# تولید الکتریسیته از تلفات گرمایی یک موتور احتراق داخلی به روش ترموالکتریک

داوود کلانتری، علی معظمی

dkalantari2000@yahoo.com

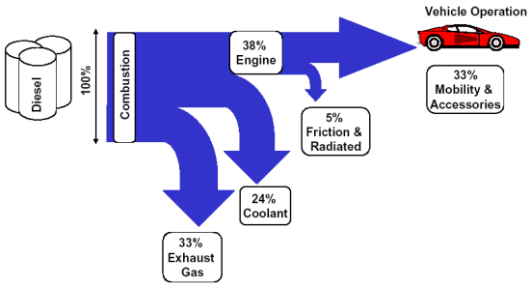
## چکیده

با بررسی بیلان انرژی تولیدی در یک موتور احتراق داخلی معلوم می گردد که تنها در حدود یک سوم انرژی گرمایی ناشی از احتراق به انرژی مکانیکی مناسب برای حرکت تراکتور یا خودرو تبدیل می گرد. لذا استحصال انرژی الکتریکی از این تلفات گرمایی به هر میزان که باشد به بالارفتن راندمان مکانیکی موتور می انجامد. از جمله دلایلی که نیاز روز افزون به انرژی الکتریکی را توجیه می کند، می توان به برقی شدن بیشتر تجهیزات مکانیکی سابق و اضافه شدن تجهیزات جدید همچون سیستمهای موقیت یاب و غیره در ما شین های مزرعه ا شاره نمود. ا صل ا ستفاده و بکار گیری مبدلهای ترمو الکتریکی بر پایه اثر " سی بک" می با شد که درآن اختلاف دمای بین منبع گرم و منبع سرد مت صل به دو "نیمه های غیر هم سان" یک اختلاف پتان سیل الکتریکی ایجاد می کند. بزرگی اختلاف پتان سیل تولید شده در این روش به مقدار ضریب سی بک (که از ویژگیهای جنس مواد بکار گرفته شده می باشد) و اختلاف دما میان منابع سرد و گرم بستگی دارد. در کار تحقیقاتی حاضرتجارب گوناگون برای تحقق این امر بررسی گردیده و با تعمیم نتایج بدست آمده از آن، طرحی برای افزایش راندمان موتور تراکتورو کمباین پیشنهاد گردیده است.

**کلمات کلیدی:** بازیاب انرژی، تلفات گرمایی، ترموالکتریک، راندمان حرارتی، موتور تراکتور

## مقدمه:

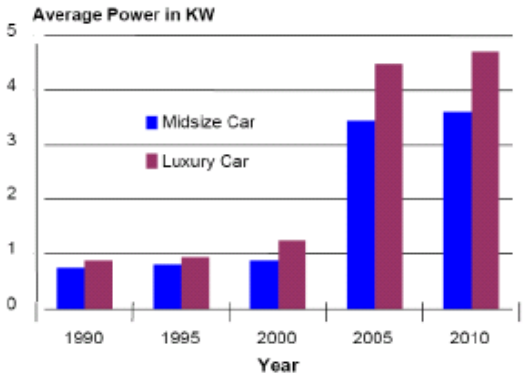
تحقیقات انجام شده بر روی چگونگی تولید انرژی مکانیکی در موتورهای درونسوز نشان می دهد که تنها یک سوم از انرژی مکانیکی (قابل حصول بر اساس سیکل کارنو) در یک موتور درونسوز استخراج می گردد و مابقی آن بدلایل گوناگون بصورت گرما در سیستم خنک کاری یا از طریق اگزوز تلف می گردد(Fairbanks, 2005) . این مو ضوع بصورت بیلان انرژی در شکل ۱ نشان داده شده است. همانگونه که در بیلان انرژی تولیدی و مصرفی برای یک موتور معمول احتراق داخلی در شکل ۱ نشان داده شده ا ست، در حدود دو سوم انرژی گرمایی نا شی از احتراق تلف می گردد: حدود یک سوم از طریق اگزوز، یک چهارم از طریق سیستم خنک کننده و مابقی در اثر اصطکاک میان اجزائ متحرک درگیر و همچنین تابش به محیط.




