

# بررسی عملکرد مدولهای ترموالکتریک در استحصال توان الکتریکی از گازهای گرم اگزوز خودرو

نادر رهبر<sup>۱\*</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

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

## چکیده

امروزه حتی مدرن ترین موتورهای احتراق داخلی راندمانی حدود ۴۰٪ داشته و مابقی انرژی حاصل از احتراق سوخت، به صورت حرارت هدر می رود. حدود نیمی از انرژی اتلافی، از طریق اگزوز خودرو به محیط اطراف فرستاده می شود. از آنجاییکه دمای گازهای خروجی از اگزوز بالاتر از محیط اطراف می باشد، از انرژی موجود در آنها می توان برای تولید توان استفاده نمود. این ایده امروزه مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. یکی از روشهای استحصال از این انرژی اتلافی، استفاده از تکنولوژی ترموالکتریک می باشد. مدولهای ترموالکتریک با قرار گرفتن در معرض اختلاف دمای موجود بین داخل اگزوز و هوای محیط توان تولید انرژی الکتریکی را خواهند داشت. عمر بسیار زیاد، عدم وجود قطعات متحرک، بی صدا بودن و قیمت نسبتاً پایین مدولهای ترموالکتریک، آنها را گزینه ای بسیار جذاب جهت استفاده در این زمینه می نماید. هدف از این تحقیق بررسی و امکان سنجی استفاده از مدولهای ترموالکتریک برای تولید قدرت از حرارت خروجی اگزوز می باشد. نتایج حاصل از مدلسازی نشان می دهند که تکنولوژی ترموالکتریک در اختلاف دمای حدود ۳۰۰ درجه سانتیگراد قابلیت تبدیل ۱۰ درصد از حرارت اتلافی را به توان الکتریکی داشته و هرچه اختلاف دمای دو سر ترموالکتریک بیشتر شود این توانایی افزایش خواهد یافت. همچنین نتایج نشان می دهند که با افزایش دمای خروجی از اگزوز دوره بازگشت سرمایه به شدت کاهش خواهد یافت.

## کلیدواژگان

تکنولوژی ترموالکتریک، بازیافت حرارت اتلافی، تولید توان الکتریکی، کاهش خطرات زیست محیطی، اگزوز خودرو

## ۱- مقدمه

آغاز قرن ۲۱ با طوفانی از بحران انرژی همراه بوده است. افزایش قیمت انرژی، کاهش منابع و امنیت دسترسی به آنها، همچنین افزایش نگرانیهای زیست محیطی به سرعت باعث تغییرات وسیعی در سیاست گذاریهای مربوط به حوزه انرژی شده اند. انرژی و آب مهم ترین پارامترهای کلیدی توسعه یافتگی جوامع می باشند. جوامع صنعتی به شدت به منابع انرژی وابسته بوده، بنابراین وجود امنیت دسترسی به این منابع یکی از چالش برانگیزترین مشکلات بشر امروز گردیده است. برآورد می شود به علت افزایش جمعیت جهان و توسعه یافتگی جوامع، نرخ تقاضای انرژی در جهان در نیمه اول قرن حاضر دو برابر و در نیمه بعد به سه برابر افزایش یابد. بنابراین در صورت عدم تلاش در زمینه دسترسی به منابع جدید انرژی، همچنین بهینه سازی مصرف آن بسیاری از جوامع در سالهای آینده دچار بحران انرژی خواهند گردید.

متأسفانه استفاده از سوختهای فسیلی تأثیرات بسیار مخربی بر روی محیط زیست خواهد داشت. انتشار گازهای گلخانه ای و به تبع آن گرم شدن کره زمین، آب شدن یخها، آلوده شدن هوا و همچنین بارانهای اسیدی تنها جزئی از تأثیرات مخرب استفاده از سوختهای فسیلی می باشند. تا به امروز تلاشهای بسیاری توسط دانشمندان برای کاهش وابستگی انسان به انرژیهای متداول فسیلی صورت گرفته است. این تلاشها و تحقیقات به دو دسته کلی تقسیم بندی می شوند: جایگزینی سوختهای فسیلی با انرژیهای تجدید پذیر و بهینه سازی مصرف سوخت با افزایش کارایی در فرایندها [۱].

