

طراحی و شبیه‌سازی بازیابی حرارت اتلافی آگروز موتور ایزوتای شناور JM برای تولید توان الکتریکی در محرک‌های انعطاف‌پذیر گرمایی

شهرزاد عباسی نژاد^۱، سیروس آقا نجفی^۲، آرمان معروفی^۳، قاسم اکبری^۴

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، قزوین، ایران، shahrooz.abbasinejhad@gmail.com

^۲ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، aghanajafi@kntu.ac.ir

^۳ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، قزوین، ایران، maroufiqian@yahoo.com

^۴ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، قزوین، ایران، gh.akbari@gmail.com

چکیده:

در این مقاله، یک روش جدید برای بازیابی حرارت اتلافی آگروز موتور ایزوتا شناور JM^۱ و تبدیل آن به الکتریسیته با استفاده از یک محرک انعطاف‌پذیر^۲ گرمایی ارائه خواهد شد. محرک انعطاف‌پذیر مورد نظر از ۳ بازوی موازی شامل بازوهای گرم و سرد برای کنترل دما و تولید توان الکتریکی استفاده می‌کند. همچنین برای کنترل حرارت‌های اتلافی از ۳ عدد پایه، در کوتاه‌ترین بازو برای پایداری حرارتی استفاده شده است. به عبارت دیگر، هدف از مقاله حاضر توسعه‌ی یک روش انتقال حرارت غیر فعال (پسیو) و یک سیستم مولد گرما به کار به منظور بازیابی حرارت اتلافی جهت تولید توان الکتریکی می‌باشد. طرح پیشنهادی دارای اندازه $40\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$ بوده و در نرم افزار کامسول ۲۰۱۸ پیاده سازی و شبیه سازی شده است. نتایج شبیه سازی برای طرح پیشنهادی با ولتاژ ۵ ولت و بیشینه دمای ۵۵۰ کلوین در مقایسه با کارهای مشابه FOM قابل قبولی از خود ارائه می‌دهد و نسبت به بهترین طرح مقدار ۲/۳ برابر و نسبت به بدترین طرح مقدار ۲۷۰۰ برابر بهبود نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی:

غیر فعال، تولید توان، بازیابی حرارتی و بازوهای انعطاف‌پذیر

Design and simulation of heat dissipation exhaust of Isotta engine of JM vessel for generating electrical power in flexible thermal actuators

Shahrooz Abbasi nezhad¹, Sirus Agha Najafi², Arman Maroufi³, Ghasem Akbari⁴

¹ Phd Student in mechanical engineering, Islamic Azad University, Qazvin Unit, Qazvin, Iran, shahrooz.abbasinejhad@gmail.com

² Professor of The Faculty of Mechanical Engineering, Khajeh Nasir al-din Tusi University, Tehran, Iran, aghanajafi@kntu.ac.ir

³ Assistant Professor, Mechanical Engineering Group, Islamic Azad University, Qazvin Unit, Qazvin, Iran, maroufiqian@yahoo.com

⁴ Assistant Professor, Mechanical Engineering Group, Islamic Azad University, Qazvin Unit, Qazvin, Iran, gh.akbari@gmail.com

Abstract:

In this paper, a new method was presented for recovering dissipated heat in the exhaust of Isotta engine of JM vessel and converting it to electricity using a flexible thermal anchor. The flexure uses three parallel arms including the hot and cold arms to control temperature and generate electrical power. Also, three dimples were used in the shortest arm for thermal stability in order to control the core temperatures. In other words, the purpose of the present paper was developing a passive heat transfer method and a heat generating system was employed for recovering dissipated heat to generate electrical power. Size of proposed design was equal to $40\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$, and it was implemented and simulated in COMSOL software 2018. Simulation results for proposed design with the voltage of 5V and maximum temperature of 550K presented acceptable FOM compared to similar work such that it showed the value of 2.3 times relative to the best design, and it was 2700 times better compared to the worst design.

Keywords: Passive, Power generation, Heat recovery, Flexible anchors

¹ Jolae Missile Craft

² Flexure

با توجه به اهمیت انرژی در زندگی روز مره انسان‌ها و کاهش روز افزون ذخایر انرژی جهانی باعث شده تا بازیافت حرارتی یک امر مهم در تحقیقات علمی امروزه بشمار آید؛ باید در نظر داشت که میزان انرژی اتلافی در صنایع در حدود ۳۳٪ می‌باشد. استفاده دوباره از گرمای تلف شده در صنعت باعث صرفه جویی در استفاده از انرژی در صنایع می‌باشد. البته اکثر گرمای اتلافی صنعتی دارای ارزش کاربردی پایین^۱ و در درجه حرارت پایین می‌باشد، بطوریکه استفاده از این گرمای اتلافی با استفاده از ماشین‌های گرمایی امروزی مانند توربین‌های بخار بسیار مشکل می‌باشد. بنابراین، ساخت وسیله‌ای برای انتقال گرما که بصورت غیر فعال^۲ عمل کرده و حداقل افت درجه حرارت را داشته باشد و برای بازیابی گرمای اتلافی، دارای راندمان مناسب باشد، حائز اهمیت است [۱-۴].

