

# مروری بر پارامترهای مؤثر بر ضریب کارایی 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

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

## چکیده

سیستم‌های ترموالکتریک دارای مزایای فراوانی از جمله سازگاری با محیط‌زیست، بدون سروصدا بودن و قابلیت اطمینان بالا هستند. با توجه به کاهش روز افزون منابع سوخت‌های فسیلی و آلودگی ناشی از آن‌ها استفاده از سیستم‌های ترموالکتریک به دو صورت خنک‌کن و ژنراتور رو به افزایش است. اما یکی از مهم‌ترین معایب خنک‌کن‌های ترموالکتریک پایین بودن ضریب کارایی آن‌ها است. امروزه محققان تمرکز خاصی بر ضریب عملکرد ترموالکتریک داشته و در تلاش هستند که آن را بهبود بخشند. جهت آشنایی بیشتر با پارامترهای مؤثر بر ضریب عملکرد در این مقاله به مرور آن‌ها پرداخته شده است. بدین منظور ابتدا تأثیر مقاومت تماسی الکتریکی و گرمایی بررسی شده است که در ماژول‌های ترموالکتریک کوچک، با نادیده گرفتن آن به نتایج مطلوبی خواهیم رسید. همچنین با کاهش مقاومت تماسی الکتریکی می‌توان مقدار ضریب کارایی را ۵۰ تا ۶۰ درصد افزایش داد. سپس رابطه ضریب عملکرد با طول ترموالمنت، اختلاف دما و جریان الکتریکی آورده شده است و در نهایت به بررسی ماژول‌های چندمرحله‌ای بر ضریب عملکرد پرداخته شده است که در نتیجه افزایش مراحل، ضریب عملکرد نیز افزایش یافته است.

## کلیدواژه‌ها

ضریب عملکرد، ترموالکتریک، مقاومت تماسی الکتریکی، مقاومت گرمایی، ماژول‌های چندمرحله‌ای

## An overview of the parameters affecting the coefficient of performance 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

Thermoelectric systems have many advantages, including environmentally friendly, without noise and high reliability. Due to the reduction of fossil fuel resources and emissions resulting them, using of thermoelectric systems both of cooling and generator are increasing. But one of the main disadvantages of thermoelectric cooling is low coefficient of performance. Today, researchers have a particular focus on the coefficient of performance and are trying to improve it. To learn more about the coefficient of performance parameters that are discussed in this paper to review. For this purpose, the first effects of electrical contact resistances and thermal resistances are investigated at small thermoelectric modules that by ignoring it will not reach the desired results. Also, by decreasing the electrical contact resistance can increasing the coefficient of performance 50 to 60 percent. Then correlation between the coefficient of performance and thermoelement length, temperature difference and electric current is provided. Finally the multi-stage modules has been discussed as a result of increasing stages, coefficient of performance also increased.

### Keywords

Coefficient of performance, Thermoelectric, Electrical contact resistance, Thermal resistance, Multi-stage module

## ۱- مقدمه

[۵]. اخیراً محققان جهت عملی نمودن کاربرد ماژول‌های ترموالکتریک، بر بهبود راندمان مواد آن‌ها متمرکز شده‌اند [۶، ۷]. اما هم چنان کارایی ماژول ترموالکتریک به برگ خریدهایی هم چون مقاومت‌های تماسی گرمایی و الکتریکی و عیوب ساختاری وابسته است [۶، ۸-۱۰]. جهت شناخت بهتر این برگ خریدها یک روش ساده و دقیق برای ارزیابی ماژول‌های ترموالکتریک مورد نیاز است.

چندین روش برای ارزیابی کارایی ماژول ترموالکتریک وجود دارد، یکی از آن‌ها اندازه‌گیری اثر سبک می‌باشد که هنگام اختلاف دما در ماژول، خروجی توان ترموالکتریک را ثبت می‌کند [۱۱-۱۳]. روش دیگر ارزیابی اثر پلنتیر بوده به نحوی که هنگام اعمال جریان ثابت به ماژول ترموالکتریک، تغییر دمایی آن اندازه‌گیری می‌شود [۱۴-۱۶]. روابط تئوری بین دمای ماژول و ویژگی‌های آن جهت ارزیابی توان خنک‌کنندگی و دیگر معیارهای مرتبط

سیستم‌های خنک‌کننده ترموالکتریک، سازگار با محیط‌زیست بوده و بدون سروصدا هستند. با توجه به طراحی ساده، دارای قابلیت اطمینان بالا و کنترل دقیق ظرفیت سرمایشی و دما می‌باشند. با توجه به چنین ویژگی‌های جالبی به دلیل پایین بودن ضریب کارایی<sup>۱</sup> هنوز جایگاه مناسبی در کاربردهای خانگی پیدا نکرده‌اند [۱].

در ماژول‌های ترموالکتریک هنگامی که ورودی آن‌ها انرژی الکتریکی باشد به‌عنوان یخچال و زمانی که ورودی آن‌ها گرما باشد به شکل یک ژنراتور الکتریکی عمل می‌کنند [۲]. کاربرد آن‌ها در سیستم‌های حرارتی است که نیاز به قابلیت اطمینان بالا و فشردگی در آن‌ها احساس می‌گردد [۳، ۴] و همچنین از آن‌ها به‌عنوان تولید قدرت از حرارت اتلاف شده استفاده می‌گردد

