

## طراحی یک نمونه صنعتی سیستم ژنراتور ترموالکتریک بر روی دودکش یک ایستگاه تقلیل فشار گاز

سید علیرضا مصطفوی<sup>۱\*</sup>، مجتبی محمودی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

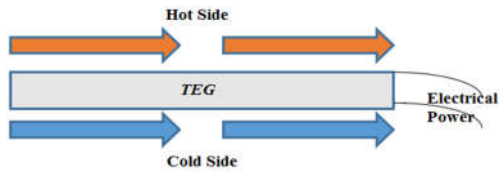
a-mostafavi@araku.ac.ir

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

mj\_mahmoudi90@yahoo.com

**چکیده:** در نقاط ورودی شبکه‌های گاز شهری با نصب ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز طبیعی، فشار گاز در خط انتقال گاز را از حدود ۱۰۰۰ psi به حدود ۲۵۰ psi کاهش می‌دهند. به دلیل مثبت بودن ضریب ژول تامسون گاز طبیعی، کاهش فشار منجر به کاهش دما نیز خواهد شد و گاها موجب میعان و حتی یخ زدگی میعانات موجود در گاز در فصول سرد می‌شود. به همین دلیل با استفاده از گرمکن‌های غیر مستقیم، دمای گاز را تا حدی بالا می‌برند که این احتمال از بین برود. قسمت اعظم گرمای حاصل از سوختن این گاز توسط دودکش به محیط منتقل می‌شود که در این مقاله هدف بازیابی این انرژی از دست رفته می‌باشد. در اینجا با مدل‌سازی دودکش و محاسبه پارامترهای مربوط به دود جاری در آن؛ یک مدل ژنراتور ترموالکتریک بر روی دودکش در ایستگاه‌ها مدل‌سازی شده و نتایج حاصل نشان می‌دهد که با استفاده از ۹۰ ماژول ترموالکتریک پربازده TEG1-241-1.4-1.2 و با استفاده از فضایی به ابعاد ۳ متر مربع از این دودکش می‌توان بیش از ۴۰۰ وات برق تولید کرد.

**واژه‌های کلیدی:** ترموالکتریک، ژنراتور، ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز، بازیابی انرژی.



شکل (۱): طرح‌واره از سیستم یک ژنراتور ترموالکتریک کامل

هریک از این چهار عملیات برای عملکرد بهتر ژنراتورهای ترموالکتریکی و در نتیجه، بازیابی بهتر انرژی‌های زاید صنعتی به هم وابسته‌اند و محاسبات و اندازه‌گیری آن‌ها به هم وابسته است. حرکت از سوی علم مواد ترموالکتریکی به سمت تجاری‌سازی استفاده از مواد ترموالکتریکی به منظور بازیابی انرژی‌های از دست‌رفته در صنعت، نیازمند پیشرفت هر یک از این چهار جزء است و شناسایی کاربردهای حجیم و بزرگی که در حد و اندازه بازار تجاری است، دنیای مهندسی را به این بازار علاقه‌مند ساخته است.

در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی در زمینه ژنراتورهای ترموالکتریک برای بازیابی انرژی در صنعت انجام شده است. بٹ و همکاران [۶]، از مواد ترموالکتریک متفاوتی از شرکت بخصوصی استفاده کردند که ترموالکتریک‌های مورد استفاده شامل بیسموت تلوراید ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ )، سرب تلوراید، سیلیکون-ژرمانیوم می‌شد. مطالعات آن‌ها نشان داد که در میان مواد مورد استفاده بیسموت تلوراید، به این سبب که حداکثر دمای کاری آن کمتر از دیگر مواد می‌باشد، بهترین عملکرد را دارد. بنابراین مطالعات آن‌ها نشان داد که استفاده از بیسموت تلوراید روی دودکش‌ها بهترین عملکرد در بین سایر مواد تحقیقاتی او دارد. ایکوما و همکاران [۷] در مرکز تحقیقاتی شرکت نیشان، ژنراتور ترموالکتریکی تولید کردند که از سیلیکون-ژرمانیوم به عنوان ماده ترموالکتریکی استفاده شده بود که در آن ۸ زوج ماده ترموالکتریکی استفاده شده بود. این ژنراتور روی یک موتور خودرو ۳۰۰۰ سی‌سی نصب شده بود که به صورت مستطیلی در کنار هم نصب شده بودند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که استفاده از آرایش مستطیلی، بازدهی بهتری از سایر آرایش‌های مواد ترموالکتریکی در کنار هم دارد.

یازوا و همکاران [۸] به منظور به حداقل رساندن مصرف سوخت در توربین‌های بخار، یک مدل عمومی با استفاده از ترموالکتریک ارائه دادند؛ نتایج نشان داد که بازدهی توربین بخار با افزودن ماژول‌های ترموالکتریک افزایش می‌یابد. دن و همکاران یک مدل مایع از سیستم ژنراتورهای ترموالکتریک به منظور بازیابی

شاخص افزایش مصرف انرژی در ایران ۶۵٪ است و کمتر از ۱۰ سال دیگر کشور ایران با بحران انرژی مواجه خواهد شد. بیش از ۵۰٪ مصرف انرژی در جهان، مربوط به بخش صنعت است و در ایران، مصرف انرژی در صنعت ۲/۵ برابر میانگین جهانی می‌باشد. در کشور روزانه معادل ۵ میلیون بشکه نفت، انرژی مصرف می‌شود؛ از این میزان معادل ۳/۶ میلیون بشکه نفت به دست مصرف‌کننده می‌رسد که این به معنای هدررفت معادل ۲/۲ میلیون بشکه نفت در روز در بخش انرژی می‌باشد. راهکارهای کاهش مصرف انرژی با اصلاح فرهنگ مصرف، کاهش تقاضا برای انرژی و بهره‌گیری از فناوری‌های جدید است [۱].