در حال حاضر، انواع مختلف سیستم‌های بازیابی گرمایی در بازار (مانند سیستم همرفتی بهبود یافته^۳، چرخ گرما^۴) یافت می‌شوند. بیشتر اینگونه سیستم‌ها نیاز به نیروی خارجی مانند پمپ یا کمپرسور برای حرکت سیال انتقال دهنده حرارت در عمل را دارند. بنابراین اینگونه سیستم‌ها به انرژی الکتریکی و تعمیر و نگهداری نیاز دارند. لوله‌های حرارتی یک راه حل ساده به عنوان ابزار انتقال گرمای غیر فعال می‌باشند. یک لوله حرارتی اجازه می‌دهد که سیال داخل آن در درجه حرارت پایین و فشار خلأ تبخیر شود. این نوع استفاده از لوله‌های گرمایی باعث حداقل شدن افت حرارت در حین انتقال می‌شود، که به نوبه خود باعث افزایش راندمان جبران حرارت می‌باشد [۵-۹].

مولدهای الکتریسیته ترموالکتریک^۵ مولد انرژی از نوع نیمه هادی بوده که باعث تبدیل حرارت اتلافی به توان الکتریکی با استفاده از اثر سبک^۶ می‌شود. مولدهای الکتریسیته ترموالکتریک مانند لوله‌های حرارتی دارای هیچگونه قسمت متحرک نمی‌باشد. مولدهای ترموالکتریک قادر به تولید الکتریسیته حتی در اختلاف دمای کم بین منبع گرما و چاه حرارتی^۷ می‌باشد، که مشخصه بسیار مطلوبی می‌باشد. اگرچه مولدهای ترموالکتریک دارای راندمان پایینی هستند، ولیکن در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی برای افزایش راندمان این مولدها با استفاده از مواد جدید انجام شده و پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای به دست آمده است. مولدهای ترموالکتریک برای بازیابی گرمای اتلافی بسیار ایده‌آل می‌باشند، چرا که هزینه عملیاتی^۸ آنها نسبت به هزینه ساخت مولد ترموالکتریک بسیار پایین می‌باشد [۵-۱۱].

افزایش قیمت نفت در جهان باعث توجه ویژه به استفاده‌ی مجدد از گرمای اتلافی صنایع شده است. بیست و پنج درصد از انرژی ورودی سوخت‌ها در بخش صنایع به صورت گرما در محیط اتلاف می‌شود. همچنین، در حدود ۳۳٪ از کل انرژی مصرفی به صورت انرژی گرمایی در محیط اتلاف می‌شود، که این امر به دلیل توانایی برای بازیافت این انرژی می‌باشد [۱۲]. در سالیان اخیر مطالعات مختلفی برای تبدیل گرمای اتلافی به الکتریسیته انجام شده است. لی و همکاران [۱۳] یک مولد ترموالکتریک متمرکز به سمت خورشید را با استفاده از مجموعه‌ی لوله‌های حرارتی میکروکانالی طراحی کرده و مدل ریاضی آن را ارائه دادند. آو و همکاران [۱۴] یک سیستم بازیابی حرارت خروجی از آگروز خودرو با بکارگیری مولدهای ترموالکتریک و لوله‌های حرارتی را طراحی نموده و مورد تحلیل قرار دادند. کائو و همکاران [۱۵] نوع جدیدی از سیستم مولد ترموالکتریک-لوله‌ی حرارتی را برای بازیابی

¹ Low grade

² Passive

³ Convective-type recuperator

⁴ Heat wheel

⁵ Thermo-electric generators (TEGs)

⁶ Seebeck effect

⁷ Heat sink

⁸ Operating cost

حرارت اتلافی از اگزوز خودرو طراحی کرده و عملکرد آن را بهبود دادند.

رملی و همکاران [۱۶] یک بررسی تجربی درباره‌ی بازیابی همزمان حرارت اتلافی و تولید توان با استفاده از سیستم مولد ترموالکتریک با کمک لوله‌های حرارتی انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که این سیستم می‌تواند حدود W ۱۰۷۹ گرما را بازیابی کرده و حدود W ۷ توان الکتریکی تولید نماید. ساساکی و همکاران [۱۷] یک سیستم ترموالکتریک 1 kW طراحی کرده و ساختند، که انرژی گرمایی را از یک چشمه‌ی داغ در دمای $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ بکار می‌گرفت. این سیستم قادر به تولید ماکزیمم توان خروجی برابر با W ۹۰۰ بوسیله‌ی بکارگیری $72\text{ }^{\circ}\text{C}$ ماژول سری یا $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ ماژول موازی بود. چن و همکاران [۱۸] یک برداشت‌کننده-ی انرژی ترموالکتریک طراحی کرده و ساختند، که برای دادن توان الکتریکی به سنسورها مورد استفاده قرار می‌گرفت.

