

# مدل سازی ریاضی برای به دست آوردن پارامترهای داخلی ترموالکتریک

مرضیه سیاه مرگویی<sup>1</sup>، نادر رهبر<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران  
2- استادیار، مرکز تحقیقات راهبردی انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران  
\*سمنان، صندوق پستی 3519697951، پست الکترونیکی: [rahbar@semnaniau.ac.ir](mailto:rahbar@semnaniau.ac.ir)

## چکیده

ترموالکتریک علم تبدیل گرما به انرژی الکتریکی و یا بطور معکوس تبدیل انرژی الکتریکی به گرمایش و یا سرمایش است. در حال حاضر کاربرد انبوه ترموالکتریک در خنک کننده‌ها می‌باشد. مهمترین مشخصه این تراشه‌ها این است که فقدان قسمت‌های مکانیکی، امکان کاربری پاک و بی‌صدا، ابعاد کوچک و وزن سبک، قابلیت اطمینان و نیز شرایط نگهداری و تعمیر ساده را فراهم می‌کند. مانع اصلی در تجاری سازی این فناوری، کارآمدی ناچیز آن است. در این مقاله به بررسی روشی تئوری برای به دست آوردن پارامترهای داخلی ترموالکتریک پرداخته شده است. اعتبار سنجی این روش از طریق بررسی جواب‌های حاصله از این روش با مقادیر کاتالوگ صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد میزان خطا این روش 3/17 درصد می‌باشد.

## کلیدواژگان

ترموالکتریک، ولتاژ، ضرایب داخلی

## A Mathematical modeling procedure to obtain thermoelectric internal parameters

M.siahmargoi<sup>1</sup>, N.rahbar<sup>2\*</sup>

1- Department of mechanical engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.  
2- Strategic Center for Energy and Sustainable Development, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran  
\*P.O.B. 3519697951 Semnan, Iran, [rahbar@semnaniau.ac.ir](mailto:rahbar@semnaniau.ac.ir)

## Abstract

Thermoelectric is the science of heat conversion into electrical energy or electrical energy conversion into heating or cooling inversely. Currently the mass application of thermoelectric is in the coolers. The most important characteristic of these chips is the lack of mechanical parts, enabling the use of clean and silent, small size and light weight, reliability and also provides simple maintenance and repair. The main obstacle in the commercialization of this technology is its low efficiency. In this paper, the theoretical approach to obtain a thermoelectric internal parameters has been studied. This method is validated by examining the results obtained from this procedure with catalog values. The results show the error of this method is 3.17%.

## Keywords

Thermoelectric, voltage, internal parameter

## 1- مقدمه

بودن انرژی، قابلیت اطمینان سیستم و عملکرد بی‌صدا، کم اهمیت‌تر است، می‌توان از این سیستم استفاده کرد [1-4]. ترموالکتریک در دستگاه‌های الکترونیکی، ابزار پزشکی، تهویه مطبوع خودرو و یخچال و فریزر می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند [5]. کاربردهای یخچال‌های ترموالکتریک نیز شامل جایگزینی کولرها و خنک‌سازی موضعی در کامپیوترها و آشکارسازهای مادون قرمز است.

## 2- مقدمه‌ای بر ترموالکتریک

مواد ترموالکتریک موادی هستند که ویژگی‌های ترموالکتریک قابل توجهی دارند، مثل موادی که طیفی از دما را به جریان الکتریکی (اثر سبک<sup>2</sup>)، جریان الکتریکی را به طیف دمایی (اثر پلتر<sup>3</sup>) و گرما را به عنوان شار جریان عبوری از طریق آن‌ها، در زمانیکه تفاوت دمایی بین پایانه آن مواد وجود داشته باشد جذب یا دفع می‌کند [1].

در سال‌های اخیر به دلیل افزایش هزینه‌های انرژی و گرم شدن کره زمین در ارتباط با منابع سوخت فسیلی دانشمندان به دنبال منابع انرژی پایدارتر و پاک‌تر برای جایگزین کردن آن بودند که یکی از آن‌ها سیستم یخچال‌های ترموالکتریک است. دستگاه‌های خنک‌کننده ترموالکتریک دارای مزایای بیش از سایر خنک‌کننده‌های موجود می‌باشند که عبارت‌اند از: عدم وجود قطعات متحرک، وزن کم و حجم کوچک، توانایی سرمایش تا زیر دمای محیط اطراف، توانایی ایجاد برودت یا گرما توسط یک واحد ترموالکتریک، تنظیم دقیق دما، ضریب اطمینان بالا، ادامه کار بدون سر و صدا و نویز اضافی، توانایی کار در خلأ و جاذبه صفر، تغذیه ساده، توانایی تولید الکتریسیته، دوستانه محیط زیست، عدم حضور سیال. علاوه بر این قابلیت کارکرد با جریان برق مستقیم<sup>1</sup>، قابلیت اتصال به سلول‌های فتوولتائیک، جریان برق اتومبیل و سلول خورشیدی را دارا می‌باشد. معایب اصلی خنک‌کننده ترموالکتریک، هزینه بالا و بهره‌وری انرژی کم است، اما زمانیکه هزینه سیستم و بهره‌وری انرژی از در دسترس

