با کمپرسور رفت و برگشتی حدود یک و با کمپرسور خطی در حدود ۰/۵) و در نهایت خنک‌کن ترموالکتریکی قرار دارد (با اختلاف دمای ۲۴/۸ k در COP در حدود ۰/۲ بوده که در **Error! Reference source not found.** مشخص شده است).

بهبود کارایی یخچال‌های ترموالکتریک با استفاده از دوفازی حاصل آمده است [۵۳]. یک یخچال ترموالکتریک که طرف سرد ماژول آن در تماس با یک ترموسیفون مویرگی و دوفازی است درحالی‌که طرف گرم آن با یک ترموسیفون دوفازی با انتقال حرارت جابجایی طبیعی در تماس است، توسعه یافته است [۵۴]. در سیستم ذکر شده اخیر، استفاده از ترموسیفون میزان COP یخچال ترموالکتریک را ۶۶٪ افزایش داده است. در کاربرد دیگری [۵۵]، در محفظه یخچال بین سیستم ترموالکتریک و مبدل حرارتی، یک ماده تغییر فاز<sup>۳</sup> قرار گرفته است (شکل ۶)، که در زمان باز شدن درب یا پس از وقفه‌ای در کارکرد منبع تغذیه سبب محدود کردن کاهش دمای داخل محفظه یخچال می‌گردد.



شکل ۶ طرح‌هایی از یخچال ترموالکتریک. (a) طرف گرم خارجی. (b) راه‌حل ترکیبی. (c) استفاده از ماده تغییر فاز [۵۵]

مدلی از یخچال ترموالکتریک خنک‌کن آب که شامل ۱۲۷ عنصر ترموالکتریک با مبدل حرارتی پره‌ای توسط ترمودینامیک زمان محدود در مرجع [۵۶] ارائه شده است. کارایی یخچال ترموالکتریک چندمنظوره در مرجع [۵۷] مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است که با کنترل سیستم خنک‌کننده در ده نقطه، میزان جریان، اختلاف دما و زمان را نشان می‌دهد. میزان کاهش دمای طرف سرد با زمان نیز در آن به نمایش درآمده است.

برای یخچال‌های ترموالکتریکی که تغذیه آن‌ها توسط سلول‌های خورشیدی تأمین می‌گردد، میزان COP آن‌ها معمولاً بالاتر از ۰/۶ نمی‌باشد [۱۱]. از تحلیل آزمایش صورت گرفته در مرجع [۵۸]، مقادیر COP حاصل با  $T_h = 50^\circ C$  و  $T_c = 5^\circ C$  در بازه ۳۰ تا ۵۰ در **Error! Reference source not found.** آمده است. با توجه به راندمان سیستم فتوولتائیک ( $\eta_{pv}$ )، راندمان کلی سیستم، ترکیبی حاصل از  $\eta_{pv}$  و COP می‌باشد که عموماً نتیجه حاصل کمتر از ۶٪ است [۱۱]. راندمان کلی را با افزایش راندمان سیستم فتوولتائیک و با استفاده از مواد با کارایی ترموالکتریکی بهتر می‌توان افزایش داد.

جهت کاربردهای تهویه مطبوع، ریفات<sup>۴</sup> و کیو<sup>۵</sup> [۵۹] مقایسه‌ای بین سه دستگاه تهویه مطبوع خانگی (تهویه مطبوع تراکمی، تهویه مطبوع جذبی و تهویه مطبوع ترموالکتریکی) انجام داده‌اند. در طی این تحقیق، بالاترین

<sup>1</sup> Hermes CJL  
<sup>2</sup> Barbosa JR  
<sup>3</sup> PCM  
<sup>4</sup> Riffat SB  
<sup>5</sup> Qiu G

