



بررسی تأثیر متغیرهای طراحی یک مولد گرما-برقی بر مصرف سوخت و توان خروجی یک خودرو نمونه

ابوالفضل محمدابراهیم^{۱*}؛ مختار اسکندری^۲

^۱ عضو هیات علمی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، m.abraham@arakut.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، mokhtareskandari1374@gmail.com

* نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۰۹ بهمن ۱۳۹۹

پذیرش: ۱۰ بهمن ۱۳۹۹

کلیدواژه‌ها:

مولد گرما-برقی

بازیابی گرمای تلف شده

مصرف سوخت

فشار پستی

چکیده

درصد قابل توجهی از ارزش گرمای سوخت در قالب گازهای داغ از خروجی خودرو تلف می‌شود. در تحولات اخیر، مواد گرما-برقی با کارایی قوی، سادگی و استحکام مناسب توسعه یافتند و تمایل به استفاده از این فناوری برای تبدیل مستقیم گرمای تلف شده به برق افزایش یافته است. مولدهای گرمای خودرو یکی از کاربردهای این فناوری است. در مقاله حاضر، یک الگو مولد گرما-برقی خودرو ابتدا با داده‌ها و نتایج تجربی ارزیابی شد و در ادامه تغییراتی در متغیرهایی که بر اقتصاد سوخت و قدرت خروجی مولد گرما-برقی خودرو اثر می‌گذارند، اعمال گردید. نتایج نشان داد، طرحی که حداکثر توان خروجی را تولید می‌کند با طرحی که بیشترین صرفه‌جویی در مصرف سوخت را دارد، متفاوت است و فشار پستی بیشترین عامل در مصرف سوخت شناسایی شد. نهایتاً الگوی بدست آمد که در حالت سکون خودرو توانست مصرف سوخت کلی را ۰٫۳ درصد کاهش دهد.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

تقریباً ۶۰٪ انرژی اولیه سوخت در یک موتور احتراق داخلی از طریق گازهای خروجی و سامانه خنک‌کننده تلف می‌شود. در نتیجه اگر ۶٪ از گرمای خروجی به برق تبدیل شود، مصرف سوخت به مقدار ۱۰ درصد کاهش خواهد یافت [۱].

امروزه در میان روش‌های مختلف بازیابی گرما، مولدهای گرمای خودرو (ATEG) به یک فناوری قابل اعتماد برای بازیابی گرمای خروجی در وسایل نقلیه تبدیل شده‌اند که مزایای بسیاری از جمله: وزن سبک، ساختار ساده، قابلیت اطمینان بالا و عملکرد بی صدا، دارند.

هسته TEG از سامانه‌های گرما-برقی^۲ (TEM) تشکیل شده است که مستقیماً گرما را به انرژی برقی تبدیل می‌کند. مبدل‌های گرمای موجود در هر دو طرف گرم و سرد TEM انتقال گرما را تضمین می‌کنند. TEG های نصب شده در ICE از یک مبدل گرمای استفاده می‌کنند که گرما را از گازهای خروجی جذب می‌کنند و آن را به مایع خنک‌کننده موتور یا به یک سامانه خنک‌کننده مستقل، منتقل می‌کنند.

تولید برق توسط گرما-برقی زمینه‌های کاربردی زیادی دارد [۲]. مولدهای گرما-برقی (TEGS)^۳ به عنوان منبع قابل اعتماد انرژی برقی^۴ در محیط‌های بزرگ [۳] و در مناطق دور افتاده برای تولید میکرو خارج از شبکه استفاده می‌شدند [۴].

اخیراً، طرح‌های جدید باعث افزایش بهره‌وری انرژی TEG های خورشیدی که شامل مترامک‌کننده‌های^۵ خورشیدی با لوله‌های گرمایی^۶ بسیار باریک^۷ صفحه مسطح^۸ شده اند [۵].

فرناندز-یائز و همکاران^۹ در یک کار آزمایشگاهی، از یک هندسه داخلی بهینه شده مبدل گرمای سمت گرم^{۱۰} استفاده کردند [۶] و نتیجه گرفتند که از بین چهار هندسه مورد بررسی، صفحه مسطح با پره‌های^{۱۱} مستقیم، بالاترین نسبت انتقال گرما را در مقابل مقادیر فشار پستی^{۱۲} داشته‌است [۷].

ماساگور و همکاران^{۱۳} که از طراحی ATEG، نتیجه گرفتند که با به حداکثر رساندن انتقال گرما از طریق TEM ها با استفاده از هندسه پره‌ای و به کارگیری مواد گرمای، می‌توان تولید توان ATEG را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشید [۸].

استوبارت و همکاران^{۱۴} برای پیدا کردن یک روش مناسب برای ویژگی‌های مبدل گرمای سمت گرم، یک الگوی عددی از یک ATEG

با داده‌های تجربی را بررسی کردند و آن را تحت شرایط مختلف برای توسعه یک الگو ساده آزمایش کردند. نتایج، تولید انرژی متفاوتی از TEMs را نشان می‌دهد که به شار گرمای غیریکنواخت^{۱۵} دریافت شده بستگی دارد [۹].

لی و همکاران^{۱۶} به این نتیجه رسیدند که پیکربندی مبدل گرمای صفحه باله‌دار برای جذب گرما در سمت گرم بهتر است [۹-۱۰]. بنابراین، طرح‌های ATEG با سطح مقطع چند ضلعی‌های منظم (مربع [۹]، شش ضلعی [۱۱] و هشت ضلعی [۱۲]) پیشنهاد شدند. طراحی مبدل گرمای نه تنها باید انتقال گرمای بالایی را فراهم کند بلکه افت فشار کم نیز داشته باشد.

کیم و همکاران^{۱۷} مشخص کردند که افت فشار از طریق ATEG دارای مقطع شش ضلعی با مبدل گرمای گرم باله‌دار، عمدتاً ناشی از انحراف جریان در ورودی و خروجی ATEG بوده و باعث بیش از ۸۰٪ کاهش انرژی در جریان‌های شدید موتور می‌شود [۱۱].

حیدر و غوجل^{۱۸} ارتباط مقاومت در برابر تماس گرمای بین قسمت‌های گرم و سرد TEM و مبدل‌های گرمای مربوطه را شناسایی کردند. استفاده از پخش‌کننده‌های گرمای و همچنین محدودیت‌های عملی از نظر مکانی که می‌توان ATEG را به‌طور مؤثری در موتور نصب کرد، ممکن است دمای قابل پیش‌بینی در سمت گرم را کاهش دهد [۱۳].

مونت‌کوکو و همکاران^{۱۹} تأثیر توان تولید شده را هنگام سه اتصال TEM، به‌طور سری یا موازی بررسی کردند. آن‌ها افت تولید برق ۹٫۲٪ (سری) و ۱۲٫۹٪ (موازی) از حداکثر توان به‌دست آمده هنگام کنترل هر TEM را به‌صورت جداگانه مشاهده کردند و نتیجه گرفتند که اتصال برقی پشت سر هم مناسب‌تر است [۱۴].

دنگ و همکاران^{۲۰} به‌طور آزمایشی و عددی تأثیر عدم اختلاط ویژگی سامانه (به عنوان مثال TEM با ضرایب سیبک^{۲۱} مختلف و مقاومت داخلی) و مقاومت سیم بر روی حداکثر توان خروجی را تجزیه و تحلیل کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که اتصال موازی در سامانه سیم‌کشی تلفات برق بیشتری را متحمل می‌شود [۱۵].

جان وانگ و همکاران^{۲۲} الگوهای عددی سه بعدی از دو طرح از سامانه-های بازیابی گرمای خروجی که در آن دو نوع مبدل گرمای طراحی شده، بررسی کردند و مشخصات میدان و درجه گرما آن‌ها را تحلیل

12 Back Pressure

13 Massaguer et al

14 Stobart et al

15 Non-Uniform Heat Flux

16 Li et al

17 Kim et al

18 Haidar and Ghajel

19 Montecucco et al

20 Deng et al

21 Seebeck

22 Wang, Jun, et al

1 Automobile ThermoElectric Generators

2 ThermoElectric Module

3 ThermoElectric Generators

4 Electrical Energy

5 Concentrators

6 Heat Pipes

7 Micro-Channel

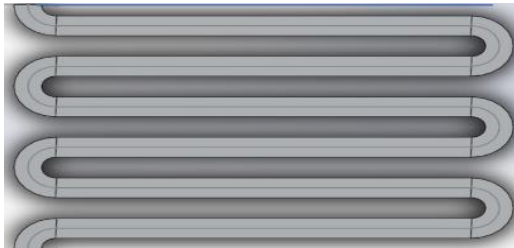
8 Flat-Plate

9 Fernández-Yañez et al

10 Hot-side Heat Exchanger

11 Fins

ورودی و خروجی از جنس فولاد است و به مقطع خروجی (به قطر ۵۰ میلی‌متر) متصل می‌شود. HSHE که طرف گرم TEM ها با آن در تماس است، از یک صفحه مسی ۲۱۰ × ۱۴۰ × ۱۵ میلی‌متر (طول × عرض × ارتفاع) تشکیل شده و دارای شش سوراخ استوانه‌ای به قطر ۱۲ میلی‌متر است. CSHE که طرف سرد TEM با آن در تماس است، از دو جعبه آلومینیومی که در آن‌ها لوله‌های موج دار با مقطع مستطیلی ۱۲ × ۱۰ میلی‌متر است (شکل ۲) قرار دارد و به عنوان خنک‌کننده عمل می‌کند.



