



## طراحی و تحلیل عملکرد یک مولد ترموالکتریک در سیستم دود خروجی یک کامیون در سیکل جاده‌ای

باقر رضائیان<sup>۱</sup>، فرهاد طالبی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد تبدیل انرژی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، [bagher.rezaeian59@yahoo.com](mailto:bagher.rezaeian59@yahoo.com)

<sup>۲</sup> عضو هیئت علمی تبدیل انرژی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، [ftalebi@semnan.ac.ir](mailto:ftalebi@semnan.ac.ir)

\* نویسنده مسئول

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۵ بهمن ۱۴۰۰

پذیرش: ۲۹ اردیبهشت ۱۴۰۱

کلیدواژه‌ها:

مولد ترموالکتریک

سیکل جاده‌ای

ماژول بیسموت تلوراید

ماژول اسکوتریودیت

ماشین‌های سنگین

### چکیده

ماشین‌های سنگین به‌تنهایی سهم بزرگی از مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان را بر عهده دارند. درحالی‌که بیش از دوسوم انرژی شیمیایی سوخت را هدر می‌دهند. از طرفی عمر بالا و سادگی ترموالکتریک‌ها که قادر به تبدیل انرژی گرمایی به الکتریکی هستند باعث شده است کاربردهای آن روزبه‌روز افزایش یابد. در این پژوهش یک مولد ترموالکتریک برای ذخیره انرژی گازهای خروجی آگزوز کامیون رنو میدلام ۱۹۵ طراحی شده است. دما و دبی گازهای خروجی در شرایط واقعی جاده‌ای اندازه‌گیری و در داخل کابین ذخیره و پایش شد. برای به‌دست‌آوردن شرایط جاده‌ای، پارامترهای ارتفاع و موقعیت جغرافیایی از طریق مکان‌یاب ماهواره‌ای اندازه‌گیری شده است. طراحی مولد ترموالکتریک بر پایه دو ماژول دما بالای اسکوتریودیت و دما پایین بیسموت تلوراید صورت گرفته است. مدل‌سازی مولد در نرم‌افزار سالدورک و شبیه‌سازی عددی آن توسط نرم‌افزار فلونت صورت گرفته است. معادلات ترموالکتریک مورد بررسی قرار گرفته و توان و بازده مولد بر اساس نتایج شبیه‌سازی به‌دست‌آمده از نرم‌افزار فلونت محاسبه شده است. توان‌های خالص به‌دست‌آمده در حالت‌های سربالایی، سرازیری و بزرگرایی به ترتیب ۱۵۱۱، ۳۷۵ و ۴۶۶ وات محاسبه شده است.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

## ۱- مقدمه

مصرف مداوم سوخت‌های فسیلی در موتورهای احتراق داخلی ماشین‌های سنگین که سال‌ها به عنوان پیش‌رانه در بخش حمل و نقل بار و مسافر استفاده می‌شوند روزانه افزایش می‌یابد و انتظار می‌رود تا آینده دور جایگزین مناسبی برای آن وجود نداشته باشد. صنعت حمل‌ونقل بعد از بخش انرژی بزرگترین منبع انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان است. تقریباً ۳۰ درصد تا نیمی از انرژی شیمیایی سوخت در این موتورها به صورت گرما از طریق اگزوز به محیط تخلیه می‌شود. با توجه به پیشرفت‌های زیادی که برای بهبود عملکرد و ذخیره انرژی انجام شده است، هنوز متوسط بازده موتورهای احتراق داخلی کمتر از ۱۵ درصد است [۱].

امروزه پژوهش‌ها به منظور بازیافت انرژی خروجی اگزوز به‌طور عمده بر دو روش سیکل رانکین و مولدهای ترموالکتریک متمرکز شده است. در خصوص سیکل رانکین طبق گزارش‌های اعلام شده می‌توان حدود ۲۰ درصد از گرمای خروجی اگزوز را با استفاده از سیکل رانکین به کار تبدیل کرد [۲]، البته این مقدار برای خودروهای دیزل حدود ۱۶ درصد می‌باشد [۳]. شبیه‌سازی‌های انجام شده در سال ۲۰۰۶ برای خودرو دیزل با حجم ۱۰/۸ لیتر نشان داد که می‌توان ۱ تا ۹ کیلووات توان از سیکل رانکین دریافت کرد [۴]. این سیکل با وجود بازده خوب با چالش‌های زیادی روبه‌روست که می‌توان به مواردی چون پیچیده بودن سیکل، حجم بالا، عدم کارایی در دماهای پایین، جرم زیاد، متحرک بودن قطعات اشاره کرد. با توجه به دلایل گفته شده بسیاری از پژوهش‌های انجام شده متمرکز بر مولد ترموالکتریک است. اساس کار این سیستم بر پایه اثر سبیک می‌باشد. در این سیستم گرادیان دما باعث تولید انرژی الکتریکی می‌شود. اگرچه مقدار توان دریافتی کمتر از سیکل رانکین است، اما از محاسن زیادی نسبت به آن برخوردار است. از جمله می‌توان به پیچیدگی بسیار پایین، عدم تحرک قطعات، تعمیر و نگهداری ساده، جرم پایین، عدم استفاده از سیال عامل به عنوان حامل انرژی و جالب‌تر از همه این‌ها که در دامنه و سیعی از دماها مورد استفاده قرار می‌گیرند. طبق پژوهش‌های به‌عمل آمده پتانسیل تولید توان توسط این سیستم برای گرمای اتلافی در خودروهای بنزینی و دیزل ۳-۲/۵ کیلووات است [۵]. شروع این مطالعات به سال ۱۹۶۳ میلادی بر می‌شود که در نهایت با تلاش‌های فراوان تکنولوژی Hi-Z در سال ۱۹۹۱ میلادی توانست از یک کامیون با حجم سیلندر ۱۰ لیتر میزان ۱۲۶/۶ وات توان بگیرد [۶]. این مطالعات ادامه یافت تا این‌که در سال ۲۰۱۱ توان ۳۵۰ کیلوواتی با استفاده از مولدی بر پایه بسموت تلوراید به دست آمد [۷]. در ادامه از کامیون اسکانیا با قدرت ۴۴۰ اسب بخار با مولدی بر پایه ماژول بسموت تلوراید یک کیلووات توان استحصال شده است [۸]. براساس پژوهش‌ها بر روی برخی ماشین‌های شاسی بلند با استفاده از ماژول بسموت تلوراید، توان ۶۴۶/۲۶ گزارش شده است [۹]. نتایج برای

بررسی شرایط جاده‌ایی روی کامیون بنز اکترس ۳۵۰ کیلوواتی انجام شده که تنها برای بیشینه دما شبیه‌سازی عددی انجام شده است. با شبیه‌سازی در نرم‌افزار فلونتت تولید الکتریسیته برای دو سوخت متفاوت گاز و دیزل به ترتیب ۱۴۰۰ و ۱۵۰۰ وات گزارش شده است [۱۰]. توان تولیدی برای یک خودرو شورلت سواری بر پایه دو ماژول بسموت تلوراید و اسکوتریودیت ۱۹۸ وات توان نشان می‌دهد [۱۱]. در یک پژوهش عددی برای یک کامیون با مصرف سوخت گاز طبیعی در شرایط بزرگراهی با سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت با دبی دود خروجی ۲۵۰ g/s و دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد مقدار ۱۵۰۴ وات توان گزارش شده است [۱۲]. موتابه و همکاران [۱۳] استفاده از مولد ترموالکتریک با گرمای روغن موتور را گزارش کرده‌اند.