مینگ و همکاران [۱۹] بر روی بازیابی آب داغ از خاکستر کوره‌ی ذوب مطالعه کردند و با استفاده از مولد ترموالکتریک، انرژی گرمایی را به الکتریسیته تبدیل نمودند. مطالعه‌ی آنها پارامترهای مربوطه را که بر عملکرد سیستم اثرگذار بودند (مانند طول المان ترموالکتریک، طول مسیر جریان و دمای آب) ارائه داد. چگالی توان تخمینی تولیدی بوسیله‌ی این سیستم در حدود 0.93 kW/m^2 در راندمان تبدیل ۲٪ بود. ژنگ و همکاران [۲۰] یک سیستم تولید همزمان ترموالکتریک مقیاس کوچک با استفاده از یک منبع حرارت ترکیبی اتلافی بویلر و انرژی خورشیدی ارائه نمودند. ماژول ترموالکتریک بوسیله‌ی این منابع حرارتی در یک مبادله‌کن حرارتی، که حاوی روغن انتقال حرارت بود، حرارت داده می‌شد. سیستم خنک‌کاری از آب شهری استفاده می‌کرد و حرارت بازیابی شده از ماژول ترموالکتریک به بویلر بازگردانده می‌شد. این مطالعه چهار تحلیل جزئی سیستم شامل عملکرد الکتریکی، عملکرد هیدرولیکی، عملکرد حرارتی و عملکرد پاسخ دینامیکی را ارائه داد.

لسیج و همکاران^۱ [۲۱] یک دستگاه آزمایش مولد ترموالکتریک مایع-به-مایع^۲ ساختند تا از حرارت اتلافی

موجود بهره ببرند. آن‌ها یک همبستگی^۳ برای ایجاد ارتباط میان شرایط ورودی حرارتی و ماکزیمم توان خروجی توسعه دادند. رملی و همکاران^۴ [۲۲] در مقاله‌ای دیگر، یک روش جدید برای بازیافت حرارت اتلافی و الکتریسیته با استفاده از ترکیب لوله‌های حرارتی و مولدهای ترموالکتریک (TEG) ارائه دادند. آن‌ها یک مدل نظری برای پیش‌بینی بازیابی حرارت اتلافی و ضریب عملکرد تبدیل الکتریسیته‌ی سیستم توسعه دادند. دات و همکاران^۵ [۲۳] مطالعات نظری و تجربی در رابطه با یک سیستم ترکیبی آبگرمکن خورشیدی و تولید توان ترموالکتریک انجام دادند. آن‌ها دریافتند که در شار حرارتی برابر با W/m^2 ۵۰۰۰، دمای آب داغ را می‌توان تا $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ بالا برد. سیستم آنها همچنین می‌تواند ولتاژ مدار باز برابر با V ۳/۰۲ را در اختلاف دمای $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ (در عرض TEG) تولید کند.

گاوس و ایلرز^۶ [۲۴] به بررسی، نصب و راه‌اندازی فاز طراحی مدول‌های ترموالکتریک خنک‌کننده همراه با عوامل مؤثر بر فاز پرداختند. بررسی‌های آنها بر روی محاسبات سطح گرم و سرد، محاسبات توان الکتریکی و محاسبات چاه حرارتی بوده است. عملکرد مدول‌های ترموالکتریک خنک‌کننده توسط اثر گرمایش ژول، اختلاف دمای دو سر ترموالکتریک و ضریب هدایت حرارتی مابین اتصالات PN تحت تأثیر قرار می‌گیرد. همچنین، نشان داده شد که تأثیر عوامل مؤثر را نمی‌توان نادیده گرفت و باید در طول محاسبات منظور شود. ما و یو^۷ [۲۵] یک مدل تحلیلی جدید از ترموالکتریک خنک‌کننده‌ی دو طبقه ارائه داد. براساس مطالعه‌ی او، زمانی حداکثر ضریب عملکرد خنک‌کنندگی وجود دارد که دمای سطح سرد زیاد و نسبت طول پایه‌ی ترموالکتریک طبقه اول به طول پایه‌ی کل مقداری کوچک باشد. بنابراین، ترموالکتریک دوطبقه اختلاف دما را بهبود بخشیده و مؤثرتر از ترموالکتریک تک طبقه است. کِرن و همکاران [۲۶] یک سیستم مولد ترمو الکتریک که بر روی ژنراتور دیزل با $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ سیلندر قرار گرفته را ارائه داد. علیرغم اینکه تولید انرژی الکتریکی آن برابر با W ۱۳۵۰ اعلام شد، ولی جزئیات مربوطه اعلام نگردید. کارخانه‌ی BMW اولین کارخانه‌ای بود که از این سیستم استفاده کرد و از این طریق توانست یک مولد W ۶۰۰

⁵ Date and et al.

⁶ Eilers

⁷ Ma and Yu

¹ Lesage and et al.

² Liquid-to-liquid

³ Correlation

⁴ Remeli and et al.

۲- طرح پیشنهادی

۱-۱-۲ اطلاعات عمومی در مورد دمای اگزوز موتور ایزوتای شناور JM

موتورهای سری ۱۳۰۰ دارای سیکل دیزل، ۴ زمانه با تزریق مستقیم سوخت است که سیلندره‌های خطی یا ۷ شکل ۹۰ درجه دارد که دارای توربوشارژر و خنک‌کن هوا بوده و ساخت کشور ایتالیا می‌باشد. در شکل ۱ مجموعه توربوشارژر، رایزر و اگزوز موتور ایزوتا نشان داده شده است. موتور ایزوتا دارای حداکثر دمای اگزوز حدود 720 درجه سانتی‌گراد می‌باشد که این دما، دمای بحرانی موتور می‌باشد و در صورت رسیدن به این دما پنل الکترونیک درون کابین شروع به هشدار دادن کرده و کاربر باید سریعاً نسبت به خاموش کردن موتور اقدام کند. درواقع در موتورهای ایزو تا در هنگام استارت تنها ۶ سیلندر سمت راست کار می‌کنند و دمای اگزوز تقریباً پایین است. با افزایش دور و رسیدن به ۱۲۰۰ دور بر دقیقه سیلندره‌های سمت چپ نیز وارد سیکل شده و موتور با ۱۲ سیلندر کار می‌کند. در این حالت که قبل از اسکی افتادن شناور می‌باشد موتور زیر بار سنگین برای جدایی از سطح آب و دارای ماکزیمم مصرف سوخت و به تبع آن ماکزیمم دمای اگزوز می‌باشد که این دما حدود ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. پس از پیمودن حالت بحرانی و رسیدن شناور به حالت اسکی، شناور از آب کنده می‌شود و به حالت سرش در می‌آید. در این حالت موتور از زیر بار سنگین خارج شده و به تبع آن همه دماها از جمله دمای روغن موتور، دمای روغن گیربکس و دمای آب شیرین درون