شکل ۲: لوله موج‌دار درون مبدل گرمای سمت سرد

هر دو جعبه خنک‌کننده بالایی و پایینی برای تأمین فشار مورد نیاز بر روی TEM ها به یکدیگر وصل می‌شوند. از آنجا که TEM ها از دو ورق گرافیتی در دو طرف سرد و گرم استفاده می‌کردند، هیچ ماده واسطه گرمای دیگری برای بهبود انتقال گرما مورد نیاز نیست. سامانه‌های گرما-برقی، سامانه‌های حالت جامد هستند که شامل تعداد زیادی از عناصر نیمه‌هادی از نوع p و n اند که به‌صورت برقی و پشت سر هم با قطعات فلزی متصل شده‌اند. این نیمه‌رساناها به صورت فیزیکی بین دو لایه برقی تشکیل شده توسط لایه‌های سفال^۳ قرار گرفته‌اند.

۲-۲- معادلات حاکم

در معادله (۱) ولتاژی (V) که به این طریق القا می‌شود، با اختلاف دما بین دو سر مدار (محل اتصال دو فلز به یکدیگر) متناسب است. ثابت این تناسب (α) ضریب سیبک است.

$$V = \alpha(T_h - T_c) \quad (1)$$

$$P = VI \quad (2)$$

معادله (۲)، معادله توان خروجی است که V ولتاژ خروجی و I جریان خروجی مولد ATEG اند.

معادلات اقتصاد سوخت شامل معادله (۳) تخمین اقتصاد سوخت حاصل از توان تولید شده توسط ATEG، معادله (۴) افزایش مصرف سوخت به دلیل توان مورد نیاز برای غلبه بر فشار برگشتی تولید شده توسط ATEG، معادله (۵) افزایش مصرف سوخت به دلیل افزایش وزن خودرو، معادله (۶) توان خالص خروجی برقی ATEG و معادله (۷) مقدار کل اقتصاد سوخت اند.

کردند. نتایج نشان داد که دمای سطح مبدل گرمای با میله‌های گرداب، بالاتر و یکنواخت‌تر از مبدل گرمای بدون میله‌های گرداب است [۱۶]. تجزیه و تحلیل‌های قبل به وضوح نشان می‌دهد که عملکرد ATEG به طراحی هر دو مبدل گرمای سمت گرم و سرد وابسته است. با این وجود، مطالعات بسیار اندکی به موضوع تولید ابزاری برای بهینه‌سازی این طرح‌ها پرداخته‌اند. در برخی موارد، مجموعه‌ای از گزینه‌های جایگزین (به عنوان مثال، طرح‌های مبدل گرمای) از پیش تعریف شده و توسط الگوهای عددی جامع تحلیل شدند. مطالعات منحصراً بر روی شبیه‌سازی‌ها نیز متمرکز شده‌اند [۱۷-۱۸].

عواملی نیز بر مصرف سوخت تأثیر می‌گذارند، مهم‌ترین آن‌ها افزایش فشار پشتی ناشی از انسداد نسبی جریان گازهای خروجی به خاطر جذب‌کننده گرما است. در نتیجه، کارایی موتور به این دلیل کاهش می‌یابد که انرژی مکانیکی بیشتری برای غلبه بر این محدودیت مورد نیاز است. از آنجا که هدف اصلی گرما-برقی افزایش صرفه‌جویی در سوخت است، بهترین طراحی ATEG باید به گونه‌ای باشد که بین تولید توان بالا و فشار پشتی تعادل برقرار کند.

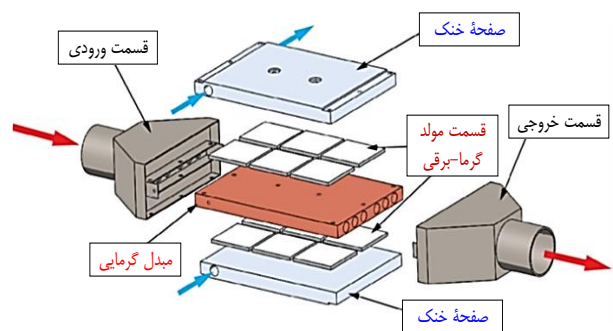
از موارد گفته شده، می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که:

- ۱) اکثر مطالعات قبلی ATEG بر روی به دست آوردن حداکثر توان مصرفی متمرکز شده‌اند.
- ۲) طراحی ATEG که حداکثر توان خروجی را تولید می‌کند ممکن است از نظر کاهش مصرف سوخت بهینه نباشد.
- بنابراین، واضح است که باید طراحی‌های ATEG را نه تنها از نظر تولید برق بلکه از نظر مصرف سوخت نیز تحلیل کرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مولد گرما-برقی

مولد گرما-برقی (شکل ۱) شامل ورودی و خروجی (۱)، مبدل گرمای سمت گرم^۱ (۲)، مبدل گرمای سمت سرد^۲ (۳)، سامانه گرما-برقی (۴) است.



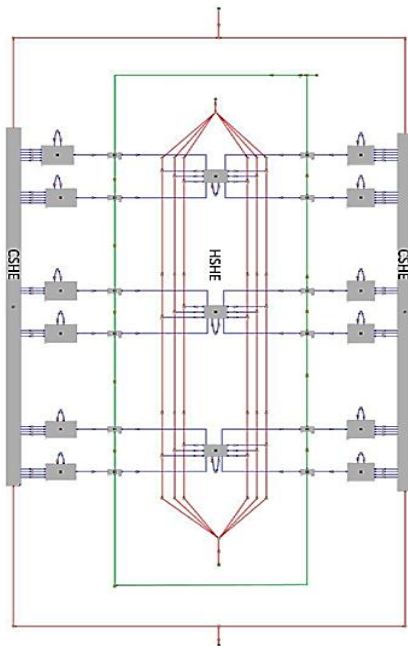
شکل ۱: مولد گرما-برقی

³ Ceramic

¹ HSHE

² CSHE

شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار GT-SUITE انجام شده است. شکل ۳ نمودار طرح کلی الگو تهیه شده برای تولید ATEG را نشان می‌دهد. مبدل گرمای مس به سه قسمت گرمای به صورت سری تقسیم شد. بنابراین، هر قسمت گرمای با بخشی از مبدل گرمای که به چهار TEM موجود در همان ستون قرار دارد مطابقت دارد. این روش تقسیم مبدل گرمای گرم در امتداد جهت جریان خروجی این امکان را می‌دهد تا به درستی نابرابری درجه گرم سرد و گرم شبیه‌سازی شود.



شکل ۳: نمودار جعبه الگو ATEG شامل دو مبدل گرمای سمت سرد (CSHEs)، ۱۲ TEM، اتصالات گرمای (خطوط آبی)، اتصالات جریان (خطوط قرمز)، اتصالات برقی (خطوط سبز) و سمت گرم مبدل (HSHE).

سطوح این مبدل‌های گرمای به‌طور مناسب به (۱) گازهای خروجی از طریق شش سوراخ استوانه‌ای، (۲) طرف‌های گرم TEM ها، و (۳) محیط متصل شده است. انتقال گرما از طریق هدایت و همرفت فرض شد و سطح خارجی (تماس با محیط) از ضریب انتقال گرما $h = \frac{W}{m^2K^2}$ استفاده کرد [۱۸].

همچنین شامل تلفات ناشی از تشعشع با سطح تابش خاکستری سطح گرم گرمای برابر ۰٫۹ است. قیاس کالبرن^۱ برای انتقال گرما از طریق همرفت در مایعات استفاده شد [۱۹].