<sup>1</sup> coefficient of performance

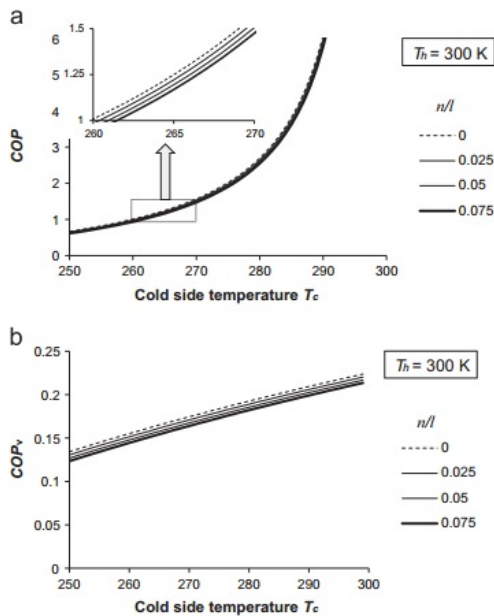
$$COP_c = \frac{T_c}{T_h - T_c} \quad (3)$$

با جایگذاری و جایگزین نمودن مقدار اصلاح‌شده  $COP_v$  و  $COP_r$  و بازنویسی  $COP_v$  به‌منظور نشان دادن نسبت  $n/l$ ، عبارت زیر حاصل می‌آید:

$$COP = COP_c COP_v \quad (4)$$

$$COP_v = \left( \frac{1 + (Z\bar{T}/(1 + (n/l))) - (T_h/T_c)}{1 + (Z\bar{T}/(1 + (n/l))) + 1} \right) \quad (5)$$

شکل ۱ مقادیر  $COP$  و  $COP_v$  را برای یک دستگاه ترموالکتریک که در دمای ثابت طرف گرم  $T_h=300$  K به‌صورت تابعی از دمای طرف سرد  $T_c$  کار می‌کند را نشان می‌دهد که در آن از مقادیر با نسبت  $n/l$  ثابت که در مرجع [۱۹] آمده، استفاده شده است.



شکل ۱ مقادیر  $COP$  و پارامتر  $COP_v$  برای نسبت‌های مختلف  $n/l$  در  $T_h=300$  K

با توجه به مقاله‌ای که رو<sup>۴</sup> [۲۰] ارائه کرده است، مقدار  $COP$  ماژول ترموالکتریک با کاهش مقاومت‌های تماسی الکتریکی می‌تواند تا ۶۰٪ افزایش یابد. اخیراً طی مطالعه‌ای که توسط آناپراگادا<sup>۵</sup> و همکاران [۲۱] صورت گرفته است، شبیه‌سازی عددی و ارزیابی تجربی از مقاومت گرمایی و مقاومت ویژه تماسی الکتریکی انجام شده است. این تحقیق بر اساس اختلاف بین توان مصرفی به‌دست‌آمده از ماژول‌های ترموالکتریک با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن مقاومت تماسی الکتریکی در مدل صورت پذیرفته است.

استفاده می‌گردد. اگرچه در این روش اندازه‌گیری دقیق جریان گرمایی در اطراف ماژول و دمای ماژول مشکل می‌باشد. هنگامی که مقاومت تماسی گرمایی ماژول ترموالکتریک، اندازه‌گیری دما را پیچیده می‌کند، اتلافات حرارتی جابجایی و تشعشع در اندازه‌گیری جریان گرمایی خطا ایجاد می‌کنند [۱۷]. جهت حل این مشکل بهتر است که اندازه‌گیری جریان گرمایی در موقعیت خلأ با استفاده از گرم‌کن‌های محافظ در دمای بالا و ایجاد موقعیت تماسی ثابت با ماژول ترموالکتریک صورت پذیرد. یکی دیگر از چالش‌های متداول این است که زمان زیادی تا رسیدن به حالت پایداری گرمایی قبل از اندازه‌گیری کارایی ماژول نیاز است. در بیشتر سیستم‌های اندازه‌گیری، ماژول ترموالکتریک به لحاظ گرمایی با محیط عایق نمی‌باشد، بنابراین معمولاً چند ساعتی تا رسیدن به حالت پایدار نیاز می‌باشد [۱۱].

در این مقاله به بررسی پارامترهای مؤثر بر ضریب کارایی از جمله مقاومت تماسی الکتریکی، مقاومت گرمایی، طول ترموالمنت، اختلاف دما، جریان الکتریکی و تعداد مراحل ماژول ترموالکتریک پرداخته شده است.

## ۲- تأثیر مقاومت تماسی الکتریکی

نظریه ارائه‌شده توسط لاف<sup>۱</sup> [۱۸] مربوط به برآورد  $COP$  در ماژول‌های ترموالکتریک با ابعاد بزرگ می‌باشد که در آن از مقاومت‌های تماسی الکتریکی و گرمایی صرف‌نظر شده است. در همان تحقیق (با صرف‌نظر از مقاومت‌های تماسی الکتریکی و گرمایی) نتایج در مورد ماژول‌های ترموالکتریک کوچک ناکافی بوده است. مین<sup>۲</sup> و راو<sup>۳</sup> [۱۹] و مین [۲۰] یک مدل ساده شده که در آن هر دو مقاومت تماسی الکتریکی و گرمایی لحاظ شده است را برای مدل‌سازی ماژول‌های ترموالکتریک با ابعاد کوچک برای تحلیل و طراحی بهینه ارائه داده‌اند. مدل ساده شده و بهبودیافته در مرجع [۱۹] نشان می‌دهد که مقدار  $COP$  هنگامی که مقاومت‌های تماسی الکتریکی و گرمایی نادیده گرفته می‌شوند، به طول ترموالمنت بستگی نخواهد داشت. با صرف‌نظر از مقاومت تماسی گرمایی و در نظر گرفتن مقدار مقاومت الکتریکی ترموالمنت، ضریب شایستگی برای ماژول به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Z = \frac{zl}{1+n} \quad (1)$$

که در آن پارامتر  $n$  وابسته به مقاومت ویژه تماسی الکتریکی بین ترموالمنت و نوار مسی و همچنین مقاومت ویژه الکتریکی مواد ترموالمنت می‌باشد. مقدار ضریب شایستگی مواد ترموالکتریک  $Z = \alpha/\rho k$  است که به ضریب سبیک مواد ترموالکتریک، مقاومت ویژه الکتریکی و هدایت گرمایی ترموالمنت وابسته می‌باشد. همچنین پارامتر  $l$  برابر طول ترموالمنت است. همان‌طور که در مرجع [۱۹] اشاره شده است، مقدار پارامتر  $n$  برای ماژول‌های تجاری ۰/۱ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود.

