بهینه‌سازی سیستم‌های ژنراتور ترموالکتریکی چند مرحله‌ای به روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات

حامد عالمی[۱]، سیروس آقانجفی[۲]

تاریخ دریافت مقاله:
۹۱/۵/۸
تاریخ پذیرش مقاله:
۹۱/۹/۲۷

چکیده:

هدف این مقاله بهینه‌سازی سیستم‌های ژنراتور ترموالکتریک چندمرحله‌ای و تحلیل نتایج بدست آمده است. ابتدا حداکثر بازده و توان تولید شده خروجی از سیستم در سیستم‌های ترموالکتریک چندمرحله‌ای که مراحل آن، هم به صورت اتصال سری و هم به صورت اتصال موازی الکتریکی به هم مرتبط شده‌اند، محاسبه شده و کارآیی این سیستم‌ها با یکدیگر مقایسه و اولویت استفاده از هر یک از سیستم‌های بررسی شده در دمای کارکردش تعیین می‌شود. همچنین حساسیت متغیرهای بهینه‌سازی و اثر دمای سطوح بر روی بازده بهینه تعیین می‌شود. در این پژوهش، برخلاف برخی پژوهش‌های انجام شده که از خواص مواد ترموالکتریک در دمای میانگین دمای سطح گرم و سرد کل سیستم استفاده می‌شود، از دمای میانگین دماهای کارکرد هر مرحله از سیستم استفاده می‌شود. روشی که ما برای بهینه‌سازی سیستم مورد استفاده قرار دادیم، روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO) است که روشی قدرتمند و سریع در حل مسائل بخصوص مسائل پیوسته می‌باشد.

کلمات کلیدی:
سیستم ژنراتور ترموالکتریک، چندمرحله‌ای، بهینه‌سازی، بازده، توان تولید شده

۱) کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، تبدیل انرژی (نویسنده مسئول) hamed.alemi@gmail.com
۲) دکترای مهندسی مکانیک، دانشیار دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی aghanajafi@kntu.ac.ir

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

مقدمه

امروزه یکی از مهمترین مشغولیات فکری دانشمندان، نگاه به آینده و یافتن راه‌کارهای تأمین انرژی مورد نیاز در آینده‌های نه چندان دور است. طبق برآوردهای اخیر، سوخت‌های فسیلی طی حدوداً هشتاد تا صد سال آینده تمام می‌شوند و شاید خیلی زودتر از این زمان، بشر باید به استفاده از دیگر منابع انرژی روی آورد.

استفاده از فناوری‌های تبدیل انرژی انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر باد و خورشید امروزه بسیار مورد توجه است و بهبود عملکرد آنها مورد توجه دانشمندان است [۱۸]. یکی از فناوری‌های مورد توجه در این زمینه، استفاده از سیستم‌های تبدیل انرژی با حالت جامد است [۱۹]. این وسائل با هزینه تعمیرات و نگهداری بسیار پایین، دارای عملکردی پاک و بدون ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی است.

وسائل ترموالکتریک عموماً به دو دسته عمده کولرها [۵، ۶، ۲۰، ۲۲] و ژنراتورها [۲، ۳، ۴، ۱۶] تقسیم می‌شوند. ژنراتورها بر اساس اثر سیبِک و کولرها بر اساس اثر پِلتیر کار می‌کنند و کارکرد آنها بدین صورت است که ژنراتورها در حضور گرادیان دمایی، الکتریسیته و کولرها در حضور میدان الکتریکی، گرادیان دمایی را در دو سر خود ایجاد می‌کنند. اما در حال حاضر، محدودیت موجود در راه بکارگیری این سیستم‌ها، بازده کم آنهاست، به طوری که بازده ژنراتورها چیزی در حدود ۵-۶ درصد است [۱] و ضریب عملکرد[۱] کولرها چیزی در حدود ۱ است در شرایطی که در سیستم‌های معمول، ضریب عملکرد حدوداً برابر ۴ است [۹].

خواص مواد ترموالکتریک همانند رسانندگی گرمایی، مقاومت الکتریکی، ضریب سیبک و پلیتر خود وابسته به دما هستند، که خود زمینه‌ای برای پژوهش بر روی مواد ترموالکتریک و دمای بهینه کارکرد آنهاست. یاماشیتا، اثر وابستگی خطی خواص ترموالکتریک با دما را بر بازده تبدیل انرژی سیستم‌های ترموالکتریک بررسی کرده است [۲۵]. ییلباس و ساهین مقدار ضریب لاغری بهینه برای بیشینه کردن بازده را به دست آورده و برای آن روابطی ارائه کردند [۲۶]. علاوه بر تحقیقات بر روی بهبود خواص مواد ترموالکتریک، تحقیقاتی نیز بر روی نحوه آرایش فیزیکی سیستم‌های ترموالکتریک برای بهبود عملکرد آنها انجام شده است. ژائووی لیانگ و همکارانش با تحلیل تئوریک و آزمایش تجربی، بر روی طرحی از سیستم ژنراتور ترموالکتریکی مطالعه کرده‌اند که شامل مجموعه‌ای از سیستم‌های منفرد ترموالکتریکی است که به صورت موازی آرایش داده شده‌اند تا بازده و توان تولیدی از سیستم را افزایش دهند [۱۳]. آنها همچنین بر روی سیستم‌های سری نیز کار کرده‌اند و بازده و توان خروجی را در این سیستم‌ها به دست آورده‌اند [۱۴]. ژانگ نیز بر روی سیستم‌های سری و موازی به صورت عددی و آزمایشگاهی تحقیق کرده است [۲۹].

---

۱) COP

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

اما شاخه‌ای از تحقیقات به این سو متمایل شد که با وجود محدودیت بازده، از سیستم‌های ترموالکتریک در ترکیب با سیستم‌های دیگر استفاده شود. سیائو و همکارانش تحقیقاتی را بر روی نصب سیستم ترموالکتریک بر روی موتور خودرو انجام دادند و به این مهم دست یافتند که نصب سیستم ترموالکتریک بر روی اگزوز دارای مزیت بیشتری نسبت به نصب آن بر روی رادیاتور است [۱۱]. در زمینه خودرو، مقالات دیگری نیز برای تبدیل انرژی حرارتی خروجی از اگزوز به الکتریسیته به چاپ رسیده است که قابل توجه هستند [۱۲، ۱۷، ۲۳، ۲۷، ۲۸]. این اواخر موردی که به نظر محققان جذاب به نظر می‌رسد، کارکرد سیستم ترموالکتریک با انرژی خورشیدی است. لی و همکارانش یک نمونه آزمایشی از سیستم ترموالکتریک خورشیدی تمرکزی ارائه کردند که در آن بازده تبدیل انرژی بیشتری حاصل می‌شود [۱۵]. آنها با در نظر گرفتن خواص مواد ترموالکتریک بر حسب دما در قرص ماده ترموالکتریک و محاسبات دقیق بر حسب المان محدود، نشان دادند که بهترین ماده برای سیستم ترموالکتریک خورشیدی تمرکزی و با توجه به شرایط دمایی کارکرد آن، Bi_2Te_3 یا به عبارت دیگر تلوراید بیسموت است. در زمینه انرژی خورشیدی، وی هی و همکاران، طرح و آنالیز یک واحد ژنراتور ترموالکتریکی در لوله گرمایی را ارائه کردند [۲۱]. آنها با ترکیب یک لوله گرمایی که انرژی خورشیدی را جذب می‌کند، با یک سیستم ترموالکتریک که لوله گرمایی شار حرارتی زیادی را برای آن فراهم می‌کند، اقدام به طراحی سیستم تبدیل انرژی SHP-TEG کردند و محاسبات تئوریک مربوطه را ارائه کردند.

در تحقیق حاضر، برخلاف بسیاری از کارهای ارائه شده، خواص قرص‌های ترموالکتریک، در هر مرحله به صورت جداگانه استخراج شده که این اقدام سبب به وجود آمدن شروط ترمودینامیکی برای حل مسأله خواهد شد که بالطبع دارای پیچیدگی‌های خاص خود می‌باشد. در بسیاری از تحقیق‌های ارائه شده توسط دانشمندان فعال در این عرصه، خواص مواد ترموالکتریک در دمای سطوح گرم و سردی که کل سیستم ژنراتور ترموالکتریک در میان آن کار می‌کند، استخراج شده است و در نتیجه، از درگیری با شروط ترمودینامیکی خودداری کردند که در نتیجه، نتایج بدست آمده دارای خطا بویژه در اختلاف دماهای زیاد می‌باشد. همچنین در این تحقیق ایده استفاده از سیستم‌های سه و چهارمرحله‌ای مورد بررسی قرار گرفت و بعلاوه، دسته‌بندی جامعی در رابطه با مزیت کاربردی هر یک از سیستم‌های ترموالکتریکی مورد بررسی در این تحقیق ارائه شد که به این نحو گفته شده، توسط محققان دیگر ارائه نشده است.