<sup>2</sup>seebeck  
<sup>3</sup>bismuth-antimony

<sup>1</sup>Direct Current (DC)

ترموالکتریک در کاربردهای گسترده‌ای از قبیل خنک‌کننده‌های دیودی کوچک، یخچال‌های قابل حمل، سردکننده‌های مایع و غیره استفاده می‌شود. بسیاری از این واحدها هم‌چنین می‌توانند برای تولید توان DC در شرایط خاص استفاده شوند. کاربردهای جدید و اغلب جالب ترموالکتریک هر روز در حال پیشرفت است.

خنک‌کننده ترموالکتریک علاوه بر کاربردهای ترموالکتریک در نظامی، هوافضا، کارهای صنعتی و علمی، به تدریج حضور بیشتری را در زندگی روزمره مردم پیدا می‌کند. دستگاه‌های خنک‌کننده ترموالکتریک به‌طور گسترده برای خنک‌کننده‌های الکترونیکی مانند پردازنده‌های کامپیوتری، پکیج‌های نگهداری محصولات غذایی و آشامیدنی قابل حمل، کنترل دمایی صندلی ماشین و حتی دستگاه‌های تهویه مطبوع ترموالکتریک مورد استفاده قرار می‌گیرند. جامعه علمی مقدار زیادی از تلاش خود را در زمینه تحقیقات خنک‌کننده‌های ترموالکتریک قرار داده است. بررسی‌های بسیاری در زمینه فن‌آوری و کاربردهای ترموالکتریک که شامل مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل مدول ترموالکتریک [4]، فن‌آوری‌های ترموالکتریک مبتنی بر انرژی خورشیدی [5]، خنک‌کننده، گرمایش، قدرت تولید، و بازیابی حرارت اتلافی [6, 7] انجام شده است. تحقیقات اخیر دو راه را برای به دست آوردن پیشرفت‌های چشمگیری در خنک‌کننده ترموالکتریک نشان می‌دهد. (1) بهبود بازده درونی مواد ترموالکتریک (2) بهبود طراحی حرارتی سیستم خنک‌کننده ترموالکتریک و بهینه‌سازی بر اساس ترموالکتریک‌های موجود.

بررسی‌های انجام شده در زمینه بهبود مواد ترموالکتریک به‌صورت زیر می‌باشد. لیو<sup>4</sup> و همکارانش [8] در سال 2012 به بررسی رفتار شبه مایع مس در اطراف زیر شبکه بلوری se در بلور  $cu_{2-x}se$  که منجر به هدایت حرارتی بسیار کم در شبکه و بالا رفتن میزان ضریب مزیت<sup>5</sup> در این نیمه‌هادی می‌شود پرداخته‌اند. هارمن<sup>6</sup> و همکارانش [9] در سال 2005 بالاترین میزان ضریب مزیت را در تحقیقات سه به دست آورد، درحالی‌که در حال حاضر بهترین ترموالکتریک‌های تجاری دارای ارزش ضریب مزیت ZT بابر یک می‌باشند. همچنین بل<sup>7</sup> [7] بیان کرد اگر میزان متوسط ZT به دو برسد، گرمایش حالت جامد خانگی و تجاری، تهویه و دستگاه‌های خنک‌کننده هوا با استفاده از مواد ترموالکتریک عملی می‌شود. مینچ<sup>8</sup> و همکارانش [10] پیشنهاد کردند که خواص برخی از مواد ترموالکتریک به‌شدت وابسته به دما است. از این رو به منظور ساخت یک مدل کلی خنک‌کننده ترموالکتریک، خواص متغیر باید در نظر گرفته شود.

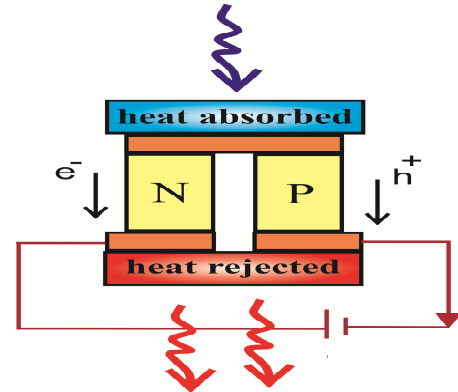
بعد از بررسی تحقیقات صورت گرفته در زمینه بهبود مواد ترموالکتریک به بررسی طراحی سیستم خنک‌کننده ترموالکتریک و بهینه‌سازی مجموعه می‌پردازیم. تحقیقات صورت گرفته با توجه به استفاده خنک‌کننده ترموالکتریک در فن‌آوری‌های متفاوت مانند یخچال‌های ترموالکتریک و خنک‌کننده‌های الکترونیکی و خنک‌کننده اتومبیل و خنک‌کننده تهویه مطبوع و ... کارهای تئوری و تجربی زیادی صورت گرفته است.