با در نظر گرفتن تنها مقاومت تماسی الکتریکی، مقدار  $COP$  برای ماژول ترموالکتریک به‌صورت زیر بیان می‌گردد: [۱۹]

$$COP = COP_c \left( \frac{1 + (Zl/(1+n))\bar{T} - (T_h/T_c)}{1 + (Zl/(1+n))\bar{T} + 1} \right) \quad (2)$$

<sup>1</sup> A. F. Ioffe  
<sup>2</sup> Min G  
<sup>3</sup> Rowe DM

<sup>4</sup> Rowe DM  
<sup>5</sup> Annapragada SR

به مقاومت گرمایی در مراجع [۲۰] و [۱۹] اشاره گردیده است و پارامتر  $x$  که نسبت هدایت گرمایی ترموالمنت به هدایت گرمایی لایه‌های تماسی و پارامتر  $y$  که ضخامت لایه تماسی را نشان می‌دهد تعریف می‌گردد. جدا نمودن مقاومت گرمایی به‌طور کامل از قسمت‌های دیگر در تعریف COP چندان امکان‌پذیر نمی‌باشد. شکل نهایی معادله COP به‌صورت زیر نوشته شده است:

$$COP = COP_c \left( \frac{1}{(1+2xy)} COP_v - \frac{xy}{(1+2xy)} \frac{1}{COP_c} \right) \quad (10)$$

در عمل جهت رسیدن به مقدار COP بالا طول ترموالمنت نسبتاً بلند می‌باشد. تأثیر دما بر مقاومت گرمایی در مرجع [۲۲] بر اساس فرضیه‌ای به‌صورت تابع خطی نشان داده شده است. چانگ<sup>۱</sup> و همکاران [۲۳] مدلی از مقاومت گرمایی به منظور بررسی کارایی خنک‌کن هوای ترموالکتریک را توسعه و بهبود بخشیدند. مقایسه‌ای بین استفاده از چاه حرارتی برای مازول ترموالکتریک و ترکیب دوجزئی از آن انجام گرفته است. با بررسی عملکرد مؤثر مشخص شده است که ترکیب دوجزئی دارای کارایی بسیار بهتری در مقایسه با استفاده از چاه حرارتی به تنهایی می‌باشد. پتس<sup>۲</sup> و همکاران [۲۴] با اقتباس از تئوری یخچال ترموالکتریک تک‌مرحله‌ای، وجود مقاومت‌های تماسی الکتریکی و گرمایی را توجیه نموده‌اند. آن‌ها طول ترموالمنت بهینه را جهت حداکثر مقدار COP برای تعیین ظرفیت سرمایشی محاسبه نموده‌اند. بدین منظور، آن‌ها با کاهش هدایت گرمایی به‌عنوان یکی از ده عامل سبب کاهش حداقل ۱۰٪ از گرمای حداکثری و همچنین با افزایش مقاومت الکتریکی اتصالات باعث کاهش حداقل ۵۰٪ مقدار COP شدند. جئونگ<sup>۳</sup> [۲۵] یک مدل تحلیلی جدید یک‌بعدی را پیشنهاد داده است که طی آن با در نظر گرفتن مقاومت‌های تماسی، افزایش جریان بهینه و در نتیجه افزایش ظرفیت سرمایشی و کاهش اختلاف دما بین طرف‌های گرم و سرد را حاصل می‌گردد. همچنین کاهش طول ترموالمنت بهینه با افزایش ظرفیت سرمایشی به‌دست‌آمده است.

بیرزچنک<sup>۴</sup> و جانسون<sup>۵</sup> [۲۶] نحوه بهینه‌سازی ساختار خنک‌کن ترموالکتریک که قادر به تأمین مقاومت گرمایی منفی در عملکرد COP بالا است را تشریح نموده‌اند که سبب توسعه در زمینه محدودیت‌های تجهیزات خنک‌کننده در کاربردهای الکترونیکی می‌شود. خنک‌کن‌های ترموالکتریکی نصب شده در میکروپروسورهای<sup>۶</sup> که توسط اسنیدر<sup>۷</sup> [۲۷] معرفی شده‌اند جهت تأمین سرمایش منطقه گرم توسط تجهیزات ترموالکتریک نازک با عملکرد شار حرارتی و COP بالا می‌باشند. نیاز به بهبود مقاومت‌های تماسی در یخچال‌های ترموالکتریک خورشیدی جهت افزایش مقدار COP توسط عبدالوهاب<sup>۸</sup> [۲۸] اشاره شده است.