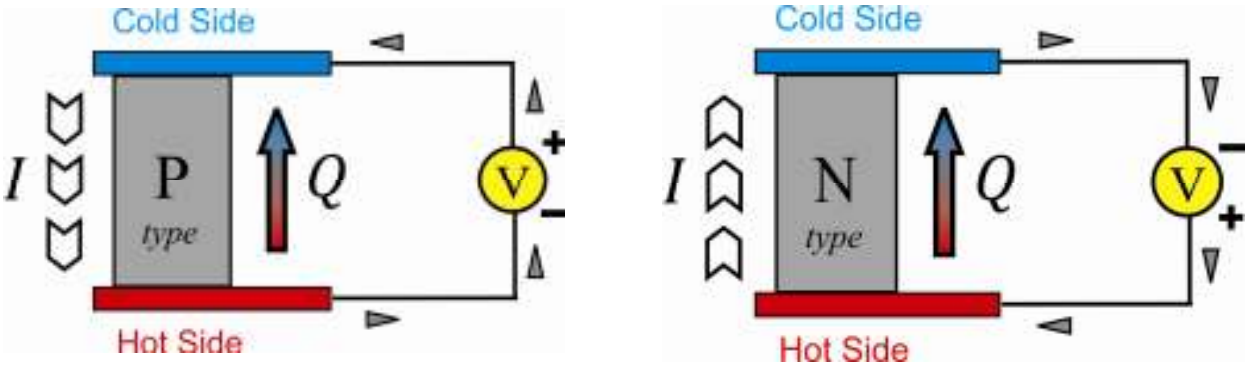
در این مقاله، ابتدا توضیحاتی مختصر در رابطه با پدیده ترموالکتریک و همچنین روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات ارائه می‌شود. در ادامه، سیستم‌های چند مرحله‌ای سری و موازی به صورت فیزیکی و الکتریکی توصیف شده و نحوه به دست آوردن روابط حاکم شرح داده می‌شود تا بدین وسیله، روابط مربوط به بازده و توان تولید شده، به عنوان توابع هدف این تحقیق به دست آید. در بخش نتایج، ابتدا نتایج بدست آمده ارائه می‌شود و سپس این نتایج مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت، میزان تأثیرات متغیرهای بهینه‌سازی بر بازده بهینه نیز تعیین می‌شود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

پدیده ترموالکتریک

موادی که به مواد ترموالکتریک مشهور هستند، عموماً مواد نیمه‌هادی هستند. نیمه‌هادی‌ها گروهی از مواد هستند که از نظر توانایی هدایت الکتریکی، بین مواد هادی الکتریکی و مواد عایق الکتریکی قرار دارند. هدایت الکتریکی نیمه‌هادی‌ها تحت تأثیر عواملی چون تحریک نوری، افزایش دما و تغییر میزان ناخالصی به نحو قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌یابد. این خاصیت مهم، دلیل بکارگیری انبوه قطعات نیمه‌هادی در سیستم‌های الکترونیکی است. خاصیتی از مواد ترموالکتریک که سبب بکارگیری این مواد در سیستم‌های تبدیل انرژی می‌شود، این است که اگر این مواد در یک میدان دمایی قرار گیرند، یعنی دو سر این مواد در میان یک اختلاف دما واقع شود، در درون این مواد، جریان الکتریکی تولید می‌شود (ژنراتور)، و بالعکس، اگر این مواد در یک میدان الکتریکی واقع شوند، یعنی در درون آنها جریان الکتریکی جریان یابد، در این مواد اختلاف دما ایجاد می‌شود و در نتیجه، انتقال حرارت در آنها رخ می‌دهد (کولر و هیتر). ما در این تحقیق تنها به سیستم‌های ژنراتور ترموالکتریک می‌پردازیم.

مواد ترموالکتریک به دو دسته نوع منفی (N)[۱] و نوع مثبت (P)[۲] تقسیم می‌شوند. مواد نوع N وقتی در یک میدان دمایی قرار می‌گیرند، جهت جریان الکتریکی تولید شده در درونشان، هم‌جهت با جریان انتقال گرماست (شکل۱ (الف))، اما در مواد نوع P جهت جریان الکتریکی تولید شده، بر خلاف جهت انتقال گرماست (شکل۱(ب)).



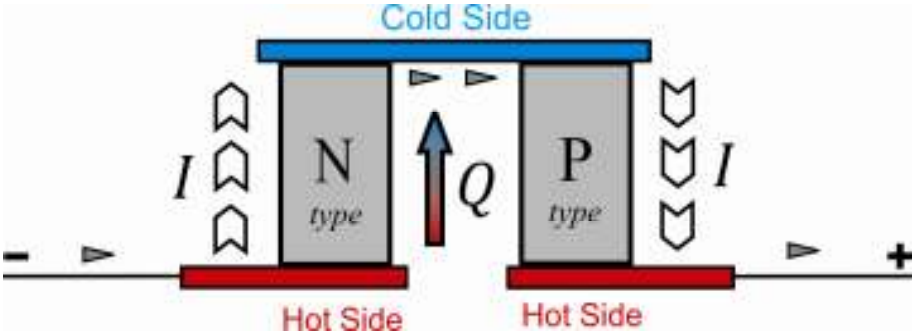
(ب) (الف)

شکل ۱) نحوه عملکرد قرص‌های ترموالکتریک نوع N و P

۱) Negative type
۲) Positive type

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

از رفتار مواد نوع N و P در سیستم‌های ترموالکتریک برای تولید متوالی جریان الکتریکی استفاده می‌شود (شکل۲). همانطور که در شکل (۲) قابل مشاهده است، شدت جریان جاری در قرص نوع N به صورت سری در قرص نوع P نیز جاری است و همچنین به دلیل اتصال سری قرص‌های ترموالکتریک، شدت جریان جاری در تمامی قرص‌ها با هم برابر است، ولی در مقابل، ولتاژ الکتریکی تولید شده در کل سیستم، برابر با ولتاژ تولید شده در مجموع قرص‌های ترموالکتریک است. در شکل (۲)، دو قرص ترموالکتریک، یعنی یک زوج ترموالکتریکی به کار گرفته شده است).



شکل۲) نحوه عملکرد یک زوج ترموالکتریک شامل قرص‌های ترموالکتریک نوع N و P

روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO) [۱]

روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO)، روشی جدید در زمینه حل مسائل بهینه‌سازی است که توسط کندی و ابرهارت اولین بار در سال ۱۹۹۵ ارائه شد [۸]. در این الگوریتم، تعدادی از موجودات وجود دارند که آنها را ذرّه می‌نامیم و به صورت هوشمند در فضای جستجوی تابعی که قصد بهینه‌کردن مقدار آن را داریم، پخش شده‌اند. هر ذره مقدار تابع هدف را در موقعیتی از فضای جستجو که در آن قرار گرفته است، محاسبه می‌کند. سپس با استفاده از ترکیب اطلاعات محل کنونی خود و بهترین محلی که قبلاً در آن بوده است و همچنین اطلاعات یک یا چند ذرّه از بهترین ذرات موجود در جمع، جهتی را برای حرکت انتخاب می‌کند تا بتواند ضمن جستجوی دامنه تابع هدف، به مقدار بهینه تابع هدف نزدیک و در نهایت مقدار بهینه تابع هدف را بیابد. این الگوریتم از یک سری تعاملات مرتبه پایین (بدون حضور مشتقات تابع هدف) برای نیل به نتیجه استفاده می‌کند که این یکی از مهمترین مزیت‌های این روش بر روش‌های دیگر بهینه‌سازی است سبب سرعت بیشتر همگرایی الگوریتم می‌شود. در این پژوهش، از تکنیک تخطی۲ برای ارضای شروط و قیود مسأله استفاده شده است. پارامترهای وزنی

