

آنالیز انرژی و انرژی سطح مدول مولد ترموالکتریک جهت بازیافت گرمای هدر رفته گازهای احتراقی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، gzhiaveh@gmail.com

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، sh.khalilarya@urmia.ac.ir

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، s.jafarmadar@urmia.ac.ir

ژیابوه قریشی

شهرام خلیل آریا*

صمد جعفر مدار

چکیده

استفاده از دستگاه‌های مولد ترموالکتریک جهت بازیافت گرمای هدر رفته گازهای احتراقی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. در مدل پیشنهادی حاضر، آنالیز ترمودینامیکی همراه با اثر سطح مدول مولد ترموالکتریک روی مشخصات عملکردی دستگاه مطالعه شده است. جهت توسعه مدل، خواص ماده مولد ترموالکتریک وابسته به دما فرض شده است. همچنین ضریب انتقال گرمای جابجایی آب در طول کانال سرد متغییر در نظر گرفته شده است. آثار رژیم جریان آب و سطح مدول هم در جهت طولی و هم به ازای پنج مقدار مختلف از سطوح مدول روی مشخصات عملکردی دستگاه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن بود که افزایش تعداد سطوح مدول و سطح مدول باعث کاهش توان و راندمان‌های انرژی و انرژی و افزایش نرخ انهدام انرژی شد. همچنین سطح مدول در دو حالت مختلف بهینه‌سازی شده است. یکی برای دستیابی به حداکثر توان خالص و دومی برای رسیدن به حداکثر نسبت توان خالص بهینه به سطح انجام شد. سطح بهینه در حالت اول و دوم به ترتیب برابر با 0.4641m^2 و 0.2207m^2 بدست آمدند.

واژه‌های کلیدی: مدول مولد ترموالکتریک، توان خالص بهینه، سطح بهینه مدول، خواص وابسته به دما، انهدام انرژی.

Energy and exergy analysis of thermoelectric generator module area to recover waste heat of combustion gases

Zh. Ghoreishi

Department of Mechanical Engineering, University of Urmia, Urmia, Iran

Sh. Khalilarya

Department of Mechanical Engineering, University of Urmia, Urmia, Iran

S. Jafarmadar

Department of Mechanical Engineering, University of Urmia, Urmia, Iran

Abstract

The use of thermoelectric generators has a special place in recovering the waste heat of combustion gases. In the proposed model, a thermodynamic analysis with the effect of the thermoelectric generator module area on the performance characteristics of the device was studied. To develop the model, the properties of the thermoelectric generator were assumed to be temperature dependent. The convective heat transfer of water in the cold channel was also considered as variable. The effects of water flow regime and the module area were investigated both in the longitudinal direction and for five different values of the module rows on the functional characteristics of the device. The results showed that increasing the number of module rows and module area decreased the power and efficiency of energy and exergy and increased the rate of exergy destruction. The module area is also optimized in two different cases. One was done to achieve the maximum net power and the second to achieve the maximum ratio of maximum net power to the area module. The optimal area in the first and second cases were 0.4641m^2 and 0.2207m^2 , respectively.

Keywords: TEG, Maximum net power, Module optimum area, Temperature dependent properties, Exergy destruction.

گرمای از دست رفته مورد استفاده قرار گیرند. مطالعه موردی بر روی دو مدل خودرو توسط کاری و همکاران [۲] انجام شد. آنها قدرت تولیدی از ترموالکتریک‌ها را برای دو مدل خودرو HZ20M و HZQW سرعت 117 km/h به ترتیب 453 W و 140 W گزارش کردند. ونگ و همکاران [۳] دستگاه مولد ترموالکتریک را در لوله انرژی نصب کردند. آنها نشان دادند که افزایش ضریب انتقال گرمای طرف گرم در مقایسه با افزایش این ضریب در طرف سرد روی افزایش توان و راندمان مدول ترموالکتریک موثرتر است. عبدرزاک و همکاران [۴] استفاده از گرمای رادیاتور خودرو را برای تولید توان یک زوج ایمان ترموالکتریک مطالعه کردند. آنها مدل خود را هم بصورت نظری و هم بصورت آزمایشگاهی

۱- مقدمه

استفاده از مقادیر نامحدود سوخت‌های فسیلی و آلودگی‌های زیست محیطی را می‌توان از مشکلات اساسی قرن ۲۱ نام برد. برای رفع این مشکل استفاده از دستگاه‌های مولد ترموالکتریک می‌تواند یکی از راه حل‌های امیدوار کننده باشد. این دستگاه هیچ بخش متحرکی ندارند و بطور کامل به هم فشرده، کوچک و بی‌صدا هستند. قابلیت اعتماد بالایی دارند و دوستدار محیط زیست هستند [۱]. مولدهای ترموالکتریک (Thermoelectric generators) با دریافت گرما آن را به طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. این دستگاه‌ها می‌توانند در بازیافت

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: sh.khalilarya@urmia.ac.ir

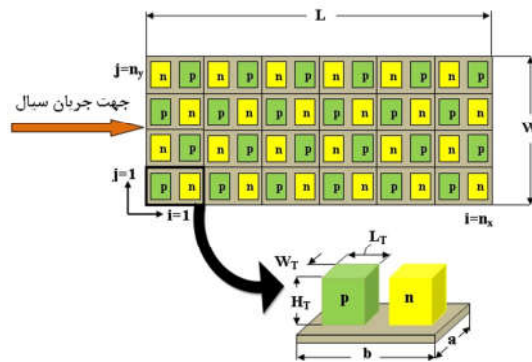
تاریخ دریافت: ۹۹/۰۹/۱۸

تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۰/۲۲

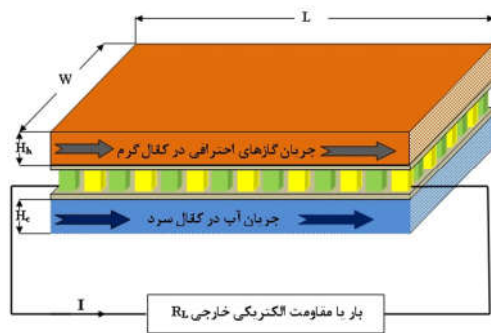
بررسی کردند. نتایج آنها گویای این حقیقت بود که اختلاف خطای نتایج نظری و تجربی ۱۰٪ بوده است. کارنا و همکاران [۵] با پیچ دار کردن هندسه داخلی اگزوز خودرو از بازیافت گازهای احتراقی جهت تولید توان توسط مولدهای ترموالکتریکی استفاده کردند. آنها مدعی شدند که در این شرایط توان تولیدی ترموالکتریکها بیشتر، آلایندهی کمتر و مصرف سوخت ویژه ترمزی ۶۵٪ بهبود می‌یابد. هشام و همکاران [۶] با نصب مولدهای ترموالکتریک روی دودکش عمودی، از بازیافت گازهای احتراقی جهت تولید توان استفاده کردند. آنها با نصب صفحه پخش‌کننده پره‌دار در طرف سرد ترموالکتریکها راندمان و توان تولیدی را بالا بردند. مقدار افزایش توان و راندمان ترموالکتریکها وابسته به ابعاد صفحه پخش‌کننده و گام پرها بود. کازوواکی و همکاران [۷] سه نوع مولد ترموالکتریک با معیارشایستگی بدون بعد مختلف را به ترتیب در محفظه احتراق، مبدل‌های بازیافت گرما و بازیافت گاز دودکش یک میکرو توربین گازی کوچک قرار دادند. آنها نشان دادند که راندمان میکرو توربین گازی در حالت عادی ۱۶٪ است. آنها مدعی شدند که با بکارگیری مولدهای ترموالکتریک، راندمان چرخه می‌تواند به بیش از ۴۰٪ برسد. زارع و همکاران [۸] از گرمای هدر رفته در چرخه کالینا جهت تولید توان توسط مولدهای ترموالکتریکی استفاده کردند. آنها نشان دادند که در چرخه پیشنهادی مقدار توان خروجی ۷۳٪ افزایش خواهد داشت. همچنین آنها نشان دادند که در صورت استفاده از ترموالکتریکهایی با قیمت کمتر از ۶۴\$/W، سیستم پیشنهادی از نظر اقتصادی به صرفه و مطلوب خواهد بود. شعیب خان-محمدی و همکاران [۹] برای بازیافت گرمای ازدست رفته چگالنده از مدول مولد ترموالکتریک جهت بهبود عملکرد سیستم زمین گرمایی یکپارچه استفاده کردند. آنها نشان دادند که با بکارگیری مدول مولد ترموالکتریک راندمان قوانین اول و دوم چرخه به ترتیب ۲/۷٪ و ۲/۸٪ افزایش داشتند. ردنیک و همکاران [۱۰] با بکارگیری ترموالکتریکهای دو طبقه جهت تولید توان، از بازیافت گازهای احتراقی چرخه موتور استرلینگ بعنوان منبع گرم استفاده کردند. آنها نشان دادند که با کمترین افت فشار می‌توان از ۴۴٪ آنتالپی گازهای احتراقی برای تولید توان حداکثر، بهره گرفت. هی و همکاران [۱۱] یک مدلسازی و بهینه-سازی ریاضی برای مدول مولدهای ترموالکتریک جهت تولید توان توسط بازیافت گازهای هدررفته موتور در اگزوز خودرو را انجام دادند. آنها اثر گرادیان دمای سیال را روی توان مولد ترموالکتریک بررسی کردند. آنها نشان دادند که با افزایش دمای گازهای احتراقی مقدار سطح بهینه تغییری نمی‌کند. اما با افزایش دبی جرمی گاز احتراقی مقدار سطح بهینه افزایش می‌یابد. هی و همکاران [۱۲] جهت جریان سیال گرم و سرد درون مبادله‌کن‌ها را در دو نوع جریان همسو و ناهمسو نیز بررسی کردند. نتایج آنها حاکی از آن شد که در جریان ناهمسو مقدار سطح بهینه بیشتر می‌شود و به ازای آن مقدار توان بهینه نیز بیشتر است. یولونگ ژائو و همکاران [۱۳] از سیال میانی بعنوان