#### ۴- ملاحظاتی بر توابع COP

با ساده‌سازی در تعریف COP از طریق مدل‌های تحلیلی که بر اساس شبیه‌سازی‌های حاصل از اعتبارسنجی تجربی حاصل شده، مشخص می‌گردد

روش متفاوتی جهت بیان COP برگرفته از مقدار مقاومت‌های الکتریکی در مرجع [۲۲] ارائه شده است. در این روش فرض می‌گردد که مقاومت ویژه الکتریکی، هدایت گرمایی و ضریب سیبک به‌صورت خطی با دما تغییر می‌کنند. رابطه حاصل به‌صورت زیر به‌دست‌آمده است:

$$COP = COP_c COP_r COP_B \quad (6)$$

$$COP_r = \left( \frac{\sqrt{1+Z\bar{T}} - (T_h/T_c)}{\sqrt{1+Z\bar{T}} + 1} \right) \quad (7)$$

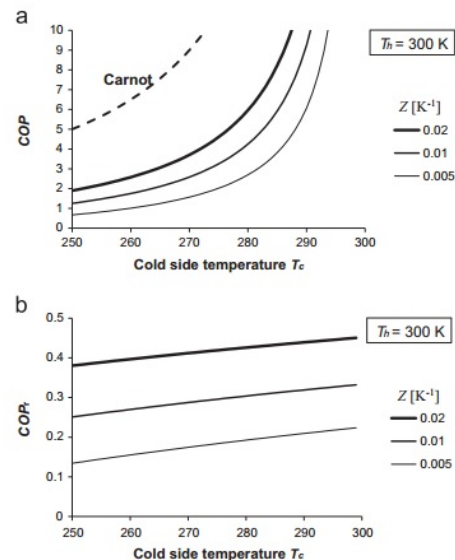
که در COP<sub>B</sub> مقدار B مشتق مقاومت ویژه الکتریکی نسبت به دما در دمای متوسط  $\bar{T}$  می‌باشد:

$$B = \frac{1}{\rho(T)} \left. \frac{d\rho(T)}{dT} \right|_{T=\bar{T}} \quad (8)$$

عبارت حاصل از COP<sub>B</sub> برابر است با:

$$COP_B = 1 + B \frac{(T_h - T_c)^2}{8T_c} \frac{(1 + (1/\sqrt{1+Z\bar{T}}))}{(\sqrt{1+Z\bar{T}} - (T_h/T_c))} \quad (9)$$

مقدار COP مازول خنک‌کننده به‌شدت به مقدار و علامت پارامتر B وابسته است. Error! Reference source not found. نمودار COP<sub>B</sub> و COP<sub>r</sub> را برای یک دستگاه ترموالکتریک در دمای طرف گرم ثابت  $T_h=300$  k به‌صورت تابعی از دمای طرف سرد  $T_c$  با مقادیر مختلفی از B را نمایش می‌دهد: [۲۲]



شکل ۲ مقادیر COP و پارامتر COP<sub>B</sub> برای مقادیر مختلف B در دمای  $T_h=300$  k

#### ۳- تأثیر مقاومت‌های گرمایی

<sup>1</sup> Chang YW  
<sup>2</sup> Pettes AM  
<sup>3</sup> Jeong ES  
<sup>4</sup> Bierschenck J  
<sup>5</sup> Johnson D  
<sup>6</sup> Microprocessor  
<sup>7</sup> G. J. Snyder  
<sup>8</sup> S. A. Abdul-Wahab

رفتار COP را در برابر گرمای دفع شده تحلیل نموده‌اند. در جریان‌های کوچک، هنگامی که اثر پلتیر بر اثر ژول غالب است، هر دو مقدار COP و گرمای دفع شده افزایش می‌یابند. در جریان حداکثری که توسط تولیدکننده مشخص گردیده است، اثر ژول بر اثر پلتیر غالب بوده و هر دو مقدار COP و گرمای دفع شده کاهش می‌یابند. برای یک مقدار COP معین، دو حالت برای جریان وجود دارد، یکی جریان کم (با توجه به گرمای دفع شده کم) و دیگری جریان زیاد (با توجه به گرمای دفع شده زیاد). دیو<sup>۷</sup> و ون<sup>۸</sup> [۳۰] بیانی از COP که در آن به وضوح مقدار جریان پدیدار می‌گردد را ارائه داده‌اند که توسط مقدار اثر سبیک (ضریب سبیک  $\alpha_h$  در طرف گرم) و اثر فوریه (با هدایت گرمایی  $k$ ) برای ترموالمنتی با جفت P از نیمه‌هادی و سطح مقطع S از نیمه‌هادی نوع P تعریف شده است:

$$COP = \frac{Q_c}{2PI\alpha_h T_h - 2pkS \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=h} - Q_c} \quad (12)$$

که در آن شروع مختصات خطی  $x$  از طرف گرم ( $x=h$ ) تعریف شده است. رو<sup>۹</sup> [۲۰] و چن<sup>۱۱</sup> [۳۴] رابطه COP با جریان را به صورت زیر تعریف نموده‌اند:

$$COP = \frac{\alpha_{P,N}IT_c - (RI^2/2) - k\Delta T}{\alpha_{P,N}I\Delta T + RI^2} \quad (13)$$

که این رابطه تأیید می‌کند مقدار COP حداکثری به تعداد جفت مای خنک‌کن ترموالکتریک در یک ماژول وابسته نمی‌باشد. منگ<sup>۱۱</sup> و همکاران [۳۵] مدلی از یخچال ترموالکتریک خنک‌کننده آب را ارائه نموده‌اند که شامل ۱۲۷ عنصر ترموالکتریک با مبدل حرارتی پره‌ای می‌باشد. مطالعه آن‌ها نشان داده است که بار خنک‌کننده حداکثری برای تحلیل سیستم ۲/۳۳ وات و COP حداکثری یخچال، هنگامی که اختلاف دما  $k = 10$  می‌باشد، حدود ۰/۵۴ است. COP حداکثری حدود ۲/۲۶ و بار خنک‌کننده حداکثری حدود ۳/۳۴ ناشی از مقاومت‌های گرمایی کاهش می‌یابند. کارایی یخچال ترموالکتریک خنک‌کننده آب می‌تواند با بهینه‌سازی طول و سطح مقطع عناصر ترموالکتریک بهبود یابد. چن<sup>۱۲</sup> و همکاران [۳۴] نشان داده‌اند که مقدار جریان بهینه با اثر تامسون و بدون آن کمتر از جریان بدون اختلاف دما است. همچنین آن‌ها افزایش اختلاف دما به دلیل اثر تامسون را یافته‌اند.