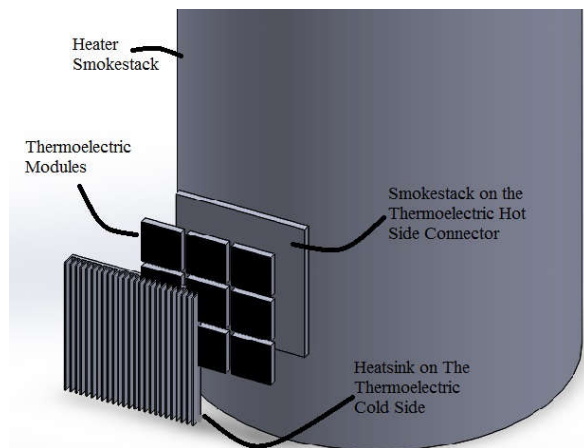
فناوری‌های مختلفی برای تبدیل و بازیابی ضایعات انرژی فرایندهای صنعتی به انرژی الکتریکی مفید وجود دارد؛ یکی از این روش‌ها استفاده از ژنراتورهای ترموالکتریک است [۲]، مواد ترموالکتریک در سال ۱۸۲۱ کشف شده‌اند، این مواد نیمه‌هادی‌های جامدی هستند که زمانی که در اتصال با یکدیگر و در معرض یک اختلاف دما قرار می‌گیرند، توان الکتریکی تولید می‌کنند. توان الکتریکی با اعمال گرما در یک طرف از یک ماده ترموالکتریک، در حالی که طرف دیگر در معرض یک منبع دما پایین و یا دمای محیط اطراف می‌باشد، تولید می‌شود [۳]. مواد ترموالکتریکی که تا حدود سال ۱۹۹۵ تولید شده‌اند، بازدهی در حدود ۲ تا ۵ درصد داشته و در کاربردهای عملی جایگاه بسیار اندکی دارند [۴]. با این حال، پیشرفت‌های اخیر در درک تکنولوژی کوانتوم و نانوساختارها روی خواص ترموالکتریک‌ها اثر گذاشته، فناوری لایه‌نازک و نانوذرات فرصتی برای پیشرفت مواد ترموالکتریک به وجود آورده و بازدهی آن‌ها را به بیش از ۱۵٪ افزایش داده است. ظهور این مواد پیشرفته در ترموالکتریک فرصت‌های جدید برای بازیابی انرژی حرارتی تلف‌شده، به صورت مؤثرتر و اقتصادی‌تر و همچنین از لحاظ ایمنی و محیط زیستی بسیار قابل اعتماد و بدون ایجاد سروصدا و ارتعاش را ارائه می‌دهد [۵].

تولید انرژی الکتریکی از ژنراتورهای ترموالکتریکی را می‌توان با ترکیب چهار عملیات واحد در این ژنراتورها به دست آورد؛ اول یک ماژول ترموالکتریک متشکل از مجموعه‌ای از چند و یا صدها اتصالات مواد ترموالکتریک، دوم یک مبدل حرارتی در سمت گرم، سوم یک مبدل حرارتی سمت سرد، و چهارم یک ماژول الکترونیک قدرت که اختلاف پتانسیل مورد نظر و خروجی آمپر مناسب را فراهم می‌آورد [۳] (شکل ۱).

دودکش در این ایستگاه‌ها مدل‌سازی شده است و میزان انرژی مفید تولیدی محاسبه شده است. همچنین زمان بازگشت هزینه ساخت این ژنراتور، با فروش برق تجدیدپذیر از بازیافت تلفات در فرایندهای صنعتی که توسط وزارت نیرو ارائه می‌شود، بررسی شده است.

## ۲. مبانی و روش‌ها

در اینجا به بررسی سیستم یک ژنراتور ترموالکتریک پرداخته می‌شود. در این پروسه در مرحله اول، توزیع دما در دودکش و سیستم خنک‌کننده بررسی می‌شوند و در مرحله بعد، انرژی تولیدشده توسط ژنراتور ترموالکتریک مورد محاسبه قرار می‌گیرد. در شکل (۲) سیستم دودکش و ژنراتور ترموالکتریک مورد بررسی نشان داده شده است.



شکل (۲): سیستم دودکش هیتر و ژنراتور ترموالکتریک طراحی شده

در شکل (۲)، سیستم ژنراتور ترموالکتریک مورد بررسی نشان داده شده است؛ که دود جاری در دودکش به صفحه اتصال دودکش به سطح داغ ترموالکتریک برخورد می‌کند و همچنین هیئت‌سینک در سطح سرد ترموالکتریک‌ها متصل شده و ۹ ماژول ترموالکتریک در بین صفحه اتصال دودکش به سطح داغ ترموالکتریک و هیئت‌سینک است.

این سیستم ژنراتور ترموالکتریک را می‌توان به ۹ بخش متقارن تقسیم‌بندی کرد، به دلیل تقارن ۹ ماژول، هر مقطع نیز دارای پروفیل دمایی یکسانی هستند. بنابراین توزیع دما برای تنها یک ماژول در هر مقطع مورد ارزیابی قرار گرفته و در حقیقت با این توضیح می‌توان اقدام به انتخاب حجم کنترل مناسب برای هر ماژول ترموالکتریک کرد؛ که این امر در شکل (۳) نشان داده شده است.

انرژی ارائه دادند که زمانی که دمای منبع گرم  $195/9^{\circ}\text{C}$  بود، ماکزیم ولتاژ مدار باز  $34/7$  ولت و بازدهی  $2\%$  به دست آمد. رملی و همکاران [۹] روش جدیدی برای بازیابی انرژی گرمایی و تبدیل آن به انرژی الکتریکی با اضافه کردن لوله‌های گرمایی به ژنراتورهای ترموالکتریک به دست آوردند و بازدهی ژنراتور را تا  $2\%$  افزایش دادند. پارک و همکاران [۱۰] روشی بر پایه استفاده از سنسور گرمایی برای ردیابی حداکثر نقاط قدرت، به منظور دستیابی به حداکثر توان خروجی، بسته به شرایط دمایی معرفی کردند. کیو و هایدن با ادغام سیستم ژنراتور ترموالکتریک و A-آر سی برای سیستم میکروتربکیبی، گرما و انرژی یک سیستم یکپارچه را معرفی کردند و دریافتند که ماژول‌های ترموالکتریک برای ترکیب با میکروچیپ‌ها بسیار مناسب‌اند و باعث افزایش بازدهی آن‌ها می‌شود. سو و همکاران [۱۱] سه مدل چینش پره‌های هیئت‌سینک خارجی را روی یک ژنراتور ترموالکتریک نصب شده روی آگزوز یک خودرو بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که آرایش آکاردئونی بهترین آرایش برای پره‌های هیئت‌سینک، بهترین بازدهی را فراهم می‌کند. ارنگورن و همکاران [۱۲] یک مدل محاسباتی به منظور تخمین عملکرد یک مدل ژنراتور ترموالکتریک روی لوله گرم با فرض دمای ثابت ارائه کردند، که این مدل توان خروجی به ازای دماهای مختلف سطح داغ ژنراتور ترموالکتریک را پیش‌بینی می‌کند. ال وی [۱۳] و همکاران سیستم‌هایی برای خنک‌کاری سطح سرد ژنراتورهای ترموالکتریک را ارائه کردند و تأثیر هر مدل را روی بازدهی نهایی بررسی کردند. حسن جابر و همکاران [۱۴] یک سیستم هیبریدی بازیابی انرژی ازدست‌رفته از لوله‌های داغ با استفاده از ژنراتورهای ترموالکتریک و انرژی خورشیدی طراحی کردند که به توان  $141$  وات به ازای سطح داغ با دمای  $47^{\circ}\text{C}$  دست یافتند.