۱) Particle Swarm Optimization

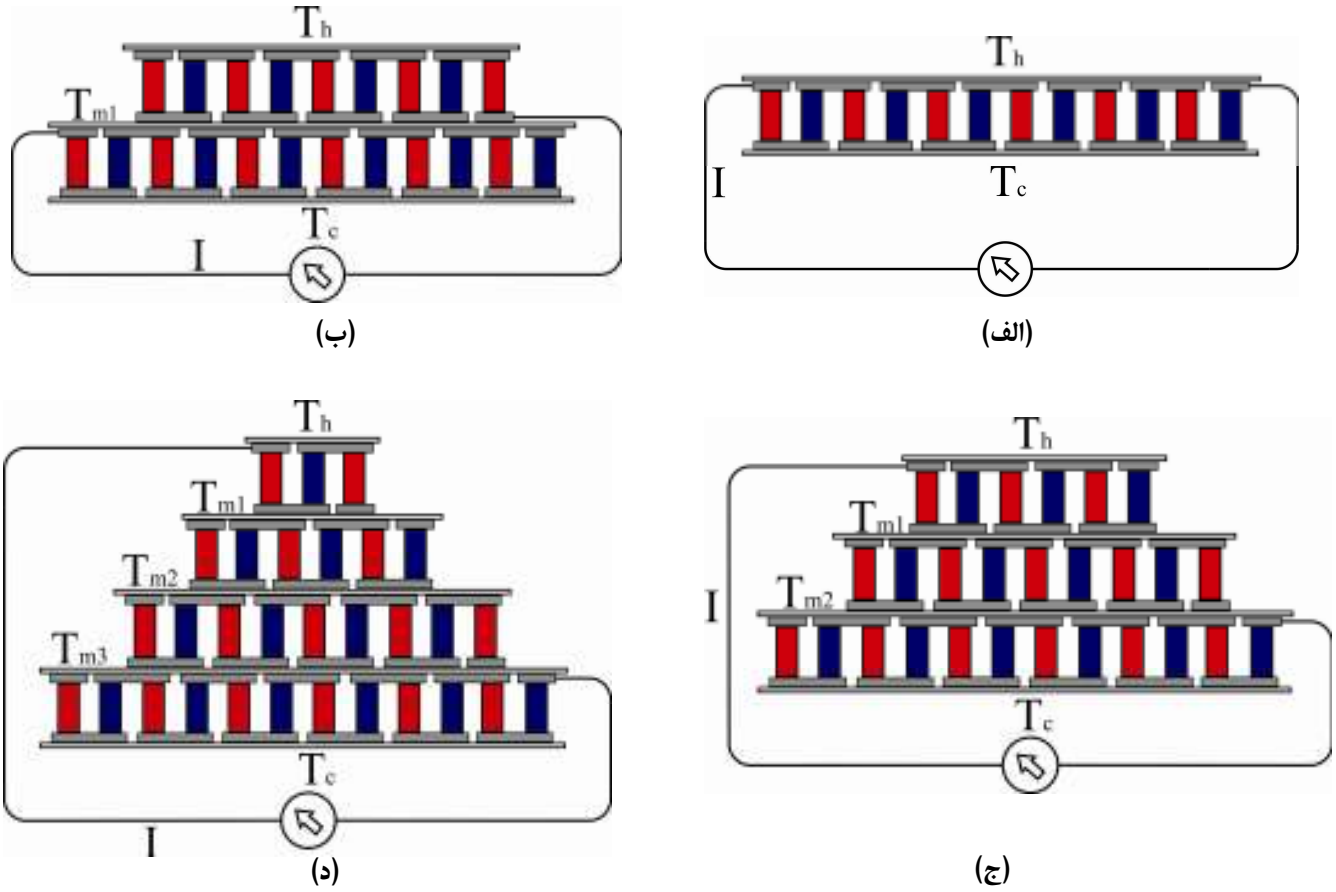
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

مورد استفاده در الگوریتم PSO، یعنی ضریب اینرسی و ضرایب شتاب، از تحقیقات کِلِرک و کِنِدی گرفتـه شـده اسـت [۷]. در روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات، حرکت ذرات از جمع سه جزء جستجوی سراسری، جستجوی محلی و مسافت طی شـده قبلـی که هر کدام در ضریب وزنی معینی ضرب شده‌اند، حاصل می‌شود. در اینجا با تغییر دادن و تنظیم کردن مقادیر ضـرایب وزنـی، می‌توان نحوه جستجوی ذرات را رهبری کرد اما عموماً بهتر است که ابتدا جستجوی سراسـری وسـیعی در دامنـه تـابع هـدف انجام شود و سپس در اطراف بهترین نتیجه، جستجوی محلی صورت گیـرد. روش بهینـه‌سـازی اجتمـاع ذرات دارای سـرعت همگرایی بالایی است و در توابع پیوسته، در میان تمامی روش‌های بهینه‌سازی، دارای بهترین نتیجه می‌باشد.

توصیف مدل و الگوریتم PSO

- **توصیف شکلی و ساختاری مدل**

مدل ساختاری سیستم‌های ژنراتور ترموالکتریک سری در شکل ۳ آمده است.

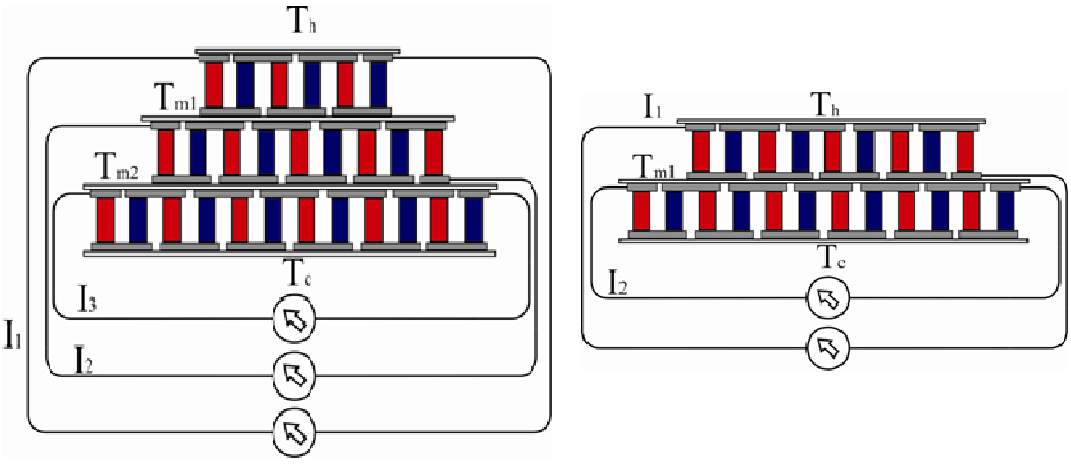


[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

شکل ۳) سیستم ژنراتور ترموالکتریک (الف) تک مرحله‌ای، (ب) دومرحله‌ای سری، (ج) سه‌مرحله‌ای سری و (د) چهار مرحله‌ای سری

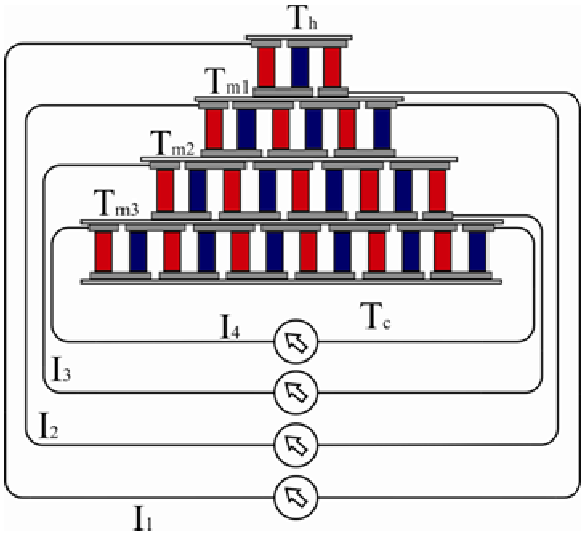
سیستم دو مرحله‌ای سری (شکل ۳ (ب))، تشکیل شده است از دو سیستم تک‌مرحله‌ای (شکل ۳ (الف)) که بر روی هم قرار گرفته‌اند و به وسیله سیم با هم به صورت سری متصل شده‌اند. به همین ترتیب که در مورد سیستم ترموالکتریک دومرحله‌ای بیان شد، سیستم‌های ترموالکتریک سه و چهار مرحله‌ای سری نیز آرایش فیزیکی می‌شوند، شکل‌های ۳ (ج) و (د) این مطلب را نشان می‌دهد.

مدل ساختاری سیستم‌های ژنراتور ترموالکتریک موازی در شکل (۴) آمده است.



(ب) (الف)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



(ج)

شکل ٤) سیستم ترموالکتریک (الف) دومرحله‌ای موازی، (ب) سه‌مرحله‌ای موازی و (ج) چهارمرحله‌ای موازی

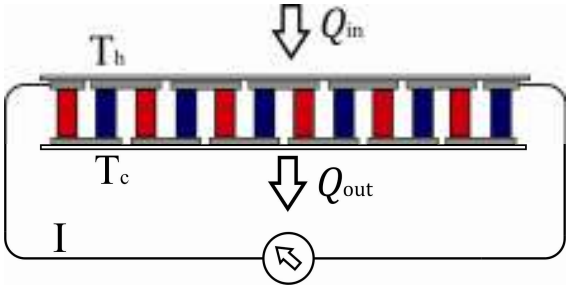
سیستم ترموالکتریکی چندمرحله‌ای موازی همان سیستم ترموالکتریکی سری است، با این تفاوت که در سیستم‌های سری، از هر مرحله از سیستم، شدت جریان تولید شده به صورت مجزا وارد مدار می‌شود.

- **توصیف ریاضی**

این تحقیق بر آن است تا با استفاده از روابط حاکم بر سیستم تک‌مرحله‌ای، روابط حاکم بر سیستم‌های چندمرحله‌ای اعم از سیستم‌های چندمرحله‌ای با اتصال سری و موازی الکتریکی را به دست آورده، روابط بازده و توان تولید شده هر سیستم را به عنوان تابع هدف و با توجه به متغیرهای بهینه‌سازی مربوطه، بهینه کرده و نسبت به تأثیر نحوه آرایش سیستم، چه به لحاظ فیزیکی و چه به لحاظ الکتریکی نتیجه‌گیری نماید.