برای فرض صحیح از حالت تجربی در شبیه‌سازی‌ها، از آب به عنوان خنک‌کننده و محصول واکنش احتراق به عنوان گازهای خروجی استفاده شد. فرض دوم، شرایط بهتر آزمایش را نسبت به تحمیل هوا به عنوان گازهای خروجی نشان می‌دهد، همانطور که معمولاً در سایر الگوهای عددی ATEG ها اتخاذ می‌شوند [۲۰، ۲۱].

$$F_{e,ATEG}(\%) = 100 \frac{\eta_{pcu}}{\eta_G P_e} P_{n,ATEG} \quad (3)$$

$$F_{e,BP}(\%) = -100 \frac{\dot{V}_g \Delta P_{bp}}{P_e} \quad (4)$$

$$F_{e,m}(\%) = -100 \frac{\xi u m_{ATEG} g}{P_e} \quad (5)$$

$$P_{n,ATEG} = P_{ATEG} - P_{wp} \quad (6)$$

$$F_{e,ATEG} + F_{e,BP} + F_{e,m} \quad (7)$$

η_{pcu} = کارایی واحد مبدل برق که برابر است با ۰٫۸۴ [۲۲].

η_G = کارایی مولد برق که برابر است با ۰٫۵ [۲۲].

\dot{V}_g = نرخ جریان حجمی گازهای خروجی

ΔP_{bp} = فشار برگشتی ناشی از نصب ATEG.

P_e = قدرت شافت موتور (گشتاور × سامانه).

ξ = مقاومت در برابر تحرک خودرو.

u = سرعت خودرو.

m_{ATEG} = وزن ATEG.

g = شتاب گرانش.

P_{ATEG} = توان خروجی ATEG.

P_{wp} = توان مصرف شده توسط تلمبه آب.

معادله‌های ۸ و ۹ مربوط به توان خروجی موتور هستند.

$$AFR = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_F} \quad (8)$$

AFR = نسبت هوا به سوخت

\dot{m}_a = جرم هوا

\dot{m}_F = جرم سوخت

$$p = \dot{m}_F \times \text{heat value} \times \eta \quad (9)$$

P = توان خروجی موتور

η = کارایی موتور

۲-۳- شبیه‌سازی

هدف مقاله حاضر اعتبارسنجی یک الگو عددی از ATEG برای یک PSA XUD7 نسخه k (جدول ۱) و بهبود طراحی آن با بررسی عواقب مختلف تغییر متغیرهای طراحی است.

جدول ۱: مشخصات موتور

حجم موتور	۱۷۶۹ (سی‌سی)
توان خروجی	۴۴ (کیلووات)
طول پیمایش	۸۸ (میلی‌متر)
قطر سمبه	۸۰ (میلی‌متر)

¹ Colburn

شکل ۴ مربوط به توان مولد گرما-برقی پژوهش حاضر است که موردهای ۱ تا ۶ با نرم افزار gt-suite آزمایش شدند. در مورد ۶ حداکثر مقدار توان به دست آمد و به ۱,۵ وات رسید. این به معنی تولید متوسط انرژی در هر TEM برابر با ۵,۱۲ وات بود.

توان خروجی شبیه سازی شده از مقادیر عددی و تجربی مرجع پیروی کرد. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می شود، نتایج پژوهش حاضر اینگونه به دست آمدند که تفاوت زیادی با مقادیر عددی و تجربی مقاله مورد نظر [۲۱] ندارند. بنابراین، روش پژوهش حاضر به طور صحیح رفتار ATEG را پیش بینی می کند (هم در رفتار گرمای و هم برقی).

۳- بررسی متغیرهای الگو

۱- متغیرهای هندسه مولد ۲- متغیرهای جریان و انتقال گرما
۳- متغیرهای گرما-برقی

با استفاده از معادله های اقتصاد سوخت ۳-۷ مقادیر $F_{e,BP}$ ، $F_{e,ATEG}$ ، $F_{e,m}$ و F_e برای الگوی مورد نظر (مورد ۶ جدول ۲) به دست آمدند.

$$F_{e,ATEG}(\%) = 0.43$$

$$F_{e,BP}(\%) = -7.51$$

$$F_{e,m}(\%) = -0.0953$$

$$F_e = F_{e,ATEG} + F_{e,BP} + F_{e,m} = -7.174$$

$$AFR = \frac{m_a}{m_g} = 14.7$$

نسبت هوا به سوخت برای موتور دیزل

$$\lambda = 1.34 \text{ نسبت معادل هوا و سوخت (جدول ۲)}$$

$$m_g = 43.8 \left(\frac{g}{s}\right) \text{ شار جرمی (جدول ۲)}$$

$$AFR \times \lambda = 19.7$$

$$m_F = \frac{m_g}{AFR * \lambda} = 2.12 \left(\frac{g}{s}\right) \text{ and } m_a = 41.68 \left(\frac{g}{s}\right)$$

باتوجه به نتایج به دست آمده، توان تولید شده توسط ATEG تأثیر مثبت در اقتصاد سوخت دارد (۰,۴۳ درصد) و باعث کاهش مصرف سوخت می شود. اما فشار پستی ناشی از نصب ATEG و وزن ATEG تأثیر منفی در اقتصاد سوخت دارند و مجموع مصرف سوخت ۷,۱۷۴- می شود.

همچنین با استفاده از شار جرمی، نسبت هوا به سوخت، ارزش گرمای سوخت دیزل و بازده موتور دیزل، توان خروجی موتور نسبت به مقدار سوخت ورودی بدست آمد. در ادامه به بررسی متغیرهای مختلف الگو با هدف بهبود مصرف سوخت، پرداخته می شود.

مصرف سوخت تحت تأثیر ۳ متغیر قرار می گیرد:

۱- اثر مثبت ناشی از توان خروجی ۲- اثر منفی ناشی از افزایش جرم

۳- اثر منفی ناشی از فشار برگشتی

جدول ۲: داده های تجربی برای ساختار موتور (دور موتور)، گشتاور، نرخ جریان جرم گاز خروجی \dot{m}_g ، دمای گاز خروجی ورودی ATEG $T_{g,i}$ ، سرعت جریان حجمی آب خنک کننده \dot{V}_w ، دمای مایع خنک کننده آب در ورودی ATEG $T_{w,i}$ و λ نسبت هم ارزی هوا و سوخت [۲۲].

شار	شار جرمی	$T_{w,i}$	$T_{g,i}$	گشتاور	سرعت
λ	حجمی $\dot{V}_w \left(\frac{L}{h}\right)$	(°C)	(°C)	N.m	rpm
۱,۶۸	۵۸۰	۲۶,۴	۴۴۴,۷	۶۹,۹	۲۵۰۰
۱,۶۸	۲۸۰	۳۱,۲	۴۲۸,۷	۶۷,۳	۲۵۰۰
۱,۶۳	۱۶۰	۳۳,۶	۴۵۰,۱	۷۱,۹	۲۵۰۰
۱,۵	۵۸۰	۲۹,۶	۵۲۱,۶	۷۵,۱	۲۸۰۰
۱,۴۳	۱۴۰	۳۳,۴	۵۴۷,۴	۸۲,۲	۲۶۰۰
۱,۳۴	۵۸۰	۲۸	۵۹۸,۸	۷۹,۲	۳۰۰۰

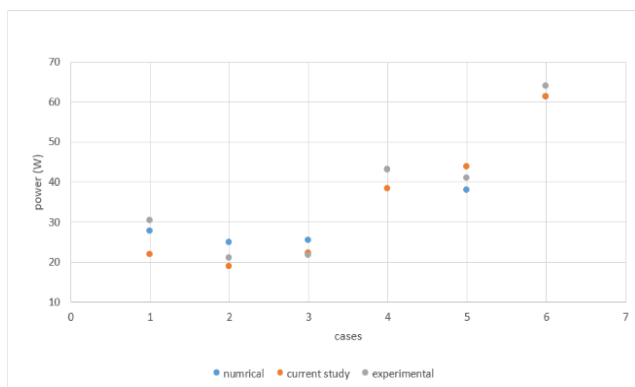
۲-۳-۱- شرایط مرزی

شرایط مرزی شبیه سازی به شرح زیر است:

- گاز خروجی در ورودی ATEG، دمای ثابت و سرعت جریان جرم (جدول ۱).
- گاز خروجی در خروجی ATEG، فشار ثابت (تنظیم شده بر روی جوی).
- آب خنک کننده در ورودی ATEG، دمای ثابت و سرعت جریان حجمی آب خنک کننده (جدول ۱).
- آب خنک کننده در خروجی ATEG، فشار ثابت (روی جوی تنظیم شده است).
- دمای محیط ثابت در ۲۴ درجه سانتیگراد.