تولید کند. با اینکه توان به دست آمده در حد قابل قبول بود، ولی چون ولتاژ تولیدی در حدود یک ولت بود، لذا کارایی سیستم زیر سؤال بود. همچنین، چن و همکاران [۲۷] یک برداشت‌کننده‌ی انرژی ترموالکتریک طراحی کرده و ساختند، که برای دادن توان الکتریکی به سنسورها مورد استفاده قرار می‌گرفت.

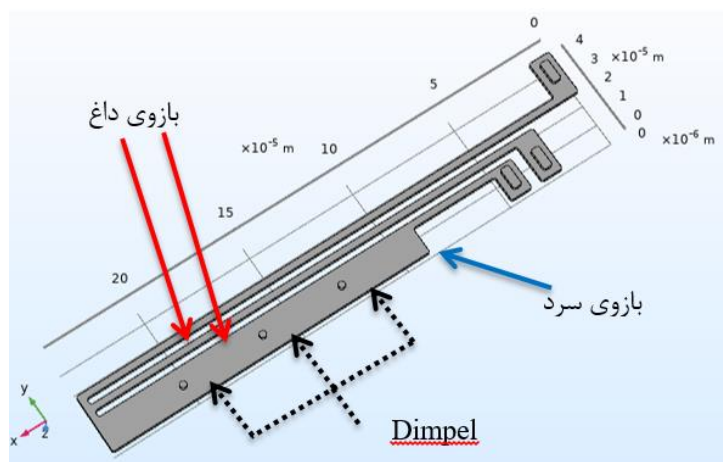
یک ویژگی مهم در تولید توان ترموالکتریک بهینه سازی سیستم انتقال گرما برای کاهش هزینه بر وات در تولید انرژی می‌باشد. در این مقاله، یک روش جدید برای بازیابی حرارت اتلافی در صنعت و تبدیل آن به الکتریسیته با استفاده از یک محرک انعطاف پذیر^۱ گرمایی ارائه خواهد شد. برخلاف روش تحریک خیلی از ساختارهای بررسی شده که از یک ورودی اعمال شده به آنها بدست آمده‌اند، در روش پیشنهادی این امکان بصورت دو جهته برقرار می‌باشد. یکی دیگر از مشکلات طرح‌های بیان شده، اثرات حرارت انگلی در بازوی سرد و گرم می‌باشند که در طرح پیشنهاد برای برطرف نمودن این اثرات از نقاطی با دمای ثابت استفاده شده است. به عبارت دیگر، هدف از مقاله حاضر توسعه‌ی یک روش انتقال حرارت غیر فعال (یا پسیو) و یک سیستم مولد گرما به کار به منظور بازیابی حرارت اتلافی جهت تولید توان الکتریکی است. این مقاله مبتنی بر سه بخش می‌باشد، بخش اول به مروری بر مفاهیم و کارهای پیشین مشابه اختصاص داده شده است. در بخش دوم ساختار، عملکرد و رهیافت طرح پیشنهادی ارائه می‌شود. در نهایت در بخش سوم نتایج طرح پیشنهادی در نرم افزار کامسول تحلیل و ارائه می‌شود.



شکل ۱- مجموعه توربوشارژر، رایزر و اگزوز

کندانسور پایین می‌آید و قاعداً به تبع آن دمای اگزوز نیز پایین‌تر آمده و به حدود ۴۰۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد خواهد رسید. لذا دمای کاری اگزوز شناور در دریا عمدتاً عددی بین ۴۰۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. طرح پیشنهادی در شکل ۲ نشان داده شده است، طبق این شکل محرک از طریق انبساط حرارتی فعال می‌شود. افزایش دمای دو بازوی داغ باعث تغییر شکل آنها بصورت جابجایی می‌شوند که این تغییر شکل و در نتیجه جابجایی محرک از طریق Joule heating بدست می‌آید. انبساط بیشتر بازوهای گرم در مقایسه با بازوهای سرد باعث خم شدن محرک می‌شود. بدین ترتیب عملکرد محرک شامل سه پدیده فیزیکی خواهد بود؛ انتقال جریان الکتریکی، انتقال حرارت با تولید گرما، فشارها و تنش‌های ساختاری به دلیل انبساط حرارتی. سپس شرایط مرزی و محدودیت‌ها در