در این پژوهش، ابتدا وسایلی برای اندازه‌گیری دما و دبی جرمی گازهای اگزوز در سیکل رانندگی ساخته شده و یک مسیر حرکت هم برای اندازه‌گیری تعریف شده است. این مسیر دارای سه شرایط آب‌وهوایی متفاوت گرم و خشک، سرد کوهستانی و معتدل بوده است. این اندازه‌گیری در فصل تابستان انجام شده است و با استفاده از GPS شیب جاده در مسیر حرکت محاسبه و حرکت کامیون به سه شرایط سربالایی، سرازیری و بزرگراهی تقسیم‌بندی شده است. میانگین اطلاعات اندازه‌گیری برای سه شرایط حرکتی به دست آمد. سپس یک مولد ترموالکتریک در نرم‌افزار سالیدورک طراحی و از اطلاعات اندازه‌گیری شده به عنوان ورودی مولد استفاده شده است. شبیه‌سازی در نرم‌افزار فلونتت انجام شده است. از نتایج به‌دست‌آمده میزان توان تولیدی سیستم با استفاده از معادلات ترموالکتریک و نمودارهای مربوطه محاسبه شده است. در پایان تخمینی برای تأثیر افت فشار مولد بر توان موتور انجام شده و با به دست‌آوردن میزان توان مورد نیاز برای پمپاژ آب در سینک سرد توان خالص مولد به دست آمده است. در پژوهش حاضر، برای اولین بار پارامترهای دمای خروجی اگزوز، میزان مصرف سوخت، شیب جاده، دبی خروجی گاز اگزوز به صورت همزمان در یک سیکل واقعی رانندگی اندازه‌گیری شده است. درحالی‌که در مطالعات قبلی یا از داده‌های مکتوب و یا اندازه‌گیری روی بستر آزمایش با استفاده از دینامومتر استفاده کرده‌اند. همچنین اکثر مطالعات میزان توان تولیدی را برحسب سرعت خودرو در بزرگراه محاسبه کرده‌اند. درحالی‌که در این مطالعه تغییرات پارامترهای موتور در شیب‌های متفاوت جاده و عبور از شرایط آب‌وهوایی متفاوت اندازه‌گیری شده است.

## ۲- تئوری کار

در این بخش، معادلات حاکم بر مولد ترموالکتریک برای استفاده در محاسبه بازده و توان مولد معرفی شده است [۱۴]. مطابق شکل ۱ المان‌های نیمه‌رسانا میان دو صفحه مسی (صفحه مسی بین سرامیک و المان قرار دارد) قرار گرفته‌اند. هر المان پایه ترموالکتریک نامیده

با استفاده از روابط ۵ و ۶ و ۷ و شکل ۱ روابط زیر بیان می‌شوند:

$$\dot{W} = \alpha I(T_h - T_c) - RI^2 \quad (۸)$$

$R$  مقاومت داخلی مازول بر حسب اهم است.

$$\dot{W} = I^2 R_L \quad (۹)$$

$R_L$  مقاومت خارجی بر حسب اهم است.

با استفاده از قانون اهم روابط زیر ولتاژ و جریان را بیان می‌کنند:

$$V = IR_L = \alpha(T_h - T_c) - IR \quad (۱۰)$$

$$I = \frac{\alpha(T_h - T_c)}{R_L + R} \quad (۱۱)$$

بازده مولد با استفاده از روابط ۵ و ۹ بیان می‌شوند:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_h} \quad (۱۲)$$

$$\eta_{th} = \frac{I^2 R_L}{\alpha T_h I - \frac{1}{2} I^2 R + k(T_h - T_c)} \quad (۱۳)$$

مقدار توان تولیدی مولد با نسبت مقاومت خارجی به مقاومت داخلی با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\dot{W} = \frac{\alpha^2 T_c^2 \left[ \left( \frac{T_c}{T_h} \right)^{-1} - 1 \right]^2}{R \left( \frac{R_L}{R} + 1 \right)^2} \left( \frac{R_L}{R} \right) \quad (۱۴)$$

### ۳- اندازه‌گیری و آزمایش

اندازه‌گیری‌ها در دو حالت درجا و در شرایط واقعی جاده از سمنان تا بهشهر با هدف به‌دست‌آوردن اطلاعات مسئله بر روی کامیون رنو انجام شده است. اطلاعات اصلی مورد نیاز دبی و دمای گازهای خروجی از اگزوز است. در ابتدا برای شناخت بهتر از پتانسیل انرژی در خروجی اگزوز کامیون، اندازه‌گیری‌ها در حالت کم‌باری و سپس در یک سیکل واقعی انجام شده است. در حالت کم‌باری دمای گازهای خروجی اگزوز در دوره‌های متفاوت موتور برای کامیون رنو میدلام (۱۹۵ کیلوواتی) اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از دمای به‌دست‌آمده دانسیته گازهای خروجی در هر دور با استفاده از جداول ترمودینامیکی به دست آمد و با استفاده از روابط ۱۵ و ۱۶ دبی گازهای خروجی از اگزوز در هر دور محاسبه شد. در ضمن از لوله پیتوت و مانومتر برای اندازه‌گیری اختلاف فشار استفاده شده است. توان اصطکاکی و میزان مصرف سوخت موتور در حالت کم‌باری با دستگاه دیاگ خودرو اندازه‌گیری شد. نمودار دبی گازهای خروجی، درصد توان اصطکاکی موتور به توان اسمی، دمای گازهای خروجی و میزان مصرف سوخت به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نمایش داده شده‌اند.

$$\Delta p = \rho_w g h = \frac{1}{2} \rho_g v^2 \quad (۱۵)$$

$$\dot{m} = \rho_g VA \quad (۱۶)$$

می‌شود که به صورت n-type و p-type در کنار هم قرار گرفته‌اند و خواص آنها مستقل از دما است. نرخ گرمای ورودی به مازول‌ها با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\dot{Q}_{in} = q_p + q_n \quad (۱)$$

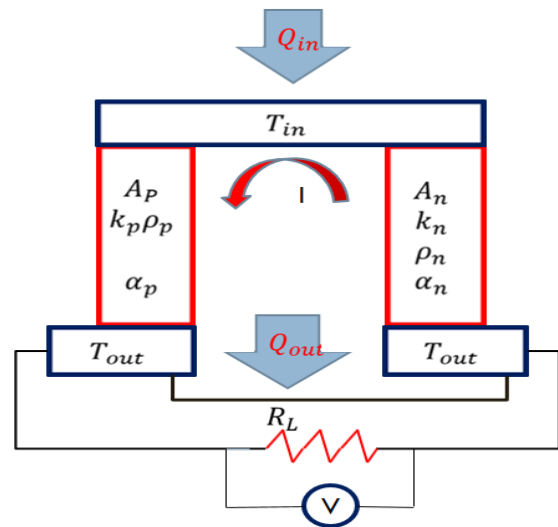
$\dot{Q}_{in}$  نرخ گرمای ورودی بر حسب وات،  $q_p$  و  $q_n$  به ترتیب نرخ گرمای ورودی به دو مازول مثبت و منفی است. نرخ گرمای ورودی به دو مازول با روابط ۲ و ۳ بیان می‌شوند.