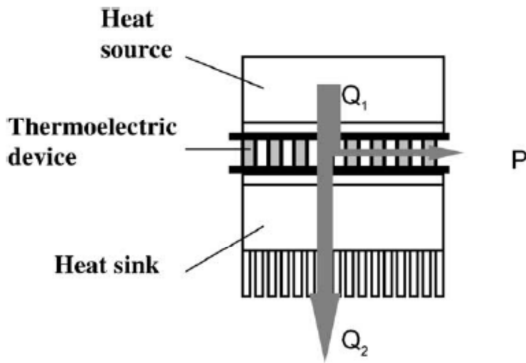
هرچند که تلاشهای بسیار زیادی در زمینه جایگزینی سوختهای فسیلی با انرژیهای تجدیدپذیر همانند باد، خورشید و زمین گرمایی صورت گرفته است، اما هنوز به علت ارزانتر بودن سوختهای فسیلی همچنین عدم دسترسی بشر به تکنولوژیهای مناسب جهت تبدیل انرژیهای نو به انرژیهای مورد نیاز، سوختهای فسیلی جایگاه خود را در زندگی روزمره حفظ نموده اند. بنابراین در صورت

افزایش کارایی در نحوه استفاده از این منابع انرژی، می توان علاوه بر کاهش هزینه های انرژی، آلاینده های ورودی به محیط زیست را نیز کاهش داد.

هرچند روشهای متعددی در زمینه افزایش کارایی فرایندهای مصرف کننده سوختهای فسیلی وجود دارد، اما در هر حال همواره در این فرایندها انرژی حرارتی تلف شده زیادی وجود خواهد داشت. این انرژی حرارتی نه تنها باعث کاهش کارایی سیستم و هدر رفتن منابع مالی می شود، بلکه در دراز مدت و در حجم وسیع می تواند اثرات زیست محیطی فراوانی را بخصوص در زمینه افزایش دمای محیط بجا بگذارد. به عنوان مثال می توان به حرارت خروجی از دودکشها در پالایشگاهها و نیروگاهها، حرارت خروجی از چگالنده ها، حرارت اتلافی در فلزهای پالایشگاهی، حرارت خروجی از اگزوز وسایل نقلیه و ... اشاره نمود. بنابراین در صورت تبدیل این حرارت اتلافی به توان الکتریکی می توان علاوه بر کاهش تأثیرات مخرب زیست محیطی، از هدررفت منابع مالی نیز جلوگیری نمود. تکنولوژی ترموالکتریک یکی از گزینه های مورد توجه در این زمینه می باشد که بخصوص در مکانهایی با دماهای پایینتر از ۳۰۰ درجه سانتیگراد مزیت زیادی را در مقایسه با سایر تکنولوژیهای موجود از خود نشان می دهد. تکنولوژی ترموالکتریک می تواند مستقیماً انرژی حرارتی را به انرژی الکتریکی تبدیل کند. یک مدول ترموالکتریک بدون هیچگونه اجزای متحرک بوده همچنین بسیار جمع و جور و کوچک می باشد. مزیت دیگر تکنولوژی ترموالکتریک این است که بسیار قابل اطمینان بوده و دارای عمر حدود ۱۰۰ هزار ساعت می باشد. این وسیله از نظر زیست محیطی نیز کاملاً سازگار با محیط زیست است. علیرغم مزایای ذکر شده تکنولوژی ترموالکتریک این عیب را دارد که راندمان تبدیل<sup>۲</sup> پایینی را دارد. بنابراین بیشتر در مکانهایی استفاده می شود که دیگر امکان استفاده از سایر تکنولوژیهای موجود برای تبدیل و بازیافت حرارت وجود ندارد. [۲]

<sup>1</sup> condensers

<sup>2</sup> Conversion efficiency



شکل ۱ نمای شماتیک از ساختار یک مدول ترموالکتریک مورد استفاده در تولید توان [۸]