هرچند در سال‌های اخیر از ژنراتورهای ترموالکتریک برای بازیابی انرژی‌های ازدست‌رفته در صنعت بسیار استفاده شده، با توجه به اینکه مقادیر بسیار زیادی انرژی به صورت گرما از هیتر ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز هدر می‌رود، هنوز این انرژی توسط ژنراتورهای ترموالکتریک بازیابی نشده است. هدف این مقاله، بازیابی همین انرژی ازدست‌رفته به صورت گرما از ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز با استفاده از ژنراتورهای ترموالکتریک می‌باشد و در نهایت به بررسی میزان صرفه‌جویی انرژی با این روش پرداخته شده است؛ به این منظور با مدل‌سازی دودکش و محاسبه پارامترهای مربوط به دود جاری در آن، یک مدل ژنراتور ترموالکتریک روی

$$R_{hs} = \frac{1}{hA} + \frac{L_1}{K_1 A_1} + \frac{\ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)}{2\pi L_2 K_2} \quad (3)$$

که  $h$  ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی،  $A$  مساحت سطح انتقال گرما،  $K_1$  ضریب هدایت گرمایی صفحه اتصال دودکش به سطح داغ ترموالکتریک (از جنس آلومینیوم)،  $L_1$  ضخامت این صفحه،  $A_1$  مساحت این صفحه در تماس با هر ترموالکتریک،  $D_1$  و  $D_2$  به ترتیب قطر داخلی و خارجی دودکش،  $L_2$  طول عمودی دودکش در تماس با هر ترموالکتریک، و  $K_2$  ضریب هدایت گرمایی دودکش (از جنس فولاد) است و رابطه گرمای ورودی به ماژول ترموالکتریک به صورت رابطه (۴) نیز می‌توان نشان داد [۱۶].

$$Q_1 = K\Delta T + \alpha T_{hs} I - \frac{1}{2} I^2 R_i \quad (4)$$

که  $Q_1$  گرمای ورودی به ماژول ترموالکتریک،  $K$  ضریب انتقال حرارت هدایت ماژول ترموالکتریک،  $\alpha$  ضریب سیبک ماژول ترموالکتریک،  $R_i$  مقاومت داخلی ماژول ترموالکتریک و  $I$  جریان جاری حاصل از هر ترموالکتریک است.

همچنین رابطه انتقال گرما برای سطح سرد ماژول ترموالکتریک به صورت رابطه (۵) قابل محاسبه است [۱۵].

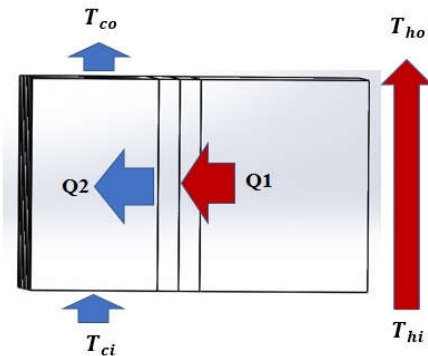
$$Q_2 = \frac{(T_{cs} - \frac{T_{ci} + T_{co}}{2})}{R_{cs}} \quad (5)$$

$Q_2$  انتقال گرما در سطح سرد ماژول ترموالکتریک است که در شکل (۳) نشان داده شده است.  $T_{cs}$  دمای سطح سرد ماژول ترموالکتریک،  $T_{ci}$  دمای ورودی به هیت سینک در سمت سرد و  $T_{co}$  دمای خروجی از آن در قسمت سرد است. همچنین  $R_{cs}$  مقاومت حرارتی هیت سینک متصل به سمت سرد ماژول ترموالکتریک است که با توجه به جنس و آرایش پره‌ها که در شکل (۴) نشان داده شده، محاسبه می‌شود؛ این مقاومت گرمایی با توجه به شکل (۴) شامل مقاومت پره‌ها و مقاومت پایه هیت سینک می‌باشد؛ که در ادامه بررسی می‌شود.

رابطه انرژی فن خنک‌کننده نیز به صورت رابطه (۶) نیز قابل نمایش است [۱۵]:

$$Q_2 = m_c c_{pc} (T_{co} - T_{ci}) \quad (6)$$

$Q_2$  انرژی از دست‌رفته از فن خنک‌کننده،  $m_c$  دبی جرمی ورودی به المان از سمت خنک‌کننده و  $c_{pc}$  ظرفیت گرمایی ویژه هوای محیط اطراف است. انرژی تولیدی ماژول ترموالکتریک به صورت رابطه (۷) است [۱۵].



شکل (۳): هر المان از سیستم ژنراتور ترموالکتریک مورد بررسی

بنابراین با داشتن توزیع دما در هر ماژول ترموالکتریک، توزیع دما در کل مبدل حرارتی قابل محاسبه است؛ در نهایت با استفاده از توزیع دما برای یک ماژول ترموالکتریک توان تولیدی از تمام ۹ ماژول با استفاده از این مدل‌سازی قابل محاسبه است. حال به بررسی انتقال گرما در یک ماژول ترموالکتریک پرداخته می‌شود که منجر به مدل‌سازی یک سیستم ژنراتور ترموالکتریک می‌شود. شکل (۳) توزیع دما و انتقال گرما در یک ماژول ترموالکتریک ایزوله‌شده در یک سیستم ژنراتور ترموالکتریک را نشان می‌دهد؛ در حقیقت انتخاب حجم کنترل، مطابق شکل (۳) انجام شده است. رابطه انرژی به دست‌آمده از گاز درون دودکش در مقطعی که در ارتباط با ماژول ترموالکتریک است به صورت رابطه (۱) به دست می‌آید [۱۵].

$$Q_1 = m_h c_{ph} (T_{hi} - T_{ho}) \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $Q_1$  همان طور که در شکل (۳) نشان داده شده، انرژی به دست‌آمده از دودکش،  $m_h$  دبی جرمی گاز درون دودکش،  $c_{ph}$  ظرفیت گرمایی ویژه گاز درون دودکش،  $T_{hi}$  دمای دود ورودی به هر ماژول ترموالکتریک از سمت دودکش و  $T_{ho}$  دمای دود خروجی از هر ماژول ترموالکتریک از سمت دودکش است.