**شکل ۱: بیلان انرژی مصرف تبدیل شده در یک موتور احتراق داخلی**

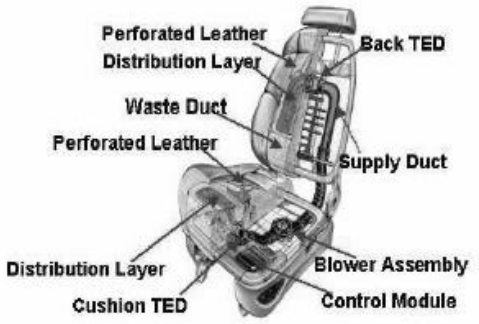
استفاده بهینه از این گرما به صرفه جویی در مصرف سوخت می انجامد. بجز آن بخش از گرما که بصورت متداول برای گرمایش فضای داخلی خودرو در فصول سرد استفاده قرار می گیرد. تا اواخر دهه نود میلادی کار جدی برای بازیاب انرژی از گرمای تلف شده انجام نشده بود. از جمله دلایلی که می توان برای این کاستی بر شمرد همان محدودیتهای تکنولوژیکی در استحصال دیگر صور انرژی از تلفات گرمایی می باشد. برای نمونه با وجود پیشرفتهای شگرفی که تاکنون صورت پذیرفته است، راندمان موتورهای حرارتی همچون موتور استرلینگ نسبت به وزن و حجم آنها رضایت بخش نیست. از اینرو استفاده از اینگونه موتورها برای بازیاب انرژی مکانیکی از تلفات گرمایی، توجیه پذیر نیست. روش دیگر همان استحصال مستقیم انرژی الکتریکی از جریان گرما می باشد. با اینکه روش مذکور که سابقه آن به اواخر قرن نوزدهم برمی گردد هنوز نتوانسته راندمانی بیش از ۵ درصد را ارائه دهد، ولی امروزه با اقبال بیشتری مواجه شده است. دلایل این اقبال نخست به چشم اندازهای روشنی برمی گردد که در افق توسعه آن دیده می شود و سپس به نیازهای روزافزون به انرژی الکتریکی در خودروها، کامیون ها، ماشین های نظامی و ماشین های مزرعه مانند کمباین بر می گردد. از جمله می توان به برقی شدن بیشتر تجهیزات مکانیکی سابق و به اضافه شدن تجهیزات الکترونیکی جدید همچون سیستمهای موقیت یاب و غیره اشاره نمود. بطور نمونه نتایج بدست آمده در مرکز تحقیق و توسعه جنرال موتورز نشان می دهد که روند افزایش تقاضا برای مصرف الکتریسیته در خودروها بشدت افزاینده است و از حدود ۷۵۰ وات تقاضا در اوایل دهه نود به حدود ۴۷۵۰ وات در اواخر این دهه برسد (شکل ۲).(Fairbanks, 2005)

از آنجایی که انرژی الکتریکی بعنوان یک انرژی ناب شناخته شده است که به راحتی قابلیت تبدیل به هر صورت از انرژی را دارد، چنان چه مقدار انرژی الکتریکی بدست آمده از بازیاب گرما بیشتر از نیاز متداول باشد، همیشه می توان به شیوه های گوناگونی از آن در بالابردن راندمان مکانیکی خودرو، تراکتور یا هر ماشین مزرعه ای استفاده نمود. امکان استفاده از سیستمهای سرمایشی ترموالکتریک که نه تنها سبک، کم حجم و بی صدا می باشند، بلکه امکان چیدمان آنها در نزدیکی مکانهای خنک کاری نیز وجود دارد. در این حالت در مصرف انرژی به میزان قابل ملاحظه ای کاسته می شود (شکل ۳)




**شکل ۲: روند افزایش تقاضا برای الکتریسیته در خودرو**

ایده تولید الکتریسیته از تلفات گرمایی موتور توسط شرکت های مهم خودروسازی گسترش یافته و بصورت تجاری بر روی مدلهای گوناگونی از خودروهای سبک وسنگین توسط شرکتهایی نظیربی ام و، ماک و جنرال موتورز پیاده شده است. این شرکتها با بکارگیری مبدلهای انرژی در یک طرح حساب شده توانسته اند تا حدود ۱۰ درصد بازده مصرف سوخت (Fuel Economy) را بهبود بخ شند. این افزایش بازدهی در بع ضی از آزمایشگاههای معتبر همچون آزمایشگاه Efficiency and Renewable Energy واقع در شهر وا شنگتن آمریکا و یا آزمایشگاه BSST در مقیاس کارکرد عملی خودرو های ذکر شده به ثبت ر سیده است.