منبع گرم مولدهای ترموالکتریک استفاده کردند. گرمای گازهای احتراقی هدررفته در خودروها صرف عمل تبخیر این سیال می‌شد و با تزریق گرما به مولدهای ترموالکتریک عمل چگالش در این سیال صورت می‌گرفت. در طول این فرایند ضریب انتقال گرمای سیال میانی تا مقدار $5000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ باقی می‌ماند. با این روش مقدار توان و راندمان مولدهای ترموالکتریک بطور چشمگیری بالا رفت. در تحقیقی دیگر وی هی و همکاران [۱۴ و ۱۵] اثرات ضریب انتقال گرمای جابجایی و افت فشار گازهای احتراقی را روی توان مدول مولد ترموالکتریک بطور همزمان بررسی کردند. آنها در تحلیل خود از آب بعنوان سیال منبع سرد با ضریب انتقال گرمای ثابت و برابر با $1000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ در نظر گرفتند. آنها نشان دادند که با افزایش ارتفاع و عرض مقطع کانال گرم ضریب انتقال گرمای سیال گرم و افت فشار هر دو کم می‌شوند و یک مقدار بیشینه‌ای برای توان خالص وجود دارد. آنها اثرات ابعاد کانال منبع سرد و پارامترهای راندمان انرژی و اگزوزی و نرخ انهدام اگزوزی را بررسی نکردند. همچنین آنها خواص مولد ترموالکتریکها را مستقل از دما در نظر گرفتند [۱۴ و ۱۵]. در همین راستا وی هی و همکاران [۱۵] اثرات دمای گازهای احتراقی را روی توان خالص بهینه برای مدل جدیدشان بررسی کردند. نتایج آنها حاکی از آن شد که با افزایش دمای گازهای احتراقی مقدار اوج توان خالص در طول کانال بیشتر می‌شود و همچنین طول بهینه و عرض بهینه کانال به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند. الانکوان و همکاران [۱۶] با استفاده از یک کانال طویل عملکرد مولد ترموالکتریک را جهت بازیافت گرمای ازدست رفته گازهای احتراقی بررسی کردند. نتایج آنها حاکی از آن شد که برای طول لوله 50 m با ضریب انتقال گرمای $25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ اگر محیط بعنوان چشمه گرمایی سرد در نظر گرفته شود، توان بیشینه و راندمان به ترتیب ۴۰/۲۲٪ و ۲۰/۷۴٪ کمتر از پیکربندی دما ثابت است. محققان اغلب خواص ماده ترموالکتریک را مستقل از دما در نظر گرفتند. درحقیقت خواص ماده ترموالکتریک به دما وابسته است. یاماشیتا [۱۷] در اولین مدل خود اثر وابستگی خواص ماده ترموالکتریک Si-Ge را بصورت یک تابع درجه اول از دما تقریب زد. یاماشیتا [۱۸] در تحقیق دیگری خصوصیات ماده ترموالکتریک را نسبت به دما غیرخطی و تابعی درجه دوم در نظر گرفت. نتایج بدست آمده حاکی از آن شد که با این تقریب، راندمان حاصل با راندمان تجربی بسیار نزدیک به هم بودند. منگ و همکاران [۱۹] نیز نشان دادند که اگر اختلاف دمای دو سر مولد ترموالکتریک زیاد باشد فرض مستقل بودن خصوصیات ماده ترموالکتریک خطای زیادی را در محاسبات توان و راندمان به همراه دارد. ژانگ [۲۰] وابستگی دمای خصوصیات ماده ترموالکتریک را از حل معادله دیفرانسیل غیر خطی حاکم بر اساس روش آشفنگی هموتوبی حل تحلیلی کرد. نتایج نشان داد که با استفاده از این روش برای چهار نوع ماده تفاوت‌های

مولد ترموالکتریک بین دو کانال مسی وصل شده است. بخشی از گازهای احتراقی توربین گاز با دبی جرمی ثابت 0.2 kg/s و دمای 673 K جهت بازیافت گرما وارد کانال بالایی می‌شود. محصولات احتراق شامل دی اکسید کربن، آب، نیتروژن و اکسیژن می‌باشند. میزان کسر مولی هرکدام از آنها به ترتیب برابر با 0.0314 ، 0.0806 ، 0.17505 و 0.1273 در نظر گرفته شده است [۲۶]. همچنین آب با دبی جرمی ثابت 0.2 kg/s و دمای 278 K وارد کانال پایینی می‌شود.



شکل ۱- سطح قرارگیری نیمه هادی های n و p به صورت واحد و طرحواره هندسه مدل ریاضی مدول مولد ترموالکتریک



شکل ۲- دستگاه مدول مولد ترموالکتریک متصل به کانال‌های مسی

مطابق شکل ۳ دمای گرم و سرد نقاط اتصال زوج المان‌ها $T_{h,i}$ و $T_{c,i}$ است. دمای ورودی و خروجی گازهای احتراقی نسبت به هر یک از ترموالکتریک‌ها به ترتیب برابر با $T_{h,i}$ و $T_{h,i+1}$ هستند. همچنین دمای آب ورودی و خروجی نسبت به هر زوج المان به ترتیب برابر با $T_{c,i}$ و $T_{c,i+1}$ هستند. در این تحقیق فرض می‌شود که دمای سیال‌های عامل گرم و سرد و دمای نقاط اتصال ترموالکتریک‌ها در جهت y ثابت هستند. لذا تغییر دمای گازهای احتراقی و آب تنها در جهت x بررسی می‌شوند. بنابراین این تغییرات یک‌بعدی است. گرمای جذب شده $q_{h,i}$ و گرمای دفع شده $q_{c,i}$ در هر ترموالکتریک مطابق با روابط موجود در رفرنس [۱۴ و ۱۵] است. در مدل حاضر با در نظر گرفتن وابستگی