همچنین رابطه انتقال گرما در سطح داغ ترموالکتریک به صورت رابطه (۲) نیز قابل محاسبه است [۱۵].

$$Q_1 = \frac{(T_{hi} + T_{ho} - T_{hs})}{R_{hs}} \quad (2)$$

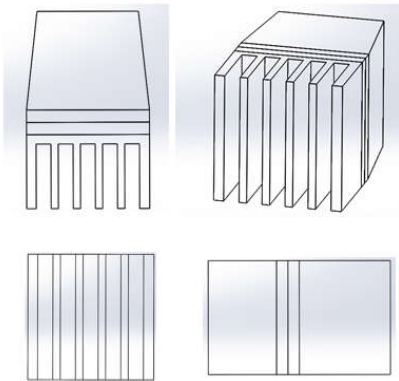
که  $Q_1$  انتقال حرارت، شامل ترکیب جابه‌جایی و هدایت در سطح داغ،  $T_{hs}$  دمای سطح داغ ماژول و  $R_{hs}$  مقاومت گرمایی است. مقدار  $R_{hs}$  در رابطه (۲) به صورت رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۱۵].

$$R_{CS} = R_b + R_f \quad (۹)$$

$R_b$  مقاومت پایه هیت سینک است که به صورت رابطه (۱۰) محاسبه می شود [۱۵].

$$R_b = \frac{t_b}{kA_b} \quad (۱۰)$$

$K$  ضریب انتقال حرارت رسانش فلز مورد استفاده در هیت سینک،  $t_b$  همان طور که در شکل (۶) نشان داده شده، ضخامت پایه هیت سینک و  $A_b$  مساحت سطح مقطع پایه هیت سینک است.



شکل (۶): سه نمای المان مورد بررسی در ترموالکتریک مورد مطالعه

برای محاسبه  $R_f$  که همان مقاومت پره‌ها به همراه هوای اطراف آن است از رابطه (۱۱) استفاده می شود [۱۷-۱۸].

$$R_f = \frac{1}{nh_h W_f (t_f + 2\eta_f L_f)} \quad (۱۱)$$

مقادیر  $W_f$  (عرض پره)،  $t_f$  (ضخامت هر پره)،  $L_f$  (طول هر پره) و  $n$  (تعداد پره‌ها) و  $h_h$  ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سیال جاری در هیت سینک است. همچنین برای محاسبه مقدار  $\eta_f$  در رابطه (۱۱) باید از رابطه (۱۲) استفاده کرد [۱۷].

$$\eta_f = \frac{\tanh mL_c}{mL_c} \quad (۱۲)$$

و مقدار  $mL_c$  به صورت رابطه (۱۳) محاسبه می شود [۱۷].

$$mL_c = \sqrt{\frac{2h_h}{kt_f}} L_f \quad (۱۳)$$

### ۳. نتایج

در این قسمت به محاسبه پارامترها و ورودی‌های معادلات (۸) به منظور پیدا کردن مجهولات شامل  $T_{ho}$ ،  $T_{co}$ ،  $T_{hs}$  و  $T_{cs}$  پرداخته می شود.

در اینجا از ماژول‌های ترموالکتریک TEG1-241-1.4-1.2 به این دلیل که تا دمای  $200^\circ\text{C}$  را تحمل می کنند و همچنین قیمتی مناسب نسبت به توان خروجی خود دارند، استفاده شده است؛

$$P = I^2 R_L = \frac{\alpha^2 (T_{hs} - T_{cs})^2 R_L}{(R_i + R_L)^2} \quad (۷)$$

با استفاده از معادلات (۱) تا (۷) مجهولات، شامل  $T_{ho}$ ،  $T_{co}$ ،  $T_{hs}$  و  $T_{cs}$  از معادلات (۸) به دست می آیند.

$$m_h c_{ph} (T_{hi} - T_{ho}) - \frac{(T_{hi} + T_{ho} - T_{hs})}{R_{hs}} = 0 \quad (\text{الف } ۸)$$

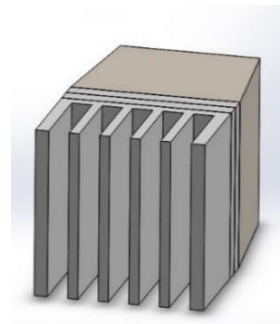
$$m_c c_{pc} (T_{co} - T_{ci}) - \frac{(T_{cs} - \frac{T_{ci} + T_{co}}{2})}{R_{cs}} = 0 \quad (\text{ب } ۸)$$

$$\frac{(T_{hi} + T_{ho} - T_{hs})}{R_{hs}} - \frac{(T_{cs} - \frac{T_{ci} + T_{co}}{2})}{R_{cs}} - \frac{\alpha^2 (T_{hs} - T_{cs})^2 R_L}{(R_i + R_L)^2} = 0 \quad (\text{ج } ۸)$$

$$\frac{(T_{hi} + T_{ho} - T_{hs})}{R_{hs}} - K\Delta T - \alpha T_{hs} I + \frac{1}{2} I^2 R_i = 0 \quad (\text{د } ۸)$$

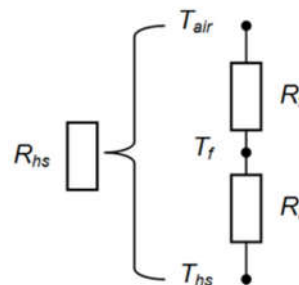
معادلات (۸) معادلات کلی هستند که برای بسیاری از ژنراتورهای ترموالکتریک کاربرد دارند.

در ژنراتور ترموالکتریک مورد بررسی المان‌گیری برای هر ماژول ترموالکتریک به صورت شکل (۴) است.



شکل (۴): نمایش یک المان از ژنراتور ترموالکتریک به صورت تکی

برای محاسبه مقدار  $R_{CS}$  برای هر هیت سینک می توان مطابق شکل (۵) از مقاومت حرارتی استفاده کرد.



شکل (۵): مقاومت حرارتی هر هیت سینک

بنابراین مقدار  $R_{CS}$  مطابق شکل (۵) به صورت رابطه (۹) محاسبه می شود.