**شکل ۳: استفاده از سیستمهای سرمایشی ترموالکتریک در صندلی راننده**

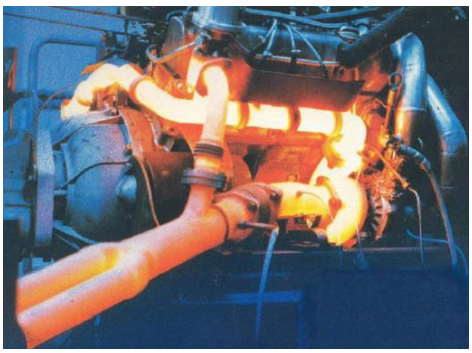
نمونه هایی از کارهای تحقیقاتی انجام شده عبارتند از:

- در سال ۱۹۹۹ شرکت جنرال موتورز از تلفات گرمایی در یک مدل Sierra Pikup توانست ۳۰۰ وات برق بدست آورد (Kushch, 2004).
- در سال ۲۰۰۱ شرکت ماک از تلفات گرمایی در یک مدل کامیون توانست ۱۰۰۰ وات برق بدست آورد (Rowe, 2004).

- در سال ۲۰۰۵ شرکت بی ام و از تلفات گرمایی در یک مدل BMW 530i توانست ۱۰۰۰ وات برق بدست آورد. خودرو مذکور قرار است تا سال ۲۰۱۰ به بازار عرضه گردد (Grandeure, and Crane, 2005) .
- در سال ۲۰۰۵ صنایع دفاع آمریکا از تلفات گرمایی در یک مدل زره پوش توانست ۵۰۰۰ وات برق بدست آورد (Fairbanks, 2005).

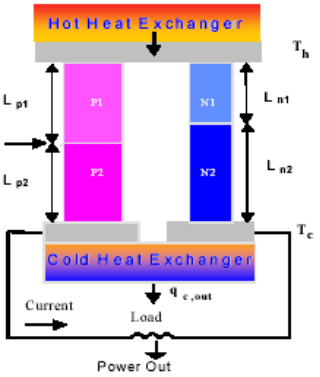
**مواد و روش ها:**

نمونه عکسبرداری حرارتی از یک موتور احتراق داخلی در شکل ۴ نشان داده شده است. با بکار گیری مبدلهای گرمایی ترموالکتریک در یک طرح مهندسی حساب شده می توان بخشی از این گرمای تلف شده را به انرژی الکتریکی تبدیل نمود. مبدلهای انرژی الکتریکی در محدوده گسترده ای از توان تولیدی قابل طراحی ساخت و نصب برروی خودروهای سبک و سنگین می باشند. امروزه نمونه های بسیار کوچکی با توان اندکی در حدود ½ وات تا نمونه های بزرگتر در حد تولید ۱ کیلووات برای نصب بر روی خودروهای سنگین طراحی و ساخته شده اند(Hendricks, 2006). به طور مثال نمونه هایی با قابلیت تولید توان بالاتر (در حد ۱ کیلووات) که در خروجی اگزوز یک کشنده و یا در خروجی توربوشارژ یک موتور دیزل قابل نصب با شند نیز طراحی و ساخته شده اند(Faiebanks, 2006).



**شکل۴: عکسبرداری حرارتی در یک موتور احتراق داخلی**

ا صل ا ستفاده و بکار گیری از مبدلهای ترمو الکتریکی بر پایه اثر " سی بک" (Seebeck Effect) می با شد که برآن ا ساس اختلاف دمای بین منبع گرم و منبع سرد متصل به دو "نیمه های غیر همسان" (Dissimilar Semiconductor) یک اختلاف پتانسیل الکتریکی ایجاد خواهد نمود (شکل 5). بزرگی اختلاف پتانسیل تولید شده در این روش به مقدار ضریب سی بک (که از ویژگیهای جنس مواد بکار گرفته شده می باشد) و اختلاف دما میان منابع سرد و گرم بستگی دارد (Rowe, 2006) .