$$q_p = \alpha_p T_1 I - \frac{1}{2} I^2 \frac{\rho_p L_p}{A_p} + \frac{k_p A_p}{L_p} (T_h - T_c) \quad (۲)$$

$$q_n = -\alpha_n T_1 I - \frac{1}{2} I^2 \frac{\rho_n L_n}{A_n} + \frac{k_n A_n}{L_n} (T_1 - T_2) \quad (۳)$$

$$\alpha = \alpha_p - \alpha_n \quad (۴)$$

$\alpha_p$  و  $\alpha_n$  به ترتیب ضریب سبیک مازول p-type و n-type بر حسب ولت بر کلون،  $I$  جریان الکتریکی بر حسب آمپر،  $T_h$  و  $T_c$  به ترتیب دمای قسمت گرم و سرد مازول بر حسب کلون،  $\rho_p$  و  $\rho_n$  به ترتیب مقاومت الکتریکی مازول مثبت و منفی بر حسب اهم متر،  $A_p$  و  $A_n$  سطح مقطع مازول‌ها بر حسب میلی‌متر مربع،  $L_p$  و  $L_n$  ارتفاع مازول‌ها بر حسب میلی‌متر،  $k_p$  و  $k_n$  ضریب هدایت حرارتی مازول‌ها بر حسب وات بر متر کلون است.



شکل ۱: شماتیک مدار ترموالکتریک

مقدار گرمای ورودی با مازول با رابطه زیر بیان می‌شود:

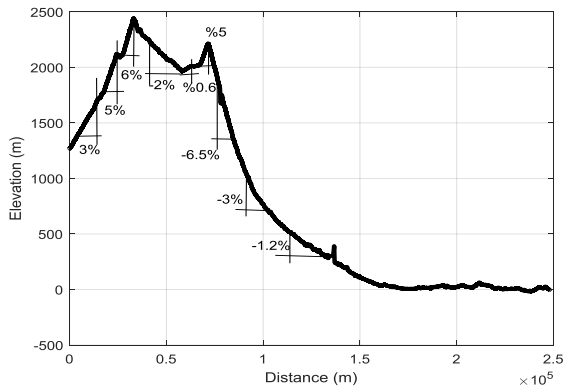
$$\dot{Q}_{in} = \alpha T_h I - \frac{1}{2} I^2 R + k(T_h - T_c) \quad (۵)$$

مقدار گرمای خروجی از مازول‌ها با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\dot{Q}_{out} = \alpha T_c I + \frac{1}{2} I^2 R + k(T_h - T_c) \quad (۶)$$

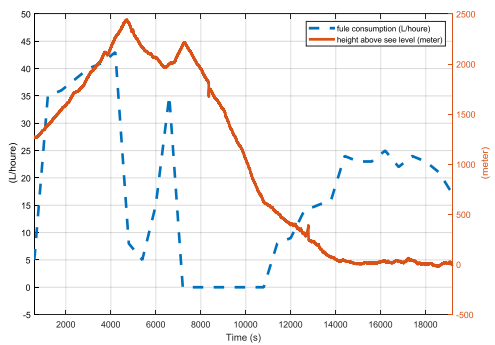
$\dot{Q}_{out}$  نرخ گرمای خروجی از مازول‌ها بر حسب وات کار انجام‌شده توسط مولد با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\dot{W} = \dot{Q}_h - \dot{Q}_c \quad (۷)$$

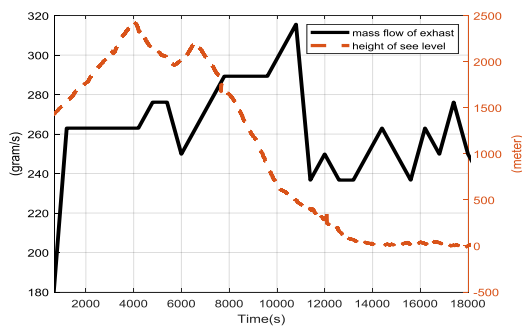


شکل ۵: تغییرات شیب جاده در طول مسیر سمنان به بهشهر

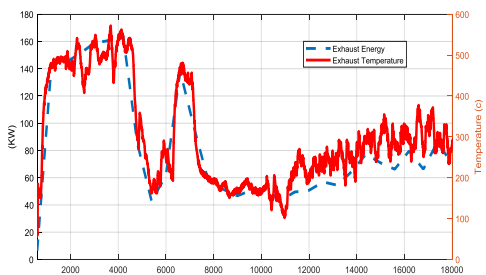
میزان مصرف سوخت، دبی خروجی، انرژی خروجی و دمای اگزوز در سیکل واقعی به همراه تغییرات شیب جاده در طول مسیر اندازه‌گیری شده است و به ترتیب در شکل‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ آمده است.



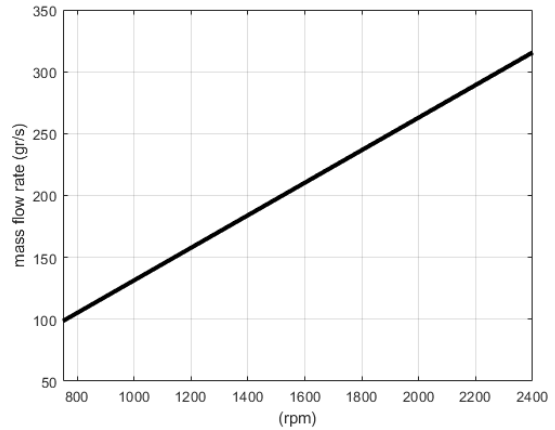
شکل ۶: تغییرات مصرف سوخت کامیون در طول مسیر



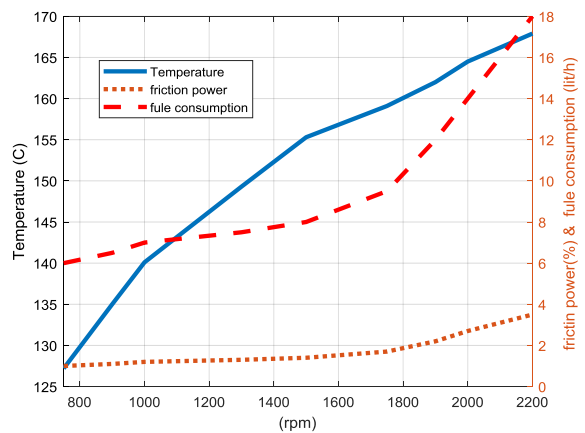
شکل ۷: تغییرات دبی جرمی اگزوز در طول مسیر



شکل ۸: تغییرات انرژی خروجی از اگزوز

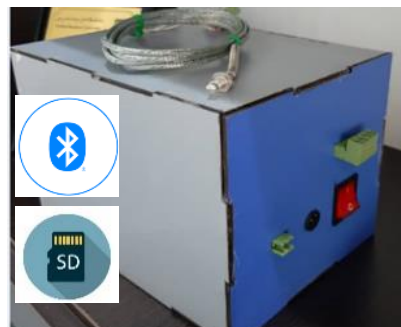


شکل ۹: دبی جرمی گازهای خروجی از اگزوز برحسب دور موتور



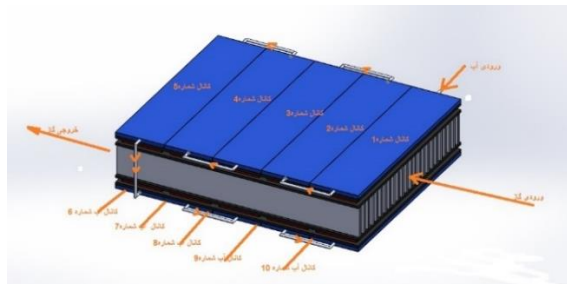
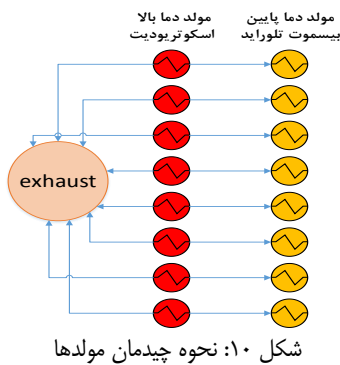
شکل ۱۰: تغییرات مصرف سوخت، توان اصطکاکی و دمای اگزوز برحسب دور موتور