۲-۴- اعتبار سنجی

۶ مورد طبق موارد جدول (۱) شبیه سازی و بررسی و با نتایج عددی و تجربی پژوهش [۲۲] مقایسه شد. که نتایج در شکل ۴ مشاهده می شوند.



شکل ۴: مقادیر توان شبیه سازی پژوهش حاضر با مقادیر عددی و تجربی مرجع

۱-۳- متغیرهای هندسه مولد

۱-۱-۳- تغییر ارتفاع لوله‌های قسمت سرد

ارتفاع کانال خنک کننده L از ۸ میلی‌متر تا ۳۰ میلی‌متر متغیر و عرض (= ۱۰ میلی‌متر) ثابت نگه داشته شد (شکل ۲). این به معنای تغییر از ۸۰ میلی‌متر مربع به ۳۰۰ میلی‌متر مربع در سطح مقطع کانال آب است. با توجه به شکل ۵، مقادیر توان حاصل از تغییر ارتفاع لوله‌های سردکننده با شار جرمی ۵۸۰ و ۱۸۰ لیتر در ساعت به دست آمد. با افزایش ارتفاع لوله جریان خنک کننده به دلیل افزایش سطح مقطع و کاهش شار که باعث کاهش انتقال گرما می‌شود، توان کاهش پیدا می‌کند. بیشترین مقدار مربوط به کمترین ارتفاع (ارتفاع: ۸ میلی‌متر) است (اختلاف مقادیر ناچیز هستند).

در حالی که نتایجی که در شکل ۵ آمده است متمرکز بر تولید برق است، هدف نهایی نصب ATEG در یک وسیله نقلیه در واقع کاهش مصرف سوخت است.

ارتفاع لوله از ۸ تا ۳۰ میلی‌متر بررسی شد و ارتفاع ۸ میلی‌متر برای مورد اصلی در نظر گرفته شد که بیشترین توان را نسبت به ارتفاع‌های دیگر تولید کرد. با توجه به اینکه فشار پستی که عامل اصلی در مقدار مصرف سوخت است مربوط به منبع گرم است و ارتفاع لوله‌ها هرچه کمتر باشد سبک‌تر می‌شوند، هرچه ارتفاع لوله‌های منبع سرد کمتر باشد توان بیشتر می‌شود و به تبع آن مصرف سوخت ناشی از تولید توان هم بیشتر می‌شود که تأثیر مثبت در مصرف سوخت دارد و با کاهش وزن، مقدار $F_{e,m}$ نیز کم می‌شود که باعث تأثیر مثبت در مصرف سوخت می‌شود. از بررسی مقادیر مصرف سوخت و توان تولید شده، نتیجه می‌شود که تغییر ارتفاع لوله‌های سرد، تأثیر بسیار کمی روی توان تولید شده و مصرف سوخت دارد.

در ارتفاع ۸ میلی‌متر بیشترین توان و کمترین مصرف سوخت به دست آمد که نتایج به صورت زیر است:

$$P = 61.291 \text{ W}$$

$$F_{e,ATEG}(\%) = 0.43$$

$$F_{e,BP}(\%) = -7.51$$

$$F_{e,m}(\%) = -0.0953$$

$$F_e(\%) = -7.174$$

۷،۱۷۴- درصد افزایش مصرف سوخت معادل با ۱،۷۳ کیلووات توان خروجی موتور است.

در ارتفاع ۳۰ میلی‌متر کمترین توان و بیشترین مصرف سوخت به دست آمد که نتایج به صورت زیر است:

$$P = 61.289 \text{ W}$$

$$F_{e,ATEG}(\%) = 0.42$$

$$F_{e,BP}(\%) = -7.51$$

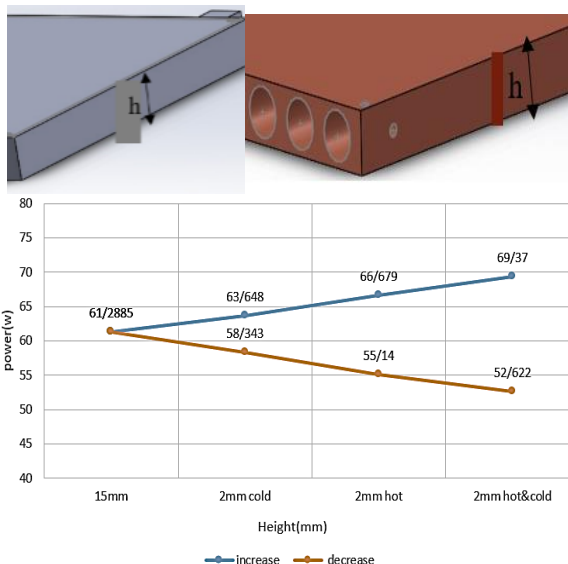
$$F_{e,m}(\%) = -0.096$$

$$F_e(\%) = -7.186$$

۷،۱۸۶- درصد افزایش مصرف سوخت معادل با ۱،۷۴ کیلووات توان خروجی موتور است.

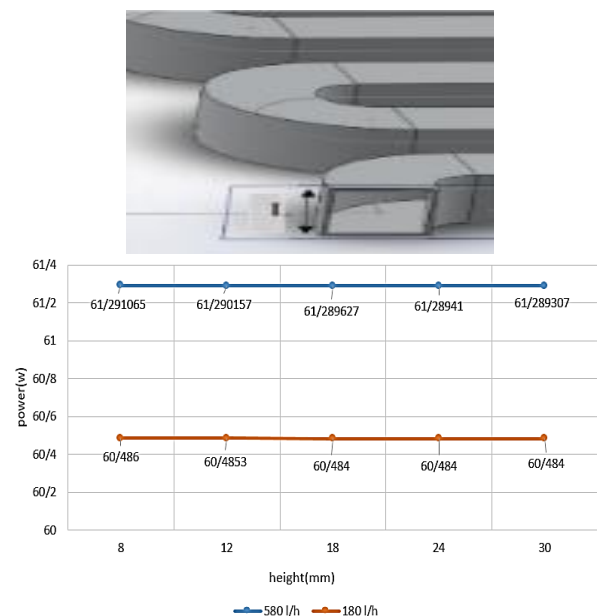
۳-۱-۲- تغییر ارتفاع مبدل‌های گرم و سرد

تغییر ارتفاع مبدل‌های گرم و سرد (شکل ۱) (تغییر طول، عرض یا ارتفاع هیچ فرقی ندارد. هر کدام تغییر کند، باعث تغییر وزن می‌شود). در شکل ۶ افزایش و کاهش ارتفاع منابع سرد و گرم بررسی شد.

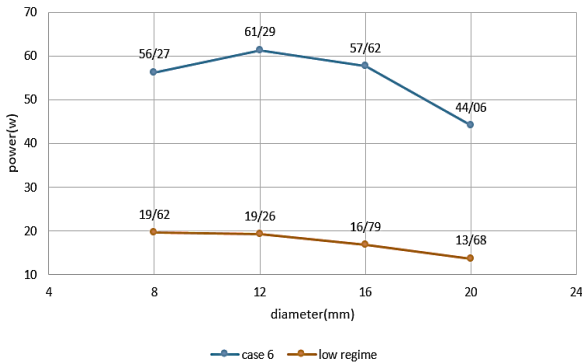
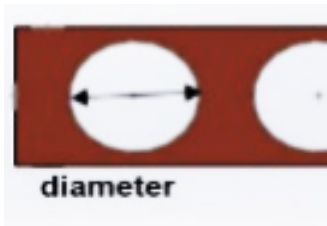


شکل ۶: نتایج توان حاصل از افزایش و کاهش ارتفاع مولد TEG

با توجه به مقادیر بدست آمده در شکل ۶ افزایش وزن باعث افزایش مصرف سوخت و کاهش وزن باعث کاهش مصرف سوخت می‌شود.