با توجه به شکل ۵، گرمای ورودی به سیستم، گرمای خروجی از سیستم، کار انجام شده و بازده سیستم، مطابق قانون دوم ترمودینامیک برای سیستم ترموالکتریک تک‌مرحله‌ای به صورت روابط (۱) تا (۴) به دست می‌آید [۱۰].

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



شکل ۵) عملکرد سیستم ترموالکتریک تک‌مرحله‌ای

$$Q_{in} = N \times \left(ST_h I - \frac{1}{2} R_{in} I^2 + K(T_h - T_c \right) \quad (۱)$$

$$Q_{out} = N \times \left(ST_c I + \frac{1}{2} R_{in} I^2 + K(T_h - T_c \right) \quad (۲)$$

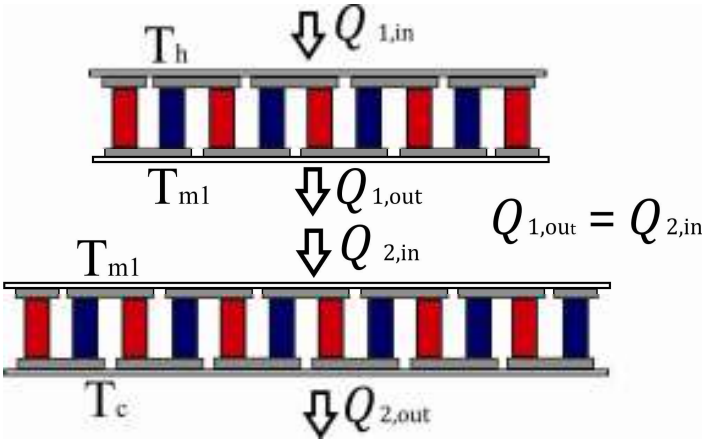
$$P = Q_{in} - Q_{out} = N \times \left(SI(T_h - T_c) - R_{in} \right. \quad (۳)$$

$$\eta = \frac{P}{Q_{in}} = \frac{N \times \left(SI(T_h - T_c) - R_{in} I^2 \right)}{N \times \left(ST_h I - \frac{1}{2} R_{in} I^2 + K(T_h - T \right.} \quad (۴)$$

در روابط بالا، P توان تولید شده الکتریکی (وات)، Q_{in} نرخ انتقال گرمای ورودی (وات)، Q_{out} نرخ انتقال گرمای خروجی (وات)، S ضریب سیبِک ماده ترموالکتریک (V/K)، I شدت جریان الکتریکی جاری در ماده ترموالکتریک (آمپر)، R_{in} مقاومت الکتریکی ماده ترموالکتریک (Ω)،K ضریب رسانش گرمایی ماده ترموالکتریک (W/m.k) و N تعداد زوج‌های ترموالکتریک است.

برای سیستم‌های چندمرحله‌ای، روابط (۱) تا (۲) برای هر مرحله از سیستم اعمال می‌شود و با در نظر داشتن شرط ترمودینامیکی تساوی گرمای ورودی و خروجی در هر مرحله، در نهایت روابط (۳) و (۴) برای کل سیستم اعمال می‌شود. برای نمونه، سیستم دو مرحله‌ای مطابق شکل (۶) تحلیل می‌شود. همان طور که در شکل (۶) مشخص است، با شرط ترمودینامیکی تساوی گرمای خروجی از مرحله اول با گرمای ورودی به مرحله دوم، مرحله اول و دوم با هم مرتبط می‌شوند و تشکیل یک سیستم دومرحله‌ای را می‌دهند. تعداد زوج‌های ترموالکتریک مورد استفاده در این تحقیق برای تمامی سیستم‌ها، ۱۰۰ عدد می‌باشد که بر این مبنا باید آرایش فیزیکی و الکتریکی بهینه به دست آید.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



شکل ٦) گرماهای ورودی و خروجی برای هر مرحله از سیستم ترموالکتریک دومرحله‌ای و شرط ترمودینامیکی مربوطه

با توجه به شکل (۶) و در نظر داشتن شکل ۴ (الف)، روابط حاکم بر سیستم دو مرحله‌ای موازی به صورت روابط (۵) تا (۱۰) در می‌آید:

$$Q_{1,in} = N_1 \times \left(S_1 T_h I_1 - \frac{1}{2} R_1 I_1^{\,2} + K_1 (T_h - T_{m1}\right. \quad (۵)$$

$$Q_{1,out} = N_1 \times \left(S_1 T_{m1} I_1 + \frac{1}{2} R_1 I_1^{\,2} + K_1 (T_h - T_{m1}\right. \quad (۶)$$

$$Q_{2,in} = N_2 \times \left(S_2 T_{m1} I_2 - \frac{1}{2} R_2 I_2^{\,2} + K_2 (T_{m1} - T\right. \quad (۷)$$

$$Q_{2,out} = N_2 \times \left(S_2 T_{m2} I_2 + \frac{1}{2} R_2 I_2^{\,2} + K_2 (T_{m1} - T_c\right. \quad (۸)$$

$$P = Q_{1,in} - Q_{2,out} \quad (۹)$$

$$\eta = \frac{P}{Q_{1,in}} \quad (۱۰)$$

اگر در روابط (۵) تا (۸) مقادیر I_1 و I_2 را با هم برابر قرار دهیم، یا به عبارتی شدت جریان را I در نظر بگیریم (شکل-۳ (ب))، روابط (۵) تا (۸) به روابط سیستم ژنراتور ترموالکتریک سری تبدیل می‌شود.

در جدول (۱) تعداد متغیرهای بهینه‌سازی و تعداد شروط ترمودینامیکی متناظر با هر سیستم می‌آید.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

جدول ۱) متغیرهای بهینه‌سازی و شروط ترمودینامیکی سیستم‌ها

آرایش فیزیکی	آرایش الکتریکی	متغیرهای بهینه‌سازی	شروط ترمودینامیکی
تک‌مرحله‌ای	–	I	–
دومرحله‌ای	سری	I, T_m, N_1, N_2	$Q_{1,out} = Q_{2,in}$
	موازی	I_1, I_2, T_m, N_1, N_2	
سه‌مرحله‌ای	سری	$I, T_{m1}, T_{m2}, N_1, N_2, N_3$	$Q_{1,out} = Q_{2,in}, Q_{2,out} = Q_{3,in}$
	موازی	$I_1, I_2, I_3, T_{m1}, T_{m2}, N_1, N_2, N_3$	
چهارمرحله‌ای	سری	$I, T_{m1}, T_{m2}, T_{m3}, N_1, N_2, N_3, N_4$	$Q_{1,out} = Q_{2,in}, Q_{2,out} = Q_{3,in}$ $Q_{3,out} = Q_{4,in}$
	موازی	$I_1, I_2, I_3, I_4, T_{m1}, T_{m2}, T_{m3}, N_1, N_2, N_3, N_4$	

خواص ماده ترموالکتریک تلوراید–بیسموت (Bi_2Te_3) ، یعنی S ،R و K، بر حسب دمایی که ما بین آن کار می‌کند در مرجع [۲۴] آمده است. در مقاله حاضر مقادیر S ، R و K برای هر مرحله از سیستم و با توجه به دمایی که میان آن کار می‌کند محاسبه و در روابط مربوطه برای بهینه‌سازی سیستم‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. ضریب لاغری قرص‌های ترموالکتریک که بیان کننده مساحت سطح مقطع یک قرص ترموالکتریک تقسیم بر محیط آن است، $G = 5 \times 10^{-3}$ (m) در نظر گرفته شده است، که در روابط مرجع [۲۴] مورد نیاز است.

همانطور که گفته شد، رابطه (۱۱) به عنوان قید برای تعداد زوج‌های ترموالکتریک برای هر سیستم در نظر گرفته شده است، که به شروط حل مسأله در جدول (۱) اضافه می‌شود.