در ادامه با استفاده از دستگاه دیتالاگر ساخته شده نمایش داده شده در شکل ۴ هر یک ثانیه یک بار دمای گازهای خروجی از اگزوز توسط ترموکوپل نوع k اندازه‌گیری و برای نمایش به صورت بی‌سیم به کابین ارسال شده است. با استفاده از GPS شیپ جاده نیز در هر پنج کیلومتر به دست آمده است که با استفاده از آن حرکت کامیون به سه بخش شیپ مثبت (سربالایی)، شیپ منفی (سرازیری) و شیپ ملایم (بزرگراهی) تقسیم شده است که در شکل ۵ نشان داده شده است.



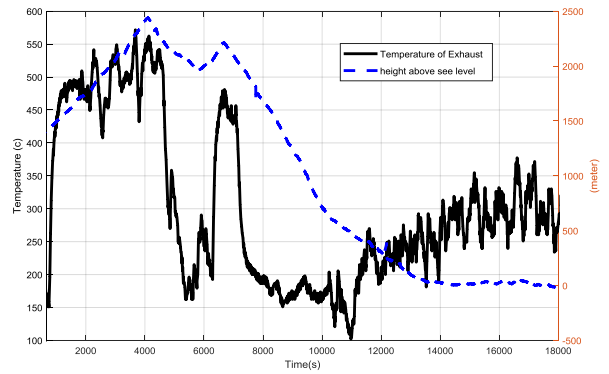
شکل ۴: دستگاه دیتالاگر ساخته شده برای اندازه‌گیری و نمایش دما در داخل کابین

۳- آرایش جریان آب و گاز، با توجه به این که اندازه عرض مولد مشخص بود و طول آن ممکن بود تغییر کند از جریان متقاطع استفاده شده است (شکل ۱۱).



۴- هندسه داخلی مولد، قطعا ضریب انتقال حرارت در دو طرف (سینک داغ و سینک سرد) برابر نیستند به‌ویژه این که در یک طرف آن مایع و در طرف دیگر آن گاز قرار دارد و معمولاً ضریب انتقال حرارت مایعات چندین برابر بیشتر از گازها هستند، دو عامل سطح تبادل حرارت و ضریب انتقال حرارت تعیین‌کننده مقاومت حرارتی هستند. بنابراین برای افزایش انتقال حرارت از سیال گاز به سیال مایع، در داخل سینک داغ از پرها استفاده شد تا هم سطح تبادل حرارت و هم ضریب انتقال حرارت بیشتر شود. اما دو هدف انتقال حرارت مناسب توأم با افت فشار پایین در نظر گرفته شد. بر این اساس با مطالعات انجام‌شده در پژوهش‌های پیشین از پره‌های موازی برای سینک داغ استفاده شد.

۵- ضخامت پره، فاصله بین آنها و ارتفاع؛ پرها باید در دامنه وسیعی از تغییرات دمایی کار کنند بنابراین با توجه به کارهای انجام‌شده در گذشته همچنین قیود، ضخامت و فاصله بین پرها انتخاب شد. در مورد ارتفاع هم یک‌بار ۲۰ میلی‌متر و بار بعدی ۳۰ میلی‌متر و در نهایت ۴۰ میلی‌متر انتخاب شد. انتخاب ۲۰ میلی‌متری باعث کاهش سطح تبادل حرارت می‌شد اما در یک دبی برابر با دیگر انتخاب‌ها ضریب جابه‌جایی حرارتی و افت فشار گاز افزایش می‌یافت نتایج نشان داد که تأثیر منفی افت فشار گاز و کاهش سطح تبادل حرارت بیشتر از اثرات مثبت افزایش ضریب جابه‌جایی می‌باشد. در انتخاب پره ۳۰ میلی‌متری وضعیت بهبود یافت و



شکل ۹: تغییرات دمایی گازهای خروجی از اگزوز

میزان دبی و دمایی میانگین گازهای اگزوز برای سه شرایط حرکت کامیون به ترتیب برای شرایط سربالایی، سرازیری و بزرگراهی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: میانگین دما و دبی گازهای خروجی در شرایط مختلف حرکت

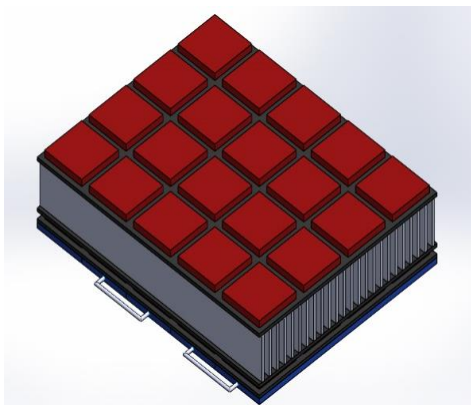
بزرگراهی	سرازیری	سربالایی	
$s > 1\%$	$s < -0.5$	$s > 1\%$	
۲۷۶/۲۱	۲۱۱/۰۵۹	۵۱۵/۶۵۷	میانگین دمایی گاز اگزوز (C) <sup>o</sup>
۲۸۹	۲۳۹	۲۶۳	میانگین دبی گاز اگزوز ( $\frac{gT}{s}$ )

#### ۴- طراحی مولد

از اطلاعات به‌دست‌آمده در اندازه‌گیری، فضای نصب مولد و نوع جریان قسمت گرم مولد تعیین شد. مراحل طراحی به شرح زیر است. ۱- انتخاب سیال قسمت سرد ماژول، در این مطالعه به سه دلیل از سیال خنک‌کننده موتور به عنوان سیال قسمت سرد ماژول استفاده شده است که عبارت بودند از اول ظرفیت گرمایی ویژه بالای آب نسبت به گاز؛ دوم حجم مخصوص پایین و سوم دمایی تقریباً یکنواخت و کنترل‌شده سیستم خنک‌کننده.

ظرفیت گرمایی ویژه آب باعث می‌شود تغییرات دمایی در طول سینک سرد که دائماً در حال دریافت گرما از سینک داغ است پایین باشد. همچنین باعث یکنواختی دما در طول سینک سرد می‌شود. حجم مخصوص پایین مایعات نسبت به گازها باعث می‌شود که توان موردنیاز برای پمپاژ آب پایین آمده و کار مکانیکی کمتری برای پمپ سیال انجام شود. عامل سوم این که دمایی آب توسط ترموستات و مجموعه سیستم خنک‌کننده کنترل می‌شود.