معناداری بین توان و راندمان ترموالکتریک نسبت به ثابت فرض کردن خصوصیات ماده ترموالکتریک وجود دارد. خواص ماده بیسموت تلورید (Bi_2Te_3) بصورت تابعی درجه دوم از دمای متوسط دو سر المان ترموالکتریک توسط ژوان و همکاران [۲۱] ارائه شد. بینگ فنگ و همکاران [۲۲] با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی بر مبنای کاهش اندازه نانو ساختار چند نوع از مواد ترموالکتریک با خصوصیات وابسته به دما توانستند با کاهش رسانایی گرمایی و افزایش ضریب سیبک، راندمان مولدهای ترموالکتریک را بالا ببرند بدون اینکه رسانایی الکتریکی کم شود. جای کی لی و همکاران [۲۳] توانستند با انجام روش بهینه سازی روی ریز ساختارهای مواد ترموالکتریک بیسموت تلورید وابسته به دما، با کاهش رسانش گرمای و مقاومت الکتریکی آن راندمان ترموالکتریک را به اندازه 24% بالا ببرند. تعدادی از محققان مشخصه های عملکردی یک عدد ترموالکتریک، از قبیل توان و راندمان را با فرض خصوصیات ماده ترموالکتریک وابسته به دما تحلیل کردند [۲۴ و ۲۵]. در تحقیق‌های پیشین وابستگی خواص مولد ترموالکتریک‌ها در مدول ترموالکتریک با ملاحظه خصوصیات جریان سیال سرد از قبیل ضریب انتقال گرمای جابجایی متغییر و رژیم جریان آن مطالعه نشده است. بطوریکه برای این مدل پیشنهادی آنالیز انرژی و انرژی انجام نشده است. در مقاله حاضر جهت بالا بردن دقت مدل‌سازی و توسعه مدل، ابتدا مجموعه‌ای از مولدهای ترموالکتریک یا مدول مولد ترموالکتریک با خصوصیات وابسته به دمای دو سر آنها در نظر گرفته می‌شوند. همچنین با ملاحظه کانال سرد و سیال عامل آب به عنوان منبع سرد، ضریب انتقال گرمای جابجایی آب در طول کانال متغییر فرض شده است. همچنین اثر رژیم جریان آب نیز روی مشخصات عملکردی مدول بررسی می‌شود. با این ملاحظات مدل‌سازی ریاضی مدول کامل‌تر می‌شود. بر مبنای این مدل اثر اندازه سطح مدول مولد ترموالکتریک روی مشخصات عملکردی دستگاه مولد ترموالکتریک از قبیل توان، راندمان‌های انرژی و انرژی و نرخ انهدام انرژی با استفاده از نرم افزار EES شبیه سازی و تحلیل می‌شوند.

۲- مدل‌سازی و معادلات حاکم

مولد ترموالکتریک از یک زوج المان و یا نیمه‌های n و p به صورت واحد با طول L_T ، عرض W_T و ارتفاع H_T مساوی و برابر با 5 mm در یک سطح مستطیلی به ابعاد a و b به ترتیب برابر با 7.5 mm و 15 mm مطابق شکل ۱ تشکیل شده است [۱۲]. طرحواره هندسه مدول مولد ترموالکتریک مطابق شکل ۱، مجموعه‌ای از مولدهای ترموالکتریک هستند که به صورت ماتریسی در دو جهت x و y به تعداد n_x ستون و n_y سطر تشکیل شده است. این مولدها از نظر الکتریکی توسط اتصال-دهنده مسی به حالت سری وصل شده‌اند. این مجموعه از دو طرف بالا و پایین به صفحه سرامیکی متصل شده است. با توجه به شکل ۲ مدول

$$\lambda_{p,i} = \lambda_{n,i} = \left[62605 - 277.7 T_{m,i} + 0.4131 T_{m,i}^2 \right] \times 10^{-4} \quad (8)$$

که در آن $T_{m,i}$ دمای متوسط دوسر ایمن ترموالکتریک است. طبق قانون بقای انرژی اختلاف آنتالپی ورودی و خروجی گازهای احتراقی نسبت به هر زوج ایمن ترموالکتریک برابر با مقدار گرمایی است که توسط هر کدام از زوج ایمن‌ها جذب می‌شود، یعنی:

$$q_{h,i} = h_{fh,i} - h_{fh,i+1} \quad (9)$$

همچنین میزان گرمای دفع شده از هر ترموالکتریک برابر با اختلاف آنتالپی آب عبوری نسبت به آن است و برابر است با:

$$q_{c,i} = h_{fc,i+1} - h_{fc,i} \quad (10)$$

مطابق با قانون اول ترمودینامیک، میزان توان بدست آمده در مدول مولد ترموالکتریک برابر است با [۱۴ و ۱۵]:

$$P_{teg} = \sum_{i=1}^{n_x} (q_{h,i} - q_{c,i}) \quad (11)$$

با در نظر گرفتن خواص مواد ترموالکتریک وابسته به دما، جریان الکتریکی تولید شده توسط مدول مولد ترموالکتریک برابر است با [۱۵]:

$$I = \sum_{i=1}^{n_x} \frac{n_y \alpha_{pn,i} (T_{h,i} - T_{c,i})}{(n_x n_y R_{pn,i} + R_L)} \quad (12)$$

که در آن R_L مقاومت خارجی است. در روابط (۱۱) و (۱۲)، ضرایب انتقال گرمای کل طرف گرم و سرد سیال به ترتیب k_h و k_c می‌باشند و در زیر تعریف می‌شوند [۱۴ و ۱۵]:

$$k_h = \left(\frac{1}{h_{fh}} + \frac{\delta_{chan}}{\lambda_{exc}} + \frac{\delta_{cop}}{\lambda_{cop}} + \frac{\delta_{cer}}{\lambda_{cer}} + R_{contact} \right)^{-1} \quad (13)$$

$$k_c = \left(\frac{1}{h_{fc}} + \frac{\delta_{chan}}{\lambda_{exc}} + \frac{\delta_{cop}}{\lambda_{cop}} + \frac{\delta_{cer}}{\lambda_{cer}} + R_{contact} \right)^{-1} \quad (14)$$

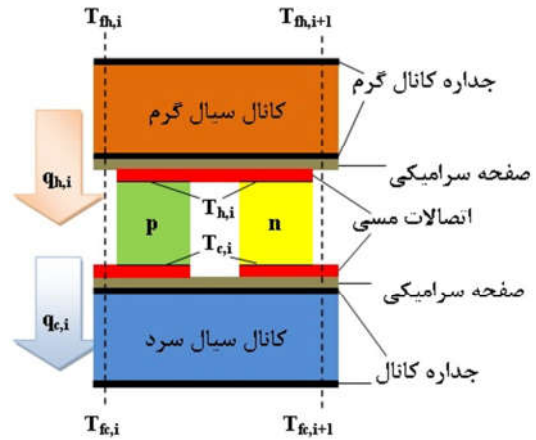
در روابط فوق δ_{chan} ضخامت‌های صفحه کانال یا مبدل، δ_{cop} ضخامت صفحه مسی اتصال دهنده و δ_{cer} ضخامت صفحه سرامیکی می‌باشند و مقادیر آنها به ترتیب برابر با 0.7 mm ، 0.3 mm و 0.5 mm هستند [۱۵]. همچنین λ_{chan} ، λ_{cop} و λ_{cer} ضرایب انتقال گرمای رسانشی صفحه کانال، صفحه مسی اتصال دهنده و صفحه سرامیکی به ترتیب برابر با 398 W/m.K ، 398 W/m.K و 35 W/m.K می‌باشند. علاوه بر این، $R_{contact}$ مقاومت گرمایی تماسی بین صفحه کانال سیال عبوری گرم و سرد با مدول مولد ترموالکتریک است و مقدار آن برابر با $0.0005 \text{ m}^2 \text{K/W}$ می‌باشد [۱۴-۱۵]. ضریب انتقال گرمای جابجایی برای هر دو سیال عامل از روابط زیر بدست می‌آید [۱۴ و ۱۵]:

$$h_f = \frac{Nu_f \lambda_f}{D_f} \quad (15)$$

خصوصیات ماده ترموالکتریک به دما، این روابط به صورت زیر تغییر می‌کنند و برابر هستند با:

$$q_{h,i} = n_y \left[\alpha_{pn,i} I T_{h,i} + K_{pn,i} (T_{h,i} - T_{c,i}) - 0.5 I^2 R_{pn,i} \right] = n_y \alpha b k_h \left[0.5 (T_{fh,i} + T_{fh,i}) - T_{h,i} \right] \quad (1)$$

$$q_{c,i} = n_y \left[\alpha_{pn,i} I T_{c,i} + K_{pn,i} (T_{h,i} - T_{c,i}) + 0.5 I^2 R_{pn,i} \right] = n_y \alpha b k_c \left[T_{c,i} - 0.5 (T_{fc,i} + T_{fc,i+1}) \right] \quad (2)$$