**شکل۵: طرح نمادین کارکرد یک سلول ترمو الکتریک**

به تجربه ثابت شده است که همیشه تنها بخشی از انرژی گرمایی جابجا شده از منبع گرم به منبع سرد به انرژی الکتریکی تبدیل می گردد و اینکه نسبت اندازه های سلول ترموالکتریک (که از ویژگیهای جنس مواد بکار گرفته شده می باشد) بر بزرگی بخش تبدیل یافته موثر است. ثابتی که اثر ضرایب هدایت گرمایی و الکتریکی و همچنین ضریب سی بک را در راندمان کارنو یک سلول ترمو الکتریک نشان می دهد را با علامت Z نشان می دهند. مقدار آن از رابطه (۱) بدست می آید(Fairbanks, 2005) .

$$Z=S^2\sigma/K \qquad (1)$$

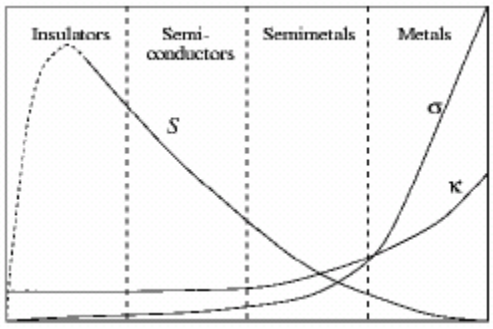
ضریب هدایت حرارتی مبدل ترمو الکتریکی می K ضریب هدایت الکتریکی و σ ضریب سی بک، Sدر این رابطه باشد.

راندمان کارنو یک سلول ترموالکتریک با لحاظ کردن ضریب Z که نشانگر ویژگیهای ماده سلول ترموالکتریک می باشد بصورت زیر محاسبه می گردد(Fairbanks, 2005):

$$\eta = \left\{ \frac{\sqrt{1+ZT_{av}}-1}{\sqrt{1+ZT_{av}}+T_C/T_H} \right\} \left( \frac{T_H - T_C}{T_H} \right) \qquad (2)$$

در این رابطه $T_H$ دمای منبع گرم ، $T_C$ دمای منبع سرد، $T_{av}$ دمای متوسط می باشد. عبارت دوم (داخل کروشه) نشان دهنده بازده چرخه کارنویی است که بین این دو دما کار کند، یعنی نشان دهنده حداکثر بازده قابل استحصال توسط یک موتور حرارتی است. همچنانکه مشاهده می شود، در راندمان کارنو عبارتی ضرب می شود که نشان دهنده کیفیت کارکرد سلول ترمو الکتریک می باشد. این عبارت که بدون بعد می باشد را ضریب شایستگی می نامند و آنرا با ZT نشان می دهند. همچنانکه از معادله (2) برمی آید هرچه ضریب ZT بالاتر باشد راندمان سلول ترموالکتریک بالاتر خواهد بود. با توجه به رابطه (۱) اگرچه یافتن ماده ای با S بالا

می تواند گزینه مناسبی باشد ولیکن با بررسی مواد گوناگون مشاهده شده است که هرچه S بالاتر باشد در عوض σ کمتر و همچنین هرچه σ بشتر شود k نیزبیشتر می گردد(شکل ۶) (Faiebanks, 2006).