۲- انتخاب ماژول، با توجه به دامنه دمایی بالا در سیکل جاده‌ای، در ابتدا طراحی مولد بر پایه ماژول‌های اسکوتریودیت انجام شد تا با کاهش دما در مولد اولیه بتوان از مولد ثانویه بر پایه ماژول بیسموت تلوراید که در دامنه دمایی پایین کار می‌کند استفاده شود. شماتیک نحوه چیدمان مولدهای سری اول و دوم در شکل ۱۰ آمده است.



شکل ۱۳: چیدمان ماژول بر روی مولد

جدول ۳: ابعاد اجزا یک مولد

ارتفاع (mm)	عرض (mm)	طول (mm)	تعداد	جنس	
۴۰	۲۴۰	۳۰۰	۱	آلومینیوم خالص	سینک داغ
۵	۵/۱	۲۴۰	۱۰	آلومینیوم	کانال آب
۷	۵۰	۵۰	۴۰	اسکوتریودیت	ماژول
۳	۲۴۰	۳۰۰	۴	آلومینیوم نیتريد	صفحه سرامیکی
۴۰	۳	۳۰۰	۲۴	آلومینیوم خالص	پره

### ۵- شبیه‌سازی

با توجه به این که هزینه ساخت چنین مولدهایی بالا می‌باشد و هزینه ساخت این مولدها با تولید انبوه جبران نمی‌شود، بیشتر مطالعات به صورت عددی می‌باشد که نمونه آن در سال ۲۰۲۰ انجام شده است [۱۵]. کار شبیه‌سازی این مولد با هدف مطالعه جریان آب و گاز در نرم‌افزار فلونتت انجام شده است. در این شبیه‌سازی از اطلاعات اندازه‌گیری جدول ۲ برای مولد سری اول و از اطلاعات خروجی مولد سری اول برای مولد سری دوم استفاده شده است مولد در نرم‌افزار سالیدورک رسم و با فرمت step در نرم‌افزار فلونتت با حلگر pressure-based و الگوریتم فشار-سرعت coupled با معیار همگرایی  $10^{-4}$  در طرح‌های گسسته‌سازی second order upwind مدل‌سازی شد اطلاعات مورد نیاز برای شبیه‌سازی در جدول ۴ آمده است خروجی مولد اتمسفر در نظر گرفته شد و فرض بر این بود که مولد با محیط اطراف مرز حرارت جابه‌جایی نداشته باشد.

جدول ۴: اطلاعات ورودی جریان آب و گاز برای مولد اول

دمای یکنواخت (c)	دبی ورودی $\frac{kg}{s}$	
۸۲=سربالایی		
۷۵=سرازیری	۰/۴۸	جریان آب ورودی سینک سرد برای سه شرایط
۷۷=بزرگراهی		
۵۱۵/۶۵	۰/۰۳۲۸۷۵	جریان گاز در شرایط سربالایی
۲۱۱/۰۶	۰/۰۳۶۱۶۲۵	جریان گاز در شرایط سرازیری
۲۷۶/۲۱	۰/۰۲۹۸۹	جریان گاز در شرایط بزرگراهی

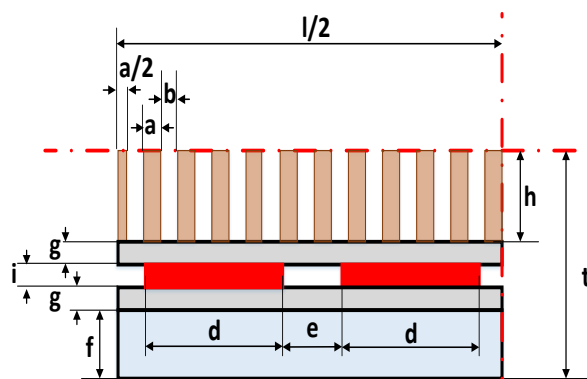
در نهایت ۴۰ میلی‌متر انتخاب شد. پره بلندتر از این هم باعث کاهش تعداد مولد به‌واسطه محدودیت قيود می‌شد. شکل ۱۲ اجزای داخلی و جدول ۲ ابعاد آنها را نشان می‌دهد.

۶- کانال آب، از تجارب مطالعات قبلی استفاده شد.

۷- جنس پره، با شبیه‌سازی مولد ابتدایی در جذب حرارت تغییر چندانی بین انتخاب آلومینیوم و مس به وجود نیامد که دلیل آن مقاومت بالای ماژول در برابر انتقال حرارت بود. زیرا مقاومت فلزات در برابر انتقال حرارت در مقایسه با ماژول‌ها به‌حدی پایین است که می‌توان آن را نادیده در نظر گرفت.

۸- دبی جریان گاز؛ افزایش دبی باعث کاهش تعداد مولد می‌شد (محدودیت جریان). مصرف انرژی در جابه‌جا کردن سیال تقریباً با توان سوم سرعت بستگی دارد در حالی که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در سرعت آرام مستقل از سرعت و در جریان مغموش با توان کوچک‌تر از یک سرعت تغییر می‌کند. بنابراین با تقسیم دبی جریان‌ها در جدول ۱ به هشت قسمت این انتخاب یعنی  $32/875$  گرم بر ثانیه برای حالت سربالایی،  $36/16$  برای سرازیری و  $29/28$  برای بزرگراهی انتخاب شد. البته از مرجع [۱۴] هم در مورد انتخاب رژیم جریان گاز استفاده شده است.

۹- تعداد ماژول؛ بر روی هر مولد ۴۰ ماژول قرار می‌گرفت یعنی برای هشت مولد سری اول و هشت مولد سری دوم در مجموع ۶۴۰ عدد ماژول با سطح مقطع  $50 \times 50$  میلی‌متر قرار گرفت. شکل ۱۳ مولد متقارن را نشان می‌دهد که قسمت بالا و پایین آن ۲۰ ماژول قرار دارد. جدول کامل جنس، ابعاد مولد در جدول ۳ آمده است.



شکل ۱۲: هندسه داخلی مولد و شکل قرار گرفتن آن

جدول ۲: مقدار پارامترهای ابعادی

ردیف	پارامتر	مقدار	ردیف	پارامتر	مقدار
۱	a	۳	۶	e	۶/۵
۲	b	۷/۶۵	۷	f	۱۱
۳	d	۵۰	۸	i	۴
۴	h	۲۰	۹	g	۳
۵	t	۴۱	۱۰	l	۲۵۰

## ۶- نتایج

این بخش به سه قسمت تقسیم می‌شود ابتدا نتایج شبیه‌سازی مولد اول و دوم و سپس نتایج به‌دست‌آمده از روابط تحلیلی و تخمین افت فشار در خروجی آگزوز بر عملکرد موتور ارائه شده است. دمای دو سر ماژول دو مولد به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ و میانگین دمای خروجی مولدها در جدول ۵ و تغییرات دمای دو سر ماژول در دبی‌های متفاوت ورودی در شرایط سربالایی برای مولد اول در جدول ۶ نشان داده شده است.

محاسبه توان تولیدی مولد اول که از ماژول اسکوتریودیت با خواص ذکر شده در مرجع [۱۶] بوده است برای سه شرایط کاری از طریق معادلات ایده‌آل (از مقاومت تماسی بین ماژول و صفحه آلومینیوم نیتريد صرف‌نظر می‌شود) انجام شد. البته این نکته لازم به ذکر است که طبق مطالعات فائقی [۱۴] استفاده از آلومینیوم نیتريد که از قیمت هشت برابری نسبت به آلومینا برخوردار است باعث می‌شود که مقاومت تماسی بین ماژول و صفحه زیرین آن به حدی کاهش یابد که بتوان نتایج معادلات ایده‌آل را با نتایج واقعی تقریباً یکسان در نظر گرفت.