[11]	H. Xi, L. Luo, G. Fraisse, Development and applications of solar-based thermoelectric technologies, <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , Vol. 11, No. 5, pp. 923-936, 2007 .	$N$ تعداد ترموالمنت
[12]	S .Tassou, J. Lewis, Y. Ge, A. Hadaway, I. Chaer, A review of emerging technologies for food refrigeration applications, <i>Applied Thermal Engineering</i> , Vol. 30, No. 4, pp. 263-276, 2010 .	$P_e$ توان الکتریکی (W)
[13]	M. K. Rawat, H. Chattopadhyay, S. Neogi, A review on developments of thermoelectric refrigeration and air conditioning systems: a novel potential green refrigeration and air conditioning technology, <i>Volume</i> , Vol. 3, pp. 362-367, 2013 .	$Q_c$ ظرفیت سرمایشی (W)
[14]	P. Bansal, E. Vineyard, O. Abdelaziz, Advances in household appliances-A review, <i>Applied Thermal Engineering</i> , Vol. 31, No. 17, pp. 3748-3760, 2011 .	$R$ مقاومت تماسی (K/W)
[15]	J. Vián, D. Astrain, Development of a hybrid refrigerator combining thermoelectric and vapor compression technologies, <i>Applied Thermal Engineering</i> , Vol. 29, No. 16, pp. 3319-3327, 2009 .	$R_e$ مقاومت الکتریکی ( $\Omega$ )
[16]	I. Sarbu, C. Sebarchievici, Review of solar refrigeration and cooling systems, <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 67, pp. 286-297, 2013 .	$S$ سطح مقطع ( $m^2$ )
[17]	M. H. Elsheikh, D. A. Shnawah, M. F. M. Sabri, S. B. M. Said, M. H. Hassan, M. B. A. Bashir, M. Mohamad, A review on thermoelectric renewable energy: Principle parameters that affect their performance, <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , Vol. 30, pp. 337-355, 2014 .	$T$ دمای مطلق (K)
[18]	D. Zhao, G. Tan, A review of thermoelectric cooling: materials, modeling and applications, <i>Applied Thermal Engineering</i> , Vol. 66, No. 1, pp. 15-24, 2014 .	$\bar{T}$ دمای متوسط (K)
[19]	G. Min, D. Rowe, Improved model for calculating the coefficient of performance of a Peltier module, <i>Energy conversion and management</i> , Vol. 41, No. 2, pp. 163-171, 2000 .	$ZT$ ضریب شایستگی بی‌بعد
[20]	J. Parrott, A. Penn, The design theory of thermoelectric cooling elements and units, <i>Solid-State Electronics</i> , Vol. 3, No. 2, pp. 91-99, 1961 .	$\Delta T$ اختلاف دما (K)
[21]	G. J. Snyder, E. S. Toberer, Complex thermoelectric materials, <i>Nature materials</i> , Vol. 7, No. 2, pp. 105-114, 2008 .	علامت یونانی
[22]	L. E. Bell, Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems, <i>Science</i> , Vol. 321, No. 5895, pp. 1457-1461, 2008 .	$\alpha$ ضریب سبیک (V/K)