بازوی سرد و گرم اعمال می‌شوند، همچنین باقی سطح‌ها بصورت الکتریکی عایق می‌شوند. دمای سه محرک^۱ و هر سه پایه^۲ محرک‌ها به دمای بسترها ثابت می‌شوند. به عبارت دیگر در طرح پیشنهادی، دمای محرک‌ها و پایه‌ها برای اینکه تاثیری در روند شبیه سازی نداشته باشند با دمای بستر یکسان در نظر گرفته شده‌اند. همچنین برای نزدیک شدن به واقعیت، مرزهای محرک با لایه‌های نازک پوشانده شده‌اند که با هوا در تعامل باشند. همچنین برای کارایی بیشتر هر سه بازو را در هر سه پایه محرک ثابت شده است. جهت حرکت پایه‌ها روی طرح در جهت محور XY بوده و در جهت محور Z هیچ حرکتی نخواهیم داشت، در واقع با تغییر مکان پایه‌ها می‌توان به بیشتر خم شدن بازوها کمک کرد.



شکل ۲- طرح پیشنهادی

در طرح برابر با مکانیسم انتقال گرما و هدایت حرارتی بصورت رابطه (۱) خواهد بود؛

$$-k_p wh \left[\frac{dT}{dx} \right]_x + J^2 \rho w t d = -k_p wh \left[\frac{dT}{dx} \right]_{x+dx} + \frac{Sw(T - T_s) dx}{R_T} \quad (1)$$

رابطه حاضر بیان کننده مقاومت گرمایشی پایدار نقطه $x+dx$ می‌باشد که برابر با مکانیسم انتقال گرما و هدایت حرارتی نقطه x می‌باشد، در واقع می‌توان بیان کرد که برای محاسبه مقاومت حرارتی از انتگرال جزئی استفاده شده و

۲-۲- عملکرد طرح پیشنهادی

در شکل ۲ با توجه به عملکرد گرمایی طرح پیشنهادی، سه مکانیسم برای جریان گرما شامل: هدایت^۲، جابجایی و تابش^۴ وجود دارد. اتلاف گرما از طریق تابش به محیط را می‌توان در مقایسه با گرمای اتلاف شده از طریق هدایت و انتقال نادیده گرفت زیرا گرمای ارائه شده توسط تابش با توجه به دمای بالای ۵۰۰ کلوین موجود در طرح قابل چشم‌پوشی می‌باشد؛ با این تعاریف وقتی جریان انتقال گرمایی به حالت پایدار برسد، مقاومت گرمایشی تولید شده

$$\frac{d^2 T(x)}{dx^2} = \frac{S(T - T_s)}{R_t k_p h} - \frac{V^2}{L^2 \rho_0} [1 - \xi(T - T_s)] \quad (۷)$$

$$\frac{d^2 T_\theta}{dx^2} = A^2 T_\theta - B \quad (۸)$$

رابطه ۸ که ساده شده‌ی رابطه ۷ می‌باشد، طبق شرایط زیر ساده‌سازی شده است:

$$T_\theta = T - T_s \quad \bullet$$

$$B = \frac{V^2}{L^2 \rho_0 k_p} \quad \bullet$$

$$A^2 = \frac{S}{R_t k_p h} + B\xi \quad \bullet$$

برای خطی نمودن معادله تفاضلی ۸ و بدست آوردن پاسخ معادله ی آن از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$T_h(x) = T_s + \frac{B}{A^2} + c_1 e^{Ax} + c_2 e^{-Ax} \quad (۹)$$

رابطه ۹ بیانگر دمای بازوی داغ در نقاط مختلف می‌باشد، همچنین با اعمال شرایط مرزی، به این صورت فرض می‌شود که پد محرک دمای یکسانی (T_s) با زیرلایه داشته و در انتهای بازو تغییرات دمایی صفر باشد.

$$T_h(0) = T_s \quad (۱۰)$$

$$\frac{dT(x)}{dx}(x=L) = 0 \quad (۱۱)$$

حل معادلات ۹ الی ۱۱ توزیع دما در امتداد بازوی گرم را نتیجه می‌دهند:

$$T_h(x) = T_s + \frac{B}{A^2} \times \frac{1}{1 + e^{-2AL}} (e^{-AL} e^{Ax} + e^{-Ax}) \quad (۱۲)$$

ماکزیمم دما نیز بصورت زیر در بخش وسط بازو بصورت زیر بدست می‌آید.

$$T_m = T_s + \frac{B}{A^2} - \frac{B}{A^2} \times \frac{2e^{-AL}}{1 + e^{-2AL}} \quad (۱۳)$$

بسط خطی برای بازوی گرم بصورت زیر است:

$$\Delta L_h = \alpha \int_0^L (T_h(x) - T_s) dx = \alpha L (\overline{T_h} - T_s) \quad (۱۴)$$

میانگین دما در بازوی گرم بصورت زیر محاسبه می‌شود:

در ادامه به حل آن پرداخته می‌شود. در این رابطه، k_p هدایت حرارتی پلی سیلیکون، J چگالی جریان، ρ مقاومت پلی سیلیکون، T و T_s نیز به ترتیب دمای تیر و زیرلایه می‌باشند. همچنین S نیز shape factor می‌باشد که تأثیر شکل عنصر روی هدایت حرارت به زیرلایه را محاسبه می‌کند. این ضریب هندسی نشان دهنده ی نسبت حرارت اتلافی از کناره و پایین تیر بر روی حرارت اتلافی از پایین تیر. R_T نیز مقاومت حرارتی بین تیر پلی سیلیکون و زیرلایه می‌باشد. این مقاومت که بین تیر و پلی سیلیکون قرار گرفته است برابر با مقاومت بازوی داغ و ضخامت پلی سیلیکون می‌باشد که در محیط هوا با هم در ارتباط هستند. بنابراین مقاومت هر دو بصورت ضخامت لایه، تقسیم بر ضریب هدایت الکتریکی بین آن و هوا بدست می‌آیند که این مقاومت حرارتی بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_T = \frac{t_v}{k_v} + \frac{t_n}{k_n} \quad (۲)$$

در این رابطه t_v و t_n به ترتیب بیانگر ارتفاع بازوی داغ و ضخامت Si3N4 می‌باشند، همچنین k_v و k_n به ترتیب ضریب متقابل هدایت حرارتی بازوی داغ و ضخامت Si3N4 در مقابل هوا می‌باشند، در این حالت shape factor با رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$S = \frac{h}{w} \left[\frac{2t_v}{h} + 1 \right] + 1 \quad (۳)$$

باید توجه شود که مقاومت پلی سیلیکون یا ρ وابسته به دما می‌باشد. برای سادگی و جلوگیری از پیچیدگی زیاد، فرض می‌شود که ضریب دما (ξ) خطی می‌باشد؛ همانند $\rho(T_s) = \rho_0$ که برابر با رابطه می‌باشد:

$$\rho(T) = \rho_0 [1 + \xi(T - T_s)] \quad (۴)$$

$$J = \frac{V^2}{\rho L} \quad (۵)$$

در این رابطه V ولتاژ در طول بازو و L طول بازوی داغ می‌باشد. با در نظر گرفتن محدودیت $\Delta x \rightarrow 0$ ، معادله ۱ بصورت زیر ساده می‌شود:

$$\frac{d^2 T(x)}{dx^2} = \frac{S(T - T_s)}{R_T k_p h} - \frac{J^2 \rho}{k_p} \quad (۶)$$

با جایگذاری معادلات ۴ و ۵، و با استفاده از بسط سری تیلور برای خطی سازی مقاومت توان گرمای، معادله ۶ بصورت روابط ۷ و ۸ ساده می‌شود.

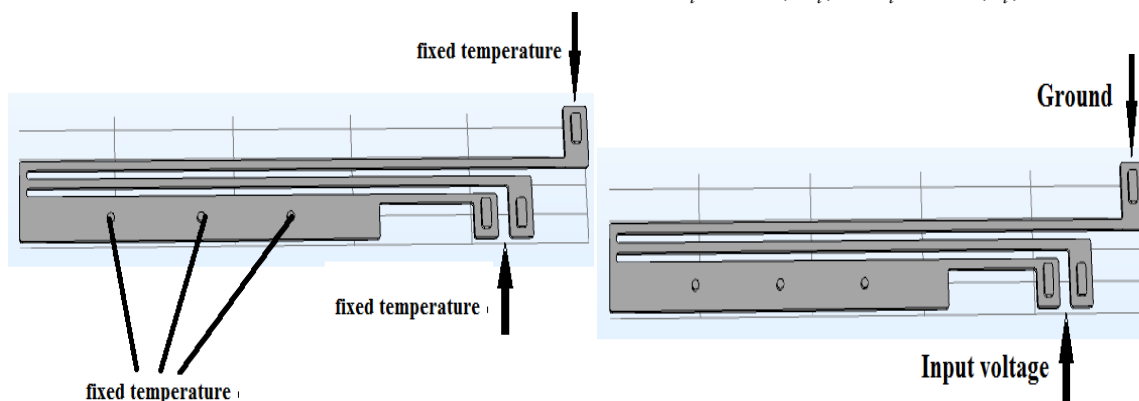
که $X_i = \frac{h}{g_i}$ و $Y_i = \frac{L_c}{g_i}$ و g_i فاصله بین i امین بازوی داغ از بازوی سرد می‌باشد.

۳- نتایج طرح پیشنهادی

برای بررسی نتایج طرح پیشنهادی ساختار ارائه شده در نرم افزار کامسول پیاده سازی شده و پس از اعمال شرایط اولیه و شرایط مرزی و محدودیت‌ها، نتایج آن مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای ورودی گرما شار گرمایی بصورت ورودی به بستر انتقال داده می‌شود، به همین منظور برای بیان شار گرمایی داخلی، ضریب h باید بصورت زیر نوشته شود.

$$h = \frac{S}{R_T} \quad (18)$$

اندازه طرح پیشنهادی از جنس پلی سیلیکون بوده و در طول محور X برابر با ۲۵۰ میکرون و در عرض محور Y برابر با ۴۰ میکرون می‌باشد. در شکل ۳ شرایط مرزی اعمال شده به طرح پیشنهادی نشان داده شده است.