جابه‌جایی دود درون دودکش پرداخته می‌شود؛ به‌منظور یافتن این ضریب می‌بایست از عدد ناسلت استفاده کرد که عدد ناسلت به‌صورت رابطه (۱۴) تعریف می‌شود [۱۵].

$$Nu_D = \frac{h_i D_H}{K} \quad (14)$$

که  $K$  ضریب هدایت سیال درون مجرا،  $h_i$  ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی داخلی و  $D_H$  قطر هیدرولیکی است که برای مجاری غیر دایره‌ای به‌صورت رابطه (۱۵) تعریف می‌شود [۱۵].

$$D_H = \frac{4A}{P} \quad (15)$$

که  $A$  مساحت مقطع عرضی و  $P$  محیط در تماس با سیال است. برای یافتن عدد ناسلت در رابطه (۱۴) می‌بایست از روابط تجربی استفاده کرد که به نوع جریان بستگی دارد. نوع جریان را می‌توان با توجه به عدد رینولدز که به‌صورت معادلات (۱۶) تعریف می‌شود تعیین کرد [۱۵].

$$Re_D = \frac{\rho u_{avg} D_H}{\mu} \quad (16 \text{ الف})$$

و یا:

$$Re_D = \frac{\dot{m} D_H}{\mu A} \quad (16 \text{ ب})$$

که  $\rho$  چگالی گاز یا دودی است که درون لوله در جریان است.  $u_m$  میانگین سرعت سیال در هر مقطع لوله،  $\mu$  لزجت سیال جاری در لوله و  $\dot{m}$  دبی جرمی گاز درون است. برای رینولدز کوچک‌تر از ۲۳۰۰ جریان آرام (لایه‌ای) است که اگر این جریان کاملاً توسعه‌یافته باشد، عدد ناسلت به‌صورت مقدار ثابت به‌صورت رابطه (۱۷) تعریف می‌شود [۱۵].

$$Nu_D = 4.36 \quad (17 \text{ الف})$$

و برای رینولدز بزرگ‌تر از ۲۳۰۰ جریان آشفته است و اگر جریان کاملاً توسعه‌یافته باشد، عدد ناسلت طبق رابطه (۱۷ ب) تعریف می‌شود که به رابطه گنیلیسکی معروف است.

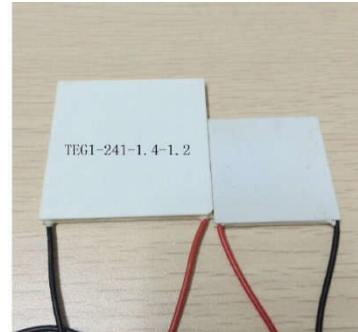
$$Nu_D = \frac{\frac{f}{8}(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (17 \text{ ب})$$

که  $Pr$  عدد پرانتل و  $f$  ضریب اصطکاک است که به‌صورت رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود [۱۵].

$$f = [0.79 \ln(Re_D) - 1.64]^{-2} \quad (18)$$

در نهایت از طریق معادلات (۱۴) و (۱۵) ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی داخلی قابل محاسبه است. در این معادلات، خواص در دمای میانگین دود درون دودکش تعریف می‌شوند و از

به‌طوری که هر ماژول قابلیت تولید ۷ ولت برق با شدت جریان ۱/۲۵ آمپر در حالت ایدئال دارد. طرح‌واره از آن در شکل (۷) نشان داده شده و خواص اصلی این ماژول در جدول (۱) آمده است [۱۵].



شکل (۷): طرح‌واره از ماژول ترموالکتریک استفاده‌شده

جدول (۱): خواص ماژول ترموالکتریک مورد استفاده در ژنراتور

مورد بررسی

مقدار	خواص ماژول ترموالکتریک
۰/۰۵	$\alpha_M \left(\frac{\text{Volt}}{\text{K}}\right)$
۱	$R_{iM} (\Omega)$
۲/۱۸	$K_M \left(\frac{\text{Watts}}{\text{K}}\right)$

ژنراتور ترموالکتریک مورد بررسی شامل ۹ ماژول ترموالکتریک از مدل فوق است. با داشتن کلیه پارامترها و حل معادلات (۸) برای این ژنراتور نمودار توان در فصول مختلف را می‌توان به دست آورد.

ابعاد هندسی سیستم ژنراتور ترموالکتریک طراحی شده مطابق

شکل (۶) در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲): ابعاد هندسی سیستم ژنراتور ترموالکتریک طراحی شده

مقدار	مؤلفه
۲ (mm)	$t_b$
۰/۰۰۱۸۰۶ (m <sup>2</sup> )	$A_b$
۵/۷ (mm)	B
۴۲/۵ (mm)	$W_f$
۱/۸ (mm)	$t_f$
۱۵/۷ (mm)	$L_f$
۶	N
۲۱۵ (W/k.m)	K

در این قسمت به روش محاسبه ضریب انتقال گرمای

$$Re_D = \frac{0.156 \times 0.488}{248 \times 10^{-7} \times 0.187} = 16415 \quad (19)$$

چون مقدار عدد رینولدز بیشتر از مقدار ۲۳۰۰ است، برای محاسبه عدد ناسلت می‌بایست از رابطه (۱۷) استفاده کرد؛ که قبل از آن باید مقدار ضریب اصطکاک از رابطه (۱۸) استفاده کرد. که به صورت رابطه (۲۰) محاسبه شده است.

$$f = [0.79 \ln(16415) - 1.64]^{-2} = 0.027 \quad (20)$$

عدد پراتل برای محاسبه مقدار عدد ناسلت نیز طبق رابطه (۲۱) در ادامه محاسبه شده است.

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (21)$$

بنابراین عدد ناسلت طبق رابطه (۱۷) به صورت رابطه (۲۲) محاسبه شده است.

$$Nu_D = \frac{\frac{f}{8}(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} = 44.14 \quad (22)$$

در نتیجه مقدار ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی دود طبق رابطه (۱۴) به صورت رابطه (۲۳) محاسبه شده است.

$$h = \frac{44.14 \times 36.7 \times 10^{-3}}{0.488} = 3.31 \quad (24)$$

همچنین مقدار  $R_{hs}$  در رابطه (۳) به صورت رابطه (۲۵) قابل محاسبه است.

$$R_{hs} = 3.78 \quad (25)$$

در جدول (۵) متوسط دمای هوای شهر اراک در سال ۱۳۹۳ در ۷ ماه سردتر سال نشان داده شده است [۲۰].

جدول (۵): متوسط دمای هر ماه هوای شهر اراک در سال ۱۳۹۳ در هفت ماه سردتر سال

ماه	دمای متوسط (°C)
آبان	۸/۳
آذر	۵/۵
دی	۳/۶
بهمن	۷/۳
اسفند	۵/۹
فروردین	۱۱/۶
اردیبهشت	۱۷/۸

خواص ترموفیزیکی هوا در میانگین دمای هر ماه که در جدول (۵) نشان داده شده در جدول (۶) محاسبه شده است [۲۱].