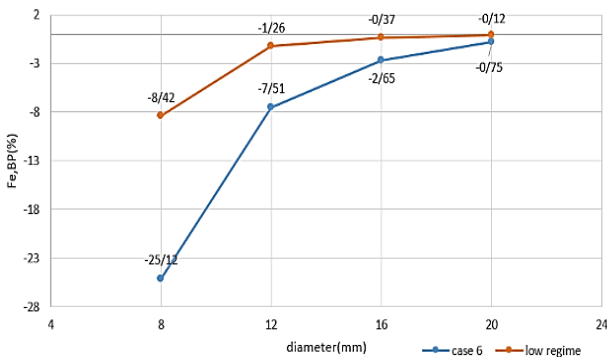
شکل ۵: حاصل از تغییر ارتفاع لوله سرد و تغییر سرعت جریان آب



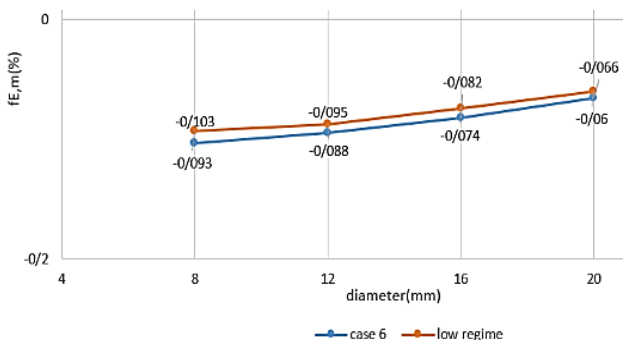
شکل ۷: توان حاصل از تغییر قطر سوراخ‌های استوانه‌ای منبع گرم

۳-۱-۴- مقادیر مصرف سوخت حاصل از تغییر قطر سوراخ‌های استوانه‌ای

مقادیر مصرف سوخت ناشی از فشار پشتی ATEG، تولید توان ATEG، جرم ATEG و مصرف سوخت کلی ATEG در شکل های ۸ تا ۱۱ آمده‌است.



شکل ۸: مقادیر مصرف سوخت ناشی از فشار پشتی ATEG



شکل ۹: مقادیر مصرف سوخت ناشی از جرم ATEG

نتایج اقتصاد سوخت حاصل از افزایش و کاهش ارتفاع منابع سرد و گرم به صورت زیر است:

$$F_{e,ATEG}(+2 \text{ mm}) = 0.49 \%$$

$$F_{e,BP}(+2 \text{ mm}) = -7.51 \%$$

$$F_{e,m}(+2 \text{ mm}) = -0.105 \%$$

$$F_e(+2 \text{ mm}) = -7.125 \%$$

۷،۱۲۵- درصد افزایش مصرف سوخت معادل با ۱،۷۲ کیلووات توان خروجی موتور است.

$$F_{e,ATEG}(-2 \text{ mm}) = 0.372 \%$$

$$F_{e,BP}(-2 \text{ mm}) = -7.51 \%$$

$$F_{e,m}(-2 \text{ mm}) = -0.085 \%$$

$$F_e(-2 \text{ mm}) = -7.223 \%$$

۷،۲۲۳- درصد افزایش مصرف سوخت معادل با ۱،۷۴ کیلووات توان خروجی موتور است.

کاهش و افزایش وزن مولد در توان تولید شده و مصرف سوخت تأثیر دارد. به این صورت که افزایش ارتفاع باعث افزایش مساحت مبدل‌ها می‌شود و به تبع آن باعث افزایش توان تولیدی می‌شود و همچنین مصرف سوخت ناشی از افزایش وزن را نیز بالا می‌برد به طوریکه با افزایش ۲ میلی‌متر ارتفاع مس (منبع گرم) و آلومینیوم (منبع سرد)، نتایج به این صورت حاصل شد که توان حدوداً ۸ وات افزایش پیدا کرد و مصرف سوخت کلی ۰،۰۴۹ درصد افزایش پیدا کرد. همچنین با کاهش ۲ میلی‌متر ارتفاع مس و آلومینیوم توان حدود ۹ وات کاهش پیدا کرد و مصرف سوخت کلی نیز ۰،۰۴۹ درصد کاهش پیدا کرد که افزایش و کاهش ارتفاع منابع سرد و گرم تأثیر کمی در مصرف سوخت داشت. با توجه به اینکه افزایش وزن باعث افزایش توان و مصرف سوخت می‌شود این نتیجه حاصل می‌شود که طراحی‌هایی که حداکثر توان خروجی را دارند، با طراحی‌هایی که حداکثر صرفه جویی در سوخت را دارند، متفاوت است.

۳-۱-۳- تغییر قطر سوراخ‌های استوانه‌ای منبع گرم

نتایج حاصل از تغییر قطر سوراخ‌های استوانه‌ای منبع گرم و همچنین نتایج برای یک جریان پایین $(m_{g,i} = 24.1 \frac{g}{s} \cdot T_{g,i} = 20^\circ C, \dot{V}_w = 580 \text{ l/h}, T_{w,i} = 454.8^\circ C)$ ز بدست آمد که در شکل ۷ آمده است.

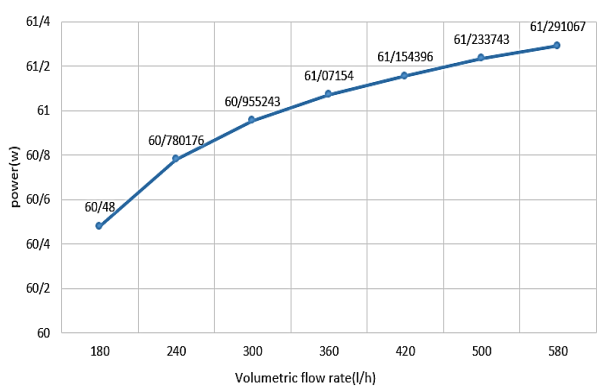
باتوجه به نتایج بدست‌آمده در شکل ۷، این نتیجه حاصل می‌شود که با افزایش قطر سوراخ‌های استوانه‌ای منبع گرم، سرعت جریان کمتر می‌شود و باعث انتقال گرما کمتر می‌شود که توان کمتری تولید می‌کند. قطر ۸ میلی‌متر باتوجه به ثابت بودن شار جرمی، اختلاف چگالی و شار حجمی در ورودی و خروجی زیاد بود و همچنین به دلیل افت فشار بالا کنار گذاشته شد.

۰,۰۷ درصد کاهش مصرف سوخت در قطر ۲۰ میلی‌متر جریان پایین، معادل با ۰,۰۱۶۹ کیلووات توان خروجی موتور است

۳-۲- متغیرهای جریان و انتقال گرما

۳-۲-۱- تغییر شار حجمی جریان آب داخل لوله‌های منبع سرد

در این قسمت تغییرات شار حجمی جریان آب داخل لوله‌های سرد از ۱۸۰ تا ۵۸۰ لیتر بر ساعت با ارتفاع ۸ میلی‌متر در شکل ۱۲ بررسی می‌شود. (در الگو اصلی از ۵۸۰ لیتر بر ساعت استفاده شده است).



شکل ۱۲: مقادیر توان تغییر شار حجمی جریان آب داخل لوله‌های منبع سرد

اثرات تغییر شار حجمی آب خنک کننده (Vw)، از ۱۸۰ لیتر بر ساعت تا ۵۸۰ لیتر بر ساعت بررسی شد. حداکثر انتقال گرما با حداکثر شار و حداقل ارتفاع بدست آمده است. هرچه شار حجمی آب منبع سرد افزایش پیدا کند، انتقال گرما بیشتر می‌شود و باعث افزایش مقدار توان می‌شود. شارهای ۱۸۰ تا ۵۸۰ لیتر بر ساعت آزمایش شدند و با توجه به اینکه شار حجمی ۵۸۰ لیتر در ساعت توان بیشتری تولید کرد، این مقدار در نظر گرفته شد.