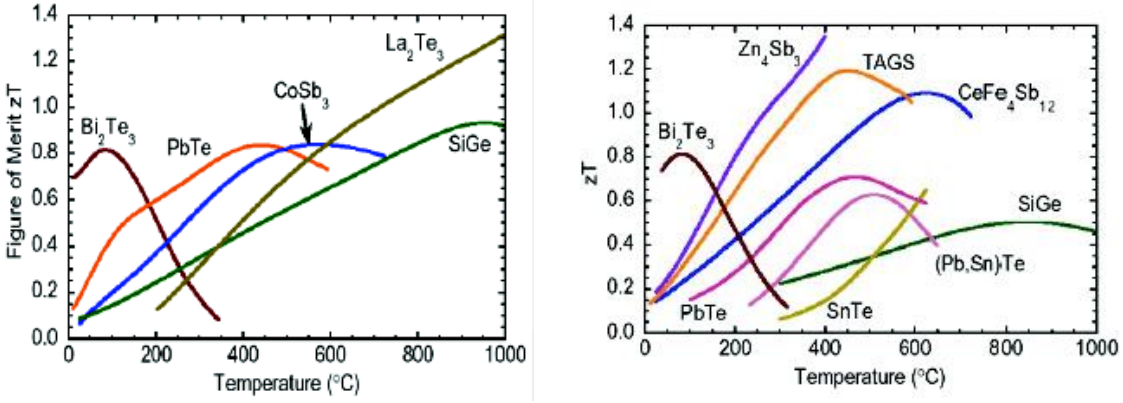



**شکل ۶: رابطه میان ضرایب سی بک، هدایت الکتریکی و هدایت حرارتی در مواد گوناگون**

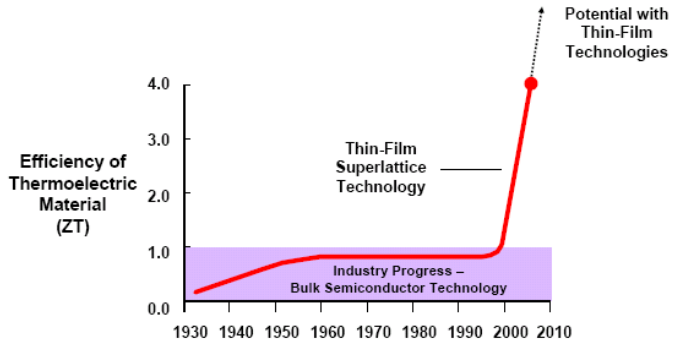
با مقایسه مواد گوناگون، نیمه هادیها بعنوان مناسب ترین مواد برای ساخت سلولهای ترموالکتریک شناخته شده اند. انتخاب دقیق و مناسب جنس نیمه هادیها در کارکرد صحیح و بهینه مبدل بسیار موثر می باشد. لذا یکی از گامهای مهم در طراحی این نوع از مبدلها تعیین جنس نیمه هادیها براساس دمای منابع سرد و گرم سیستم می باشد. که در شکل 7 نشان داده شده است. در این شکل ضریب ZT توسط ضرایب هدایت حرارتی و الکتریکی به ضریب سی بک مرتبط می شود.

با پیشرفتهای شگرفی که در زمینه فناوری نانو مواد بدست آمده ، روند توسعه تکنولوژی در ساخت سلولهای ترموالکتریک نیز با یک جهش نمایی مواجه شده است (شکل 8). بگونه ای که تا پیش از اواسط دهه نود بدلیل پایین بودن ضریب شایستگی، راندمان حرارتی آنها بقدری پایین بود که استفاده از سیستمهای ترموالکتریک برای تولید انرژی الکتریکی جز در موارد ناگزیر توجیه پذیر نبود. امروزه شرایط بگونه ای پیش می رود که در آینده نزدیک این فنآوری می تواند به رقیب جدی برای سیستمهای موجود برای تولید انرژی الکتریکی از گرما تبدیل شود.

**N Type TE Material** **P Type TE Material**

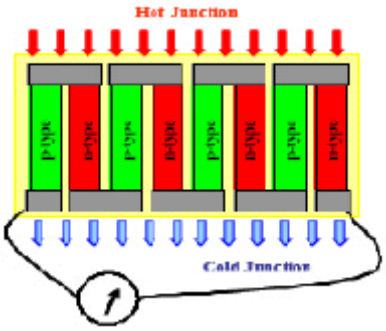



**شکل ۷: انتخاب جنس نیمه هادیها درمبدل ترمو الکتریک بر اساس دمای منبع گرم.**

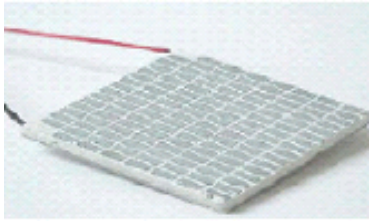



**شکل ۸: روند توسعه تکنولوژی ساخت سلولهای ترموالکتریک [1]**

نظر به پایین بودن اختلاف پتانسیل میان دو سر نیمه هادیها در یک سلول ترمو الکتریک، برای افزایش بازده این سیستم و تولید اختلاف پتانسیلهای بالاتر تعدادی از این سلولها را بصورت سری الکتریکی به همدیگر متصل نموده و بصورت یک بلوک ترمو الکتریک عرضه می گردند. نحوه چیدمان این زوجها و شکل اتصال آنها به منبع گرمایی در شکل های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.