#### ۵- استفاده از ماژول‌های چندمرحله‌ای

هنگامی که ماژول‌های خنک‌کننده ترموالکتریک تک‌مرحله‌ای جهت ایجاد اختلاف دمای مورد نیاز مناسب نباشند، از ماژول‌های خنک‌کننده ترموالکتریک چندمرحله‌ای استفاده می‌گردد. اضافه کردن مراحل، اختلاف دما ( $\Delta T$ ) را بین منبع گرمایی و چاه حرارتی افزایش می‌دهد، اما منجر به افزایش توان مصرفی و کاهش راندمان سیستم ترموالکتریک می‌گردد. مواد ترموالکتریک بهینه شده برای ماژول‌های ترموالکتریک سه و چهار مرحله‌ای

که مقالات انواع دیگری از توابع COP را لحاظ نموده‌اند. یکی از جنبه‌های اصلی این مطالعات، با هر یک از مدل‌های تحلیلی یا شبیه‌سازی، ارائه ساختارهایی از ابعاد محدود با برپایی شرایط مرزی مناسب است. به عنوان مثال، در مقاله آسترین<sup>۱</sup> [۲۹] مقایسه خطای نسبی بین مدل عددی و شبیه‌سازی به سمت ۷٪ میل می‌کند.

در این رابطه نتایج ذیل حاصل می‌گردد:

(الف) رابطه COP با طول ترموالمنت:

بر اساس نظریه مرسوم که برای ترموالمنت مای بلند معتبر می‌باشد، با افزایش طول ترموالمنت، مقدار COP افزایش می‌یابد [۲۰]. اما برای ترموالمنت مای کوتاه، مقاومت تماسی سبب نزدیک شدن مقاومت پایه‌ها شده و تأثیر قابل توجهی بر COP می‌گذارد. برای مثال، همان‌طور که در مرجع [۲۰] آمده است، هنگامی که طول ترموالمنت کمتر از ۱/۵ mm شود، کاهش شدیدی در COP رخ می‌دهد.

نمودارهای COP در مقایسه با طول ترموالمنت برای مقاومت‌های الکتریکی مختلف هم چون پارامترهای تماسی گرمایی مختلف به شکل تابع نمایی نمایش داده شده است [۱۹].

(ب) رابطه COP با اختلاف دما و جریان:

COP تابعی از اختلاف دما می‌باشد. به‌طور خاص هنگامی که اختلاف دما کاهش می‌یابد، مقدار COP افزایش می‌یابد. برای یک یخچال ترموالکتریک خانگی که عموماً اختلاف دمایی در حدود  $k = 25-30$  دارد، جهت رسیدن به خنک‌کنندگی مناسب بررسی انجام شده است. در این مورد، مقدار COP یخچال ترموالکتریک به حدود  $0.5-0.7$  رسیده است که تقریباً ۵۰٪ مقدار COP یخچال‌های کمپرسوری رایج می‌باشد [۲۰]. دیو<sup>۷</sup> و ون<sup>۸</sup> [۳۰] مشخص نموده‌اند هنگامی که جریان بسیار کم و یا اختلاف دما حدود صفر است، حداکثر مقدار COP ترموالکتریک حاصل می‌آید. چنانچه کاهش جریان ادامه یابد و اختلاف دما کمتر از صفر شود، مقدار COP نیز کاهش می‌یابد. هنگامی که اختلاف دما کاهش یابد، همانند اضافه شدن بار سبب افزایش مقدار COP می‌گردد.

گلدسمیت<sup>۴</sup> [۳۱] رابطه‌ای برای جریان الکتریکی مربوط به حداکثر مقدار COP ارائه نموده است:

$$I_{COPmax} = \frac{(T_h - T_c) \alpha_{P,N}}{(\sqrt{1 + ZT} - 1)(R_p + R_N)} \quad (11)$$

که در آن  $\bar{T}$  دمای متوسط،  $R_p$  و  $R_N$  مقاومت‌های الکتریکی پایه مای ترموالمنت نوع P و N، و همچنین  $\alpha_{P,N} = \alpha_P - \alpha_N$  که در آن  $\alpha_P$  و  $\alpha_N$  ضرایب سبیک نیمه‌هادی نوع P و N می‌باشند.