تغییر شار حجمی تأثیری در فشارپشتی و جرم ATEG ندارد و افزایش شار باعث افزایش توان تولیدی می‌شود. اما با توجه به توان بدست‌آمده در شکل ۱۲، تأثیر زیادی در اقتصاد سوخت ندارد و بسیار ناچیز است. نتایج اقتصاد سوخت حاصل از شار ۵۸۰ لیتر در ساعت به صورت زیر است:

$$P = 61.29 \text{ W}$$

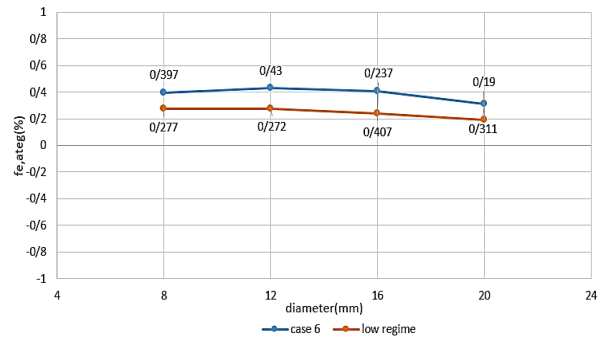
$$F_{e,ATEG}(\%) = 0.43$$

$$F_{e,BP}(\%) = -7.51$$

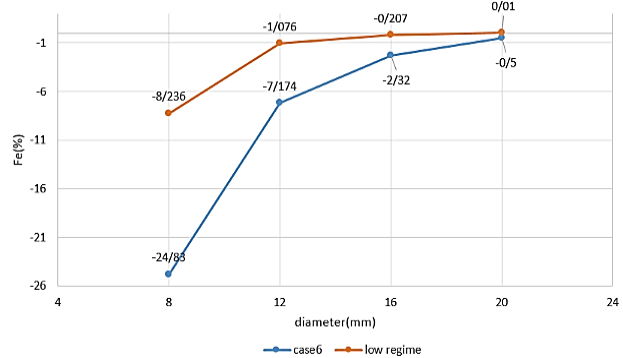
$$F_{e,m}(\%) = -0.096$$

$$F_e(\%) = -7.176$$

۷,۱۷۴- درصد افزایش مصرف سوخت معادل با ۱,۷۳۸ کیلووات توان خروجی موتور است.



شکل ۱۰: مقادیر مصرف سوخت ناشی از توان تولیدشده ATEG



شکل ۱۱: مقادیر مصرف سوخت کلی ATEG

مورد اصلی با قطر ۱۲ میلی‌متر شبیه‌سازی شد، زیرا بیشترین توان خروجی را تولید می‌کرد. حال با توجه به نتایج به دست آمده در شکل‌های ۷ تا ۱۱ این نتیجه حاصل می‌شود که با افزایش قطر سوراخ استوانه‌ای منبع گرم، مقدار مصرف سوخت ناشی از فشار برگشتی ATEG (شکل ۸) و مقدار مصرف سوخت ناشی از جرم ATEG و اقتصاد سوخت ناشی از توان تولیدی ATEG (شکل ۹ و ۱۰) کم می‌شود.

همین طور به دلیل اینکه سطح مقطع افزایش پیدا می‌کند و شار جرمی گاز خروجی و وزن مبدل گرمای نیز کم می‌شوند، توان کمتری تولید می‌شود (شکل ۷). در قطر ۲۰ میلی‌متر، با کاهش مقدار فشار پشتی ATEG که بیشترین تأثیر را در مصرف سوخت داشت و کاهش وزن ATEG، مصرف سوخت نسبت به قطر ۱۲ میلی‌متر، در حدود ۷ درصد کم شد (شکل ۱۱).

همچنین جریان پایین نیز مورد بررسی قرار گرفته که در قطر ۲۰ میلی‌متر مصرف سوخت ۰,۰۱ درصد کاهش پیدا کرد. اگر خودرو را در حالت سکون فرض کرد، مصرف سوخت ناشی از جرم نادیده گرفته می‌شود و مصرف کل اقتصاد سوخت ۰,۰۷ درصد کاهش پیدا می‌کند. ۷,۱۷۴- درصد افزایش مصرف سوخت در قطر ۱۲ میلی‌متر، معادل با ۱,۷۳۷ کیلووات توان خروجی موتور است.

۰,۵- درصد افزایش مصرف سوخت در قطر ۲۰ میلی‌متر، معادل با ۰,۱۲۱ کیلووات توان خروجی موتور است.

۰,۰۱ درصد کاهش مصرف سوخت در قطر ۲۰ میلی‌متر جریان پایین، معادل با ۰,۰۲۴ کیلووات توان خروجی موتور است.

$$F_{e.ATEG}(\%) = 0.371$$

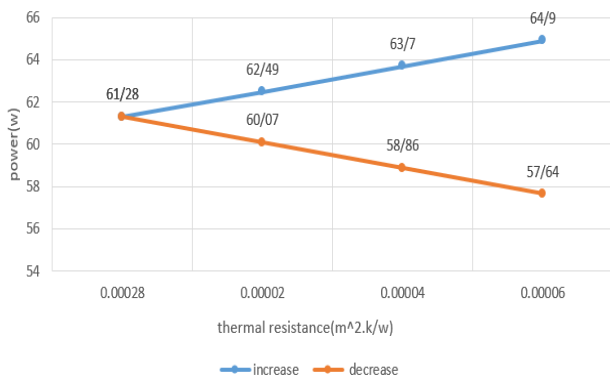
$$F_{e.BP}(\%) = -7.51$$

$$F_{e.m}(\%) = -0.096$$

$$F_e(\%) = -7.235$$

۷,۲۳۵- درصد افزایش مصرف سوخت معادل با ۱,۷۴۹ کیلووات توان خروجی موتور است.

با توجه به نتایج اقتصاد سوخت و توان حاصل از تغییر ضریب سیبک سامانه TE، با افزایش ضریب سیبک توان افزایش می‌یابد و به دلیل اینکه تغییر ضریب سیبک سامانه فقط روی توان تولیدی تأثیر می‌گذارد باعث کاهش مصرف سوخت نیز می‌شود.



شکل ۱۴: مقادیر توان تغییر مقدار مقاومت گرمای

همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، متغیر مقاومت گرمای سامانه TE بررسی شد که با افزایش مقدار مقاومت گرمای به دلیل اینکه باعث افزایش تبادل گرما و سرما می‌شود مقدار توان افزایش و با کاهش مقدار مقاومت گرمای، این مقدار کاهش پیدا می‌کند. نتایج اقتصاد سوخت حاصل از افزایش مقدار مقاومت گرمای سامانه به صورت زیر است:

$$P = 64.9 \text{ W}$$

$$F_{e.ATEG}(\%) = 0.458$$

$$F_{e.BP}(\%) = -7.51$$

$$F_{e.m}(\%) = -0.096$$

$$F_e(\%) = -7.148$$

۷,۱۴۸- درصد افزایش مصرف سوخت معادل با ۱,۷۳۳ کیلووات توان خروجی موتور است.

نتایج اقتصاد سوخت حاصل از کاهش مقدار مقاومت گرمای سامانه به صورت زیر است:

$$P = 57.64 \text{ W}$$

$$F_{e.ATEG}(\%) = 0.4$$

$$F_{e.BP}(\%) = -7.51$$

$$F_{e.m}(\%) = -0.096$$

$$F_e(\%) = -7.2$$

نتایج اقتصاد سوخت حاصل از شار ۱۸۰ لیتر در ساعت به صورت زیر است:

$$P = 60.48 \text{ V}$$

$$F_{e.ATEG}(\%) = 0.427$$

$$F_{e.BP}(\%) = -7.51$$

$$F_{e.m}(\%) = -0.096$$

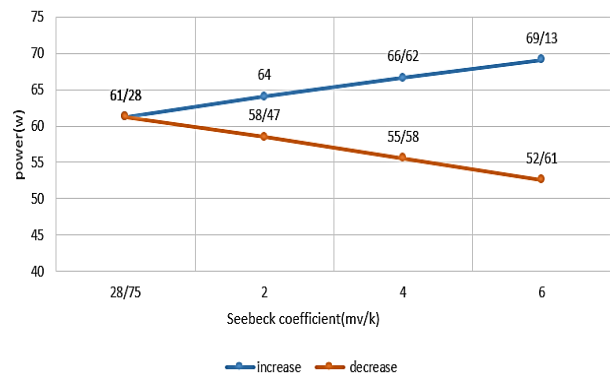
$$F_e(\%) = -7.179$$

۷,۱۷۹- درصد افزایش مصرف سوخت معادل با ۱,۷۳۹ کیلووات توان خروجی موتور است.

۳-۳- متغیرهای گرما-برقی

۳-۳-۱- تغییر متغیرهای داخلی سامانه TE

در این بخش متغیرهای ضریب سیبک، مقاومت برقی و مقاومت گرمای سامانه تغییر داده شدند (شکل‌های ۱۳-۱۵).



شکل ۱۳: مقادیر توان تغییر مقدار ضریب سیبک

ضریب سیبک بررسی شد و طبق نتایج شکل ۱۳، مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب سیبک، چون باعث افزایش کارایی سامانه می‌شود، مقدار توان افزایش پیدا می‌کند و با کاهش ضریب سیبک این مقدار کاهش پیدا می‌کند.

نتایج اقتصاد سوخت حاصل از افزایش مقدار ضریب سیبک سامانه به صورت زیر است:

$$P = 69.13 \text{ W}$$

$$F_{e.ATEG}(\%) = 0.488$$

$$F_{e.BP}(\%) = -7.51$$

$$F_{e.m}(\%) = -0.096$$

$$F_e(\%) = -7.118$$

۷,۱۱۸- درصد افزایش مصرف سوخت معادل با ۱,۷۲۷ کیلووات توان خروجی موتور است.