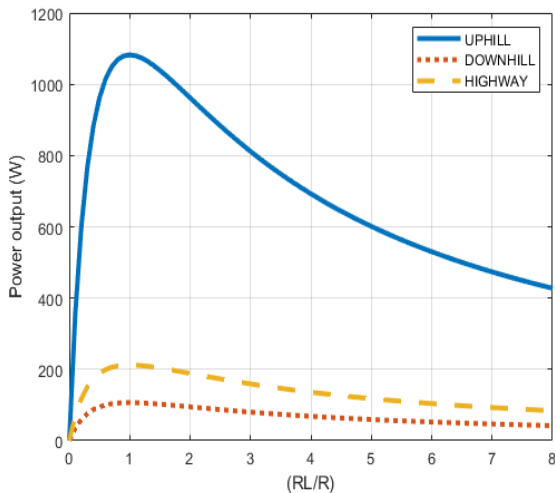
جدول ۵: میانگین دمای خروجی از دو مولد

شرایط کاری	دمای خروجی مولد اول (c)	دمای خروجی مولد دوم (c)
سربالایی	۴۵۳٫۴۸	۳۹۸٫۵۱
سرازیری	۱۹۲٫۵۵	۱۷۷٫۳۵
بزرگراهی	۲۴۶٫۵۲	۲۱۲٫۴۵

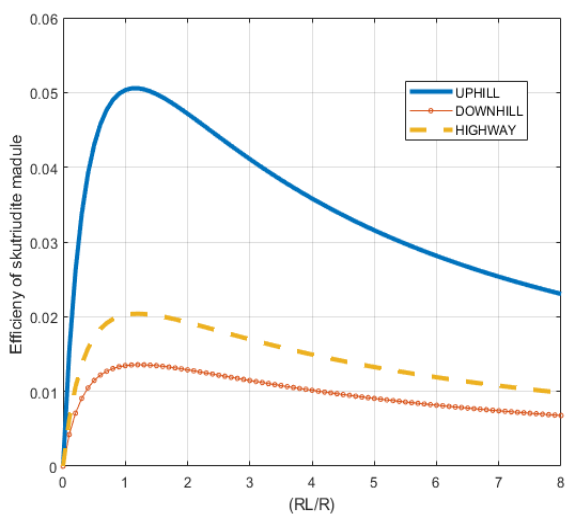
جدول ۶: تغییرات دمای دو سر ماژول با دبی ورودی آب

دبی آب ورودی (لیتر بر دقیقه)	۳	۸	۱۵	۲۳	۲۷	۲۹
اختلاف دمای دو سر ماژول (درجه سانتی‌گراد)	۲۷	۷۳	۱۴۷	۲۲۰	۲۵۷	۲۸۸

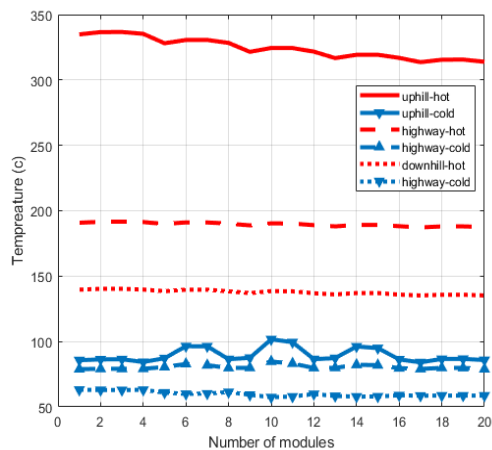
تغییرات توان تولیدی و بازده ماژول و توان تولیدی بین دو دمای میانگین  $T_c$  و  $T_h$  با نسبت تغییرات  $\frac{R_L}{R}$  در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ آمده است. همچنین شکل ۱۷ تغییرات جریان و ولتاژ را نسبت به  $\frac{R_L}{R}$  (نسبت مقاومت الکتریکی خارجی به داخلی شکل (۱)) نشان می‌دهد.



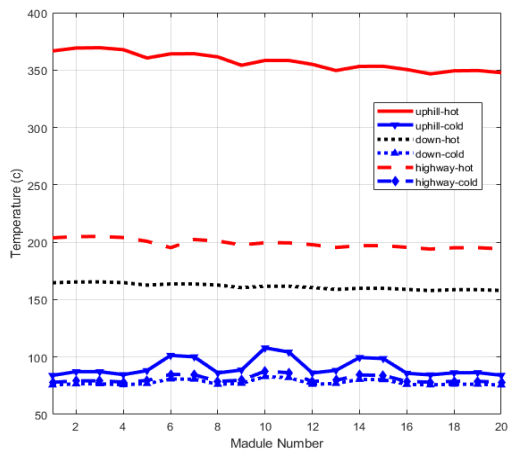
شکل ۱۶: توان تولیدی از مولد اول نسبت به تغییرات  $\frac{R_L}{R}$



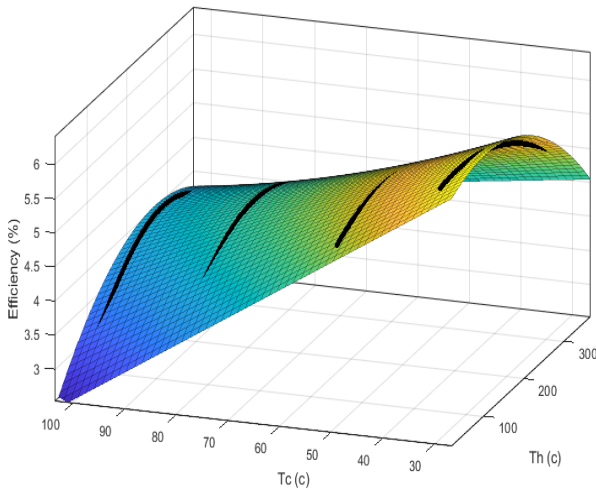
شکل ۱۷: بازده ماژول مولد اول نسبت به تغییرات  $\frac{R_L}{R}$



شکل ۱۴: نمودار دمای دو سر ماژول در ۲۰ نقطه برای مولد یک



شکل ۱۵: نمودار دمای دو سر ماژول در ۲۰ نقطه برای مولد دوم



شکل ۲۰: شکل تصحیح شده بازده بیسموت تلوراید

نمودار تصحیح شده در شکل ۱۹ آمده است و با استفاده از رابطه فوق و نمودار به دست آمده به راحتی می توان برای هر دمای سرد و گرم دو طرف ماژول مقدار بازده آن را به دست آورد. با مطالعاتی که درباره تخمین افت فشار در خروجی اگزوز بر عملکرد موتور به واسطه نصب مولد ترموالکتریک صورت گرفته است [۱۸]. میزان کاهش توان ترمزی به ازای هر کیلوپاسکال افت فشار در بستر اگزوز بسته به بار موتور بین ۳۰۰ تا ۴۴۰ وات تخمین زده شده است و میزان افزایش مصرف مخصوص سوخت نیز بسیار کوچک تر از یک درصد تخمین زده شده است. میزان تلفات پمپاژ سیال سیستم خنک کننده برای خنک کاری ماژولها ۲۳۹٫۸ وات محاسبه شده است. همچنین جدول های ۷ و ۸ به ترتیب تخمین افت فشار برای دو مولد را نشان می دهند و جدول ۹ و ۱۰ میانگین دمای دو سر ماژولها را به همراه بازده و توان ناخالص به دست آمده برای دو مولد نشان می دهند.