آنجا که معادلات از روابط تجربی به دست می‌آیند، به خودی خود ۱۰٪ خطا دارند. بنابراین با داشتن خواص سیال و مقدار دبی دود خروجی در دمای مورد نظر می‌توان مقدار  $h$  را با استفاده از عدد ناسلت به دست آورد.

برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی دود درون دودکش ابتدا می‌بایست به محاسبه عدد رینولدز از رابطه (۱۶) پرداخت، که برای محاسبه دبی در این رابطه با توجه به مصرف سوخت و همچنین نسبت هوا به سوخت برای این گرم‌کن می‌توان اندازه‌گیری دبی دود را انجام داد. مقدار به‌دست‌آمده برای دبی برابر با ۰/۱۵۶ کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد. ترکیبات دود و درصد هر کدام در جدول (۳) نشان داده شده است [۱۹].

جدول (۳): ترکیبات دود خروجی از دودکش که توسط گرمکن

تولیدشده		
ترکیب	واحد	مقدار اندازه‌گیری شده
$O_2$	%	۸/۹۶
$CO$	Ppm	۱۱
$NO_x$	Ppm	۱۵/۲
$NO$	Ppm	۱۵
$NO_2$	Ppm	۰/۲
$CO_2$	%	۶/۸۲
$SO_2$	Ppm	۲
$HC$	Ppm	۱۱۱
<i>Efficiency</i>	%	۸۴/۴
<i>Loss</i>	%	۱۱/۶
$H_2S$	Ppm	۰/۳
<i>Ex. Air</i>	%	۷۴/۴

با توجه به ترکیبات دود در جدول (۳) می‌توان خواص ترموفیزیکی دود را اندازه گرفت. این خواص در یک دمای خاص جدول (۴) در دمای ۱۸۰°C که دمای متوسط دود در زمان کارکرد گرم‌کن می‌باشد، نشان داده شده است [۱۷].

جدول (۴): خواص ترموفیزیکی دود در دمای متوسط دود خروجی از گرم‌کن

T (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg.K)	$\mu \cdot 10^7$ (N.s/m <sup>2</sup> )	$k \cdot 10^3$ (W/m.K)
۴۶۳/۱۵	۰/۰۷۸	۱/۰۷۹	۲۴۸	۳۶/۷

بنابراین مقدار عدد رینولدز طبق رابطه (۱۶) در یک دمای خاص به صورت رابطه (۱۹) محاسبه شده است.

رابطه (۲۹) است.

$$Re_D = \frac{1.15 \times 6 \times 9.65 \times 10^{-3}}{186.08 \times 10^{-7}} = 3578 \quad (29)$$

بنابراین با توجه به اینکه عدد رینولدز بیشتر از ۲۳۰۰ می‌باشد، جریان از نوع آشفته است و اگر جریان کاملاً توسعه یافته فرض شود، می‌بایست از رابطه (۱۷) برای محاسبه عدد ناسلت استفاده شود که ابتدا باید از رابطه (۱۸) ضریب اصطکاک به صورت رابطه (۳۰) محاسبه شود.

$$f = [0.79 \ln(3578) - 1.64]^{-2} = 0.043 \quad (30)$$

مقدار عدد پرانتل نیز به صورت رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود:

$$Pr = 7.068 \times 10^{-1} \quad (31)$$

حال طبق رابطه (۱۷) مقدار عدد ناسلت به صورت رابطه (۳۲) محاسبه می‌شود.

$$Nu_D = \frac{0.043}{8} (3578 - 1000) \times 7.068 \times 10^{-1} \quad (32)$$

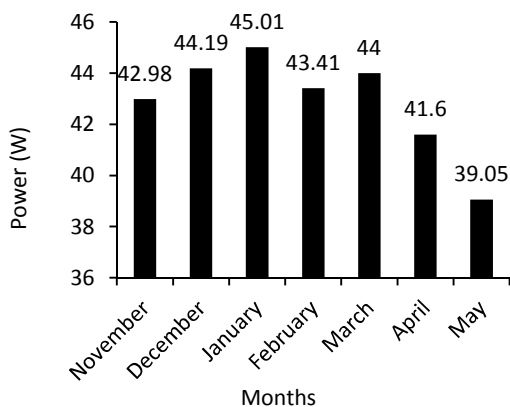
$$1 + 12.7 \left( \frac{0.043}{8} \right)^{\frac{1}{2}} \left( (7.068 \times 10^{-1})^{\frac{2}{3}} - 1 \right)$$

$$= 12.13$$

بنابراین مقدار ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی به صورت رابطه (۳۳) به دست می‌آید:

$$h = \frac{12.13 \times 26.5 \times 10^{-3}}{9.65 \times 10^{-3}} = 33.31 \quad (33)$$

بنابراین تمامی پارامترهای مورد نیاز برای به‌دست‌آوردن مجهولات معادلات (۸) در هر دمایی قابل اندازه‌گیری هستند و با حل این چهار رابطه و رابطه (۷)، مجهولات معادلات به دست می‌آیند. ژنراتور ترموالکتریک مورد بررسی شامل ۹ ماژول ترموالکتریک از مدل فوق است؛ با داشتن همه پارامترها و حل معادلات (۸) برای این ژنراتور نمودار توان در ماه‌های مختلف سال در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل (۹): نمودار توان تولیدی از ژنراتور ترموالکتریک در هر ماه سال

جدول (۶): خواص ترموفیزیکی هوا در دمای متوسط هر ماه در هفت

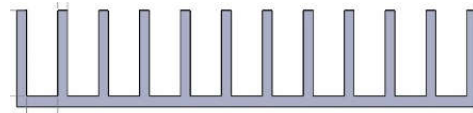
ماه سردتر سال				
T (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg.K)	$\mu \cdot 10^7$ (N.s/m <sup>2</sup> )	$k \cdot 10^3$ (W/m.K)
۲۸۱/۴۵	۱/۲۴۶	۱/۰۱۳	۱۷۳	۲۵/۶
۲۷۸/۶۵	۱/۲۵۹	۱/۰۱۳	۱۷۷	۲۵/۴
۲۷۶/۷۵	۱/۲۶۷	۱/۰۱۲	۱۷۶	۲۵/۲
۲۸۰/۴۵	۱/۲۵۱	۱/۰۱۳	۱۷۸	۲۵/۶
۲۷۹/۰۵	۱/۲۵۵	۱/۰۱۳	۱۷۸	۲۵/۴
۲۸۴/۷۵	۱/۲۳۲	۱/۰۱۴	۱۸۰	۲۵/۷
۲۹۰/۹۵	۱/۲۰۴	۱/۰۱۵	۱۸۳	۲۶/۳

با توجه به خواص ترموفیزیکی هوا و هندسه هیت‌سینک با استفاده از روابط (۹) تا (۱۳) می‌توان مابقی پارامترهای هندسی و گرمایی مربوط به روابط (۸) را به دست آورد.