نتایج اقتصاد سوخت حاصل از کاهش مقدار ضریب سیبک سامانه به صورت زیر است:

$$P = 52.61 \text{ W}$$

با توجه به نتایج بدست آمده از مصرف سوخت و توان حاصل از تغییر مقاومت برقی سامانه TE، با کاهش مقدار مقاومت برقی سامانه، توان افزایش پیدا می‌کند و به دلیل اینکه تغییر مقاومت برقی سامانه فقط روی توان تولیدی تأثیر می‌گذارد، مصرف سوخت نیز کاهش پیدا می‌کند. همچنین بیشترین ضریب سیبک (۶۴,۵ mv/k) و کمترین مقدار مقاومت برقی (۰,۱۸ ohm) موجود سامانه گرما-برقی (GM250-49) 16-45 برای حالت جریان پایین بررسی شد که نتایج آن‌ها به صورت زیر است:

بیشترین ضریب سیبک:

$$p = 31.43 W$$

$$F_{e.ATEG}(\%) = 0.43$$

$$F_{e.BP}(\%) = -0.12$$

$$F_{e.m}(\%) = -0.066$$

$$F_e(\%) = 0.244$$

مقدار مصرف سوخت کلی برای بیشترین ضریب سیبک، ۰,۲۴۴ درصد کاهش پیدا کرد که با در نظر گرفتن حالت سکون، مقدار مصرف سوخت کلی ۰,۳۱ درصد کاهش پیدا می‌کند. کمترین مقدار مقاومت برقی:

$$p = 28.37 W$$

$$F_{e.ATEG}(\%) = 0.39$$

$$F_{e.BP}(\%) = -0.12$$

$$F_{e.m}(\%) = -0.066$$

$$F_e(\%) = 0.204$$

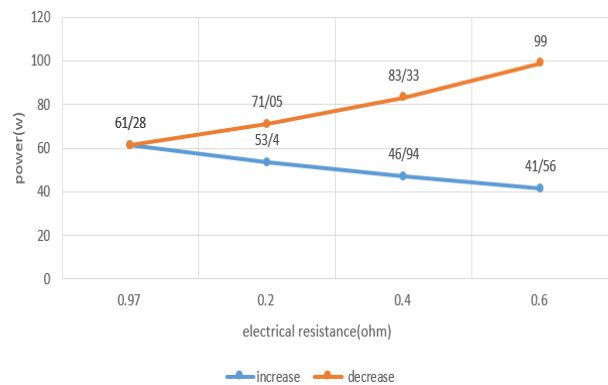
مقدار مصرف سوخت کلی برای کمترین مقدار مقاومت، ۰,۲۰۴ درصد کاهش پیدا کرد با در نظر گرفتن حالت سکون، مقدار مصرف سوخت کلی ۰,۲۷ درصد کاهش پیدا می‌کند. نهایتاً مشخص شد که تغییر در متغیرهای داخلی سامانه TE، می‌تواند باعث افزایش توان و کاهش مصرف سوخت کلی شود، لیکن این امر مستلزم توسعه سامانه‌های گرما-برقی است تا متغیرهای عملکردی آن بهبود یابد. با توجه به رابطه اقتصاد سوخت، وزن کم سامانه‌ها و این واقعیت که فشارپشتی سامانه‌ها نبوده، بلکه مربوط به طراحی مولد است، اهمیت توسعه سامانه‌ها مشخص می‌شود.

۴- نتیجه گیری

یک الگو ATEG بر اساس نرم افزار GT-SUITE شبیه‌سازی شد. این الگو با داده‌های تجربی تأیید و به طور صحیح توان خروجی برقی را پیش‌بینی کرد و به وسیله آن اثر متغیرهای مختلفی بررسی شد. - طراحی‌هایی که حداکثر توان خروجی را دارند، با طراحی‌هایی که حداکثر صرفه‌جویی در سوخت را دارند، متفاوت است. - افزایش سرعت حجمی جریان خنک‌کننده باعث افزایش توان خروجی می‌شود، همچنین قدرت مورد نیاز برای فرستادن جریان آب

۷,۲- درصد افزایش مصرف سوخت معادل با ۱,۷۴۲ کیلووات توان خروجی موتور است.

با توجه به نتایج بدست آمده از مصرف سوخت و توان حاصل از تغییر مقاومت گرمای سامانه TE، با افزایش مقدار مقاومت گرمای سامانه، توان افزایش پیدا می‌کند و به دلیل اینکه تغییر مقاومت گرمای سامانه فقط روی توان تولیدی تأثیر می‌گذارد، مصرف سوخت نیز کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۱۵: مقادیر توان تغییر مقدار مقاومت برقی

در شکل ۱۵ متغیر مقاومت برقی سامانه TE بررسی شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با کاهش مقدار مقاومت برقی به دلیل اینکه باعث افزایش تبادل گرما و سرما می‌شود، مقدار توان افزایش پیدا می‌کند و با افزایش مقدار مقاومت، مقدار توان کاهش پیدا می‌کند. نتایج اقتصاد سوخت حاصل از کاهش مقدار مقاومت برقی سامانه به- صورت زیر است:

$$P = 99 W$$

$$F_{e.ATEG}(\%) = 0.7$$

$$F_{e.BP}(\%) = -7.51$$

$$F_{e.m}(\%) = -0.096$$

$$F_e(\%) = -6.906$$

۶,۹۰۶- درصد افزایش مصرف سوخت معادل با ۱,۷۸۷ کیلووات توان خروجی موتور است. نتایج اقتصاد سوخت حاصل از افزایش مقدار مقاومت برقی سامانه به- صورت زیر است:

$$P = 41.56 W$$

$$F_{e.ATEG}(\%) = 0.293$$

$$F_{e.BP}(\%) = -7.51$$

$$F_{e.m}(\%) = -0.096$$

$$F_e(\%) = -7.313$$

۷,۳۱۳- درصد افزایش مصرف سوخت معادل با ۱,۷۶۳ کیلووات توان خروجی موتور است.

P_{TEM}	توان خروجی برقی TEM (W)
P_{WP}	توان مصرف شده توسط تلمبه آب (W)
Q_c	جریان گرما در سمت سرد TEM (W)
Q_h	جریان گرما در سمت گرم TEM (W)
R_L	مقاومت بار برقی خارجی (Ω)
\bar{T}	میانگین دمای سرد و گرم ($^{\circ}C$)
T_c	دمای سمت سرد TEM ($^{\circ}C$)
T_h	دمای سمت گرم TEM ($^{\circ}C$)
T_g	دمای گاز خروجی ($^{\circ}C$)
T_w	دمای آب ($^{\circ}C$)
ϑ	سرعت وسیله نقلیه ($\frac{m}{s}$)
\dot{V}_w	جریان حجمی خنک کننده ATEG ($\frac{L}{h}$)
ZT_e	عدد مؤثر شایستگی

علائم یونانی

α_e	ضریب مؤثر سیبک TEM ($\frac{V}{K}$)
Δ_{PBP}	فشار برگشتی ناشی از نصب ATEG (Pa)
η	کارایی ATEG
η_G	کارایی مولد برق
η_{PCU}	کارایی واحد مبدل برق
η_{PCU}	کارایی واحد مبدل برق
λ	نسبت معادل هوا و سوخت
ξ	مقاومت در برابر تحرک خودرو (مقاومت غلتشی)
ρ_e	مقاومت مؤثر برقی ($\Omega \cdot m$)

مراجع و منابع

- [1] Habib Aghaalin, Hans-Erik Ångström, "Renewable and Sustainable Energy Reviews" 49 (2015) 813-824.
- [2] Champier, D. Thermoelectric generators: A review of applications. Energy Convers. Manag. 2017, 140,167-181.
- [3] Von Lukowicz, M.; Abbe, E.; Schmiel, T.; Tajmar, M. Thermoelectric generators on satellites-An approach for waste heat recovery in space. Energies 2016, 9, 541.
- [4] Lv, H.; Li, G.; Zheng, Y.; Hu, J.; Li, J. Compact water-cooled thermoelectric generator (TEG) based on a portable gas stove. Energies 2018, 11, 2231.
- [5] Li, G.; Zhang, G.; He, W.; Ji, J.; Lv, S.; Chen, X.; Chen, H. Performance analysis on a solar concentrating thermoelectric generator using the micro-channel heat pipe array. Energy Convers. Manag. 2016, 112, 191-198.
- [6] Fernández-Yáñez, P.; Armas, O.; Kiwan, R.; Stefaopoulou, A.G.; Boehman, A.L. A thermoelectric

خنک کننده را افزایش می دهد. بنابراین، باید سازشی بین توان تولید شده و توان لازم برای تلمبه آب ایجاد شود.