جدول ۷: میانگین افت فشار گاز برای مولد اول

پارامتر	بزرگرایی	سرازیری	سربالایی	کلی
فشار برگشتی (Pa)	۱۲۲/۴	۱۴۹/۵۳	۲۰۳/۱۲	۱۰۰۰
تلفات (W)	۳۶/۷۲	۴۴/۸۶	۶۰/۹۴	۳۰۰

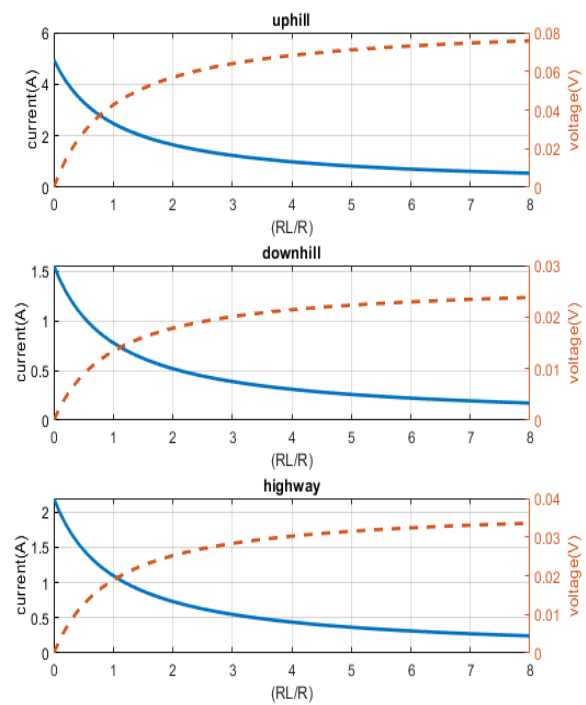
جدول ۸: میانگین افت فشار گاز برای مولد دوم

پارامتر	بزرگرایی	سرازیری	سربالایی	کلی
فشار برگشتی (Pa)	۱۴۱	۱۵۵	۲۱۰	۱۰۰۰
تلفات (W)	۴۲/۳	۴۶/۵	۶۳	۳۰۰

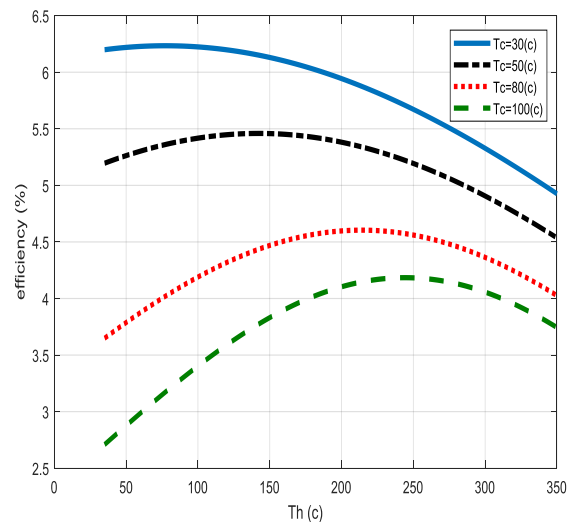
نتایج کلی برای عملکرد مولدهای ترموالکتریک در جدول های ۹ و ۱۰ جمع آوری شده است.

محاسبه توان مولد دوم بر پایه بیسموت تلوراید مطالعه شده در مرجع [۱۷] انجام شده است. از آنجایی که این نمودار بازده مولد را تنها برای چهار حالت دمای سرد ماژول نشان می داد (شکل ۱۸). با استفاده از برازش منحنی در نرم افزار متلب بازده مطابق رابطه ۱۷ تخمین زده شده است:

$$\eta(T_h T_c) = (7.429 + 0.002351 \times T_h) - (0.05102 \times T_c) - (2.599e - 0.5 \times T_h^2) + (0.00001122 \times T_h \times T_c) \quad (17)$$



شکل ۱۸: تغییرات جریان و ولتاژ در  $\frac{R_L}{R}$  متفاوت برای سه شرایط ورودی



شکل ۱۹: بازده بیسموت تلوراید [۱۷]

### فهرست علائم

$\dot{Q}$	نرخ گرمای ورودی به ماژول، $W$
$q$	ورودی به پایه ترموالکتریک $W$
$I$	جریان الکتریکی، <i>Ampere</i>
$R$	مقاومت الکتریکی، $\Omega$
$V$	اختلاف پتانسیل الکتریکی، $V$
$A$	سطح مقطع، $mm^2$
$h$	ضریب جابه‌جایی حرارتی، $\frac{W}{K.m^2}$
$\vec{v}$	سرعت سیال، $\frac{m}{s}$
$\dot{m}$	دبی جرمی، $\frac{gr}{s}$
$h$	ارتفاع، $m$
$p$	فشار، $Pa$
$g$	شتاب گرانش، $\frac{m}{s^2}$
$T$	دما، $K$
$k$	ضریب هدایت حرارتی، $\frac{W}{mK}$
$\rho$	چگالی، $\frac{kg}{m^3}$
$\alpha$	ضریب سیبک، $\frac{V}{K}$
$h$	سطح گرم ترموالکتریک
$c$	سطح سرد ترموالکتریک
$p$	نیمه هادی مثبت
$n$	نیمه هادی منفی
$th$	ترموالکتریک
$L$	مقاومت الکتریکی خارجی
$w$	آب
$g$	گاز

### مراجع و منابع

- [1] J. Thomas, "Drive Cycle Powertrain Efficiencies and Trends Derived from EPA Vehicle Dynamometer Results," SAE Int. J. Passeng. Cars -Mech. Syst., vol. 7, pp. 1374-1384, 2014
- [2] F. Liming, G. Wenzhi, Q. Hao and X. Bixian, "Heat Recovery from Internal Combustion Engine with Rankine Cycle," in Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific, Chengdu, 2010
- [3] M. Wei, J. Fang, C. Ma and S. N. Danish, "Waste heat recovery from heavy-duty diesel engine exhaust gases by medium temperature ORC system," Science China Technological Sciences, vol. 54, no. 10, pp. 2746-2753, 2011
- [4] S. Amicabile, J. I. Lee and D. Kum, "A comprehensive design methodology of organic Rankine cycles for the waste heat recovery of automotive heavy-

جدول ۹: توان ناخالص تولیدی توسط مولد اول

شرایط حرکت	دمای طرف گرم ماژول ( $C^0$ )	دمای طرف سرد ماژول ( $C^0$ )	بیشترین بازده (%)	بیشترین توان تولید از مولد (W)
سربالایی	۳۵۷/۴۶۶	۹۰/۰۸	۵	۱۰۸۲
سربایینی	۱۶۱/۴	۷۷/۷۶	۲/۰۴	۱۰۶/۶
بزرگراهی	۱۹۸/۷۸۹	۸۰/۷۷	۱/۳۶	۲۱۲/۲