چنگ<sup>9</sup> و همکارانش [11] عملکرد یک خنک‌کننده هوای ترموالکتریکی برای دستگاه‌های الکترونیکی را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق نشان داده شد، که در یک‌بار حرارتی خاص، مدول خنک‌کننده ترموالکتریک در جریان ورودی مطلوب، بهترین عملکرد خنک‌کنندگی را دارا است.

سیبک اول نشان داد که یک نیروی محرکه به وسیله حرارت دادن محل اتصال بین دو فلز غیر مشابه تولید می‌شود. اثر معکوس توسط پلتیر در سال 1834 کشف شد و بدون شک لنز<sup>1</sup> در سال 1838 نشان داد زمانیکه با موفقیت آب در محل اتصال بیسموت آنتیموان<sup>2</sup> یخ زد، آن را ثابت کرد [2].

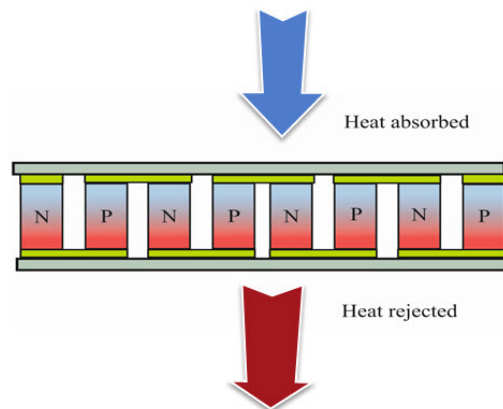
## 1-2 درون‌مایه ترموالکتریک

دو نوع مواد در زوج‌های ترموالکتریک وجود دارد. یکی نوع n و دیگری نوع p که از طریق اتصالات فلزی به هم متصل هم موازی می‌باشند و لایه‌ی بیرونی آن‌ها یک ماده سرامیکی است تا بتوانند گرما و جریان الکتریکی را منتقل کنند. شکل 1 یک زوج ترموالکتریک را نشان می‌دهد.



شکل 1 شماتیک یک زوج ترموالکتریک

اثر پلتیر، پایه بسیاری از دستگاه‌های سرمایه‌ی ترموالکتریک و اثر سیبک پایه دستگاه‌های مولد توان است. هر دو دستگاه‌های یخچال و مولدهای توان می‌توانند با استفاده از مدل مشابه کار کنند. شکل 2 مثالی از یک سیستم ساده ترموالکتریک و نحوه‌ی عملکرد آن را نشان می‌دهد.



شکل 2 شماتیک عملکرد سیستم خنک‌کننده ترموالکتریک

وقتی جریان مستقیم به سیستم ترموالکتریکی اعمال می‌شود، حامل‌های بار مثبت و منفی در رشته قرص‌ها، انرژی گرمایی را از یک سطح لایه خروجی دریافت و آن را از سطح طرف دیگر آزاد می‌کنند. سطحی که انرژی گرمایی آن جذب می‌شود، سرد شده و سطح مخالف که انرژی گرمایی را دریافت می‌کند، گرم می‌شود. زمانی که قطب‌های مثبت و منفی ولتاژ منبع مستقیم<sup>3</sup> تغییر کند این پدیده به‌صورت معکوس اتفاق می‌افتد و انتقال گرما در جهت مخالف صورت می‌گیرد [3]. با استفاده از این روش ساده، فن‌آوری

<sup>4</sup> Liu

<sup>5</sup> ZT

<sup>6</sup> Harman

<sup>7</sup> Bell

<sup>8</sup> Minnich

<sup>9</sup> Chang

<sup>1</sup>Lenz

<sup>2</sup>bismuth-antimony

<sup>3</sup>Direct current (DC)

ترموالکتریک دوطبقه اختلاف دما را بهبود بخشیده و مؤثرتر از ترموالکتریک تک طبقه است.

فرانسیس دیسالو<sup>12</sup> [17] به معرفی ترموالکتریک و نحوه کارکرد آن و اساس کار آن پرداخته است. ایشان با بهبود مواد ترموالکتریک اثر آن را در افزایش بهره‌وری ترموالکتریک بررسی کرده است. بهبود مواد نه تنها به خنک‌کنندگی الکتریکی پیشرفته کمک می‌کند بلکه بر روی ارائه مزایای انرژی در یخچال و حتی تولید انرژی برق با هدر رفت گرما تأثیر می‌گذارد.