برای محاسبه قطر هیدرولیکی هیت‌سینک در سمت سرد ماژول ترموالکتریک مطابق شکل (۸) به محاسبه مقادیر  $A$  و  $P$  که همان مساحت و محیط دهانه ورودی برای حجم کنترل مورد نظر است، پرداخته می‌شود. که این مقادیر به ترتیب مطابق روابط (۲۶) و (۲۷) محاسبه شده‌اند.

$$A = \frac{11 \times 1.57 \times 0.57 \times 10^{-4}}{4} = 2.46 \times 10^{-4} \quad (26)$$

$$P = \frac{[(2 \times 1.57) + 0.57] \times 11 \times 10^{-2}}{4} = 0.102 \quad (27)$$



شکل (۸): ابعاد و اندازه هیت‌سینک خنک‌کننده

بنابراین مقدار قطر هیدرولیکی به صورت رابطه (۲۸) است.

$$D_H = \frac{4 \times 2.46 \times 10^{-4}}{0.102} = 9.65 \times 10^{-3} \quad (28)$$

خواص هوا در جدول (۶) نشان داده شده، که در یک دمای خاص که در اینجا مقدار ۳۰ °C و یا ۳۰۳/۱۵ K است، با استفاده از میان‌بایی مقادیر خواص در جدول (۶) در این دما به صورت جدول (۷) نشان داده شده است.

جدول (۷): خواص هوا در دمای ۳۰۳/۱۵ کلوین و فشار ۱ اتمسفر

T (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg.K)	$\mu \cdot 10^7$ (N.s/m <sup>2</sup> )	$k \cdot 10^3$ (W/m.K)
۳۰۳/۱۵	۱/۱۵۹	۱/۰۰۷	۱۸۶/۰۸	۲۶/۵

بنابراین مقدار عدد رینولدز در این دمای خاص به صورت



است. همچنین هزینه تعمیر و نگهداری چنین ژنراتورهایی بسیار کم است. علاوه بر آن ژنراتورهای ترموالکتریک بدون سروصدا و قطعه دوار هستند که باعث افزایش عمر مفید این ژنراتورها می شود. این ویژگی ها ژنراتورهای ترموالکتریک را از سایر ژنراتورها متمایز می سازد و همچنین استفاده از ژنراتورهای ترموالکتریک، به منظور تولید برق در بسیاری از شرایط می تواند یک روش مناسب باشد.

با توجه به اینکه هزینه خرید برق تجدیدپذیر از بازیافت تلفات در فرایندهای صنعتی ۲۹۰۰ ریال است، اگر روزانه ۲۰ ساعت از این ژنراتور ترموالکتریک طراحی شده استفاده شود، با توجه به اینکه ژنراتور طراحی شده با میانگین گیری از مقادیر نمودار شکل (۹) توانایی تولید ۴۲/۵ وات برق دارد، روزانه ۸۵۰ وات-ساعت برق تولید می کند. اگر از ۱۰ ژنراتور به این شکل استفاده شود، روزانه ۸/۵ کیلووات-ساعت برق تولید می شود. در جدول (۸) میزان تولید و صرفه جویی سالانه نشان داده شده است.

### فهرست علائم

$A$	مساحت ( $m^2$ )
$B$	ضخامت بین پره ها ( $m$ )
$C_p$	ظرفیت گرمایی ویژه ( $J/Kg.K$ )
$D$	قطر ( $m$ )
$f$	ضریب اصطکاک
$h$	ضریب انتقال حرارت جابه جایی ( $W/m^2.K$ )
$I$	جریان (آمپر)
$K$	ضریب انتقال گرمای رسانش ( $W/m.K$ )
$L_f$	طول هر پره ( $m$ )
$\dot{m}$	دبی ( $Kg/s$ )
$Nu_D$	عدد ناسلت
$n$	تعداد پره ها
$P$	توان خروجی ( $W$ )
$P_r$	عدد پراکتل
$Q$	گرمای ورودی یا خروجی ( $W$ )
$R_b$	مقاومت گرمایی پایه هیت سینک ( $W/K$ )
$R_i$	مقاومت داخلی (اهم)
$R_L$	مقاومت بار خارجی (اهم)
$Re_D$	عدد رینولدز
$r$	شعاع ( $m$ )
$T$	دما ( $K$ )
$TE$	ترموالکتریک
$TEG$	ژنراتور ترموالکتریک
$t_b$	ضخامت پایه هیت سینک ( $m$ )
$u_m$	سرعت سیال ( $m/s$ )
$W_f$	عرض هیت سینک ( $m$ )
$\alpha$	ضریب سیبک ( $V/K$ )
$\Delta T$	اختلاف دما ( $K$ )
$\rho$	چگالی ( $Kg/m^3$ )
$J$	ژول

جدول (۸): میزان صرفه جویی در انرژی سالانه

مقدار	مشخصه
۸/۵	متوسط توان تولیدی روزانه از ۱۰ ژنراتور با اشغال فضای ۳/۲۴ مترمربع (KWh)
۲۲۰	متوسط تعداد روزهای روشن بودن هیتر در سال (روز)
۲۹۰۰	قیمت خرید هر کیلووات ساعت برق از بازیافت تلفات در فرایندهای صنعتی (ریال)
۵/۴۲۳/۰۰۰	میزان صرفه جویی سالانه از دیدگاه ملی (ریال)

هزینه ساخت چنین ژنراتوری با ۹۰ ماژول ترموالکتریک (۱۰ عدد از ژنراتورهای مورد بررسی) در سال ۹۵ به صورت تقریبی ۶۰ میلیون ریال است. بازگشت این سرمایه در حدود ۱۱ سال است.

### ۴. نتیجه گیری

در این مقاله، در ابتدا مختصری درباره ژنراتورهای ترموالکتریک و استفاده از آن ها در صنعت توضیح داده شده است، سپس با مدل سازی دودکش و محاسبه پارامترهای مربوط به دود جاری در آن، یک مدل ژنراتور ترموالکتریک روی دودکش در این ایستگاه ها مدل سازی شده که در نمودار ارائه شده در شکل (۹) که مربوط به ژنراتور ترموالکتریک مدل سازی شده می باشد، نشان داده شده است. این ژنراتور که شامل ۹ ماژول ترموالکتریک است و تنها ۳۲۴ سانتی متر مربع فضا اشغال کرده، قابلیت تولید به صورت میانگین در حدود ۴۲/۵ وات توان الکتریکی دارد. بنابراین می توان از تعداد بیشتری ماژول نیز استفاده کرد، که البته بدیهی است که هزینه نهایی به نسبت افزایش تعداد ماژول ها افزایش می یابد.