شکل ۳- مشخصات حرارتی مجموعه نسبت به یک مولد ترموالکتریک که در آن $\alpha_{pn,i}$ ، $K_{pn,i}$ و $R_{pn,i}$ به ترتیب، ضریب انتقال گرمای رسانشی و مقاومت الکتریکی i امین ترموالکتریک هستند و برابرند با:

$$\alpha_{pn,i} = \alpha_{p,i} - \alpha_{n,i} \quad (3)$$

$$K_{pn,i} = \left(\frac{A_n \lambda_{n,i}}{H_{T,n}} + \frac{A_p \lambda_{p,i}}{H_{T,p}} \right) \quad (4)$$

$$R_{pn,i} = \left(\frac{H_{T,n} \rho_{n,i}}{A_n} + \frac{H_{T,p} \rho_{p,i}}{A_p} \right) \quad (5)$$

ارتفاع و سطح مقطع نیمه‌هادی‌های n و p باهم برابر فرض می‌شوند. ماده ترموالکتریک مورد استفاده از نوع بیسموت تلورید Bi_2Te_3 است. خواص این ماده مانند $\alpha_{n,i}$ و $\alpha_{p,i}$ ضریب سیبک نیمه‌هادی‌های n و p ، $\lambda_{n,i}$ و $\lambda_{p,i}$ ضریب انتقال گرمای رسانشی ویژه نیمه‌هادی‌های n و p و $\rho_{n,i}$ و $\rho_{p,i}$ مقاومت الکتریکی ویژه نیمه‌هادی‌های n و p وابسته به دمای متوسط دو سر زوج ایمن‌های ترموالکتریک در نظر گرفته شده است [۲۱].

$$\alpha_i = [\alpha_{p,i} - (-\alpha_{n,i})] = 2 \times \left[22224 + 930.6 T_{m,i} - 0.9905 T_{m,i}^2 \right] \times 10^{-9} \quad (6)$$

$$\rho_{p,i} = \rho_{n,i} = \left[5112 + 163.4 T_{m,i} + 0.6279 T_{m,i}^2 \right] \times 10^{-10} \quad (7)$$

$$f_c = (0.79 \ln(Re_{fc}) - 1.64)^{-2}, \quad 3000 \leq Re_{fc} < 5 \times 10^6 \quad (22)$$

$$f_c = \frac{64}{Re_{fc}}, \quad Re_{fc} < 3000$$

توان مورد نیاز جهت پمپ کردن سیال درون کانال از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۴ و ۱۵]:

$$P_{pump} = f_z \left(\frac{\dot{m}_f}{\rho_f} \right) \quad (23)$$

توان خالص خروجی که توسط مدول ترموالکتریک تولید می‌شود برابر است با [۱۴ و ۱۵]:

$$P_{net} = P_{teg} - P_{pump} \quad (24)$$

راندمان انرژی مدول مولد ترموالکتریک مطابق قانون اول ترمودینامیک از نسبت توان کل به مجموع گرمای وارد شده به هر کدام از زوج المان‌های ترموالکتریک حاصل می‌شود، یعنی:

$$\eta_{teg} = \frac{P_{teg}}{\sum_{i=1}^{n_x} q_{h,i}} \quad (25)$$

نرخ انرژی گرمایی طرف گرم مدول مولدهای ترموالکتریک برابر است با:

$$\dot{E}_{x_{qh}} = T_0 \sum_{i=1}^{n_x} \left(1 - \frac{q_{h,i}}{T_{h,i}} \right) \quad (26)$$

راندمان انرژی مدول مولد ترموالکتریک مطابق قانون دوم ترمودینامیک از نسبت توان کل به نرخ انرژی گرمایی طرف گرم مدول مولد ترموالکتریک بدست می‌آید، یعنی:

$$\epsilon_{teg} = \frac{P_{teg}}{\dot{E}_{x_{qh}}} \quad (27)$$

نرخ آنتروپی تولید شده در مدول مولد ترموالکتریک که بین دو منبع گرمایی گرم و سرد کار می‌کند برابر است با:

$$\dot{S}_{gen,teg} = \sum_{i=1}^{n_x} \left(\frac{q_{h,i}}{T_{h,i}} + \frac{q_{c,i}}{T_{c,i}} \right) \geq 0 \quad (28)$$

از اینرو نرخ انهدام انرژی مدول مولد ترموالکتریک برابر است با:

$$\dot{E}_{x_{d,teg}} = T_0 \dot{S}_{gen,teg} \quad (29)$$

۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- صحت سنجی

ابتدا مدل حاضر با نتایج مدل Wei He و همکاران [۱۲] صحت سنجی می‌شود. نتایج این مدل با استفاده از روش‌های عددی توسط برنامه فرترن بدست آمد. آنها از بازیافت گرمای آگزوز خودرو برای تولید

$$D_f = \frac{2W.H}{(W+H)} \quad (16)$$

جاییکه در آن D_f , L , W و h_f به ترتیب قطر هیدرولیکی، طول، عرض و ارتفاع کانال است. عدد رینولدز سیال جاری درون کانال برحسب یک دبی جرمی ثابت برابر است با

$$Re_f = \frac{\rho_f u_f D_f}{\mu_f} = \frac{\dot{m}_f D_f}{\mu_f W.H} = \frac{2\dot{m}_f}{\mu_f (W+H)} \quad (17)$$

در رابطه فوق ρ_f , \dot{m}_f و μ_f به ترتیب چگالی، دبی جرمی و لزجت دینامیکی سیال است. عدد ناسلت برای گازهای احتراقی از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۴ و ۱۵]:

$$Nu_{fh} = 0.0214 (Re_{fh}^{0.8} - 100) Pr_{fh}^{0.4} \left[1 + \left(\frac{D_{fh}}{L} \right)^{2/3} \right] \times \left(\frac{T_{fh,av}}{T_{wh,av}} \right)^{0.45}, \quad 2300 < Re_{fh} < 10^6 \quad (18)$$

دمای میانگین گازهای احتراقی در طول مسیر $T_{fh,av}$ است. علاوه بر این، $T_{wh,av}$ دمای میانگین سطح کانالی است که گازهای احتراقی از آن عبور می‌کند و L طول کانال است. افت فشار سیال عبوری از کانال توسط رابطه زیر بدست می‌آید [۱۴ و ۱۵]:

$$f_z = 4f (L/D_f) \left(\frac{\rho_f u_f^2}{2} \right) = \frac{2\dot{m}_f^2 L f}{\rho_f D_f W^2 H^2} \quad (19)$$

ضریب اصطکاک کانال f است و توسط روابط زیر برای جریان گاز احتراقی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۵]:

$$f_h = \frac{0.0791}{Re_{fh}^{0.25}}, \quad 2000 < Re_{fh} \leq \frac{59.7}{\left(\frac{2H_{rough}}{D_{fh}} \right)^7} \quad (20)$$

که در آن H_{rough} زبری سطح کانال است و مقدار آن برابر با 0.05 mm در نظر گرفته شده است [۱۵]. عدد ناسلت برای آب عبوری از کانال از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۷]:

$$Nu_{fc} = \frac{\left(\frac{f_c}{8} \right) (Re_{fc} - 1000) Pr_{fc}}{1 + 12.7 \sqrt{\frac{f_c}{8}} \left(Pr_{fc}^{2/3} - 1 \right)}, \quad 3000 \leq Re_{fc} < 5 \times 10^6, \quad 0.5 \leq Pr_{fc} < 2000 \quad (21)$$

$$Nu_{fc} = 3.66 + \frac{0.0668 \left(\frac{D_{fc}}{L} \right) Re_{fc} Pr_{fc}}{1 + 0.04 \left(\left(\frac{D_{fc}}{L} \right) Re_{fc} Pr_{fc} \right)^{2/3}}, \quad Re_{fc} < 3000, \quad Pr_{fc} \geq 5$$

که در آن Re_{fc} , Pr_{fc} , D_{fc} به ترتیب عدد رینولدز، عدد پرانتل و قطر هیدرولیکی برای آب عبوری از کانال است. همچنین f_c ضریب اصطکاک است و برابر است با [۲۷]

توان استفاده کردند. برای این منظور آنها از ماده ترموالکتریک BiTe استفاده کردند. خواص ماده مولدهای ترموالکتریک مستقل از دما فرض شد. همچنین در مدل آنها اثری از تغییرات ضرایب انتقال گرمای جابجایی هر دو سیال عامل و افت فشار درون کانال‌ها ملاحظه نشده است. جدول ۱ توان بیشینه مولدهای ترموالکتریک به ازای دبی جرمی گاز احتراقی مدل حاضر و مدل هی و همکاران را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه میزان حداکثر خطا کمتر از یک درصد است، بنابراین مدل حاضر و شبیه سازی آن توسط نرم افزار EES از دقت مناسبی برخوردار است.