[23]	Y. S. Ju, U. Ghoshal, Study of interface effects in thermoelectric microrefrigerators, <i>Journal of Applied Physics</i> , Vol. 88, No. 7, pp. 4135-4139, 2000 .	$\rho$ مقاومت ویژه الکتریکی ( $\Omega m$ )
[24]	J.-c. Zheng, Recent advances on thermoelectric materials, <i>Frontiers of Physics in China</i> , Vol. 3, No. 3, pp. 269-279, 2008 .	$\sigma$ ضریب هدایت الکتریکی
[25]	V. Zlatic, A. Hewson, <i>Properties and applications of thermoelectric materials: the search for new materials for thermoelectric devices</i> : Springer Science & Business Media, 2009 .	$\tau$ ضریب تامسون (V/K)
[26]	G. S. Nolas, J. Poon, M. Kanatzidis, Recent developments in bulk thermoelectric materials, <i>MRS bulletin</i> , Vol. 31, No. 03, pp. 199-206, 2006, 05	زیر نویس ها
[27]	J. Hone, I. Ellwood, M. Muno, A. Mizel, M. L. Cohen, A. Zettl, A. G. Rinzler, R. Smalley, Thermoelectric power of single-walled carbon nanotubes, <i>Physical Review Letters</i> , Vol. 80, No. 5, pp. 1042, 1998 .	a محیط
[28]	R. Venkatasubramanian, E. Siivola, T. Colpitts, B. O'quinn, Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit, <i>Nature</i> , Vol. 413, No. 6856, pp. 597-602, 2001 .	c طرف سرد
[29]	I. Chowdhury, R. Prasher, K. Lofgreen, G. Chrysler, S. Narasimhan, R. Mahajan, D. Koester, R. Alley, R. Venkatasubramanian, On-chip cooling by superlattice-based thin-film thermoelectrics, <i>Nature Nanotechnology</i> , Vol. 4, No. 4, pp. 235-238, 2009 .	e الکتریکی
[30]	O. Yamashita, H. Odahara, T. Ochi, K. Satou, Dependence of Seebeck coefficient on a load resistance and energy conversion efficiency in a thermoelectric composite, <i>Materials Research Bulletin</i> , Vol. 42, No. 10, pp. 1785-1803, 2007 .	h طرف گرم
[31]	H.-S. Huang, Y.-C. Weng, Y.-W. Chang, S.-L. Chen, M.-T. Ke, Thermoelectric water-cooling device applied to electronic equipment, <i>International Communications in Heat and Mass Transfer</i> , Vol. 37, No. 2, pp. 140-146, 2010 .	m ماژول
[32]	M. P. Gupta, M.-H. Sayer, S. Mukhopadhyay, S. Kumar, Ultrathin thermoelectric devices for on-chip peltier cooling, <i>Components, Packaging and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on</i> , Vol. 1, No. 9, pp. 1395-1405, 2011 .	max حداکثر
[33]	J. Chen, Y. Zhou, H. Wang, J. T. Wang, Comparison of the optimal performance of single-and two-stage thermoelectric refrigeration systems, <i>Applied Energy</i> , Vol. 73, No. 3, pp. 285-298, 2002 .	r نسبی
[34]	G. Karimi, J. Culham, V. Kazerouni, Performance analysis of multi-stage thermoelectric coolers, <i>International Journal of Refrigeration</i> , Vol. 34, No. 8, pp. 2129-2135, 2011 .	C کارنو
		J ژول
		M ماژول چندمرحله‌ای
		N نیمه‌هادی نوع N
		P نیمه‌هادی نوع P