طی مقاله‌ای کاسنیر<sup>۵</sup> [۳۲] مشخص کرد هنگامی که اختلاف دمایی بین ۵ درجه سانتی‌گراد (با جریان ۱ آمپر) و ۳۰ درجه سانتی‌گراد (با جریان ۵ آمپر) تغییر نماید مقدار COP در خنک‌کن ترموالکتریک از ۴/۵ تا ۰/۳ کاهش می‌یابد و منحنی‌هایی به‌صورت خطی از COP نسبت به اختلاف دما در جریان ثابت منتشر شده است. با این وجود، رابطه بین اختلاف دما و جریان به‌طور کاملاً خطی نیست. پرز<sup>۶</sup> و همکاران [۳۳] هنگامی که جریان افزایش می‌یابد،

<sup>7</sup> C.-Y. Du

<sup>8</sup> C.-D. Wen

<sup>9</sup> Rowe DM

<sup>10</sup> Chen WH

<sup>11</sup> Meng F

<sup>12</sup> W.-H. Chen

<sup>1</sup> D. Astrain

<sup>2</sup> Du CY

<sup>3</sup> Wen CD

<sup>4</sup> Goldsmid JH

<sup>5</sup> M. Cosnier

<sup>6</sup> Perez\_Aparicio JL

مرحله در مراحل مختلف رخ داده است و کاهش COP هنگامی اتفاق افتاده است که دمای طرف سرد بالا بوده و نسبت طول مرحله اول به طول کلی به‌طور نسبی کوچک‌تر بوده است. بنابراین، خنک‌کن ترموالکتریک آبخاری دومرحله‌ای، اختلاف دمای عملکرد را بهبود بخشیده و از خنک‌کن ترموالکتریک تک‌مرحله‌ای کارا تر است.

#### ۶- نتیجه‌گیری

چنانچه از مقاومت‌های تماسی الکتریکی و گرمایی در برآورد COP ماژول‌های ترموالکتریک کوچک صرف‌نظر گردد به نتایج مطلوبی حاصل نخواهد شد. بدین منظور با در نظر گرفتن مقاومت تماسی الکتریکی دو رابطه برای محاسبه COP ارائه شده است. هم‌چنین مشاهده گردید که با کاهش مقاومت تماسی الکتریکی، می‌توان مقدار COP ماژول ترموالکتریک را ۵۰ تا ۶۰ درصد افزایش داد. پارامتر مؤثر دیگر بر COP طول ترموالمنت می‌باشد که برای ترموالمنت مای بلند با افزایش طول، مقدار COP نیز افزایش یافته است. هم‌چنین COP تابعی از اختلاف دما بوده که کاهش اختلاف دما سبب افزایش آن می‌گردد. در بررسی تعداد مراحل ماژول ترموالکتریک مشخص گردید که با افزایش تعداد مراحل، مقدار COP نیز افزایش می‌یابد به‌طوری‌که در یک سیستم آبخاری سه مرحله‌ای در مقایسه با ماژول‌های تک‌مرحله‌ای سبب افزایش COP به میزان حدود ۲۵٪ شده است.

#### ۷- فهرست علائم

$COP$	ضریب کارایی
$k$	هدایت حرارتی (W/mK)
$l$	طول ترموالمنت (m)
$n$	نسبت مقاومت ویژه الکتریکی (m)
$p$	جفت نیمه‌هادی
$r$	مقاومت تماسی بر واحد سطح ( $\Omega/m^2$ )
$x$	مختصات خطی (m)
$y$	ضخامت لایه تماسی (m)
$z$	ضریب شایستگی مواد ترموالکتریک ( $K^{-1}$ )
$B$	مشتق مقاومت ویژه الکتریکی نسبت به دما ( $K^{-1}$ )
$I$	جریان الکتریکی (A)
$M$	تعداد مراحل ماژول
$N$	تعداد ترموالمنت
$Q_c$	ظرفیت سرمایشی (W)
$R$	مقاومت تماسی (K/W)
$R_e$	مقاومت الکتریکی ( $\Omega$ )
$S$	سطح مقطع ( $m^2$ )
$T$	دمای مطلق (K)
$\bar{T}$	دمای متوسط (K)
$ZT$	ضریب شایستگی بی‌بعد
$\Delta T$	اختلاف دما (K)

#### علائم یونانی

$\alpha$	ضریب سیبک (V/K)
$\rho$	مقاومت ویژه الکتریکی ( $\Omega m$ )
$\sigma$	ضریب هدایت الکتریکی

آبخاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. عموماً هنگامی که دمای طرف سرد کمتر از دمای خنک‌کن تک‌مرحله‌ای باشد هم چون زمانی که تغییرات دمایی مطلوب بین طرف‌های سرد و گرم حاصل نمی‌گردد از ماژول‌های چندمرحله‌ای استفاده می‌شود.

رو<sup>۱</sup> [۳۶] گزارشی ارائه کرده است مبنی بر اینکه با کاهش حداقل دمای طرف سرد، تعداد مراحل افزایش می‌یابد و در مقاله اسنیدر<sup>۲</sup> [۲۷] آمده است که مقدار COP به نسبت افزایش تعداد مراحل افزایش می‌یابد. چن<sup>۳</sup> و همکاران [۳۷] کارایی سیستم یخچال ترموالکتریک تک‌مرحله‌ای و دومرحله‌ای را مورد تحلیل و بررسی قرار دادند، که در نتیجه COP ماکزیمم بیشتری برای یخچال ترموالکتریک دومرحله‌ای نسبت به تک‌مرحله‌ای حاصل گردیده است. گلدسمیت<sup>۴</sup> [۹] با فرض تعداد مراحل M برای یک سیستم، ارتباط بین  $COP_M$  از ماژول چندمرحله‌ای و COP تک‌مرحله‌ای را با استفاده از رابطه زیر تشریح نموده است:

$$1 + COP_M^{-1} = (1 + COP^{-1})^M \quad (14)$$

که در آن:

$$COP_M = \frac{1}{(1 + COP^{-1})^M - 1} \quad (15)$$

یو<sup>۵</sup> و وانگ<sup>۶</sup> [۳۸] ساختاری چندمرحله‌ای با طول مرحله متغیر را پیشنهاد دادند که در آن طول مرحله از طرف سرد به طرف گرم کاهش می‌یابد. در این مرجع، روشی جهت تعیین COP ماکزیمم از طریق محاسبات عددی ارائه شده است. نتیجه به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که سیستم آبخاری سه مرحله‌ای در مقایسه با ماژول‌های تک‌مرحله‌ای با طول مرحله یکسان می‌تواند منجر به بهبود COP به میزان حدود ۲۵٪ و بهبود ظرفیت سرمایشی حدود ۳۶٪ گردد. مقدار COP ماکزیمم برای ماژول ترموالکتریک تک‌مرحله‌ای با جریان بهینه به ضریب شایستگی ماده ترموالکتریک و هم‌چنین اختلاف دما بین طرف گرم و سرد بستگی دارد [۳۸]. برای دما طرف گرم ثابت، مقدار COP ماکزیمم در طی افزایش اختلاف دما بین طرف گرم و سرد، کاهش می‌یابد.

کریمی<sup>۷</sup> و همکاران [۳۹] برای ارزیابی مزایای کارایی خنک‌کن ترموالکتریک چندمرحله‌ای (یک خنک‌کن ترموالکتریک چندمرحله‌ای هرمی با ۱۰ مرحله) در مقایسه با خنک‌کن ترموالکتریک تک‌مرحله‌ای به لحاظ مقدار شار حرارتی ماکزیمم و COP کلی، تحلیل و بررسی انجام داده‌اند. آن‌ها مقدار COP و مقاومت گرمایی چاه حرارتی را به‌عنوان پارامتری کلیدی جهت به دست آوردن فرمول‌هایی برای COP و مقاومت گرمایی چاه حرارتی در مقابل جریان الکتریکی در نظر گرفتند. آن‌ها مشاهده کردند که طراحی بهینه خنک‌کن ترموالکتریک چندمرحله‌ای بر اساس COP ماکزیمم و بهترین فن‌آوری چاه حرارتی صورت گرفته است. ما<sup>۸</sup> و یو<sup>۹</sup> [۴۰] یک مدل تحلیلی جدید از خنک‌کن ترموالکتریک آبخاری دومرحله‌ای را ارائه کرده‌اند. طبق مطالعه آن‌ها، رساندن COP به مقدار حداکثر برای نسبتی خاص بین طول