**شکل ۹: طرح نمادین از چیدمان سلولها در یک بلوک ترمو الکتریک [8]**



**شکل ۱۰: نمونه ای از یک بلوک ترمو الکتریک با ۱۲۶ سلول**

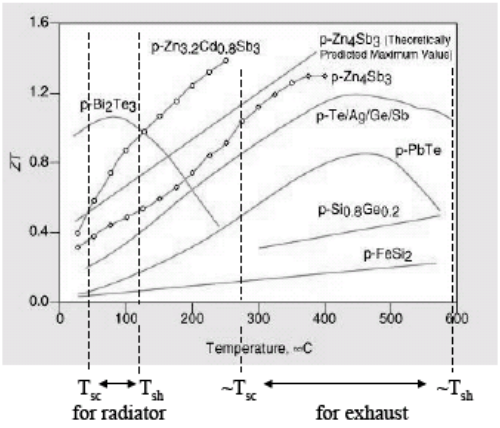
## نتایج وبحث

بنا بر آنچه که در بالا ذکر شد، اگزوز و سیستم خنک کننده دو منبع مهم اتلاف گرما در موتور می باشند که بیش از نیمی از گرمای موتور را هدر می دهند، لذا بیشترین تلاش برای بازیاب انرژی از تلفات گرمایی بر روی این بخش از تلفات متمرکز میگردد. چرا که آن بخش از تلفات گرمایی که از طریق اصطکاک بین اجزائ متحرک موتور و همچنین تابش به محیط از موتور خارج می شود بقدری ناچیز و همچنین غیر متمرکز ا ست که بازیاب آن هنوز توجیه پذیر نمی با شد. در جدول ۱ اختلاف دمای قابل ا ستفاده در هر بخش از موتورو ماشین بطور تقریبی داده شده است.

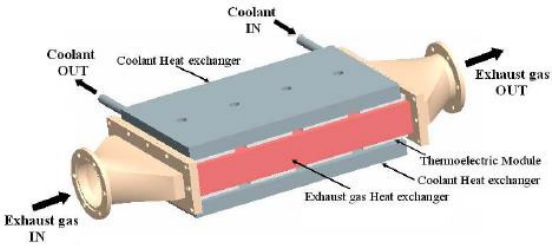
**جدول۱ : اختلاف دمای تقریبی قابل استفاده در هر بخش از موتورو ماشین بطور مجزا**

| منبع مورد استفاده | اختلاف دمای قابل استفاده |
|---|---|
| سیستم خنک کننده | ۷۰ درجه سلسیوس |
| سیستم اگزوز | حدود ۴۰۰ درجه سلسیوس |
| سیستم ترمزها | حدود ۳۵۰ درجه سلسیوس |
| سیستم روغن کاری | ۷۰ درجه سلسیوس |

نظر به اختلاف دمای فاحش میان دمای اگزوز و دمای آب در سیستم خنک کننده تجهیزاتی که برای استخراج انرژی از این دو منبع می تواند مورد استفاده قرار گیرد لزوما یکسان نمی باشند. لذا برای انتخاب ترموالکتریکهای مناسب در هر کاربرد، می بایستی آنها را بر پایه جنس مواد نیمه هادیشان انتخاب نمود. نمونه ای از دسته بندی جنس مولد های ترموالکتریک براساس ضریب شایستگی آنها در دمای منبع گرم در شکل ۱۱ نشان داده شده است(Faiebanks, 2003). از آنجایی که هرچه اختلاف دمای بین منبع گرم و سرد بیشتر باشد مولد ترموالکتریک برق بیشتری تولید می کند، هزینه سرمایه گذاری برای تولید برق از گرمای رادیاتور بسیار بالاتر از تولید برق از گرمای اگزوز خواهد بود. از این روست که در دنیا نیز بیشترین تلاش برای بازیاب انرژی از تلفات گرمایی بر ا ستخراج انرژی از اگزوز متمرکز گردیده ا ست. نمونه ای طرح قابل ا ستفاده جهت بکارگیری مبدلهای ترمو الکتریک که به دور اگزوز خروجی گاز تعبیه شده اند در شکل ۱۲ نشان داده شده است.




**شکل ۱۱: دسته بنده جنس مولد های ترموالکتریک براساس ضریب شایستگی آنها در دمای منبع گرم**




**شکل ۱۲: طرح شماتیک ازکاربرد بلوکهای ترمو الکتریک در بازیاب گرما از اگزوز**

نمونه نمایش داده شده در فوق از نوع آب خنک می باشد.