$$\sum_{i=1}^{j=Number\ of\ stages} N_i = 100 \qquad (11)$$

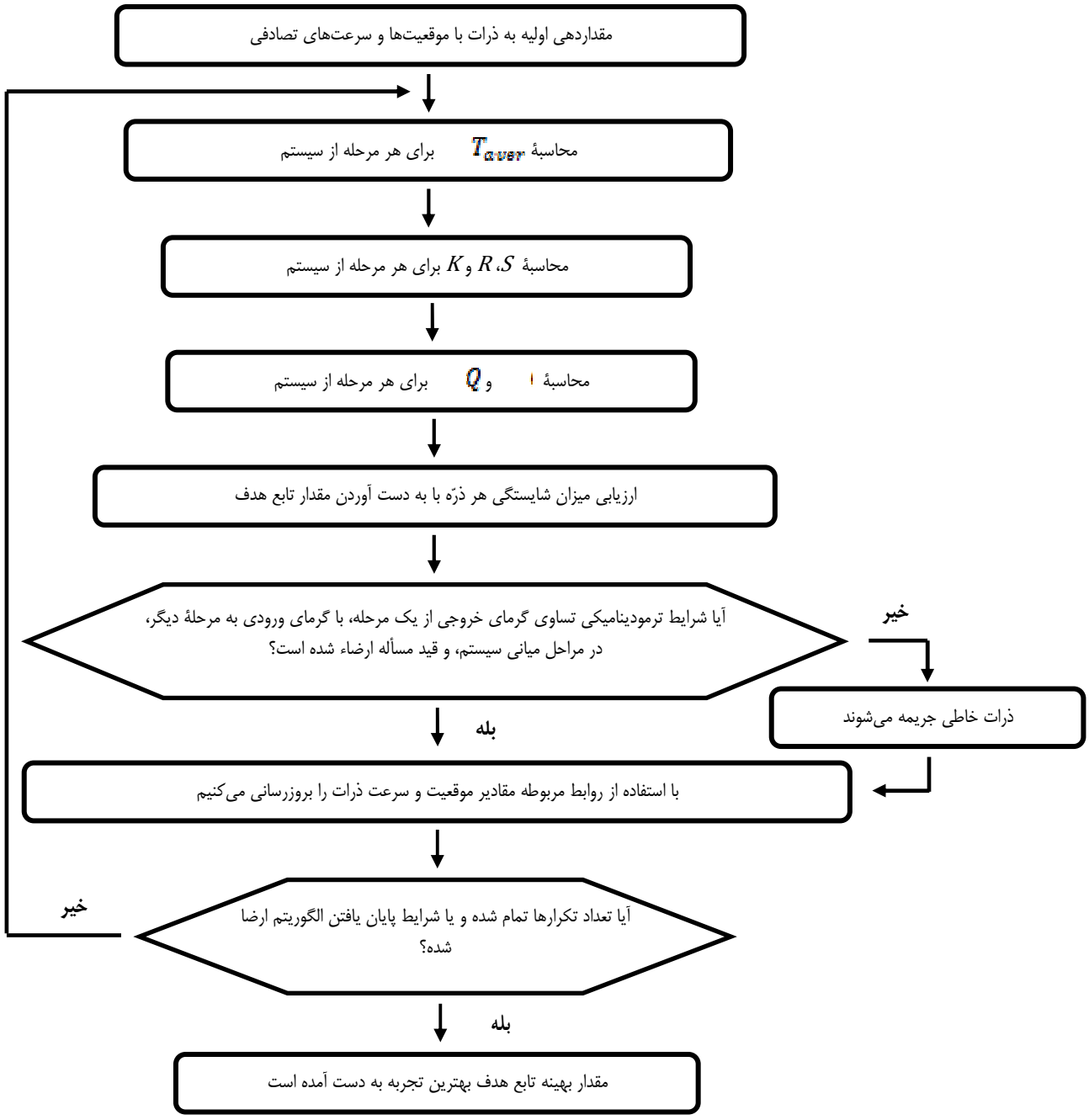
- **نمودار جریانی الگوریتم روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات**

عملکرد روش اجتماع ذرات و نحوه استفاده الگوریتم از ذرات و مقادیر مختصه آنها در نمودار جریانی شکل (۳) با روند مشخص شده نشان داده شده است. ابتدا تعداد مشخصی ذره که ظرفیت پذیرش متغیر به تعداد متغیرهای بهینه‌سازی سیستم را دارند، در الگوریتم PSO تولید می‌شوند. برای هر ذره و برای هر مرحله از سیستم، $T_{average}$ مورد محاسبه قرار می‌گیرد که عبارت است از میانگین دمایی که آن مرحله از سیستم در آن بین کار می‌کند. بعد از محاسبه دمای میانگین،

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

برای هر ذره و با استفاده از مرجع [۲۴]، خواص ماده ترموالکتریک استخراج می‌شود. سپس با استفاده از روابط (۱) و (۲)، برای هر مرحله از سیستم، نرخ انتقال گرمای ورودی و خروجی برای هر ذره مورد محاسبه قرار می‌گیرد. در مرحله بعد، هر ذره مقادیر متغیرهایی را که در خود ذخیره کرده در اختیار تابع هدف تعریف شده گذارده و مقدار تابع هدف را محاسبه می‌کند (ارزیابی شایستگی). در قدم بعد، نوبت به بررسی ارضا شدن شروط ترمودینامیکی جدول (۱) و قید رابطه (۱۱) می‌رسد. اگر شرط یا شروط توسط ذره ارضاء نشده باشد، الگوریتم از تکنیک تخطی استفاده می‌کند که شیوه‌ای برای نزدیک کردن ذرات خاطی به ارضای شروط مسأله است. در گام بعد، ذرات با استفاده از روابط مربوط به الگوریتم PSO، موقعیت جدیدی را اختیار می‌کنند، یعنی متغیرهای بهینه‌سازیی را که به خود اختصاص داده‌اند با استفاده از روابطی هوشمند تغییر می‌دهند و هر ذره به موقعیت جدید خود منتقل می‌شود. اگر شرط اتمام حلقه ارضاء شده باشد، بهترین نتیجه‌ای که تاکنون به دست آمده است، به عنوان نتیجه بهینه‌سازی تابع هدف شناخته می‌شود و در غیر اینصورت، به مرحله محاسبه T_{aver} بازمی‌گردیم و مراحل را تا حصول به نتیجه ادامه می‌دهیم. الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات، توسط زبان برنامه-نویسی MATLAB برای تحقیق حاضر مورد استفاده قرار گرفته است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



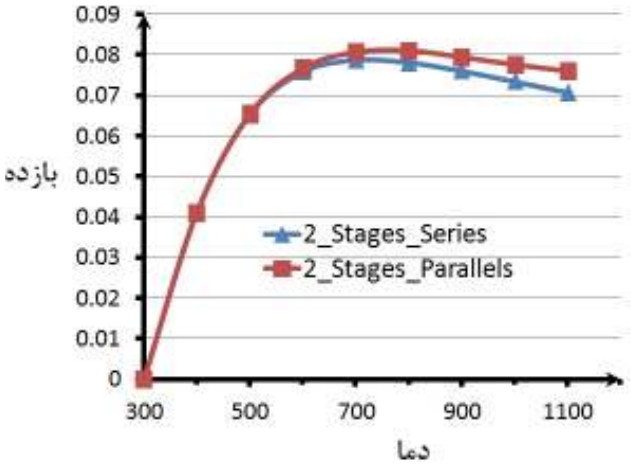
شکل ۷) نمودار جریانی روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

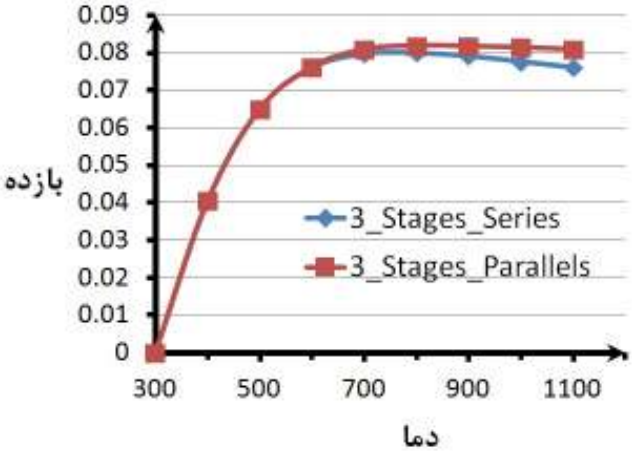
نتایج و بحث و بررسی

روابط ریاضی ذکر شده در بخش مدل ریاضی، با شروط و قید ذکر شده، به وسیله روش بهینه‌سازی PSO بهینه شده و مقادیر توابع هدف مورد نظر و متغیرهای مستقل مربوط به آن مقادیر توابع هدف به دست آمد. اکنون مقایسه‌ای میان نتایج سیستم‌های ترموالکتریک سری و موازی داریم.