روابط حاکم بر یک مدول ترموالکتریک به شرح زیر می‌باشد [۱۰]:

$$V_{oc} = 2\alpha N\Delta T \quad (1)$$

$$V_{mp} = \frac{V_{oc}}{2} = \alpha N\Delta T \quad (2)$$

$$I_{sc} = \frac{\alpha A}{\rho L} \Delta T \quad (3)$$

$$I_{mp} = \frac{1}{2} \frac{\alpha A}{\rho L} \Delta T \quad (4)$$

$$P_m = \frac{1}{2} \frac{\alpha^2 NA}{\rho L} \Delta T^2 \quad (5)$$

که در آنها  $N$  تعداد ترموالمنتها،  $T_H$  و  $T_C$  دمای سطوح گرم و سرد ترموالکتریک،  $\alpha$  ضریب سیبک،  $\rho$  مقاومت الکتریکی،  $K$  ضریب انتقال حرارت هدایت،  $L$  ضخامت،  $I$  جریان گذرنده از مدول،  $\Delta T = T_H - T_C$  و  $A$  سطح ترموالمنت می‌باشند. ولتاژ مدار باز<sup>۱</sup>،  $V_{oc}$  و ولتاژ مدار کوتاه<sup>۲</sup>،  $I_{sc}$  جریان مدار کوتاه<sup>۱</sup> و بیشترین توان خروجی از ترموالکتریک می‌باشند.

#### ۱-۲- طراحی مدول ترموالکتریک ژنراتور

در میان مواد ترموالکتریک موجود در بازار ترموالکتریکهای بیسموت - تلوراید  $Bi_2Te_3$  بیشترین فاکتور توانی ( $37 \times 10^{-4} Wm^{-1} K^{-2}$ ) را در محدوده دمایی ۲۰ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد از خود نشان می‌دهند. بنابراین در این تحقیق از آنها استفاده شده است. برای بیسموت - تلوراید می‌توان مقادیر جدول ۱ را به عنوان خصوصیات ترموالکتریک در این محدوده دمایی در نظر گرفت.

با جاگذاری مقادیر فوق در معادلات (۱) تا (۵) روابط زیر بدست می‌آیند:

$$V_{oc} = 2 \times 190 \times 10^{-6} N \Delta T \quad (6)$$

۱) Open circuit  
۲) Short circuit

در زمینه استفاده از ترموالکتریک در بازیافت انرژی تحقیقات بسیار وسیعی صورت گرفته است. یو و چاو [۲] با استفاده از ترموالکتریک به بازیافت انرژی از موتور احتراق داخلی پرداختند. آنان توانستند ماکزیمم توان حدود ۴ وات را با یک مدول ترموالکتریک و از دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد بدست آورند. آنان همچنین گزارش نمودند که با استفاده از ۱۲۰ عدد ترموالکتریک و دمایی حدود ۷۵۰ درجه می‌توان به توان الکتریکی حدود ۶۰۰ وات رسید. وچاراساتین و همکاران [۴] به بررسی عملکرد ترکیب ترموالکتریک و کلکتور خورشیدی در تولید توان الکتریکی پرداختند. آنان با استفاده از ۱۶ عدد ترموالکتریک توان خروجی حدود ۱۴ وات را برای اختلاف دمای ۶۰ درجه سانتیگراد گزارش نمودند. استوبان و توروک [۵] نیز در مقاله‌ای به بررسی امکان استفاده از ترموالکتریک در خروجی اگزوز پرداخته و با محاسبات تئوری نشان دادند که در اختلاف دمایی حدود ۹۰ درجه سانتیگراد یک مدول ترموالکتریک می‌تواند توان خروجی حدود ۱/۲ وات با کارایی تبدیل ۲/۴ درصد داشته باشد. چامپیر و همکاران [۶] به بررسی عملکرد ترموالکتریک در تبدیل حرارت خروجی از یک بخاری پرداختند. خروجی دستگاه آنان حدود ۷ وات در دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد بود. لوزاتی‌هانا کورن [۷] نیز در مقاله‌ای به بررسی عملکرد و تحلیل اقتصادی ترکیب ترموالکتریک با اجاقی با سوخت زیست‌توده پرداخت. توان خروجی بدست آمده در تحقیق وی حدود ۲/۴ وات در اختلاف دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد بود. وی همچنین بیان نمود که در مقایسه با یک باتری زمان بازگشت سرمایه ترموالکتریک بسیار کمتر خواهد بود. هدف از این مقاله این است که به بررسی و تحلیل تئوری عملکرد تکنولوژی ترموالکتریک در تولید توان از حرارت خروجی از اگزوز وسایل پرداخته و میزان توانایی آنها در تولید توان الکتریکی از حرارت اتلافی اینگونه وسایل را مورد سنجش قرار دهد.