- طراحی منبع گرم از دو جنبه بسیار مهم بود: (۱) برای به حداکثر رساندن انتقال گرما و (۲) برای به حداقل رساندن فشار پستی. فشار پستی بیشترین عامل افزایش مصرف سوخت بود.

- با افزایش قطر سوراخ های استوانه ای می توان فشار پستی را کاهش داد که بالتبع باعث کاهش توان تولیدی می شود.

• حداکثر صرفه جویی در سوخت فقط نمی تواند به کاهش مقادیر فشار پستی متکی باشد. زیرا این امر منجر به طراحی های بی اهمیت با فشار کم و انتقال گرما بسیار کم می شود.

• فشار پستی بیشترین تأثیر در مصرف سوخت را داشت و چون مقدار فشار پستی منفی است، مصرف سوخت را افزایش می دهد.

• در حالت جریان پایین اقتصاد کلی سوخت مثبت شد ولی در حد قابل توجهی نبود. برای شرایط عادی خودرو (در حال حرکت)، مصرف سوخت کلی افزایش پیدا می کند. اما اگر خودرو در حالت سکون باشد، چون مصرف سوخت ناشی از جرم ATEG تأثیری ندارد (به دلیل سرعت و مقاومت غلتشی)، می توان با اضافه کردن وزن مولد و تولید توان بیشتر اقتصاد سوخت را بهبود بخشید.

• اگر سامانه های گرما-برقی کارآمدتری تولید شوند، با توجه به اینکه وزن زیادی ندارند و فشار برگشتی طراحی کلی ATEG است، می توان توان خروجی را افزایش و مصرف سوخت را کاهش داد.

فهرست علائم

A_{TEM}	سطح TEM (m^2)
D	قطر سوراخ های استوانه ای (m)
F_e	اقتصاد سوخت (%)
$F_{e.ATEG}$	مصرف سوخت حاصل از توان ATEG (%)
$F_{e.BP}$	مصرف سوخت ناشی از فشار برگشتی (%)
$F_{e.m}$	مصرف سوخت ناشی از افزایش وزن (%)
g	شتاب گرانش ($\frac{m}{s^2}$)
I_{TEM}	جریان برقی (A)
k_e	هدایت گرمای مؤثر TEM ($\frac{W}{K \cdot m}$)
L	ارتفاع مسیر خنک کننده (mm)
L_{TEM}	ارتفاع TEM (mm)
m_{ATEG}	جرم ATEG (kg)
\dot{m}_g	سرعت جریان توده گاز خروجی ($\frac{g}{s}$)
P_{ATEG}	توان خروجی برقی ATEG (W)
P_e	توان موتور (W)
$P_{n.ATEG}$	توان خروجی برقی خالص ATEG (W)

- [15] Deng Y D, Zheng S J, Su C Q, Yuan X H, Yu C G, Wang Y P. Effect of thermoelectric Modules topological connection on automotive exhaust heat recovery system. *J Electron Mater* 2016; 45:1740-50.
- [16] Wang, Jun, et al. "Modeling and Analysis of Thermoelectric Generators for Diesel Engine Exhaust Heat Recovery System." *Journal of Energy Engineering* 146.2 (2020): 04020002.
- [17] Demir, M.E.; Dincer, I. Performance assessment of a thermoelectric generator applied to exhaust waste heat recovery. *Appl. Therm. Eng.* 2017, 120, 694–707.
- [18] Kempf, N.; Zhang, Y. Design and optimization of automotive thermoelectric generators for maximum fuel efficiency improvement. *Energy Convers. Manag.* 2016, 121, 224–231.
- [19] Incropera, F.P.; DeWitt, D.P.; Bergman, T.L.; Lavine, A.S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th ed.; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2007.
- [20] Comamala, M.; Pujol, T.; Cózar, I.R.; Massaguer, E.; Massaguer, A. Power and fuel economy of a radial automotive thermoelectric generator: Experimental and numerical studies. *Energies* 2018, 11, 2720.
- [21] Massaguer, A.; Massaguer, E.; Comamala, M.; Pujol, T.; González, J.R.; Cardenas, M.D.; Carbonell, D.; Bueno, A.J. A method to assess the fuel economy of automotive thermoelectric generators. *Appl. Energy* 2018, 222, 42–58.
- [22] Comamala, M., Cózar, I. R., Massaguer, A., Massaguer, E., & Pujol, T. (2018). Effects of design parameters on fuel economy and output power in an automotive thermoelectric generator. *Energies*, 11(12), 3274.
- [23] Karri, M.A.; Thacher, E.F.; Helenbrook, B.T. Exhaust energy conversion of thermoelectric generator: Two case studies. *Energy Convers. Manag.* 2011, 52, 1596–1611.
- generator in exhaust systems of spark-ignition and compression-ignition engines. A comparison with an electric turbo-generator. *Appl. Energy* 2018, 229, 80–87.
- [7] Fernández-Yañez, P.; Armas, O.; Capetillo, A.; Martínez-Martínez, S. Thermal analysis of a thermoelectric generator for light-duty diesel engines. *Appl. Energy* 2018, 226, 690–702.
- [8] Massaguer, A.; Massaguer, E.; Comamala, M.; Pujol, T.; Montoro, L.; Cardenas, M.D.; Carbonell, D.; Bueno, A.J. Transient behavior under a normalized driving cycle of an automotive thermoelectric generator. *Appl. Energy* 2017, 206, 1282–1296.
- [9] S, R.; Wijewardane, M.A.; Yang, Z. Comprehensive analysis of thermoelectric generation systems for automotive applications. *Appl. Therm. Eng.* 2017, 112, 1433–1444.
- [10] He, W.; Zhang, G.; Li, G.; Ji, J. Analysis and discussion on the impact of non-uniform input heat flux on thermoelectric generator array. *Energy Convers. Manag.* 2015, 98, 268–274.
- [11] Kim, T.Y.; Kwak, J.; Kim, B.-W. Energy harvesting performance of hexagonal shaped thermoelectric generator for passenger vehicle applications: An experimental approach. *Energy Convers. Manag.* 2018, 160, 14–21.
- [12] Bass, J.C.; Elsner, N.B.; Leavitt, F.A. Performance of the 1 kW thermoelectric generator for diesel engines. *AIP Conf. Proc.* 1994, 316, 295–298.
- [13] Haidar, J.G.; Ghojel, J.I. Waste heat recovery from the exhaust of low-power diesel engine using thermoelectric generators. In *Proceedings of the 20th International Conference on Thermoelectrics, Proceedings ICT, Beijing, China, 8–11 June 2001*; pp. 413–417.
- [14] Montecucco A, Siviter K, Knox A R. The effect of temperature mismatch on thermoelectric generators electrically connected in series and parallel. *Appl Energ* 2014; 123:47-54.



The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineersearch.ir



Investigation of the effect of design variables of a thermoelectric generator on fuel consumption and output power of a vehicle

A. Mohammadebrahim^{1*}, M. Eskandari²

¹ Faculty of Mechanical Engineering Department, Arak University of Technology, Arak, Iran, m.brahim@arakut.ac.ir

² MSc Student, Mechanical Engineering Department, Arak University of Technology, Tehran, Iran, mokhtareskandari1374@gmail.com

*Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 28 January 2021

Accepted: 29 January 2021

Keywords:

Thermoelectric Generator

Waste Heat Recovery

Fuel Consumption

Back Pressure

ABSTRACT

A significant percentage of the heating value of the fuel is lost in the form of hot exhaust gases from the vehicle exhaust system. In recent developments, thermoelectric materials have been developed with high efficiency, simplicity, and good strength, and the tendency to use this technology to directly convert wasted heat into electricity has increased. Vehicle heat generators are one of the applications of this technology. In the present paper, a vehicle thermoelectric generator model was first confirmed with experimental data, and then changes were made to the parameters that affect the fuel economy and output power of the vehicle thermoelectric generator. The design that produces the maximum output power is different from the design that produces the most fuel economy. Backpressure was identified as the most important factor in fuel consumption. Different parameters were examined, each of which had different effects on fuel consumption and power output, and finally, a model was obtained that could reduce the overall fuel consumption by 0.07 in the vehicle at rest.