رهاب نور<sup>13</sup> و محمد الکبی<sup>14</sup> [18] به بررسی تئوری انتقال حرارت به روش تفاضل محدود برای پارامترهای متفاوت داخلی ترموالکتریک پرداخته‌اند. همچنین به بررسی تأثیرات توان ورودی و  $T_c$  بر روی  $Q_c$  و  $Q_h$  و  $COP$  پرداختند و بهینه‌ترین مقدار ضریب عملکرد زمانی اتفاق می‌افتد که توان ورودی کمترین مقدار را دارد با افزایش توان ورودی ضریب عملکرد کاهش پیدا می‌کند.

### 3- تئوری حاکم

از آنجایی که به دلیل مسائل امنیتی شرکت‌های تولید کننده ترموالکتریک، مقادیر ضرایب داخلی ترموالکتریک در اختیار کاربران قرار نمی‌دهند و معلوم بودن این مقادیر برای حل معادلات مربوط به ترموالکتریک ضروری است. در ازای آن نمودارهای عملکرد ترموالکتریک را در اختیار کاربران قرار می‌دهند که در این نمودارها بیشترین اختلاف دما برای جریان‌های الکتریکی و حرارت انتقالی متفاوت نشان داده می‌شود. باین حال امکان اینکه با استفاده از این نمودارها بتوان تشخیص داد چه مقدار انرژی الکتریکی می‌تواند تولید شود اگر از ترموالکتریک به عنوان ژنراتور استفاده شود وجود ندارد. برای این منظور چن<sup>15</sup> و سیندر<sup>16</sup> [19] با توسعه معادلات و استفاده از پارامترهای  $Q_{max}$  و  $\Delta T_{max}$  و  $I_{max}$  مقادیر ضریب سبیک ترموالکتریک  $\bar{\alpha}_e$  و مقاومت الکتریکی  $\bar{\rho}$  و رسانایی گرمایی  $\bar{k}$  را به صورت روابط زیر به دست آوردند:

$$\bar{\alpha}_e = \frac{Q_{max}(T_h - \Delta T_{max})}{NT^2 I_{max}} \quad (1)$$

$$\bar{\rho} = \frac{Af(T_h - \Delta T_{max})^2 Q_{max}}{2 T_h^2 l N^2 I_{max}^2} \quad (2)$$

$$\bar{k} = \frac{l(T_h - \Delta T_{max})^2 Q_{max}}{Af T_h^2 \Delta T_{max}} \quad (3)$$

این روابط دارای پیچیدگی است. در این مقاله با روش و روابطی بسیار ساده‌تر مقادیر ضرایب داخلی ترموالکتریک را به دست می‌آوریم.

در ابتدا یک مدل ترموالکتریک که برای کاربردهای خنک‌کنندگی ساخته شده از شرکت فروتک را در نظر می‌گیریم. در اینجا با استفاده از معادلات اولیه و پایه ترموالکتریک [1] پارامترهای داخلی ترموالکتریک ( $\gamma$  و  $\beta$  و  $\alpha$ ) را به دست می‌آوریم.

اگر به یک قطعه ترموالکتریک جریان الکتریکی  $I$  اعمال شود یک مقدار مشخصی از گرما  $Q_c$  از سمت سرد جذب می‌شود و به سمت گرم پمپ می‌شود. به خاطر اثر پلتیر گرما پمپ شده متناسب با مقدار جریان و درجه حرارت در سمت سرد  $T_c(K)$  و  $\alpha(\frac{V}{K})$  که ضریب پلتیر است.

باین حال، در یک ماژول ترموالکتریک واقعی، حرارت جذب شده در سمت سرد، فقط عبارت پلتیر نیست، بلکه این مقدار به دلیل مقاومت الکتریکی و

گاوس<sup>1</sup> و ایلر<sup>2</sup> [12] به بررسی و نصب و راه‌اندازی فاز طراحی مدول‌های ترموالکتریک خنک‌کننده<sup>3</sup> همراه با عوامل مؤثر بر فاز پرداختند. بررسی‌ها بر روی محاسبات سطح گرم و سرد، محاسبات توان الکتریکی و محاسبات هیت-سینک بوده است. عملکرد مدول‌های ترموالکتریک خنک‌کننده توسط اثر گرمایش ژول، اختلاف دمای دو سر ترموالکتریک و ضریب هدایت حرارتی بین اتصالات PN تحت تأثیر قرار می‌گیرد. همچنین نشان داده شد که تأثیر عوامل تأثیرگذار را نمی‌توان نادیده گرفت و باید در طول محاسبات منظور شود.

ریفات<sup>4</sup> و ژائولی<sup>5</sup> [13] یک یخچال ترموالکتریک طراحی و تست کردند. سیستم در ابتدا به صورت یک هیت‌سینک بر روی سطح سرد و یک هیت‌سینک به همراه فن بر روی سطح گرم مورد بررسی قرار داده شد. همچنین برای حالت دوم سطح سرد ترموالکتریک خنک‌کننده با ماده تغییر فاز<sup>6</sup> محصور شد و مورد بررسی قرار گرفت. تعویض سیستم هیت‌سینک معمولی با ماده تغییر فاز، بهبود در عملکرد سیستم تبرید ترموالکتریک را به همراه داشت. همچنین جریان گرما معکوس در ترموالکتریک را می‌توان با استفاده از لوله‌های حرارتی بین ترموالکتریک خنک‌کننده و ماده تغییر فاز از بین برد.