- **بهینه‌سازی بازده سیستم**

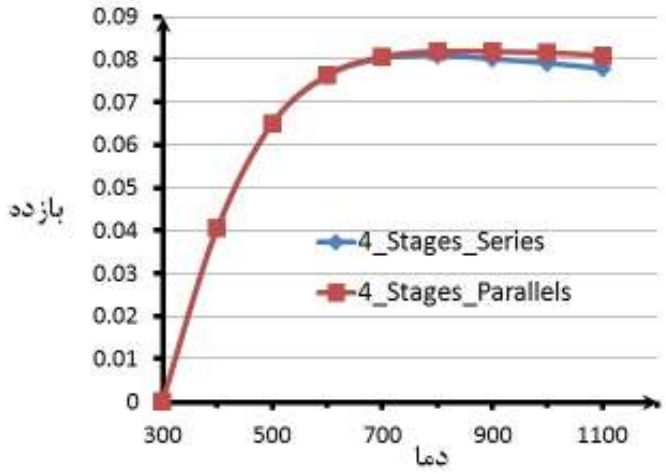


شکل ۸) نمودار بازده بر حسب دمای سطح گرم در سیستم‌های ژنراتور ترموالکتریکی دومرحله‌ای سری و موازی ($T_c = ۳۰۰K$)

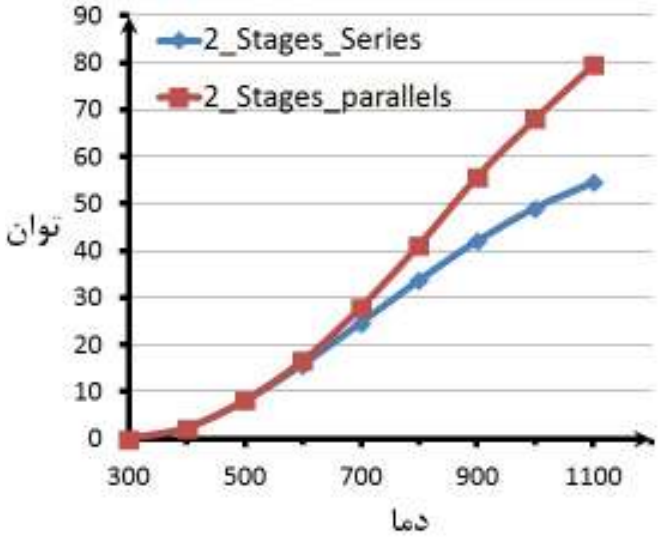


شکل ۹) نمودار بازده بر حسب دمای سطح گرم در سیستم‌های ژنراتور ترموالکتریکی سه‌مرحله‌ای سری و موازی ($T_c = ۳۰۰K$)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

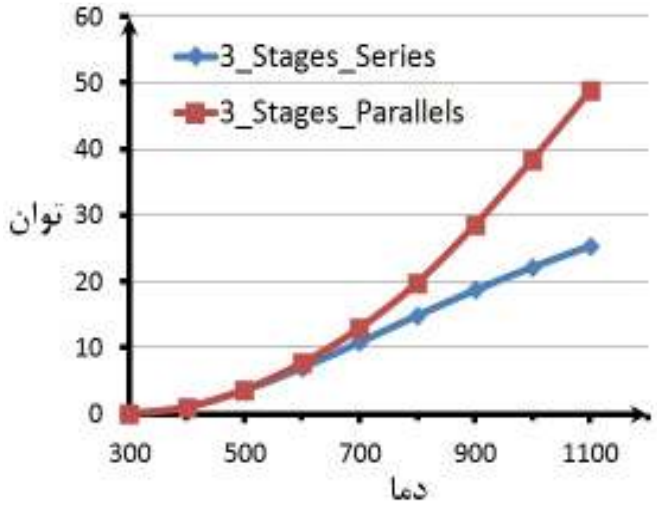


شکل ۱۰) نمودار بازده بر حسب دمای سطح گرم در سیستم‌های ژنراتور ترموالکتریکی چهارمرحله‌ای سری و موازی ($T_c = ۳۰۰K$)

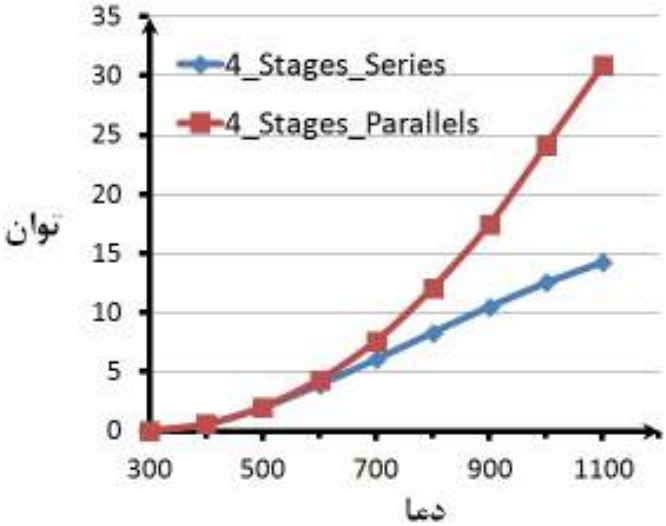


شکل ۱۱) تغییرات توان تولید شده(وات)، با دمای سطح گرم در سیستم‌های ژنراتور ترموالکتریکی دومرحله‌ای سری و موازی ($T_c = ۳۰۰K$)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



شکل ۱۲) تغییرات توان تولید شده (وات)، با دمای سطح گرم در سیستم‌های ژنراتور ترموالکتریکی سه‌مرحله‌ای سری و موازی ($T_c = ۳۰۰K$)



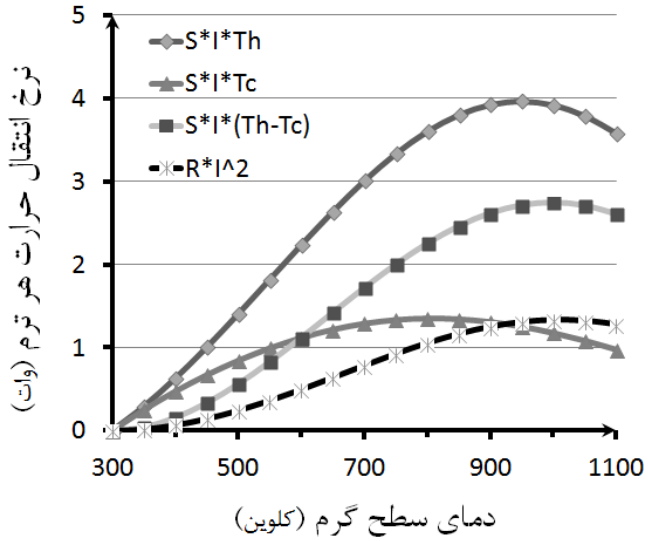
شکل ۱۳) تغییرات توان تولید شده (وات)، با دمای سطح گرم در سیستم‌های ژنراتور ترموالکتریکی چهارمرحله‌ای سری و موازی ($T_c = ۳۰۰K$)

با توجه به شکل‌های ۸ تا ۱۰ در می‌یابیم که بازده سیستم‌های موازی در دماهای بالا (بالای حدوداً ۷۰۰ کلوین) بیشتر از بازده سیستم‌های سری است، ولی این برتری قابل توجه نیست. همچنین در سیستم‌های با تعداد مرحله بالاتر، منحنی بازده، بعد از نقطه حداکثر خود، دارای نزول با شیب ملایم‌تری است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

- **بهینه‌سازی توان تولید شده سیستم**

در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳، همان طور که مشخص است، همانند نمودارهای بازده، توان تولید شده در سیستم‌های موازی نیز بیشتر از سیستم‌های سری است. علت بهتر بودن نتایج در سیستم‌های موازی و سیستم‌های با مراحل بالاتر، انعطاف‌پذیری بالاتر در سیستم‌های موازی، برای غلبه بر محدودیت‌های تغییرات متغیرهای مؤثر است. با بررسی‌های انجام شده در این زمینه، دریافتیم که علت کاهش بازده از دمای حدوداً ۷۰۰ کلوین به دو عامل کاهش ضریب سیبِک از دمای میانگین حدوداً ۱۰۰۰ کلوین و روند صعودی و فزاینده ضریب رسانش گرمایی و نرخ انتقال حرارت رسانشی است. همچنانکه بنابر مشاهدات انجام شده، روند تغییرات متغیر R_{in} تا دمای ۱۱۰۰ همواره صعودی است. این عوامل سبب کاهش ترم STI_h از دمای ۹۵۰ کلوین، عنصر STI_c از دمای ۸۰۰ کلوین و در مجموع عنصر $SI\ (T_h - T_c)$ از دمای ۱۰۰۰ کلوین می‌شود (شکل ۱۴). همچنین علت کاهش بازده از دمای حدوداً ۷۰۰ کلوین، با رشد فزاینده نرخ انتقال گرمای رسانشی در مخرج رابطه بازده سیستم توجیه می‌شود.



شکل ١٤) نمودار تغییرات ترم به ترم روابط (۱) و (۲)، $(T_c = ۳۰۰K)$

- **بررسی مقادیر متغیرهای بهینه‌سازی سیستم چهارمرحله‌ای موازی**

در جدول۲ مقادیر متغیرهای بهینه‌سازی به ازای بازده بهینه سیستم چهارمرحله‌ای موازی در برخی دماها به صورت نمونه ارائه شده است. لازم به یادآوری است که سیستم چهارمرحله‌ای موازی دارای ۱۱ متغیر بهینه‌سازی و همچنین ۳

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

شرط تساوی ترمودینامیکی و یک قید مسأله است که بهینه‌سازی سیستم را بسیار دشوار می‌کند.