شکل ۳- شرایط مرزی طرح پیشنهادی

$$\begin{aligned} \bar{T}_h = T_s + \frac{B}{A^2} - \frac{B}{A^2} \times \frac{e^{-2AL}}{(1+e^{-2AL})AL} (e^{AL} - 1) \\ + \frac{B}{A^2} \times \frac{1}{(1+e^{-2AL})AL} (e^{-AL} - 1) \end{aligned} \quad (15)$$

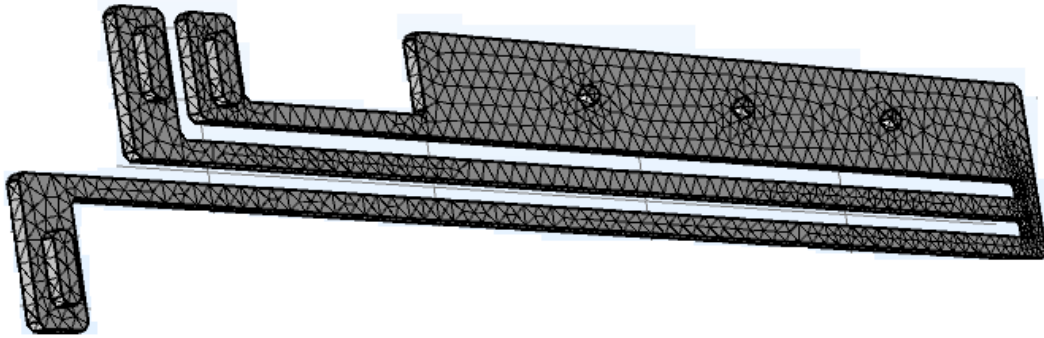
انرژی ساطع شده توسط بازوی گرم و دریافت شده توسط بازوی سرد را می‌توان به صورت تقریبی مطابق رابطه نوشت:

$$E_{hc} = \sum_{i=1}^2 hL_c F_i \varepsilon \rho (T_h^4 - T_s^4) \quad (16)$$

که در آن ε جذب کننده مؤثر پلی سیلیکون است. F_i یب فاکتور انرژی ساطع شده بازوی داغ می‌باشد.

$$\begin{aligned} F_i = \frac{2}{\prod X_i Y_i} \left[\ln \sqrt{\frac{(1+X_i^2)(1+Y_i^2)}{1+X_i^2+Y_i^2}} \right] \\ + X_i \sqrt{1+Y_i^2} \tan^{-1} \left(\frac{X_i}{\sqrt{1+Y_i^2}} \right) + \\ Y_i \sqrt{1+X_i^2} \tan^{-1} \left(\frac{Y_i}{\sqrt{1+X_i^2}} \right) \\ - X_i \tan^{-1}(X_i) - Y_i \tan^{-1}(Y_i) \end{aligned}$$

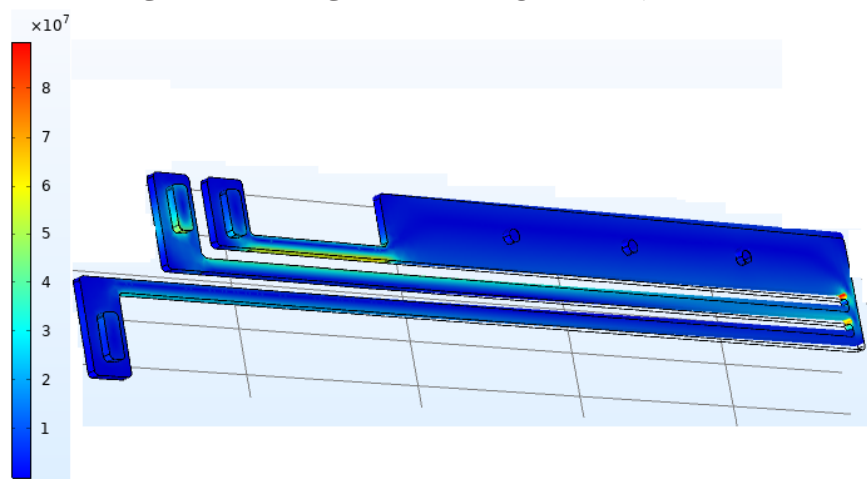
برای شبیه سازی لازم است ابتدا مش بندی مناسبی ل طرح پیشنهادی اعمال شود، در شکل ۴ این مش ی نشان داده شد است.



شکل ۴- مش بندی مناسب طرح پیشنهادی

حاصل می‌شوند، میزان تنش ایجاد شده پس از اعمال شار حرارتی بصورت شکل ۵ می‌باشد.

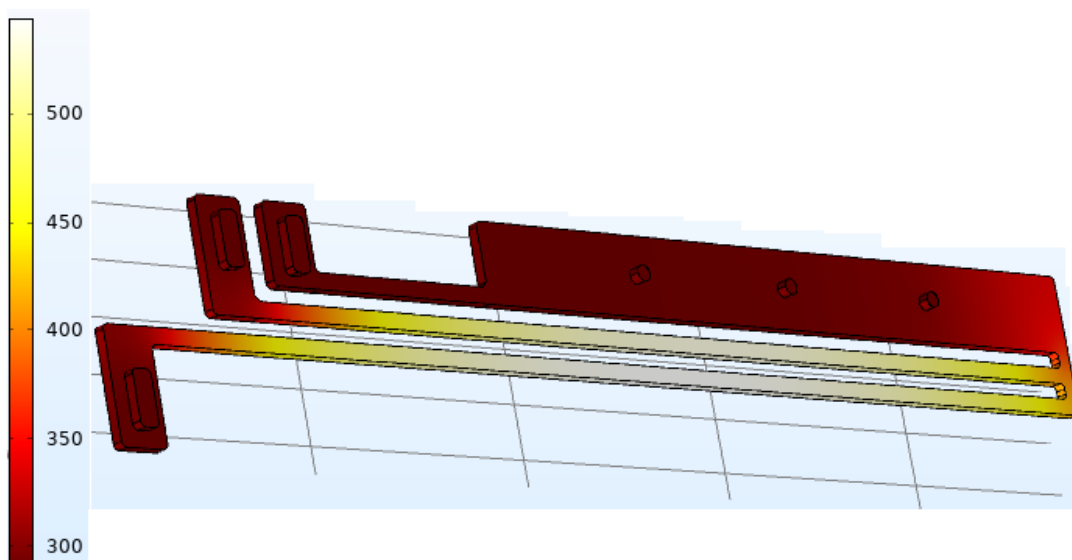
پس از مش بندی مطابق شکل ۴ و اعمال شرایط مرزی بیان شده در شکل ۳، شبیه سازی انجام گرفته و نتایج زیر