جدول ۱۰: توان ناخالص تولیدی توسط مولد دوم

شرایط حرکت	دمای طرف گرم ماژول ( $C^0$ )	دمای طرف سرد ماژول ( $C^0$ )	بیشترین بازده (%)	بیشترین توان تولید از مولد (W)
سربالایی	۳۲۴/۱۸۰	۸۹/۶۳۶	۴/۱۴۶	۸۲۷/۲۶
سربایینی	۱۳۷/۷۴۷	۷۷/۹۱۶	۴/۴۸۸	۲۵۴/۱۳
بزرگراهی	۱۸۹/۵۶۷	۸۰/۵۱۲	۴/۵۴۵۴	۵۲۱/۳۴

### ۷- نتیجه گیری

در این مطالعه که برای اولین بار براساس اندازه‌گیری‌های جاده‌ای انجام شده است، یک مولد ترموالکتریک دو نوع ماژول طراحی و عملکرد آن بررسی شده است. نتایج نشان داد که میزان متوسط مصرف سوخت کامیون در طول مسیر ۱۷٫۶۵ لیتر بر ساعت و متوسط انرژی اگزوز ۷۱٫۹ کیلووات است. این نشان می‌دهد که ۳۴ درصد انرژی شیمیایی سوخت با کیفیت ذکر شده در جدول ۱ از اگزوز خودرو خارج می‌شوند و این شرایط در طول مسیر بین ۳۲ تا ۳۶ درصد تغییر می‌کند. در طراحی انجام شده می‌توان مقدار قابل توجهی توان از گازهای خروجی اگزوز بازیافت نمود. دمای سیستم خنک‌کننده ماشین افزایش تنها دو درجه سانتی‌گراد داشته است و فشار برگشتی در اگزوز ۲۱۰ پاسکال بیشتر می‌شود. نتایج نشان داد به طور کلی توان خالص دریافتی در شرایط سرازیری بهتر از حالت بزرگراهی است، درحالی‌که میزان مصرف سوخت ناچیز است. آهنگ کاهش توان تولیدی توسط ماژول‌های اسکوتریودیت با کاهش دما زیاد می‌شود اما برای بیسموت تلوراید با کاهش دما افزایش و سپس کاهش می‌یابد. بازده ماژول بیسموت تلوراید بر خلاف بسیاری از گزارش‌ها [۱۹] در حالت بزرگراهی و نه در بار کامل بالاترین مقدار را داشته است. افزایش دبی سیال خنک‌کننده منجر به افزایش اختلاف دمای دو سر ماژول و توان تولیدی بیشتر می‌شود.

### تشکر و قدردانی

در پایان از زحمات مجموعه کارگاه‌های دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه سمنان و امکانات شرکت تکساز آزما کومش به‌ویژه آقای دکتر علی‌اصغر مداح و مالک کامیون آقای مسیح براری که نهایت همکاری را با بنده داشتند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

Waste Heat at GM, in Thermoelectric Applications Work shop, San Diego, CA, 2011.

[12] L. Heber, J. Schwab Modelling of a thermoelectric generator for heavy-duty natural gas vehicles: Techno-economic approach and experimental investigation, Appl. Thermal Eng., volume 174 , 25 June 2020.

[13] A. Mutabe , E. Celik, Design optimization of oil pan thermoelectric generator to recover waste heat from internal combustion engines, Energy, Vol. 200 2020.

[14] H. Fagehi, Optimal Design of Automotive Exhaust Thermoelectric Generator (AETEG), Master's Theses, Western Michigan University, 2016.

[15] M. He, E. Wang, Y. Zhang,, W. Zhang, F. Zhang, Ch. Zhao, Performance analysis of a multilayer thermoelectric generator for exhaust heat recovery of a heavy-duty diesel engine, Applied Energy, Vol.274, 2020.

[16] S. Kumar, et al., Thermoelectric Generators for Automotive Waste Heat Recovery Systems Part I: Numerical Modeling and Baseline Model Analysis, Journal of Electronic Material.,Vol. 42, 2013.

[17] P. Fernández-Yáñez, O. Armas, A. Gómez, A. Gil, Developing Computational Fluid Dynamics (CFD) models to evaluate available energy in exhaust systems of diesel light-duty vehicles. Appl Sci 2017.

[18] J.D. Pesansky, et.al. The Effect of Three-way Catalyst Selection on Component Pressure Drop and System Performance, 2009-01-1072, SAE Int., 2009.

[19] S. Ezzitouni, P. et.al., Global energy balance in a diesel engine with a thermoelectric generator, Applied Energy, 274, 2020.

duty diesel engines," Applied Thermal Engineering, vol. 87, pp. 574-585, 2015

[5] M. Srinivasan and S. Praslad, Advanced Thermoelectric Energy Recovery System in Light Duty and Heavy Duty Vehicles: Analysis on Technical and Marketing Challenges, in Power Electronics and Drives Systems, PEDS. International Conference on, Kuala Lumpur, 2005

[6] J.C. Bass, A.S. Kushch and N.B. Elsner, Thermoelectric generator development for heavy duty truck applications. In Proceedings of the Annual Automotive Technology Development Contractors' Coordination Meeting, Dearborn, MI, USA, 28-31 October 1991; pp. 743-748

[7] ] C. Liu, X. Pan, X. Zheng, Y. Yan and W. Li, An experimental study of a novel prototype for two-stage thermoelectric generator from vehicle exhaust. J. Energy Inst. 2016, 89, 271-281.

[8] A. Edvin Risseh, H.P Nee, Olof Erlandsson Klas Brincfeldt, Design of a Thermoelectric Generator for Waste Heat Recovery Application on a Drivable Heavy Duty Vehicle, SAE International Journal of Commercial Vehicles, April 2017.

[9] R. Quan, et.al., Performance Investigation of an Exhaust Thermoelectric Generator for Military SUV Application Wuhan university of Thechnology, Woohan 430070 China Received:4 Desember 2017 .

[10] L. Heber, J. Schwab, H.E. Friedrich, Design of a Thermoelectric Generator for Heavy Duty Vehicle: Approach Based on WHVC and Real Driving Vehicle Boundary conditions, Germany, Aerospace Center (DLR) Conference Paper, November 2018.

[11] G.P. Meisner, Advanced Thermoelectric Materials and Generator Technology for Automotive



## Design and analysis of a thermoelectric generator for a heavy-duty vehicle in real road test

B. Rezaeian<sup>1</sup>, F. Talebi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> MSc Student, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, [bagher.rezaeian59@yahoo.com](mailto:bagher.rezaeian59@yahoo.com)

<sup>2</sup> Assistant professor, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, [ftalebi@semnan.ac.ir](mailto:ftalebi@semnan.ac.ir)

\*Corresponding Author

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 04 February 2022

Accepted: 19 May 2022

#### Keywords:

Bismuth telluride module

Heavy duty vehicle

Real road test

Scoteruidit

Thermoelectric generator

### ABSTRACT

Heavy duty vehicles have a great share on fossil fuel consumption and greenhouse gases in the world, while they waste two third of chemical energy of fuel. On the other hand, simplicity and long life of thermoelectric generators (TEGs) are considered more and more to convert thermal energy to electrical one. In this paper a TEG designed in the exhaust system of Renault Midlum 195 Dxi Engine. The temperature and mass flowrate of exhaust gas was measured in a real road test. The height and location of vehicle was recorded by GPS system. The TEG based on two high temperature scoteruidit and low temperature bismuth modules was designed. After designing in SOLIDWORKS, simulation was done using FLUENT. Based on the simulation outputs the power and efficiency of TEG was calculated through thermoelectric fundamental equations. The output power is 1511W, 375W and 466W, in uphill, flat and downhill road respectively.