جدول ۲) مقادیر متغیرهای حاصل شده از بهینه‌سازی سیستم چهارمرحله‌ای موازی، ($T_c = ۳۰۰K$)

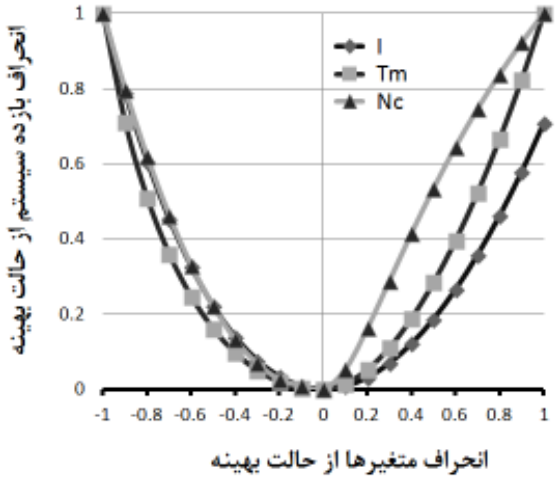
T_h	بازده	T_{m1}	T_{m2}	T_{m3}	I_1	I_2	I_3	I_4	N_1	N_2	N_3	N_4	توان
۴۰۰	۰/۰۴۰۵	۳۷۲	۳۴۶	۳۲۲	۰/۸۸۹	۰/۸۹	۰/۸۸	۰/۸۸	۲۱/۵۶	۲۳/۸۴	۲۶/۸۶	۲۷/۷۳	۰/۵۹
۶۰۰	۰/۰۷۶۳	۵۰۴	۴۲۵	۳۵۸	۱/۹۰	۱/۹۱	۱/۹۸	۲/۱۴	۱۲/۲۷	۲۱/۲۲	۳۰/۳۷	۳۶/۱۳	۳/۶۶
۸۰۰	۰/۰۸۱۹	۶۱۶	۵۰۵	۳۹۶	۱/۹۱	۲/۰۴	۲/۷۳	۳/۳۰	۶/۶۴	۱۹/۹۳	۳۰/۹۷	۴۲/۴۶	۷/۶۱
۱۰۰۰۰	۰/۰۸۱۵	۷۰۰	۵۶۳	۴۳۱	۱/۹۰	۲/۰۴	۳/۱۷	۴/۳۷	۳/۷۰	۱۸/۲۷	۳۲/۰۶	۴۶/۰۱	۱۱/۴۴

با تحلیل نتایج جدول (۲) می‌توان دریافت که در اختلاف‌های کم دماهای سطوح گرم و سرد، شدت جریان‌های الکتریکی تولید شده در هر مرحله از سیستم تقریباً با هم برابر است. بنابراین، آرایش موازی الکتریکی نسبت به آرایش سری الکتریکی مزیتی ندارد و بهتر است از سیستم‌های سری استفاده شود، اما در اختلاف دماهای بیشتر، اختلاف شدت جریان تولید شده در هر مرحله از سیستم، متفاوت از مرحله دیگر است که در اینجا لزوم استفاده از سیستم‌های موازی الکتریکی در اختلاف دماهای بیشتر استنباط می‌شود. همچنین با توجه به جدول (۲) در می‌یابیم که در مورد آرایش فیزیکی مراحل سیستم‌ها، بایستی تعداد زوج‌های ترموالکتریک در قسمت سردتر بیشتر از طرف مقابل، یعنی طرف گرم‌تر باشد.

- **حساسیت بازده سیستم به متغیرهای بهینه‌سازی**

در شکل ۱۵ میزان تأثیر متغیرهای بهینه‌سازی بر روی تابع هدف ارائه شده است. همان طور که مشخص است، حساسیت تابع هدف بر روی تعداد زوج‌های ترموالکتریک بیشتر از متغیرهای دیگر است که لزوم دقت در آرایش فیزیکی سیستم را یادآور می‌شود.

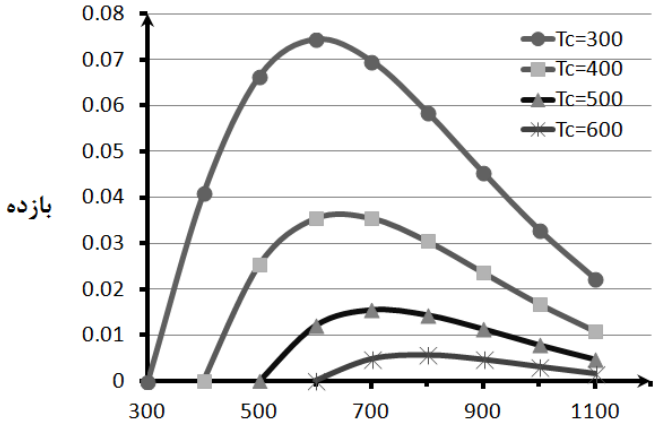
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



شکل ۱۵) حساسیت بازده سیستم ترموالکتریک به متغیرهای بهینه‌سازی

- **تأثیر دمای سطح سرد بر روی بازده سیستم**

با تغییر دمای سطح سرد از ۳۰۰ کلوین به دماهای بیشتر در سیستم تک‌مرحله‌ای و بررسی نتایج بدست آمده، این مهم دریافت می‌شود که هر اندازه دمای سطح سرد بیشتر شود، بازده با شتاب بیشتری افت کرده و استفاده از سیستم‌های ترموالکتریک مزیت خود را کاملاً از دست می‌دهد. پس مطابق آنچه در شکل ۱۶ مشخص است، باید تا حد امکان دمای سطح سرد را کاهش داد تا بازده سیستم افزایش یابد.



شکل ١٦) تأثیر دمای سطح سرد بر روی بازده سیستم

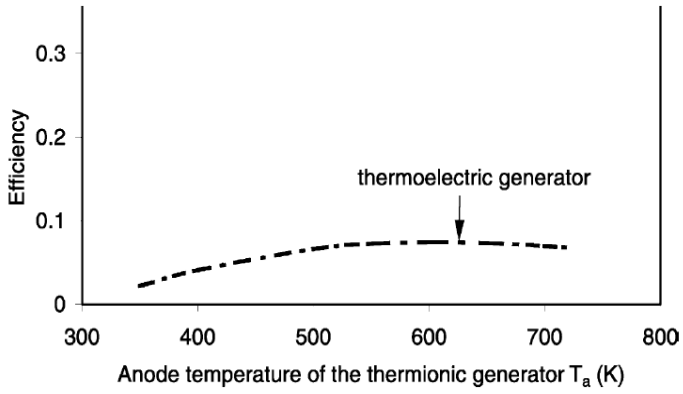
متغیر ضریب لاغری مطابق بررسی‌های انجام شده، متغیر بهینه‌سازی نیست، به این معنی که توابع هدف تعریف شده

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

که عبارت بودند از توان تولید شده و بازده سیستم به ازای مقدار خاصی از ضریب لاغری، دارای مقدار بهینه‌ای نیستند.

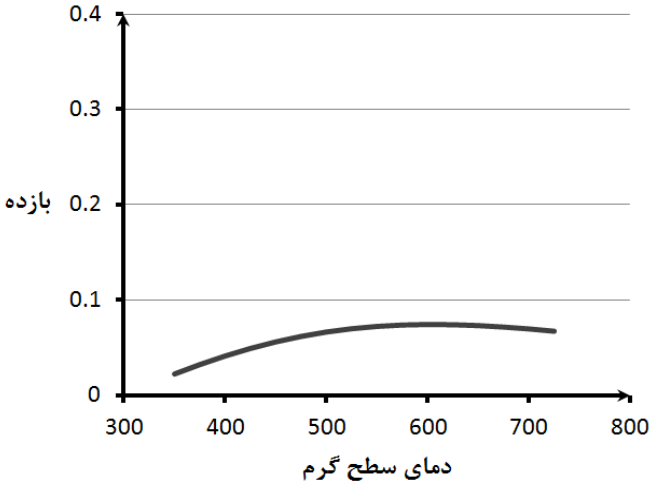
اعتبار سنجی

برای اعتبار سنجی مدل ارائه شده به مقاله ژوان مراجعه کرده [۲۴] و نتایج سیستم تک‌مرحله‌ای را با نتایج ارائـه شـده در مقاله مذکور مقایسه می‌کنیم. در تحقیق ژوان، مانند تحقیق حاضر، دمای سطح سرد ۳۰۰ کلوین و بازده بهینه بر اساس دمای سطح گرم به دست آمده که نتیجه آن در شکل ۱۷ آورده شده است.



شکل ۱۷) بازده سیستم ترموالکتریک تک‌مرحله‌ای بدست آمده توسط ژوان [٢٤]، ($T_c = ۳۰۰ K$)

نتایجی که به دست آوردیم در شکل ۱۸ مشخص است.



شکل- ۱۸: بازده سیستم ترموالکتریک تک‌مرحله‌ای بدست آمده توسط عالمی و آقانجفی، ($T_c = ۳۰۰ K$)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

با مقایسه شکل ۱۷و شکل۱۸ به وضوح انطباق نتایج مشخص است. بیشترین بازده در دمای ۶۰۰ کلوین به دست آمده است که مقدار آن ۰/۰۷۴۴ می‌باشد. در تحقیق ژوان، از خواص مشابه مواد ترموالکتریک، یعنی ماده تلورایـد بیسموت استفاده شده است.

نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، به دست آوردن نوع آرایش فیزیکی و الکتریکی سیستم‌های ترموالکتریکی دو، سه و چهارمرحله‌ای، برای داشتن بازده و توان تولیدی حداکثر است که می‌توان در این رابطه، موارد زیر را بیان کرد:

استفاده از سیستم‌های موازی دارای پیچیدگی‌های بیشتری است و استفاده از آن، اگر طراحی ما بر اساس بازده بیشتر باشد، مقرون به صرفه نیست، زیرا تفاوت چندانی بین بازده سیستم‌های سری و موازی، خصوصاً در دماهای پایین‌تر سطح گرم مشهود نیست. اما اگر طراحی ما بر اساس توان تولیدی بیشتر باشد، همانطور که در شکل‌های ۱۱، ۱۲و ۱۳ مشخص است، استفاده از سیستم‌های موازی می‌تواند توان خروجی بیشتری نسبت به سیستم‌های سری در بر داشته باشد.

از نتایج این پژوهش می‌توان این گونه جمع‌بندی کرد که در بهترین حالت، حداکثر بازده خروجی از سیستم مقداری در حدود ۸ درصد است که مقدار قابل توجهی نیست. از این‌رو، استفاده از سیستم‌های ترموالکتریک در همه شرایط دارای مزیت نیست، مگر زمانی که با محدودیت مکانی مواجه هستیم و یا قصد بر تولید مقدار کمی الکتریسیته داریم که در این هنگام، سیستم‌های معمول تبدیل انرژی مقرون به صرفه نیست. استفاده از سیستم‌های چندمرحله‌ای و موازی شرایط بهتری را برای استفاده از سیستم‌های ترموالکتریک فراهم می‌کند، اما باز هم تا شرایط ایده‌آل فاصله بسیاری باقی است. مواد ترموالکتریک مهمترین جزء از یک سیستم ترموالکتریک است که مطابق فرمول‌های حاکم گفته شده، ضریب سیبِک، ضریب مقاومت الکتریکی و ضریب رسانش گرمایی مهمترین خواص آن برای بررسی است. مطابق بررسی‌ها و با توجه به روابط حاکم، یک ماده بهتر ترموالکتریک ماده‌ای است که در دمای کارکردش، ضریب سیبک بالاتر و ضریب رسانش گرمایی و ضریب مقاومت الکتریکی کمتری داشته باشد. امروزه با توجه به رشد روزافزون علم نانو، می‌توان به بهبود خواص مواد ترموالکتریک امیدوار بود و شاید دور از ذهن نباشد که در آینده‌ای نزدیک، سیستم‌های تولید توان و سیستم‌های سرمایش و گرمایش حالت جامد، نظیر ترموالکتریک‌ها، جای تمامی سیستم‌های مرسوم فعلی را بگیرد و بشریت بتواند بدون کمترین آلودگی، انرژی مورد نیاز خود را به واسطه این سیستم‌ها تأمین کند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

مراجع

[۱] Amatya R., Ram R.J., ۲۰۱۰ "Solar thermoelectric generator for micropower applications", Journal of Electronic Materials, PP. ۳۵-۴۰.

[۲] Champier D., Bedecarrats J.P., Rivaletto M., Strub F., ۲۰۱۰, "Thermoelectric power generation from biomass cook stoves", Energy, PP. ۳۵-۴۲.

[۳] Champier D, Bedecarrats JP, Kousksou T, Rivaletto M, Strub F, Pignolet P. "Study of a TE (thermoelectric) generator incorporated in a multifunction wood stove." Energy. pp. ۱۸-۲۶, ۲۰۱۱.

[۴] Chen M., Rosendahl L.A., Condra T., ۲۰۱۱, "A three-dimensional numerical model of thermoelectric generators in fluid power systems", Int. J. Heat Mass Transfe, PP. ۴۵-۵۵.

[۵] Cheng T.C., Cheng C.H., ۲۰۱۱, Huang Z.Z., Liao G.C., "Development of an energy-saving module via combination of solar cells and thermoelectric coolers for green building applications", Energy, PP. ۳۳-۴۰.

[۶] Chen W.H., Liao C.Y., Hung C.I., ۲۰۱۲, "A numerical study on the performance of miniature thermoelectric cooler affected by Thomson effect", Appllied Energy, PP. ۶۴-۷۳.

[۷] Clerc M., Kennedy J., ۲۰۰۲, "The Particle Swarm Explosion, Stability, and Convergence in a Multidimensional Complex Space", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, PP. ۵۸-۷۳

[۸] Eberhart R.C., Kennedy J., ۱۹۹۵, "A new optimizer using particle swarm theory", [A]. In: Proceedings of the Sixth International Symposium on Micromachine and Human Science [C]., Nagoya, Japan, PP. ۳۹-۴۳.

[۹] Esarte J., Min G., Rowe D.M., ۲۰۰۱, "Modeling heat exchangers for thermoelectric generators.", J. Power Sources, PP. ۲-۶.

[۱۰] Goupil C., Seifert W., Zabrocki K., Muller E. and G. Snyder J., ۲۰۱۱, "Thermodynamics of Thermoelectric Phenomena and Applications", Entropy, PP. ۱۴۸۱-۱۵۱۷.

[۱۱] Hsiao Y.Y., Chang W.C., Chen S.L., ۲۰۱۰, "A mathematic model of thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine", Energy, PP. ۴۷-۵۴.

[۱۲] Hsu C.T., Huang G.Y., Chu H.S., et al., ۲۰۱۱, "Experiments and simulations on low temperature waste heat harvesting system by thermoelectric power generators", Applied

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

Energy, PP. ۱-۷.

[۱۳] Liang G., Zhou J., Huang X., ۲۰۱۱, "Analytical model of parallel thermoelectric generator", Applied Energy ۸۸, PP. ۵۱۹۳-۵۱۹۹.

[۱۴] Liang G.W., Zhou J.M., Huang X.Z., et al., ۲۰۱۱, "Analytical model of series semiconductor thermoelectric generators,", J. Jiangsu. Univ. Sci. Technol., PP. ۴-۹.

[۱۵] Li P., Cai L., Zhai P., Tang X., Zhang Q., Niino M., ۲۰۱۰, "Design of concentration solar thermoelectric generator." Journal of Electronic Materials . pp. ۲۲-۳۰.

[۱۶] Martinez A., Astrain D., Rodriguez A., ۲۰۱۱, "Experimental and analytical study on thermoelectric self cooling of devices", Energy, PP. ۵۰-۶۰.

[۱۷] Masahide M., Michio M., Masaru O., ۲۰۰۱, "Thermoelectric generator utilizing automobile engine exhaust gas", Therm. Sci. Eng., PP. ۷-۸.

[۱۸] Rahman S., Going G., ۲۰۰۳, "the growth of renewable energy", IEEE Power and Energy Magazine, PP.۱۶-۱۸.

[۱۹] Riffat S.B., Ma X., ۲۰۰۳, "Thermoelectrics: a review of present and potential applications", Applied Thermal Engineering, PP. ۱۳-۳۵.

[۲۰] Simons R.E., Ellsworth M.J., Chu R.C., ۲۰۰۵, "An assessment of module cooling enhancement with thermoelectric coolers.", J Heat Transfer-Trans ASME, PP. ۷۶-۸۴.

[۲۱] Wei He, Yuehong Su, Riffat S.B., JinXin Hou, Jie Ji., ۲۰۱۱, "Parametrical analysis of the design and performance of a solar heat pipe thermoelectric generator unit", Applied Energy ۸۸, PP. ۵۰۸۳-۵۰۸۹.

[۲۲] Wu K.H., Hung C.I., ۲۰۰۹, "Thickness scaling characterization of thermoelectric module for small-scale electronic cooling", J Chin Soc Mech Eng., PP. ۷۵-۸۱.

[۲۳] Xu L.Z., Li Y., Yang Z., et al., ۲۰۱۰, "Experimental study of thermoelectric generation from automobile exhaust", J. Tsinghua. Univ. (Sci. Technol.), PP. ۷-۹.

[۲۴] Xuan X.C., Li D., ۲۰۰۳, "Optimization of a combined thermionic–thermoelectric generator", Journal of Power Sources, PP.۱۶۷–۱۷۰.

[۲۵] Yamashita O., ۲۰۰۸, "Effect of linear temperature dependence of thermoelectric properties on energy conversion efficiency.", Energy Conversion and Management, PP. ۳-۹.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

[۲۶] Yilbas B.S., Sahin A.Z., ۲۰۱۰, "Thermoelectric device and optimum external load parameter and slenderness ratio", Energy, PP. ۸۰-۸۴.

[۲۷] Yodovard P., ۲۰۰۱, "The potential of waste heat thermoelectric power generation from diesel cycle and gas turbine cogeneration plants", Energy Source, PP. ۳-۴.

[۲۸] Yu C., Chau K.T., ۲۰۰۹, "Thermoelectric automotive waste heat energy recovery using maximum power point tracking", Energy Convers Manage., PP. ۶-۱۲.

[۲۹] Zhang H.J., Chen H., et al., ۲۰۰۱, "Research on the generating performance of series parallel connection and reappearance of a semiconductor thermoelectric module", Acta Energiae Solaris Sinica, PP. ۴-۷.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]