جدول ۱- نتایج مدل حاضر و مدل هی و همکاران

مدل حاضر	مرجع [۱۲]	دبی جرمی (kg/s)
۷۸/۱۵	۷۸	۰/۰۱
۱۵۳	۱۵۲	۰/۰۲
۲۲۷/۶	۲۲۶	۰/۰۳
۲۹۹/۱	۳۰۰	۰/۰۴
۳۶۹	۳۷۱	۰/۰۵

۳-۲- اثر طول مدول مولد ترموالکتریک

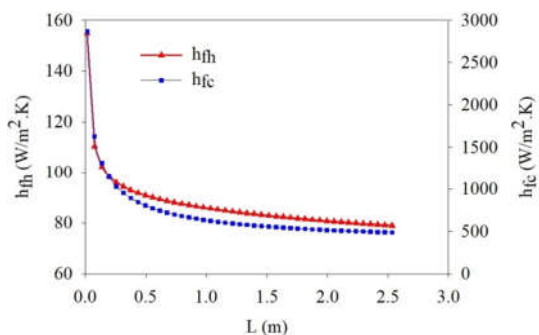
در مدل حاضر، برای انجام آنالیزهای انرژی و آگرژی از گازهای احتراقی به عنوان سیال عامل گرم و از آب به عنوان سیال عامل سرد با مشخصات ثابت مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شده است. همچنین ارتفاع کانال‌های سرد و گرم ثابت و مطابق با جدول ۲ است.

جدول ۲- مشخصات مبنای دستگاه مولد ترموالکتریک

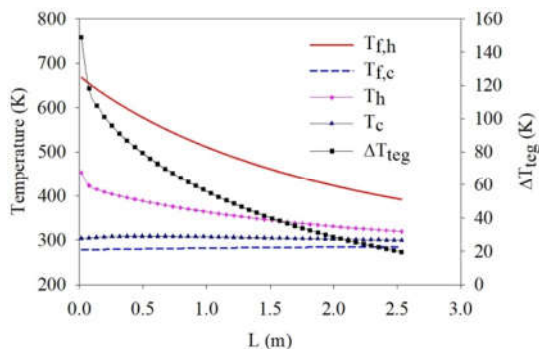
۶mm	ارتفاع کانال منبع گرم
۳mm	ارتفاع کانال منبع سرد
۰/۰۲kg/s	دبی جرمی گازهای احتراقی
۰/۲kg/s	دبی جرمی آب
۶۷۳K	دمای گازهای احتراقی
۲۷۸K	دمای آب

در این بخش اثر طول مدول مولد ترموالکتریک روی مشخصات عملکردی دستگاه بررسی می‌شود. برای این منظور تعداد سطرهای ترموالکتریک در جهت عرضی ثابت و برابر با ۳۰ عدد ($n_y=30$) می‌باشد. همچنین تعداد ستون‌های مولد ترموالکتریک یعنی n_x از ۱ تا ۱۶۹ عدد تغییر می‌کند. طول کانال و طول مدول مولد ترموالکتریک برابر هستند. هر دو آنها وابسته به تعداد ستون‌های مولد ترموالکتریک می‌باشند.

مطابق شکل ۴ ضرایب انتقال گرمای گازهای احتراقی و آب با افزایش طول کانال کاهش یافته است. در شکل ۵، دمای گازهای احتراقی T_{fh} به علت دفع گرما در طول مسیر کانال کاهش یافته است و دمای آب T_{fc} نیز به علت جذب گرما افزایش یافته است. بنابراین گرادیان‌های دمایی در طول کانال برای هر دو سیال عامل تشکیل شده است. تشکیل این گرادیان‌های دمایی به علت کاهش ضرایب انتقال گرمای جابجایی هر دو سیال، جذب گرما توسط مولدهای ترموالکتریک از گازها و دفع گرما از آنها به آب در طول کانال می‌باشد. بواسطه وجود گرادیان‌های دمایی سیال عامل اختلاف دمای دو سر مولدهای ترموالکتریک یعنی $\Delta T_{teg,i} = T_{h,i} - T_{c,i}$ در طول مدول کاهش یافته است.



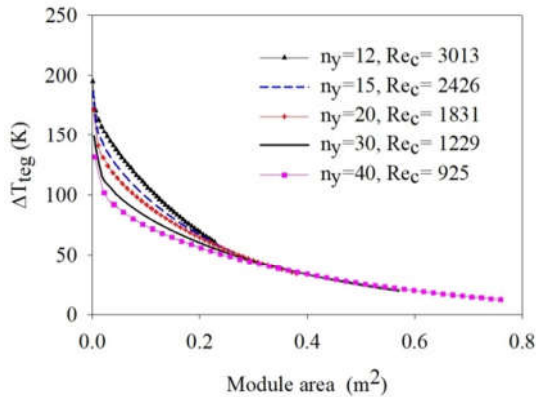
شکل ۴- تغییرات ضرایب انتقال گرمای جابجایی گازهای احتراقی و آب در طول مدول و کانال



شکل ۵- تغییرات دمای گازهای احتراقی و آب، دمای دوسر المان‌های ترموالکتریک T_h و T_c و اختلاف دمای دو سر آنها در طول مدول و کانال

شکل ۶ نشان می‌دهد که توان کل و توان خالص به علت افزایش تعداد ترموالکتریک‌ها در طول مدول بیشتر می‌شود. اما نرخ افزایش توان کل به دلیل کاهش اختلاف دمای دو سر ترموالکتریک‌ها در این راستا کم می‌شود. این دو عامل به همراه عامل افزایش توان پمپ‌شده سبب می‌شوند که توان خالص در طول ۱۸۶m از کانال به مقدار اوج ۱۰۶۶W برسد. این طول را می‌توان طول بهینه تعریف کرد. مطابق شکل‌های ۶ و ۷ تغییرات راندمان‌های انرژی و آگرژی دستگاه مولد ترموالکتریک در جهت طولی مدول به دلیل کاهش اختلاف دمای دو سر مولدها

کانال در $n_p=12$ از نوع مغشوش است. به ازای مقادیر دیگر سطرها رژیم جریان آب از نوع آرام هستند. نوع رژیم جریان گازهای احتراقی به ازای هر پنج مقدار از سطرها از نوع مغشوش است. لازم به ذکر است که در این تحقیق دبی جرمی گازهای احتراقی و آب ثابت فرض شد. در نتیجه با کاهش تعداد سطرها، عرض مدول و عرض کانال کاهش یافته است. این عامل باعث شد که سرعت آب افزایش داشته باشد و نوع رژیم آن بطور مشخص به ازای $n_p=12$ در کانال سرد از آرام به سمت مغشوش تغییر کند. تغییرات اختلاف دمای دو سر مولدهای ترموالکتریک به ازای پنج مقدار مختلف از سطرها، عرض مدول و عرض کانال ترموالکتریک نسبت به سطح مدول در شکل ۸ ارائه شده است. اختلاف دمای دو سر مولدها تا سطح 0.2282m^2 از مدول در $n_p=12$ بیشترین مقدار را دارد. به ازای این مقدار از تعداد سطرها، رژیم جریان در کانال آب سرد از نوع مغشوش است. در نتیجه ضریب انتقال گرمای جابجایی آب افزایش یافته است. علت افزایش اختلاف دمای دو سر مولدها ناشی از دو عامل رژیم جریان مغشوش و کاهش تعداد ترموالکتریکها بواسطه کاهش تعداد ردیفهای مولد ترموالکتریک است.