۹- مراجع



- [58] Y. Dai, R. Wang, L. Ni, Experimental investigation and analysis on a thermoelectric refrigerator driven by solar cells, *Solar energy materials and solar cells*, Vol. 77, No. 4, pp. 377-391, 2003 .
- [59] S. Riffat, G. Qiu, Comparative investigation of thermoelectric air-conditioners versus vapour compression and absorption air-conditioners, *Applied thermal engineering*, Vol. 24, No. 14, pp. 1979-1993, 2004 .
- [60] T. Harman, M. Walsh, G. Turner, Nanostructured thermoelectric materials, *Journal of electronic materials*, Vol. 34, No. 5, pp. L19-L22, 2005 .
- [35] R. Yang, G. Chen, G. J. Snyder, J.-P. Fleurial, Multistage thermoelectric microcoolers, *Journal of applied physics*, Vol. 95, No. 12, pp. 8226-8232, 2004 .
- [36] Y.-H. Cheng, C. Shih, Maximizing the cooling capacity and COP of two-stage thermoelectric coolers through genetic algorithm, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, No. 8, pp. 937-947, 2006 .
- [37] J. Yu, B. Wang, Enhancing the maximum coefficient of performance of thermoelectric cooling modules using internally cascaded thermoelectric couples, *international journal of refrigeration*, Vol. 32, No. 1, pp. 32-39, 2009 .
- [38] J. Chen, Z. Yan, L. Wu, Nonequilibrium thermodynamic analysis of a thermoelectric device, *Energy*, Vol. 22, No. 10, pp. 979-985, 1997 .
- [39] M.-J. Huang, R.-H. Yen, A.-B. Wang, The influence of the Thomson effect on the performance of a thermoelectric cooler, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, No. 2, pp. 413-418, 2005 .
- [40] M.-J. Huang, P.-K. Chou, M.-C. Lin, Thermal and thermal stress analysis of a thin-film thermoelectric cooler under the influence of the Thomson effect, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 126, No. 1, pp. 122-128, 2006 .
- [41] G. Fraisse, J. Ramousse, D. Sgorlon, C. Goupil, Comparison of different modeling approaches for thermoelectric elements, *Energy Conversion and Management*, Vol. 65, pp. 351-356, 2013 .
- [42] A. Chakraborty, B. Saha, S. Koyama, K. Ng, Thermodynamic modelling of a solid state thermoelectric cooling device: Temperature-entropy analysis, *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 49, No. 19, pp. 3547-3554, 2006 .
- [43] J. Chen, Z. Yan, L. Wu, The influence of Thomson effect on the maximum power output and maximum efficiency of a thermoelectric generator, *Journal of applied physics*, Vol. 79, No. 11, pp. 8823-8828, 1996 .
- [44] O. Yamashita, Effect of linear and non-linear components in the temperature dependences of thermoelectric properties on the cooling performance, *Applied Energy*, Vol. 86, No. 9, pp. 1746-1756, 2009 .
- [45] R. Cherkez, Theoretical studies on the efficiency of air conditioner based on permeable thermoelectric converter, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 38, pp. 7-13, 2012 .
- [46] W.-H. Chen, C.-Y. Liao, C.-I. Hung, A numerical study on the performance of miniature thermoelectric cooler affected by Thomson effect, *Applied Energy*, Vol. 89, No. 1, pp. 464-473, 2012 .
- [47] H. Najafi, K. A. Woodbury, Optimization of a cooling system based on Peltier effect for photovoltaic cells, *Solar Energy*, Vol. 91, pp. 152-160, 2013 .
- [48] P. Bansal, A. Martin, Comparative study of vapour compression, thermoelectric and absorption refrigerators, *International Journal of Energy Research*, Vol. 24, No. 2, pp. 93-107, 2000 .
- [49] K. H. Lee, O. J. Kim, Analysis on the cooling performance of the thermoelectric micro-cooler, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 9, pp. 1982-1992, 2007 .
- [50] B. Yang, H. Ahuja, T. N. Tran, Review Article: Thermoelectric Technology Assessment: Application to Air Conditioning and Refrigeration, *HVAC&R Research*, Vol. 14, No. 5, pp. 635-653, 2008 .
- [51] D. Astrain, A. Martínez, A. Rodríguez, Improvement of a thermoelectric and vapour compression hybrid refrigerator, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 39, pp. 140-150, 2012 .
- [52] C. J. Hermes, J. R. Barbosa, Thermodynamic comparison of Peltier, Stirling, and vapor compression portable coolers, *Applied Energy*, Vol. 91, No. 1, pp. 51-58, 2012 .
- [53] J. Lee, S. Rhi, C. Kim, Y. Lee, Use of two-phase loop thermosyphons for thermoelectric refrigeration: experiment and analysis, *Applied thermal engineering*, Vol. 23, No. 9, pp. 1167 . 2003, 1176 .
- [54] J. Vián, D. Astrain, Development of a thermoelectric refrigerator with two-phase thermosyphons and capillary lift, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 10, pp. 1935-1940, 2009 .
- [55] S. Omer, S. Riffat, X. Ma, Experimental investigation of a thermoelectric refrigeration system employing a phase change material integrated with thermal diode (thermosyphons), *Applied Thermal Engineering*, Vol. 21, No. 12, pp. 1265-1271, 2001 .
- [56] F. Meng, L. Chen, F. Sun, Performance prediction and irreversibility analysis of a thermoelectric refrigerator with finned heat exchanger, *Acta Physica Polonica A*, Vol. 120, No. 3, pp. 397-406, 2011 .
- [57] S. Jugsujinda, A. Vora-ud, T. Seetawan, Analyzing of thermoelectric refrigerator performance, *Procedia Engineering*, Vol. 8, pp. 154-159, 2011 .