#### ۲- تکنولوژی ترموالکتریک و روابط حاکم بر آن

در سال ۱۸۲۱ یک فیزیکدان آلمانی بنام سیبک مشاهده نمود که اگر یک سیکل بسته از اتصال دو فلز ناهمجنس ساخته شده باشد که بین دو سر اتصال اختلاف دما باشد، در سیکل اختلاف پتانسیل ایجاد خواهد شد. در سال ۱۸۳۴ ژان پلتیر عکس پدیده سیبک را گزارش نمود. وی مشاهده کرد که درون سیکلی از اتصال دو فلز ناهمجنس اگر جریان القا شود، بین دو سر اتصال اختلاف دما به وجود خواهد آمد. کشفیات فوق تا سال ۱۸۳۸ کاربرد خاصی نداشتند تا در آن سال مهندسی آلمانی بنام لنز با استفاده از پدیده پلتیر یک قطره آب را منجمد نمود. پدیده ترموالکتریک تا اواسط دهه ۱۹۵۰ که نیمه هادیها به بازار عرضه شدند، جای خود را در صنعت باز نکرد. با عرضه نیمه هادیها و به تبع آن ساخت مدولهای ترموالکتریک از نیمه هادیها به مرور کاربردها و مزایای تکنولوژی ترموالکتریک برای بشر آشکار شد.

استفاده از ترموالکتریک برای تولید توان معمولاً به صورت نشان داده شده در شکل ۱- صورت می‌گیرد. در این حالت مدول ترموالکتریک به صورت ساندویچی بین یک منبع حرارتی و یک هیت سینک قرار گرفته، حرارت را از منبع دریافت و توسط هیت سینک به محیط اطراف می‌دهد. به علت اختلاف دمای بین دو سطح گرم و سرد ترموالکتریک، در آن تولید توان الکتریکی می‌شود. [۸، ۹]