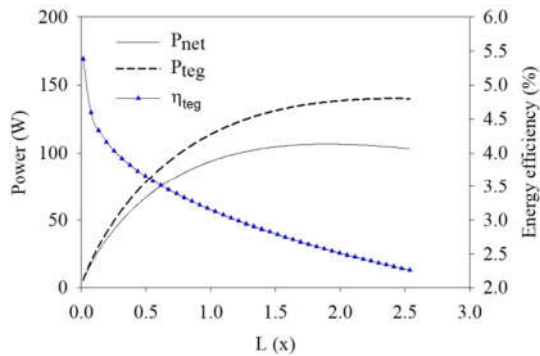


شکل ۸- تغییرات اختلاف دمای دوسر المانها نسبت به

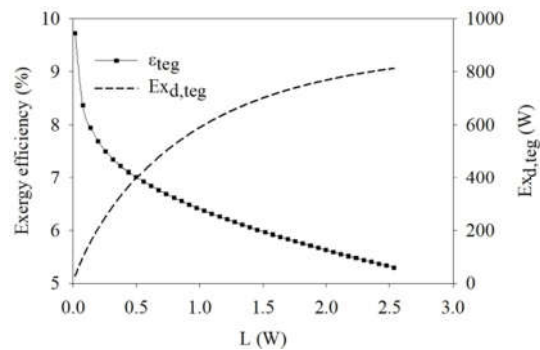
سطح مدول مولد ترموالکتریک

توان کل دستگاه مولد ترموالکتریک در پنج مقدار مختلف از سطرها، مدول به ازای سطح مدول در شکل ۹ نشان داده شده است. مقدار توان کل تا سطح 0.2282m^2 به ازای $n_p=12$ به دلیل افزایش اختلاف دمای دو سر مولدها بیشترین مقدار را دارد. در نتیجه هر چه تعداد سطرها، مدول بیشتر شود توان خالص کمتر شده است. با افزایش تعداد سطرها، افزایش سطح مدول اثر بسیار کمی روی افزایش توان کل داشته است. بطوریکه در $n_p=40$ هرچه سطح بواسطه افزایش طول مدول بیشتر شود مقدار توان کل به حالت یکنواخت رسیده است. افت فشار هر دو سیال عامل مطابق رابطه ۱۹ وابسته به سطح مدول مولد ترموالکتریک و سطح کانال است $(A=L \times W = a \cdot b \cdot n_p \cdot n_g)$. این عامل به همراه عوامل اختلاف دمای دو سر مولدها، تعداد مولدها و نوع رژیم جریان سیال سرد

کمتر شده است. این پارامتر بعنوان یک عامل اصلی علاوه بر تعیین آهنگ توان خالص در تعیین رفتار راندمانهای مدول مولدهای ترموالکتریک نیز موثر است. نرخ انهدام انرژی مدول مولد ترموالکتریک وابسته به تعداد زوج المانها و اختلاف دمای بین دوسر الماها است. هر چه طول مدول بیشتر شود دو عامل تعداد مولدها و اختلاف دمای دوسر مولدها به ترتیب بیشتر و کمتر می شود. مطابق شکل ۶ با افزایش طول مدول نرخ انهدام انرژی افزایش یافته است. بنابراین اثر تعداد ترموالکتریکها روی افزایش نرخ انهدام انرژی غالب تر است. اما این افزایش با رشد کمتری در طول مدول همراه است.



شکل ۶- تغییرات توان کل، توان خالص و راندمان انرژی مدول مولد ترموالکتریک در طول مدول



شکل ۷- تغییرات راندمان انرژی و نرخ انهدام انرژی مدول مولد ترموالکتریک در طول مدول

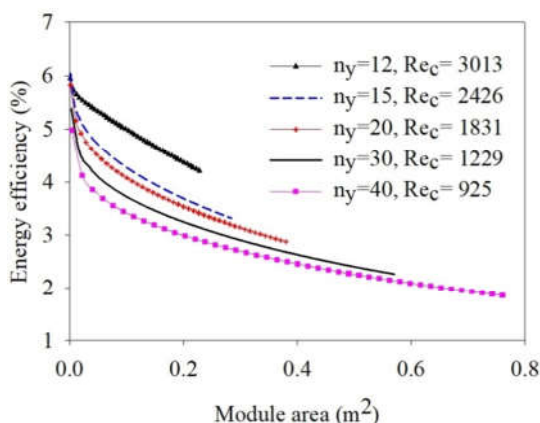
۳-۳- اثر سطح مدول مولد ترموالکتریک

ابعاد مدول مولد ترموالکتریک می تواند روی تقابل سه عامل اختلاف دمای دو سر المانها، توان پمپ شده و تعداد مولدهای ترموالکتریک و در نتیجه روی خصوصیات دستگاه موثر شوند. در این بخش اثر سطح مدول به ازای پنج مقدار از تعداد سطرها، مولد ترموالکتریک در جهت عرضی به ترتیب ۱۲، ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ روی مشخصه های دستگاه بررسی شده است. به ازای هر کدام از سطرها، تعداد ستونهای مولد ترموالکتریک از ۱ تا ۱۶۹ عدد تغییر می کند. نوع رژیم جریان آب درون

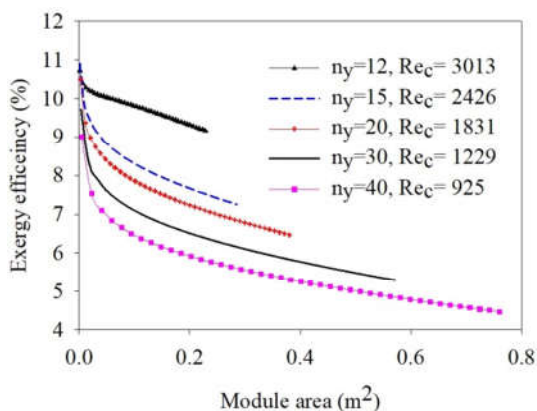
راندمان‌های انرژی و انرژی با افزایش سطح مدول به دلیل کاهش اختلاف دمای دو سر مولدها مطابق با شکل‌های ۱۱ و ۱۲ کاهش یافته است. تاثیر افزایش سطح می‌تواند ناشی از افزایش طول مدول یا افزایش عرض آن باشد. افزایش هردو آن روی کاهش راندمان‌های مولد ترموالکتریک موثر هستند.

جدول ۳- اوج توان خالص و سطح بهینه نسبت به n_y

$\frac{P_{net,max}}{A_{opt}}$ (W/m ²)	$N=n_x \times n_y$	A_{opt} (m ²)	$P_{net,max}$ (W)	n_y
۲۲۷٫۷۹	۶۸۴	۰٫۰۷۷	۱۷٫۵۴	۱۲
۳۰۲٫۴۱	۱۲۱۵	۰٫۱۳۶۷	۴۱٫۳۴	۱۵
۳۱۸٫۳۱	۲۳۴۰	۰٫۲۶۳۳	۸۳٫۸۱	۲۰
۲۶۱٫۰۲	۳۶۳۰	۰٫۴۰۸۴	۱۰۶٫۶	۳۰
۱۹۹٫۴۳	۴۶۸۰	۰٫۵۲۶۵	۱۰۵	۴۰

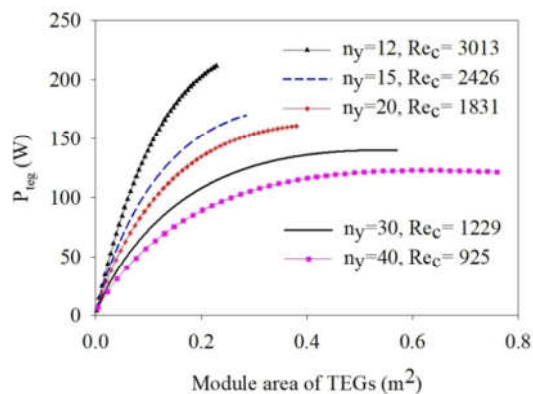


شکل ۹- تغییرات توان کل دستگاه نسبت به سطح مدول



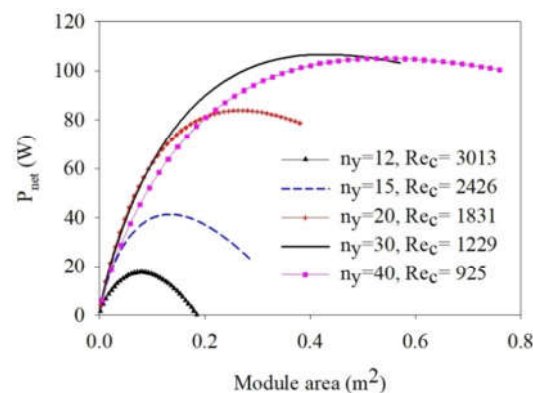
شکل ۱۰- تغییرات راندمان انرژی کل دستگاه نسبت به سطح مدول

روی توان خالص موثر هستند. مطابق شکل ۱۰ توان خالص در مقادیری از سطح مدول دارای مقدار پیک است. این سطح همان سطح بهینه مدول است. هرچه تعداد سطرهای دستگاه مولد ترموالکتریک بیشتر شود، مقدار پیک توان خالص و اندازه سطح بهینه نیز بیشتر شده است.