## نتیجه گیری

به عنوان نتیجه گیری درمقام مقایسه میان انرژی الکتریکی تولید شده با استفاده از مولد های ترمو الکتریک و سیتمهای الکترو مکانیکی موجود می توان به نکات زیر توجه نمود:

- منبع تولید انرژی در مولد های ترموالکتریک همان تلفات گرمایی می باشد که مجانی است.
- با توجه به افت انرژی در انتقال آن از محور موتور تا محور التر ناتور و از آنجا راندمان پایین التر ناتورها در تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی، و همچنین راندمان پایین موتورها، راندمان التر ناتورها در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد برآورد می گردد. از این رو برای تولید هر کیلووات برق در التر ناتور می بایستی در حدود ۱۰ کیلووات سوخت بسوزد.
- امکان کوچک سازی و یا حذف دینامو‌های موجود که مستقیما از انرژی مکانیکی موتور استفاده می کنند

- امکان جایگزینی واتر پمپ، اویل پمپ و دیگر اجزای مکانیکی جانبی موتور با نمونه های الکتریکی آنها . در این حالت علاوه بر ساده تر شدن موتور، بدلیل فرمانپذیر بودن سیستمهای الکتریکی می توان راندمان موتور را نیز بالاتر برد.
- امکان تبدیل سیستمهای سرمایشی موجود به نوع الکتریکی آنها که علی الخصوص در ماشین های زراعی مانند کمباین که راننده ساعت ها مجبور به نشستن در داخل کابین است بسیار حائز اهمیت است.
- امکان استفاده از سیستمهای سرمایشی ترموالکتریک که نه تنها سبک، کم حجم و بی صدا می باشند بلکه امکان چیدمان آنها در نزدیکی مکانهای خنک کاری نیز وجود دارد. در این حالت در مصـــرف انرژی به میزان قابل ملاحظه ای کاســـته می شود.

**منابع**

Fairbanks J. W., "The 60 percent efficient diesel engine; probable, possible, or just a fantasy?", DEER: Diesel Engine Emission reduction Conference, Palmer House Chicago, August 24-25, 2005.

Grandeure J. La and Crane D., "Vehicle fuel economy improvement through thermoelectric waste heat recovery", DEER: Diesel Engine Emission Reduction Conference, Palmer House Chicago, August 24-25, 2005.

Schock H., "Thermoelectric conversion of waste heat to electricity in an IC engine power vehicle", 5th International Modelica Conference, Vienna Austria ,September 4-5, 2007.

Eschenbach M., "Vehicle model for transient simulation of a waste-Heat-Utilisation-Unit containing extended power train and fluid library components", DEER: Diesel Engine Emission Reduction Conference, Palmer House Chicago, August 15, 2007.

Yang J., "Opportunities and challenges of thermoelectric waste heat recovery in the automotive industry", DEER: Diesel Engine Emission Reduction Conference, Palmer House Chicago, August 24-25, 2007.

Guibbs J., "Heavy Vehicle Propulsion Materials", the 21th century Truck partnership, Michigan, February 8-9 2007.

Kushch A., "The effects of an exhaust thermoelectric generator of a GM Sierra pickup truck", DEER: Diesel Engine Emission Reduction Conference, Coronado, California, august 29- September 2004.

Hendricks T., “Engineering scoping of thermoelectric generator system for industrial waste heat recovery”, US Department of Energy: Report of Industrial Technologies Program, November 2006.

Yang B., “Thermoelectric technology assessment”, ATRI Report No 10120-01, Department of Mechanical Engineering, May 2007.

Hi-Z Brochure 2006, http://www.hi-z.com/documents/Hi- .Brochure.2006.pdf.

Faiebanks J. W., “Thermoelectric developments for vehicular application”, DEER: Diesel Engine Emission Reduction Conference, Detroit, MI, August 24-25 2006.

Faiebanks J. W., “Potential thermoelectric application in diesel vehicle”, DEER: Diesel Engine Emission Reduction Conference, Newport Rhode Island, August 24-28 2003.

Rowe D. M., “Thermoelectric waste heat recovery as renewable energy source”, International journal of innovations in energy systems and power, vol. 1 no. 1, p13-21, November 2006.

Rowe D. M., “Recent development of thermoelectric power generations”, Chinese science bulletin, vol. 49 no. 12, p1212-1219, June 2004.

Rowe D. M., “Quantom Well thermoelectric for converting waste heat to electricity”, HI-Z: quarterly technical progress report, Reporting period 1-1-2006 through 3-31-2006.

Willigan R., “Coast-effective fabrication routes for a production of Quantom Well type structures and recovery of waste heat from heavy duty truck”, DEER: Diesel Engine Emission Reduction Conference, Palmer House Chicago, August 24-25, 2005.