گازهای خروجی از موتور نسبت به هوای محیط بوده که بین دو سمت یک مدول ترموالکتریک فرض شده اند. شکل ۲- نمودار ماکزیمم توان و جریان قابل استحصال از یک مدول ترموالکتریک را بر حسب اختلاف دمای دو سر ترموالکتریک نشان می‌دهد. همانطور که از نمودار مشخص است هرچه اختلاف دمای دو سر ترموالکتریک بیشتر شود، توان و جریان خروجی نیز بیشتر خواهند شد. به عبارت دیگر با افزایش دمای گازهای خروجی از موتور، مدول ترموالکتریک امکان تولید توان الکتریکی بیشتری را خواهد داشت، هرچند که این امر به معنای اتلاف بیشتر خواهد بود. با توجه به نمودار در اختلاف دمای حدود ۳۰۰ درجه سانتیگراد امکان تولید حدود ۱۴ وات توان الکتریکی و ۱/۷ آمپر توسط یک مدول ترموالکتریک با ابعاد ۴×۴ سانتیمتر مربع وجود دارد. شکل ۳- نشان دهنده نمودار ولتاژ مدار باز و ماکزیمم ولتاژ قابل دستیابی توسط ترموالکتریک می‌باشد. با توجه به نمودار با افزایش اختلاف دما ولتاژ خروجی نیز بیشتر خواهد بود. ماکزیمم ولتاژ خروجی (مربوط به ماکزیمم توان) حدود ۸ ولت و برای اختلاف دمای حدود ۳۰۰ درجه سانتیگراد خواهد بود. شکل ۴ نمودار راندمان تبدیل را بر حسب اختلاف دمای دو سر ترموالکتریک نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است هر چه اختلاف دمای دو سر ترموالکتریک بیشتر شود، امکان تبدیل درصد بیشتری از حرارت اتلافی به توان الکتریکی وجود دارد. راندمان تبدیل برای اختلاف دمای ۳۰۰ درجه در حدود ۹٪ محاسبه گردیده است. شکل ۵ نمودار دوره بازگشت سرمایه را بر حسب اختلاف دمای دو سر ترموالکتریک نشان می‌دهد. در همانطور که مشخص است با افزایش اختلاف دما دوره بازگشت سرمایه به شدت کاهش می‌یابد. در اختلاف دمای حدود ۱۲۰ درجه سانتیگراد دوره بازگشت سرمایه حدود ۷ سال خواهد بود که با توجه به متوسط طول عمر ۱۵ ساله یک مدول ترموالکتریک مقدار مناسبی خواهد بود. در اختلاف دمای حدود ۲۰۰ درجه سانتیگراد دوره بازگشت سرمایه حدود ۲ سال خواهد شد. باید توجه داشت که با افزایش دما طول عمر مدوله‌های ترموالکتریک نیز کاهش خواهد داشت که بایستی در محاسبات دقیق در نظر گرفته شود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی و امکان‌سنجی تولید توان الکتریکی از حرارت اتلافی خروجی از آگزوز خودرو پرداخته شده است. با توجه به محاسبات انجام شده موارد زیر را می‌توان به عنوان نتیجه این تحقیق ذکر نمود:

- افزایش اختلاف دمای دو سر ترموالکتریک (افزایش دمای گازهای خروجی) منجر به افزایش توان الکتریکی خواهد شد.
- در اختلاف دمای حدود ۳۰۰ درجه ترموالکتریک توانایی تبدیل حدود ۱۰ درصد از انرژی اتلافی را دارد.
- با افزایش اختلاف دما راندمان تبدیل ترموالکتریک نیز افزایش می‌یابد.
- با افزایش اختلاف دمای دو سر ترموالکتریک دوره بازگشت سرمایه به شدت کاهش خواهد داشت. در اختلاف دماهای بالای ۱۰۰ درجه سانتیگراد دوره بازگشت سرمایه نسبت به طول عمر مدول ترمو الکتریک قابل توجه خواهد بود.

$$V_{mp} \approx 190 \times 10^{-6} N \Delta T \quad (7)$$

$$I_{mp} \approx 0.06 \frac{A}{L} \Delta T \quad (8)$$

$$P_m = 0.114 \times 10^{-4} \frac{NA}{L} \Delta T^2 \quad (9)$$

جدول ۱ مقادیر تقریبی خصوصیات برای ترموالکتریک بیسموت - تلوراید

$\alpha = 190 \mu V/K$	ضریب سیبک
$k = 1.5 W/mK$	مقاومت حرارتی
$\rho = 1.6 \times 10^{-5} \Omega m$	مقاومت الکتریکی

هرچند رابطه (۹) نشان می‌دهد که هرچه  $L$  کوچک شود  $P_m$  زیادتر می‌شود اما در واقعیت در طولهای بسیار کوچک این امر اتفاق نمی‌افتد. بنابراین رابطه به صورت زیر تصحیح شده و به همراه راندمان تبدیل  $\phi$  به صورت زیر ارائه گردیده است [۱۱]:

$$P_m = 0.114 \times 10^{-4} \frac{NA}{(L+n)(1+2r \frac{l_c}{L})^2} \Delta T^2 \quad (10)$$

$$\phi = \left( \frac{T_H - T_c}{T_H} \right) \times \left( 1 + 2r \frac{l_c}{L} \right)^{-2} \times \quad (11)$$

در رابطه فوق  $l_c$  ضخامت عایق،  $Z$  ضریب مزیت،  $r = \frac{k}{k_c}$  نسبت هدایت حرارتی تماسی و  $n = \frac{2\rho_c}{\rho}$  نسبت مقاومت الکتریکی تماسی هستند.