چین<sup>7</sup> و هانگ<sup>8</sup> [14] به بررسی عملکرد خنک‌کننده ترموالکتریک در خنک‌کننده‌های الکترونیکی پرداختند. آن‌ها با معلوم بودن دمای سطح سرد  $T_c$  و اختلاف دمای دو سر ترموالکتریک  $\Delta T$  مقادیر ظرفیت خنک‌کنندگی و دمای اتصال به چپ و ضریب عملکرد ترموالکتریک و مقاومت هیت‌سینک سطح گرم ترموالکتریک را محاسبه کردند. نتایج نشان داد زمانی که دمای سطح سرد افزایش و اختلاف دمای دو سطح کاهش پیدا می‌کند، ضریب عملکرد خنک‌کنندگی افزایش پیدا می‌کند. بنابراین ضریب عملکرد ترموالکتریک بستگی به دمای سطح سرد و مقاومت هیت‌سینک سطح گرم دارد. آن‌ها هیت‌سینک با کانال میکرو را با استفاده از آب یا هوا خنک کردند تا کاهش مقاومت حرارتی برای هیت‌سینک گرم را در پی داشته باشد. کاهش مقاومت حرارتی هیت‌سینک گرم باعث افزایش ضریب عملکرد ترموالکتریک می‌شود.

چرکز<sup>9</sup> [15] به شرح امکان بهبود ضریب عملکرد خنک‌کنندگی برای خنک‌کننده برای ترموالکتریک با ترکیب دو اثر پلتیر و اثر ژول-تامسون پرداخت و نتایج به دست آمده نشان دادند که مقدار ضریب عملکرد خنک‌کنندگی 60 تا 70 درصد افزایش را در مقایسه با دستگاه‌های ترموالکتریک همرفتی و 5 تا 8 درصد افزایش در مقایسه با ترموالمنت‌های با اثر جزئی ژول داشته است.

مینگ<sup>10</sup> و یو<sup>11</sup> [16] یک مدل تحلیلی جدید از ترموالکتریک خنک‌کننده دوطبقه ارائه دادند. براساس مطالعه آن‌ها زمانی حداکثر ضریب عملکرد خنک‌کنندگی را خواهیم داشت که دمای سطح سرد زیاد و نسبت طول پایه ترموالکتریک طبقه اول به طول پایه کل مقداری کوچک باشد؛ بنابراین

<sup>1</sup>Gouws

<sup>2</sup>Eilers

<sup>3</sup>Thermoelectric cooler modules (TECMs)

<sup>4</sup>Riffat

<sup>5</sup>Xiaoli Ma

<sup>6</sup> phase change material (PCM)

<sup>7</sup>Chein

<sup>8</sup>Huang

<sup>9</sup>Cherkez

<sup>10</sup>Ming Ma

<sup>11</sup>Yu

<sup>12</sup>Francis J. DiSalvo

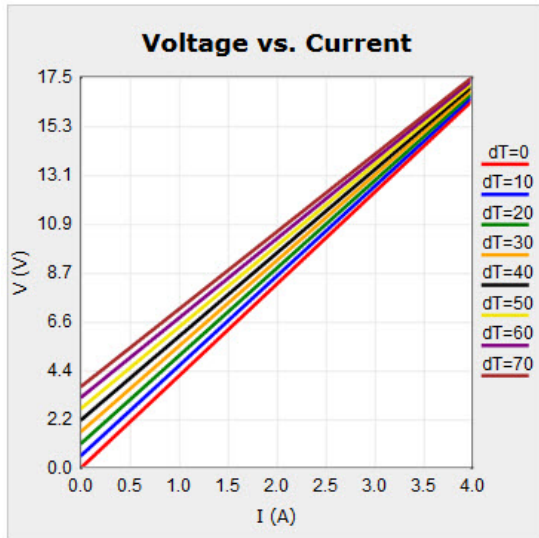
<sup>13</sup>Rehab Noor

<sup>14</sup>Mohammed Al-Kaby

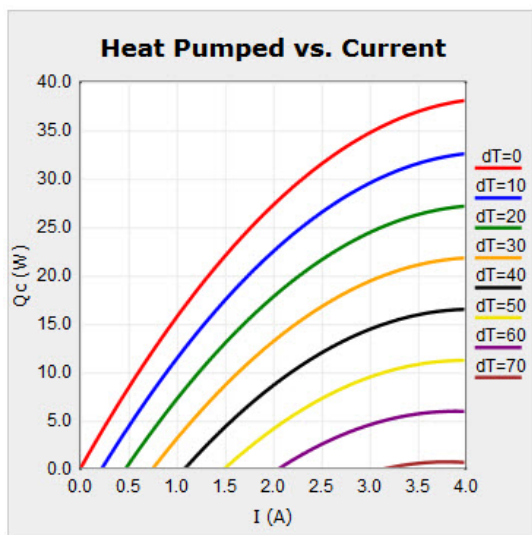
<sup>15</sup>Chen

<sup>16</sup>S Snyder

درصد خطا مقادیر متفاوتی از جریان الکتریکی و ولتاژ خوانده شده و از مقادیر به دست آمده برای مقاومت الکتریکی میانگین گرفته شده است. با قرار دادن مقدار  $\beta$  در رابطه (11) می توان مقدار  $\alpha$  را به دست آورد.