شکل ۱۱- تغییرات توان کل دستگاه نسبت به سطح مدول

در جدول ۳ مقدار اوج توان خالص، سطح بهینه مدول و نسبت مقدار بیشینه توان خالص به مقدار سطح بهینه به ازای تعداد سطرهای ۱۲، ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ از مدول مولد ترموالکتریک ارائه شده است. نسبت اوج توان به سطح بهینه مدول به ازای $n_y=20$ بیشترین مقدار را دارد و برابر با 318.31 W/m^2 است. تعداد کل مولدهای ترموالکتریک در این شرایط ۲۳۴۰ عدد می‌باشد. براین اساس از میان پنج مقدار مختلف از تعداد سطرهای مدول مقدار ۲۰ عدد سطر برای مدول مولد ترموالکتریک مطلوب‌ترین است. مطابق شکل ۱۰ مقدار توان خالص تا سطح مدول 0.11 m^2 به ازای تعداد سطرهای ۲۰ و ۳۰ بیشتر از سه مقدار دیگر از سطرهای مدول است. همچنین اگر تعداد سطح مدول بین 0.11 m^2 تا 0.52 m^2 باشد میزان توان خالص بیشترین مقدار را در $n_y=30$ دارد.



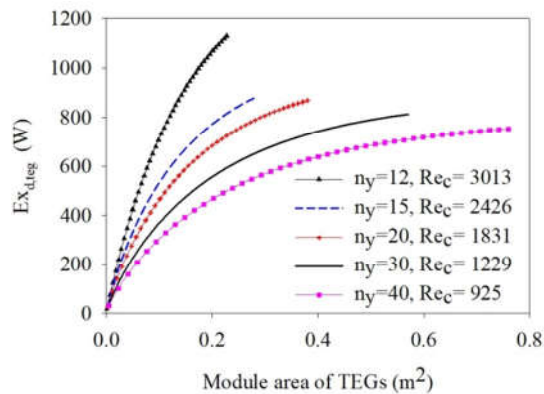
شکل ۱۲- تغییرات توان خالص دستگاه نسبت به سطح مدول

حالت برابر با 0.4641 m^2 است. نسبت توان به سطح نیز برابر با 231.1 W/m^2 است. در حالت دوم بهینه‌سازی، سطح بهینه مدول از نسبت توان بیشینه به سطح نظیر آن یعنی $P_{\text{net,max}}/A_{\text{opt}}$ در هر سطر از مدول و به ازای تغییرات ستون‌های آن از ۱ تا ۱۶۹ محاسبه شده است. بیشترین مقدار برای این نسبت در سطر ۱۸ و ستون ۱۰۹ رخ داده است. اندازه آن برابر با 320.7 W/m^2 است. در این شرایط مقادیر توان بیشینه و سطح بهینه به ترتیب برابر با 70.7 kW و 0.2207 m^2 بدست آمدند.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه ابتدا مدل ریاضی توسعه داده شده است برای این منظور خواص مولد ترموالکتریک وابسته به دما در نظر گرفته شده است. سیال کاری آب بعنوان منبع سرد با ضریب انتقال گرمای متغییر و وابسته به طول کانال فرض شده است. در ادامه با انجام آنالیز انرژی و انرژی روی مدل، اثر ابعاد سطح مدول مولد ترموالکتریک روی مشخصه‌های عملکردی دستگاه مولد ترموالکتریک بررسی شده است. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش طول کانال و مدول، ضرایب انتقال گرمای گازهای احتراقی و آب کاهش یافتند. همچنین باتوجه به میزان جذب و دفع حرارت توسط مولدها در طول مدول، اختلاف دمای دوسر مولدها نیز کاهش یافتند. از آنجا که راندمان یک مولد ترموالکتریک وابسته به اختلاف دمای دو سر آن می‌باشد، بنابراین راندمان‌های انرژی و انرژی مدول مولد ترموالکتریک با کاهش اختلاف دمای دوسر مولدها در مدول کاهش پیدا کردند و نرخ انهدام انرژی آن نیز افزایش یافت. با افزایش طول مدول توان زیاد شده است، این در حالی است که راندمان مدول کم شده است. این ناشی از دو عامل است. اول، نسبت توان تولیدی به گرمای جذب شده از هر مولد یعنی راندمان آن در طول مدول کمتر شده است. این خود سبب می‌شود که اختلاف دمای دوسر مولدها کاهش یابد. دوم، افزایش طول کانال سبب افزایش تعداد مولدها و افزایش توان می‌شود. در تقابل این دو عامل با افزایش طول مدول مقدار توان به علت افزایش تعداد مولدها بیشتر شده است و در ادامه، رشد توان به علت کاهش اختلاف دمای دوسر مولدها کمتر شده است. افزایش یا کاهش سطح مدول وابسته به تعداد سطرها و ستون‌های مدول مولد ترموالکتریک است. با کاهش تعداد سطرها مدول، عرض مدول و سطح مقطع کانال نیز کم شد. به ازای یک دبی جرمی ثابت از سیال سرد این عامل باعث شد که سرعت آب و عدد رینولدز آن بیشتر شود و نوع رژیم جریان از لایه‌ای به مغشوش تغییر کند. در تعداد سطر ۱۲ نوع رژیم جریان آب مغشوش شد. در نتیجه با افزایش ضریب انتقال گرمای جابجایی سیال سرد، اختلاف دمای دو سر مولدها نیز بیشتر شد. این عامل سبب شد که توان کل، راندمان‌های انرژی و انرژی و نرخ انهدام انرژی در مقایسه با مقادیر دیگر تعداد سطرها مدول بیشتر شود. لازم است اشاره شود با کاهش عرض مدول و کانال افت فشار و توان پمپ شده نیز زیاد می‌شود و این سبب کاهش توان خالص می‌شود. به این دلیل در $n_y=12$ توان خالص افت زیادی داشت. تغییرات سطح مدول مولد ترموالکتریک روی چهار عامل اختلاف دمای دوسر مولدها، تعداد مولدها، توان پمپ شده و نوع رژیم جریان سیال سرد موثر هستند. در تقابل این چهار عامل، سطح بهینه و پیک توان

اثر افزایش سطح مدول روی نرخ انهدام انرژی مدول مولد ترموالکتریک به ازای پنج مقدار مختلف از تعداد سطرها مدول در شکل ۱۳ ارائه شده است. همانطور که قبلاً اشاره شد با افزایش سطح مدول، اختلاف دمای دوسر مولدها کاهش یافته است. در نتیجه بازگشت ناپذیری کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش تعداد مولدها و سطح مدول، بازگشت ناپذیری افزایش می‌یابد. در این تقابل اثر افزایش سطح روی افزایش نرخ انهدام انرژی غالب‌تر خواهد شد و سبب شده است که نرخ انهدام انرژی مدول مولد ترموالکتریک بیشتر شود. همچنین در یک سطح معلوم، به ازای تعداد سطرها کم‌تر نرخ انهدام انرژی به دلیل افزایش اختلاف دمای دو سر مولدها بیشتر شده است.