به صورت معمول  $z = 0.003 \frac{1}{c}$ ،  $l_c = 0.8 mm$ ،  $r = 0.2$  و  $n = 0.1 mm$  می‌باشند [۱۲]. در این تحقیق ترموالکتریک مدل TEP1-12708 به عنوان مدول نمونه جهت محاسبات در نظر گرفته شده است. مشخصات این ترموالکتریک در جدول ۲ نشان داده شده است.

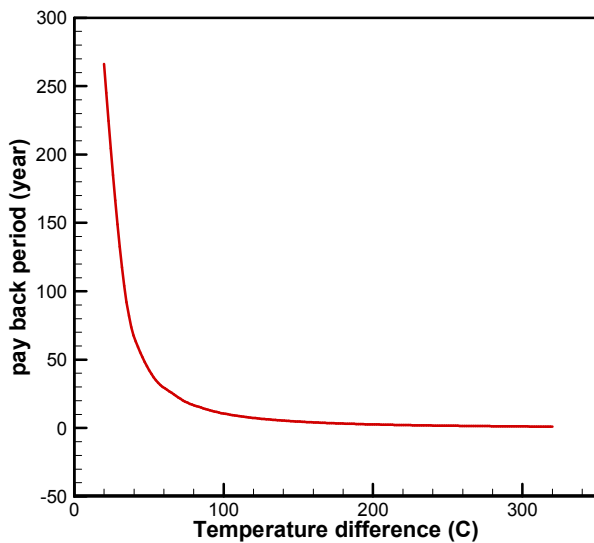
جدول ۲ خصوصیات ترموالکتریک TEP1-12708

Leg length (L), cm	0.125
Leg area (A), cm <sup>2</sup>	0.0196
Couples (N)	127

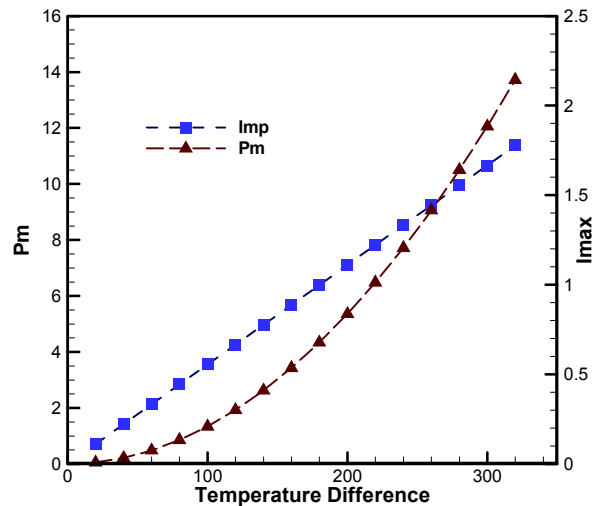
#### ۳- نتایج و نمودارها

با توجه به روابط ذکر شده، در این تحقیق سعی شده است که به صورت تئوری میزان توان خروجی قابل استحصال از گازهای گرم‌خروجی از آگزوز مورد محاسبه و بررسی قرار گیرد. برای این کار فرض شده است که دمای محیط ۲۵ درجه سانتیگراد بوده و نتایج برای اختلاف دماهای بین ۲۰ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد مورد محاسبه قرار گرفته‌اند. این اختلاف دما به علت گرم‌تر بودن