شکل 3 شماتیکی از کاتالوگ شرکت فروتک ferrotec



شکل 4 شماتیکی از کاتالوگ شرکت فروتک ferrotec

با قرار دادن مقدار  $\beta$  در رابطه (11) می توان مقدار  $\alpha$  را به دست آورد.

$$\alpha = \frac{Q_c + \frac{1}{2}\beta I^2}{IT_c} \quad (11)$$

زمانی که  $\Delta T = 0$  مقادیر  $T_c = T_h$  می باشد و مقدار  $\beta$  معلوم است. مقدار  $\alpha$  به  $I$  و  $Q_c$  وابسته است، در نتیجه مقدار  $a$  برای هر مقداری از  $Q_c$  و  $I$  بر روی منحنی  $\Delta T = 0$  می توان به دست آورد. برای کاستن از میزان خطا به جای استفاده از  $Q_{max}$  و  $I_{max}$  پیشنهاد می شود متوسط مقادیر به دست آمده برای  $\alpha$  لحاظ شود. دقت شود میزان تغییرات  $Q_c$  و  $I$  نسبت به هم خطی نیست.

در انتها، آخرین پارامتر داخلی ماژول ترموالکتریک  $\gamma$  می باشد که مرتبط با رسانایی گرمایی می باشد. برای به دست آمدن این پارامتر از رابطه (2) با شرط  $Q_c = 0$  استفاده می شود.

$$\gamma = \frac{\alpha IT_c - \frac{1}{2}\beta I^2}{\Delta T} \quad (12)$$

انتقال حرارت ناشی از هدایت، کاهش می یابد. با عبور جریان الکتریکی از مدول ترموالکتریک گرمایی داخل قطعه ایجاد می شود که به آن اثر ژول گفته می شود که متناسب است با مقاومت الکتریکی و مجذور جریان. توان تولید شده توسط اثر ژول برای طرف سرد و گرم ترموالکتریک مقداری برابر دارد.

عبارت آخر در معادله اصلی حرارت جذب شده توسط سطح سرد ترموالکتریک مقدار حرارت منتقل شده از سطح سرد به سطح گرم توسط مقاومت حرارتی درونی ترموالکتریک را نشان می دهد؛ که در اینجا میزان توان متناسب با ضریب رسانایی (هدایت) و اختلاف دمای سطح سرد و گرم است.

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (4)$$

بافرض این که خواص مواد داخلی (آلفا و گاما) ثابت هستند و به درجه حرارت بستگی ندارند معادله حرارتی سمت سرد به صورت زیر است [20]

$$Q_c = \alpha IT_c - \frac{1}{2}I^2\beta - \gamma\Delta T \quad (5)$$

معادله مشابهی می تواند برای توان حرارتی دفع شده در سطح گرم مورد استفاده قرار گیرد با این تفاوت که علامت عبارت وسط از منفی به مثبت تغییر می کند [20]

$$Q_h = \alpha IT_h + \frac{1}{2}I^2\beta - \gamma\Delta T \quad (6)$$

توان الکتریکی تولید شده در سیستم حاصل از ولتاژ و جریان الکتریکی می باشد. مقدار توان الکتریکی ترموالکتریک مانند بقیه لوازم الکتریکی ثابت نیست چون برای هر جریان الکتریکی، ولتاژ وابسته به اختلاف دمای دو سطح است و مقاومت الکتریکی  $\beta$  با تغییر دما تغییر می کند.

$$W = VI \quad (7)$$

بنابراین با استفاده از معادلات (5) و (6) می توان رابطه جدیدی برای توان الکتریکی نوشت

$$Q_h - Q_c = W$$

$$\alpha IT_h + \frac{1}{2}I^2\beta - \gamma\Delta T - \alpha IT_c + \frac{1}{2}I^2\beta + \gamma\Delta T = VI \quad (8)$$

با ساده سازی معادله بالا داریم

$$V = \alpha\Delta T + \beta I \quad (9)$$

مهم ترین مزیت معادله بالا این است که شامل دو عبارت است و به راحتی می توان با استفاده از منحنی های عملکرد مقادیر  $\alpha$  و  $\beta$  را به دست آورد. با مشخص شدن این مقادیر میزان  $\gamma$  نیز به دست می آید. در اینجا به عنوان مثال با استفاده از نمودارهای منحنی عملکرد ضرایب داخلی یک ترموالکتریک که مبدل های حرارتی آن به صورت سری به هم متصل است را به دست می آوریم.