<sup>1</sup> D. M. Rowe

<sup>2</sup> G. J. Snyder

<sup>3</sup> Chen J

<sup>4</sup> Goldsmid JH

<sup>5</sup> Yu J

<sup>6</sup> Wang B

<sup>7</sup> Karimi G

<sup>8</sup> Ma M

<sup>9</sup> Yu J

	τ	ضریب تامسون (V/K)
	زیر نویس‌ها	
	a	محیط
	c	طرف سرد
	d	جریان از اتصال گرم به اتصال سرد
	e	الکتریکی
	h	طرف گرم
	i	مرحله
	j	اتصال
	m	ماژول
	max	حداکثر
	r	نسبی
	C	کارنو
	J	ژول
	M	ماژول چندمرحله‌ای
	N	نیمه‌هادی نوع N
	P	نیمه‌هادی نوع P
	۸- مراجع	
[17]		R. L. Kallaher, C. A. Latham, F. Sharifi, An apparatus for concurrent measurement of thermoelectric material parameters, <i>Review of Scientific Instruments</i> , Vol. 84, No. 1, pp. 013907, 2013.
[18]		A. F. Ioffe, Semiconductor thermoelements and thermoelectric cooling, 1957.
[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.
[20]		T. Handbook, Macro to Nano, edited by DM Rowe, <i>CRC Taylor &amp; Francis, Boca Ratcon</i> , 2006.
[21]		S. R. Annapragada, T. Salamon, P. Kolodner, M. Hodes, S. V. Garimella, Determination of electrical contact resistivity in thermoelectric modules (TEMs) from module-level measurements, <i>Components, Packaging and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on</i> , Vol. 2, No. 4, pp. 668-676, 2012.
[22]		O. Yamashita, Effect of temperature dependence of electrical resistivity on the cooling performance of a single thermoelectric element, <i>Applied Energy</i> , Vol. 85, No. 10, pp. 1002-1014, 2008.
[23]		Y.-W. Chang, C.-C. Chang, M.-T. Ke, S.-L. Chen, Thermoelectric air-cooling module for electronic devices, <i>Applied Thermal Engineering</i> , Vol. 29, No. 13, pp. 2731-2737, 2009.
[24]		A. M. Pettes, M. S. Hodes, K. E. Goodson, Optimized thermoelectric refrigeration in the presence of thermal boundary resistance, in <i>Proceeding of</i> , American Society of Mechanical Engineers, pp. 221-228.
[25]		E. S. Jeong, A new approach to optimize thermoelectric cooling modules, <i>Cryogenics</i> , Vol. 59, pp. 38-43, 2014.
[26]		J. Bierschenk, D. Johnson, Extending the limits of air cooling with thermoelectrically enhanced heat sinks, in <i>Proceeding of</i> , IEEE, pp. 679-684.
[27]		G. J. Snyder, M. Soto, R. Alley, D. Koester, B. Conner, Hot spot cooling using embedded thermoelectric coolers, in <i>Proceeding of</i> , IEEE, pp. 135-143.
[28]		S. A. Abdul-Wahab, A. Elkamel, A. M. Al-Damkhi, A. Is' haq, H. S. Al-Rubai'ey, A. K. Al-Battashi, A. R. Al-Tamimi, K. H. Al-Mamari, M. U. Chutani, Design and experimental investigation of portable solar thermoelectric refrigerator, <i>Renewable Energy</i> , Vol. 34, No. 1, pp. 30-34, 2009.
[29]		D. Astrain, J. Vián, J. Albizua, Computational model for refrigerators based on Peltier effect application, <i>Applied Thermal Engineering</i> , Vol. 25, No. 17, pp. 3149-3162, 2005.
[30]		C.-Y. Du, C.-D. Wen, Experimental investigation and numerical analysis for one-stage thermoelectric cooler considering Thomson effect, <i>International Journal of Heat and Mass Transfer</i> , Vol. 54, No. 23, pp. 4875-4884, 2011.
[31]		H. Goldsmid, Electronic Refrigeration (Pion, London, 1986), <i>Chap</i> , Vol. 3, pp. 57-87.
[32]		M. Cosnier, G. Fraisse, L. Luo, An experimental and numerical study of a thermoelectric air-cooling and air-heating system, <i>International Journal of refrigeration</i> , Vol. 31, No. 6, pp. 1051-1062, 2008.
[33]		J. Pérez-Aparicio, R. Palma, R. Taylor, Finite element analysis and material sensitivity of Peltier thermoelectric cells coolers, <i>International Journal of Heat and Mass Transfer</i> , Vol. 55, No. 4, pp. 1363-1374, 2012.
[34]		W.-H. Chen, C.-Y. Liao, C.-I. Hung, A numerical study on the performance of miniature thermoelectric cooler affected by Thomson effect, <i>Applied Energy</i> , Vol. 89, No. 1, pp. 464-473, 2012.
[35]		F. Meng, L. Chen, F. Sun, Performance prediction and irreversibility analysis of a thermoelectric refrigerator with finned heat exchanger, <i>Acta Physica Polonica A</i> , Vol. 120, No. 3, pp. 397-406, 2011.
[36]		D. M. Rowe, <i>CRC handbook of thermoelectrics</i> : CRC press, 1995.
[37]		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.
[38]		J. Yu, B. Wang, Enhancing the maximum coefficient of performance of thermoelectric cooling modules using internally cascaded thermoelectric couples, <i>international journal of refrigeration</i> , Vol. 32, No. 1, pp. 32-39, 2009.
[39]		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.
[40]		M. Ma, J. Yu, An analysis on a two-stage cascade thermoelectric cooler for electronics cooling applications, <i>International Journal of Refrigeration</i> , Vol. 38, pp. 352-357, 2014.
[1]		R. Cherkez, Theoretical studies on the efficiency of air conditioner based on permeable thermoelectric converter, <i>Applied Thermal Engineering</i> , Vol. 38, pp. 7-13, 2012.
[2]		F. J. DiSalvo, Thermoelectric cooling and power generation, <i>Science</i> , Vol. 285, No. 5428, pp. 703-706, 1999.
[3]		A. Majumdar, Thermoelectric devices: helping chips to keep their cool, <i>Nature Nanotechnology</i> , Vol. 4, No. 4, pp. 214-215, 2009.
[4]		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.
[5]		S. J. Kim, J. H. We, B. J. Cho, A wearable thermoelectric generator fabricated on a glass fabric, <i>Energy &amp; Environmental Science</i> , Vol. 7, No. 6, pp. 1959-1965, 2014.
[6]		Z. Tian, S. Lee, G. Chen, Heat transfer in thermoelectric materials and devices, <i>Journal of Heat Transfer</i> , Vol. 135, No. 6, pp. 061605, 2013.
[7]		G. J. Snyder, E. S. Toberer, Complex thermoelectric materials, <i>Nature materials</i> , Vol. 7, No. 2, pp. 105-114, 2008.
[8]		X. Xuan, Investigation of thermal contact effect on thermoelectric coolers, <i>Energy conversion and management</i> , Vol. 44, No. 3, pp. 399-410, 2003.
[9]		H. J. Goldsmid, <i>Review of thermoelectric materials</i> , in: <i>Introduction to Thermoelectricity</i> , Eds., pp. 139-166: Springer, 2010.
[10]		M. Barako, W. Park, A. Marconnet, M. Asheghi, K. Goodson, Thermal cycling, mechanical degradation, and the effective figure of merit of a thermoelectric module, <i>Journal of electronic materials</i> , Vol. 42, No. 3, pp. 372-381, 2013.
[11]		H. Wang, R. McCarty, J. R. Salvador, A. Yamamoto, J. König, Determination of thermoelectric module efficiency: a survey, <i>Journal of Electronic Materials</i> , Vol. 43, No. 6, pp. 2274-2286, 2014.
[12]		D. Rowe, G. Min, Evaluation of thermoelectric modules for power generation, <i>Journal of Power Sources</i> , Vol. 73, No. 2, pp. 193-198, 1998.
[13]		J. Hejtmánek, K. Knížek, V. Švejda, P. Horna, M. Sikora, Test system for thermoelectric modules and materials, <i>Journal of Electronic Materials</i> , Vol. 43, No. 10, pp. 3726-3732, 2014.
[14]		H. Zhang, A general approach in evaluating and optimizing thermoelectric coolers, <i>international journal of refrigeration</i> , Vol. 33, No. 6, pp. 1187-1196, 2010.
[15]		B. Ciyilan, S. Yilmaz, Design of a thermoelectric module test system using a novel test method, <i>International journal of thermal sciences</i> , Vol. 46, No. 7, pp. 717-725, 2007.
[16]		H.-C. Chien, E.-T. Chu, H.-L. Hsieh, J.-Y. Huang, S.-T. Wu, M.-J. Dai, C.-K. Liu, D.-J. Yao, Evaluation of Temperature-Dependent Effective Material Properties and Performance of a