شکل ۱۳- تغییرات نرخ انهدام انرژی مدول مولد ترموالکتریک

نسبت به سطح مدول

۴-۳- بهینه‌سازی سطح مدول مولد ترموالکتریک

در بخش قبلی توان خالص بیشینه به ازای تعداد پنج سطر مختلف در شکل ۱۰ بررسی شد. با توجه به رفتار منحنی‌های توان خالص، در هر سطری از مدول و به ازای اندازه‌ای از سطح توان خالص دارای مقدار اوج است. این سطح همان سطح بهینه معرفی شد. در هر سطری مقادیر سطح بهینه و توان خالص متفاوت بودند. با توجه به جدول ۳، به ازای تعداد ۳۰ سطر توان خالص بیشترین مقدار را داشت و نسبت توان خالص به سطح بهینه به ازای تعداد سطر ۲۰ نیز بیشترین اندازه را داشت. حال بر مبنای پارامترهای ورودی در جدول ۲ و همچنین حوزه تغییرات تعداد سطرها مولد ترموالکتریک یعنی n_y بین ۱۲ تا ۴۰ و تعداد ستون‌های آن یعنی n_x بین ۱ تا ۱۶۹، سطح مدول در دو حالت بهینه شده است. یکی بر اساس توان بیشینه خالص و دیگری بر مبنای نسبت توان بیشینه خالص به سطح نظیر آن در محیط EES بهینه‌سازی شده است. روش مورد استفاده در این نرم‌افزار برای این منظور، روش نسبت طلایی (Golden section search) می‌باشد. در حالت اول، توان خالص بیشینه برابر با 107.3 kW است. این توان در سطر ۳۳ و ستون ۱۲۵ مدول اتفاق افتاده است و سطح بهینه مدول در این

- performance of an exhaust waste heat recovery system based on intermediate fluid under different cooling methods. *Case studies in Thermal Engineering*, Vol. 23, pp. 100881, 2021.
- [14] Wei He., ShixueWanga., Yanzhe Li., Yulong Zhao., Structural size optimization on an exhaust exchanger based on the fluid heat transfer and flow resistance characteristics applied to an automotive thermoelectric generator. *Energy Conversion and Management*, Vol. 129, pp. 240-249, 2016.
- [15] Wei He., Shixue Wang., Like Yue., High net power output analysis with changes in exhaust temperature in a thermoelectric generator system. *Applied Energy*, Vol. 196, pp. 259-267, 2017.
- [16] Elankovan R., Suresh S., Krishnadass Karthick., Mohammed Maaaz M.D. Hussain., V.P. Chandramohan., Evaluation of thermoelectric power generated through waste heat recovery from long ducts and different thermal system configurations. *Energy*, Vol. 185, pp. 477-491, 2019.
- [17] Yamashita O., Effect of linear temperature dependence of thermoelectric properties on energy conversion efficiency. *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, pp. 3163-3169, 2008.
- [18] Yamashita O., Effect of linear and non-linear components in the temperature dependences of thermoelectric properties on the energy conversion efficiency. *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, pp.1968-1975, 2008.
- [19] Meng F.K., Chen L.G., Sun F.R., Effects of temperature dependence of thermoelectric properties on the power and efficiency of a multielement thermoelectric generator. *International Journal of Energy and Environment*, Vol. 3, pp 137-150, 2012.
- [20] Zhang T., Effects of Temperature-Dependent Material Properties on Temperature Variation in a Thermoelement. *J Electron Mater*, Vol. 44, pp. 3612-3620, 2015.
- [21] X. C. Xuan., K. C. Ng., C. Yap., H. T. Chua., The maximum temperature difference and polar characteristic of two-stage thermoelectric coolers. *Cryogenics*, Vol. 42, pp. 273-278, 2002.
- [22] Yining Feng., Aline Elquist., Yuepeng Zhang., Kaizhong Gao., Ian Ferguson., Athanasios Tzempelikos., Na Lu., Temperature dependent thermoelectric properties of cuprous delafossite oxides. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 156, pp. 108-112, 2019.
- [23] Jai Ki Lee., Ji Hui Son., Su Dong Park., Particle size dependent anisotropic thermoelectric properties of N-type Bi₂(Te,Se)₃ alloys on hot deformation. *Journal of Alloys and Compounds*, pp. 157-727, 2020.
- [24] Man-Wen Tian., Leonardus W.E. Mihardjo., Hazim Moria., Sohil Asaadi., Hamed Sadighi Dizaji., Shahram Khalilarya., Phong Thanh Nguyen., A comprehensive energy efficiency study of segmented annular thermoelectric generator; thermal, exergetic and economic analysis. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 181, pp. 115-996, 2020.
- [25] Soheil Asaadi., Shahram Khalilarya., Samad Jafarmadar., Numerical study on the thermal and electrical performance of an annular thermoelectric generator under pulsed heat power with different types of input functions. *Energy Conversion and Management*, Vol. 167, pp. 102-112, 2018.
- [26] Bejan A., Moran M.J., *Thermal design and optimization*. John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [27] Theodore L. Bergman., Adrienne S. Lavine., Frank P. Incropera., David P. DeWitt., *Fundamentals of Heat and mass transfer*. John Wiley & Sons, 2011.

خالص حاصل شد. در این بررسی نسبت توان خالص به سطح مدول به ازای تعداد سطر ۲۰ بیشترین مقدار را داشت. جهت مطالعه دقیق‌تر، سطح بهینه در دو حالت بهینه شد. در حالت اول مقدار سطح بهینه نسبت به بیشترین توان خالص مدول برابر 0.4641 m^2 بدست آمد. در حالت دوم مقدار سطح مدول به ازای نسبت توان بیشینه به سطح نظیر آن کمتر شد و برابر با 0.2207 m^2 بدست آمد. علی‌رغم اینکه توان خالص بیشینه در این سطح کمتر شده است اما نسبت توان به سطح بیشتری حاصل شد. این مقدار از نظر ترمودینامیکی و اقتصادی بسیار حائز اهمیت است. افزایش سطح مدول می‌تواند باعث کاهش نسبت توان به سطح، راندمان‌های انرژی و اگزرژی و افزایش نرخ انهدام اگزرژی دستگاه شود.

۵- مراجع

- [1] Honig, J.M., Harman, T.C., *Thermoelectric and Thermomagnetic Effects and Applications*. McGraw-Hill, New York, 1967.
- [2] Karri M. A., Thacher E. F., Helenbrook B. T., Exhaust energy conversion by thermoelectric generator : two case studies. *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, pp. 1596-1611, 2011.
- [3] Yuchao Wang., Chuanshan Dai., Shixue Wang., Theoretical analysis of a thermoelectric generator using exhaust gas of vehicles as heat source. *Applied Energy*, Vol. 112, pp. 1171-1180, 2013.
- [4] Abderezzak B., Randi S., Experimental investigation of waste heat recovery potential from car radiator with thermoelectric generator. *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 20, pp. 100686, 2020.
- [5] Dhruv Raj Karana., Rashmi Rekha Sahoo., Performance assessment of the automotive heat exchanger with twisted tape for thermoelectric based waste heat recovery. *Journal of Cleaner Production*, pp. 124631, 2020.
- [6] Hesham Khalil., Hamdy Hassan., Enhancement of waste heat recovery from vertical chimney via thermoelectric generators by heat spreader. *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 140, pp. 314-329, 2020.
- [7] Kazuaki Yazawa., Timothy S. Fisher., Eckhard A. Groll., Ali Shakouri., High exergetic modified Brayton cycle with thermoelectric energy conversion. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 114, pp 1366-1371, 2017.
- [8] Zare V., Palideh V., Employing thermoelectric generator for power generation enhancement in a Kalina cycle driven by low-grade geothermal energy. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 130, pp 418-428, 2018.
- [9] Shoaib Khanmohammadi., Morteza Saadat-Targhi., Faraedon Waly Ahmad., Masoud Arfand., Potential of thermoelectric waste heat recovery in a combined geothermal, fuel cell and organic Rankine flash cycle (thermodynamic and economic evaluation). *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, 6934-6948, 2020.
- [10] Rednic V., Gutt. R., Bruj E., Bot A., Two-stage heat recovery system equipped with thermoelectric elements. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 185, pp. 116412, 2021.
- [11] Wei He., Shixue Wang., Xing Zhang., Yanzhe Li., Chi Lu., Optimization design method of thermoelectric generator based on exhaust gas parameters for recovery of engine waste heat. *Energy*, Vol. 91, pp 1-9, 2015.
- [12] Wei He., Shixue Wang., Chi Lu., Xing Zhang., Yanzhe Li., Influence of different cooling methods on thermoelectric performance of an engine exhaust gas waste heat recovery system. *Applied Energy*, Vol.162, pp. 1251- 1258, 2016.
- [13] Yulong Zhao., Yucong Fan., Minghui Ge., Liyao Xie., Zhenhua Li., Xiangyang Yan., Shixue Wang., Thermoelectric