### 3-1 پارامترهای داخلی ترموالکتریک

در منحنی عملکرد دیده می شود که می توان حرارت جذب شده را تابعی از  $\Delta T$  و جریان نوشت و به همچنین می توان ولتاژ را تابعی از جریان نوشت. در اینجا با استفاده از دو شرط  $Q_c = 0$ ،  $\Delta T = 0$  مقادیر این ضرایب را به دست می آوریم. برای به دست آوردن پارامترهای داخلی ترموالکتریک که به ترتیب  $\alpha$  و  $\beta$  و  $\gamma$  می باشند از روابط (5) و (9) استفاده می شود. با قرار دادن  $\Delta T = 0$  در رابطه (9) مقدار  $\beta$  به دست می آید.

$$\beta = \frac{V}{I} \quad (10)$$

با خواندن مقادیر جریان و ولتاژ از روی نمودارها و قراردادن مقادیر در رابطه (10) مقدار مقاومت الکتریکی به دست می آید که برای کاهش میزان

#### 4- نتایج

در این مقاله یک روش تحلیلی برای تخمین پارامترهای داخلی ترموالکتریک خنک کننده با استفاده از منحنی های عملکرد ارائه شده توسط تولیدکنندگان ترموالکتریک ارائه شده است. بعد از به دست آمدن این پارامترها تخمین چگونگی عملکرد قطعه ترموالکتریک تحت شرایط کاری متفاوت آسان تر است. در این تحقیق نشان داده شد نمودار جریان بر حسب ولتاژ خطی بوده و شیب نمودار بیانگر مقدار  $\beta$  بوده و میزان درصد خطا این روش 3/17 می باشد.

#### 5- فهرست علائم

- $Q_c$  میزان توان خنک کنندگی ترموالکتریک (W)
- $Q_h$  حرارت خروجی از ترموالکتریک (W)
- $T_c$  دمای سطح سرد ترموالکتریک (K)
- $T_h$  دمای سطح گرم ترموالکتریک (K)
- $\Delta T$  اختلاف دمای سطح سرد و سطح گرم ترموالکتریک (K)
- $I$  جریان الکتریکی (A)
- $V$  ولتاژ (A)
- $W$  توان الکتریکی سیستم (W)

#### علائم یونانی

- $a$  ضریب سبیک ( $V/K$ )
- $b$  مقاومت الکتریکی ( $\Omega$ )
- $g$  ضریب رسانایی ( $W/K$ )

#### 6- مراجع

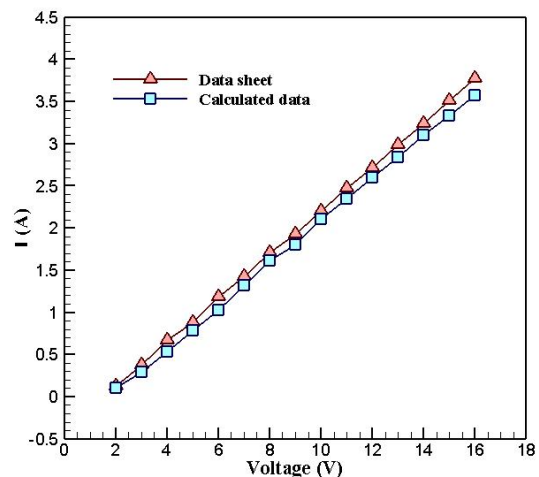
- [1] S. A. Siqueira, "Calculation of Time-Dependent Heat Flow in a Thermoelectric Sample," 2012.
- [2] I. I. a. T. S. S. Haidar, "Thermoelectric Cooling Using Peltier Cells in Cascade".
- [3] X.C. Tong, "Thermoelectric Cooling Through Thermoelectric Materials ", *Advanced Materials for Thermal Management of Electronic Packaging, Springer Series in Advanced Microelectronics* 30, 2011.
- [4] S. L. a. S. Ben-Yaakov, "Modeling and Analysis of Thermoelectric Modules," *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 43, 2007 ,
- [5] L. L. Hongxia Xi, Gilles Fraisseb, "Development and applications of solar-based thermoelectric technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, pp. 923-936, 2007.
- [6] X. M. S.B. Riffat "Thermoelectrics: a review of present and potential applications," *pergamon*, vol. 23, pp. 913-935, 2003.
- [7] L. E. Bell, "Cooling, Heating, Generating Power, and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems," *SCIENCE*, vol. 231, 2008.
- [8] X. S. Huili Liu, Fangfang Xu, Linlin Zhang, Wenqing Zhang, Lidong Chen, Qiang Li, Ctirad Uher, Tristan Day & G. Jeffrey Snyder, "Copper ion liquid-like thermoelectrics," 2012.