همان طور که در بخش ۳ گفته شد، هزینه ساخت چنین ژنراتوری در سال ۹۵ در حدود ۶۰ میلیون ریال می باشد. بازگشت این سرمایه در حدود ۱۱ سال است که زمان زیادی برای جبران این هزینه در صورت فروش این برق تجدیدپذیر به اداره برق می باشد. اما این ژنراتور خواص ویژه ای از جمله سازگاری با محیط زیست و قابلیت استفاده در مکان هایی را دارد که دسترسی به برق محدود

کلونین	زیرنویسها	
K		
Kg	<i>b</i>	پایه
M	<i>c</i>	سطح سرد
Mm	<i>f</i>	پره
m <sup>2</sup>	<i>h</i>	سطح گرم
Ppm	<i>i</i>	داخلی
Psi	<i>L</i>	بار
S	<i>m</i>	متوسط
W	<i>o</i>	خارجی
°C		درجه سانتیگراد

## مراجع

- [۱] جعفری، حوری، نرخ رشد مصرف انرژی در ایران، همایش تقدیر از برگزیدگان چهارمین دوره جایزه ملی مدیریت انرژی (۱۸ دی) تهران: دانشگاه تهران ۱۳۹۷.
- [۲] محمدی، میثم، مهربان، مظفرعلی، رئیسی، افراسیاب، بهیود بازده تبدیل انرژی حالت جامد با استفاده از نانوساختارهای ترموالکتریک، نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، سال هشتم، شماره سوم، صفحه ۷۰-۸۱، ۱۳۹۷.
- [3] Bell, L. E., *Cooling, Heating, Generating Power, and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems*, Science, Vol. 321, No. 5895, pp. 1457-1461, 2008.
- [4] Hong, S. J., and Chun, B. S., *Microstructure and Thermoelectric Properties of Extruded n-Type 95% Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-5% Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> Alloy along Bar Length*, Materials Science and Engineering: A, Vol. 356, No. 1, pp. 34, 2003.
- [5] Hyun, D., Hwang, J., Oh, T., Shim, J. D., and Kolomoets N., *Electrical Properties of the 85% Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-15% Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> Thermoelectric Material Doped with SbI<sub>3</sub> and CuBr*, Journal of Physics and Chemistry of Solids, Vol. 59, No. 6-7, pp. 1039-1044, 1998.
- [6] Tang, X., Xie, W., Li, H., Zhao, W., Zhang, Q., and Niino, M., *Preparation and Thermoelectric Transport Properties of High-Performance p-Type Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> with Layered Nanostructure*, Applied physics letters, Vol. 90, No. 1, pp. 12102, 2007.
- [7] Ikoma, K., Munekiyo, M., Furuya, K., Kobayashi, M., Izumi, T., and Shinohara, K. *Thermoelectric Module and Generator for Gasoline Engine Vehicles*, in Proceeding of, IEEE, pp. 464-467, 1998.
- [8] Yazawa, K., Koh, Y. R., and Shakouri, A. *Optimization of Thermoelectric Topping Combined Steam Turbine Cycles for Energy Economy*, Applied Energy, Vol. 109, pp. 1-9, 2013.
- [9] Remeli, M. F., Tan, L., Date, A., Singh, B., and Akbarzadeh, A., *Simultaneous Power Generation and Heat Recovery Using a Heat Pipe Assisted Thermoelectric Generator System*, Energy Conversion and Management, Vol. 91, pp. 110-119, 2015.
- [10] Park, J. D., Lee, H., and Bond, M., *Uninterrupted Thermoelectric Energy Harvesting Using Temperature-Sensor-Based Maximum Power Point Tracking System*, Energy Conversion and Management, Vol. 86, pp. 233-240, 2014.
- [11] Su, C., Wang, W., Liu, X., and Deng, Y., *Simulation and Experimental Study on Thermal Optimization of the Heat Exchanger for Automotive Exhaust-Based Thermoelectric Generators*, Case Studies in Thermal Engineering, Vol. 4, pp. 85-91, 2014.
- [12] Arnguren, P., Araiz, M., Astrain, D., and Martinez, A., *Thermoelectric Generator for Waste Heat Harvesting: a Computational and Experimental Approach*, Energy Convers. Manage. Vol. 148, pp. 680-691, 2017.
- [13] Lv, S., He, W., Jiang, Q., Hu, Z., Liu X., and Chen, H., *Study of Different Heat Exchange Technologies Influence on the Performance of Thermoelectric Generators*, Energy convers. Manage. Vol. 156, pp. 167-177, 2018.
- [14] Hassan, J., Khaled, M., and Lemenad, T, *Effect of Generator Load on Hybrid Heat Recovery System*, Case Studies in Thermal Engineering, vol. 13, 2019.
- [15] Bergman, T. L., Incropera, F. P., DeWitt, D. P., and Lavine, A. S., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, 2011.
- [16] Angrist, S. W., *Direct Energy Conversion*, 1976.
- [17] Prstic, S., Iyengar, M., and Cohen, A., *Bypass Effect in High Performance Heat Sinks*, in Proceeding of, Begel House Inc., pp. 34-37, 2000.
- [18] He, W., Zhang, G., Li, G., and Ji, J., *Analysis and Discussion on the Impact of Non-Uniform Input Heat Flux on Thermoelectric Generator Array*, Energy Conversion and Management, Vol. 98, pp. 268-274, 2015.
- [19] Li, G., and You, S., *New Multi-Function Integrated Ventilation and Air Conditioning System for City Rail Transit*, in Proceeding of, IEEE, pp. 6112-6115, 2011.
- [20] Mohajerani, S., Sokht Anamdani, R., Mohtashami, M., and Ebrahimi, M., *Investigation the Effects of Cultivation Season and Genotypes on Some of Agronomic Parameters of Rape Plant with Delayed Cultivation in Arak Climate Condition (Markazi province)*, Cumhuriyet Science Journal, Vol. 36, No. 3, pp. 621-635, 2015.
- [21] Peacock, R. D., Jones, W., Reneke, P., and Forney, G., *CFast-Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (version 6) user's guide*: Citeseer, 2013.