<sup>1</sup> Conversion efficiency



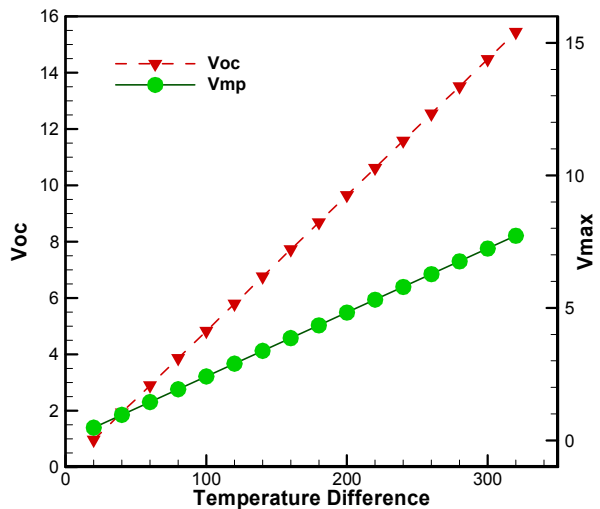
شکل ۵ نمودار دوره بازگشت سرمایه را بر حسب اختلاف دمای دو سر ترموالکتریک



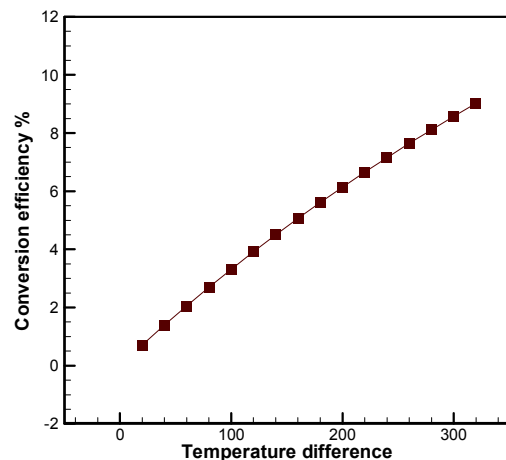
شکل ۲ نمودار توان و جریان ماکزیمم بر حسب اختلاف دما

۵- مراجع

- [1] Foster R, Ghassemi M, Cota A, MyLibrary. Solar energy: renewable energy and the environment: CRC Press, 2010.
- [2] Gou X, Xiao H, Yang S. Modeling, experimental study and optimization on low-temperature waste heat thermoelectric generator system. Applied Energy. 2010;87(10):3131-6.
- [3] Yu C, Chau KT. Thermoelectric automotive waste heat energy recovery using maximum power point tracking. Energy Conversion and Management. 2009;50(6):1506-12.
- [4] Vatcharasathien N, Hirunlabh J, Khedari J, Daguene M. Design and analysis of solar thermoelectric power generation system. International Journal of Sustainable Energy. 2005;24(3):115-27.
- [5] Stuban N, Torok A. Utilization of exhaust gas thermal energy - Theoretical investigation. Conference Utilization of exhaust gas thermal energy - Theoretical investigation, Warsaw. p. 268-72.
- [6] D. Champier, J.P. Bedecarrats, M. Rivaletto, F. Strub. Thermoelectric power generation from biomass cook stoves. Energy. 2010;35:935-42.
- [7] Lertsatitthanakorn C. Electrical performance analysis and economic evaluation of combined biomass cook stove thermoelectric (BITE) generator. Bioresource Technology. 2007;98:1670-4.
- [8] Riffat SB, Ma X. Thermoelectrics: a review of present and potential applications. Applied Thermal Engineering. 2003;23(8):913-35.
- [9] Bell LE. Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems. Science. 2008;321(5895):1457-61.
- [10] Nuwayhid RY, Shihadeh A, Ghaddar N. Development and testing of a domestic woodstove thermoelectric generator with natural convection cooling. Energy Conversion and Management. 2005;46(9-10):1631-43.
- [11] Rowe DM, Min G. Evaluation of thermoelectric modules for power generation. Journal of Power Sources. 1998;73(2):193-8.
- [12] Lertsatitthanakorn C, Khasee N, Athajariyakul S, Soponronnarit S, Therdyothin A, Suzuki RO. Performance analysis of a double-pass thermoelectric solar air collector. Solar Energy Materials and Solar Cells. 2008;92(9):1105-9.



شکل ۳ نمودار ولتاژ مدار باز و ولتاژ ماکزیمم بر حسب اختلاف دما



شکل ۴ نمودار راندمان تبدیل بر حسب اختلاف دما