مقدار  $\gamma$  را برای هر مقدار  $I$  و  $\Delta T$  بر روی منحنی  $Q_c = 0$  می توان به دست آورد و مانند مقدار  $\alpha$  برای کاستن از میزان خطاها، متوسط گیری از مقدارهای به دست آمده  $\gamma$  در  $I$  و  $\Delta T$  های متفاوت پیشنهاد می شود [20].  
مقادیر به دست آمده برای  $\alpha$  و  $\beta$  و  $\gamma$  در جدول 1 ذکر شده است.

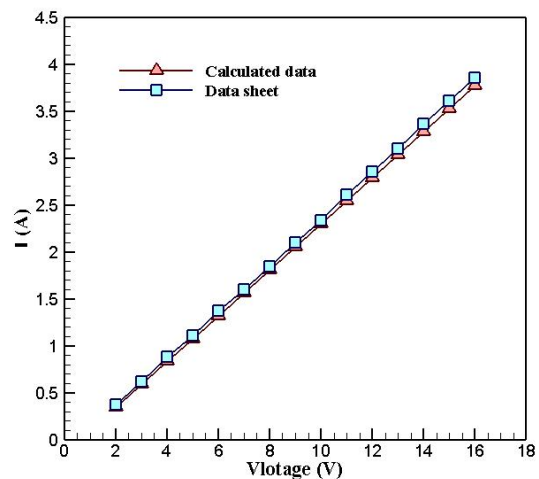
جدول 1 ضرایب داخلی ترموالکتریک در دمای 50 درجه سانتی گراد

ردیف	ضرایب داخلی ترموالکتریک	مقدار ضرایب در دمای 50°C
	$\alpha (VK^{-1})$	۰/۰۵۹۹۹
	$\beta(\Omega)$	۴/۰۹
	$\gamma (WK^{-1})$	۰/۴۴۴۴۸۵

برای اعتبار سنجی روش محاسباتی ارائه شده، معادله (2) با فرض دمای سطح گرم 50 درجه سانتی گراد و اختلاف دمای 10 و 30 درجه سانتی-گراد حل شده است. مقادیر به دست آمده با نمودارهای عملکرد مورد سنجش قرار گرفته اند؛ و نمودارهای اعتبار سنجی جریان برای دو حالت اختلاف دمای 10 و 30 درجه سانتی گراد را می توان در شکل های (6) و (7) ارائه شده است. همانطور که در شکل دیده می شود نمودار جریان بر حسب ولتاژ خطی بوده و شیب نمودار بیانگر مقدار  $\beta$  بوده و میزان درصد خطا این روش 3/17 می باشد.



شکل 5 اعتبار سنجی جریان در  $\Delta T = 30$



شکل 6 اعتبار سنجی جریان در  $\Delta T = 10$

- [9] T.C. Harman, M.P. Walsh, B.E. Laforge, and G.W. Turner, "Nanostructured Thermoelectric Materials," *Journal of Electronic materials*, vol. 34, 2005.
- [10] a. M. S. D. A. J. Minnich, b Z. F. Renc and G. Chen, "Bulk nanostructured thermoelectric materials: current research and future prospects," *Energy & Environmental Science*, 2009.
- [11] C.-C. C. a. Yu-Wei Chang a, Ming-Tsun Ke b ,Sih-Li Chen, "Thermoelectric air-cooling module for electronic devices," *Applied Thermal Engineering*, 2009.
- [12] R. G. a. H. Eilers, "A review on thermoelectric cooling modules: Installation design, performance and efficiency," *Scientific Research and Essays*, pp. 485-492, 2013.
- [13] S. A. O. S.B. Riffat, Xiaoli Ma, "A novel thermoelectric refrigeration system employing heat pipes and a phase change material: an experimental investigation," *pergamon*, vol. 23, pp. 313-323, 2001.
- [14] G. H. Reiyu Chein" ,Thermoelectric cooler application in electronic cooling," *elsevier*, pp. 2207-2217, 2004.
- [15] R. Cherkez, "Theoretical studies on the efficiency of air conditioner based on permeable thermoelectric converter," *Applied Thermal Engineering*, vol. 38, pp. 7.2012 ,13-
- [16] J. Y. Ming Ma, "An analysis on a two-stage cascade thermoelectric cooler for electronics cooling applications," *International Journal of Refrigeration*, 2013.
- [17] F. J. DiSalvo, "Thermoelectric Cooling and Power Generation," *aaas*, vol. 285.1999 ,
- [18] R. N. M. Al-Kaby, "Studey of thermal performance of thermoelectric cooling system".
- [19] Min Chena, G. Jeffrey Snyder, "Analytical and numerical parameter extraction for compact modeling of thermoelectric coolers," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013.
- [20] A. Palacios, Pecharrómán, Pagola, "Analytical procedure to obtain internal parameters from performance curves of commercial thermoelectric modules," *elsevier*, pp. 3501-3505, 2009.