شکل ۵- میزان تنش ایجاد شده

مختلف نشان داده می‌شود، در این شکل بازوی داغ و بازوی سرد را مشاهده می‌کنیم و محل تلاقی آن‌ها که باعث ایجاد گرمای اتلافی شده و توان الکتریکی ایجاد می‌کند نیز به وضوح دیده می‌شود.

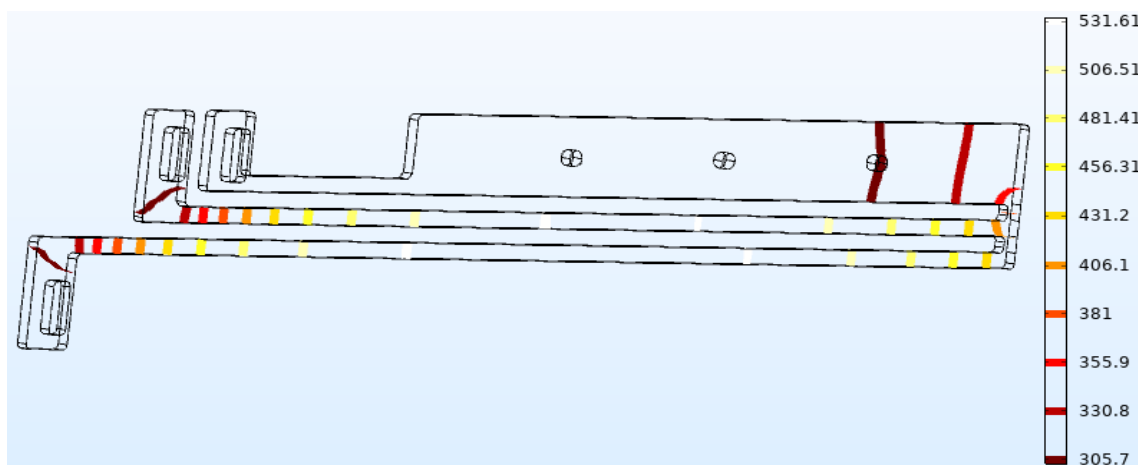
مطابق شکل مشاهده می‌شود که تنش ایجاد شده در قسمت ورودی نسبت به دیگر جاها بیشتر بوده و در ماکزیمم تنش ایجاد شده برابر با ۰/۹ میکرو نیوتون بر متر مربع می‌باشد. همچنین در شکل ۶ میزان دمای سطح‌های



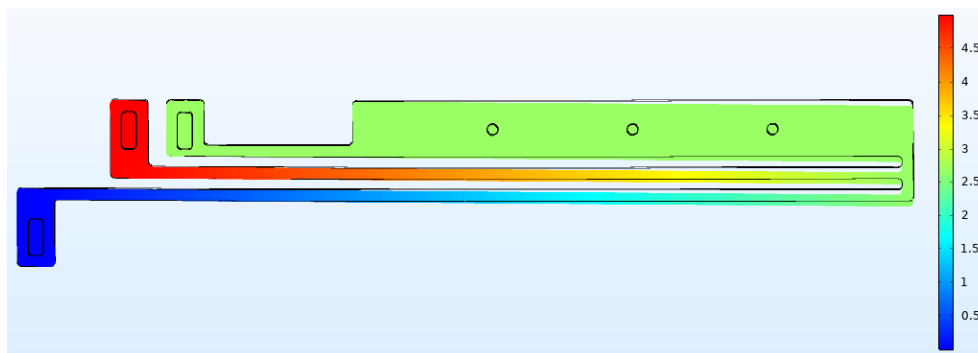
شکل ۶- توزیع دمای سطح

پایه‌های محرک می‌باشد، سپس گرمای سطح باعث تنش و خم شدن بازوها شده که در نتیجه این کار ولتاژ دوباره‌ای ایجاد شده و نتیجه آن در طول بازوهای پیشنهادی در شکل ۸ نشان داده شده است.

در شکل ۷ نیز توزیع سطحی دما برحسب کلونین و ایزوله بودن قسمت‌های مختلف نشان داده شده است که دمای یک سطح از دمای سطح دیگر با هم فرق می‌کنند. در نهایت و در شکل ۸ نیز سطح پتانسیل الکتریکی ایجاد شده در طول طرح پیشنهادی نشان داده شده است. ورودی شبیه سازی در شکل ۸ برابر است با اعمال ولتاژ به یکی از



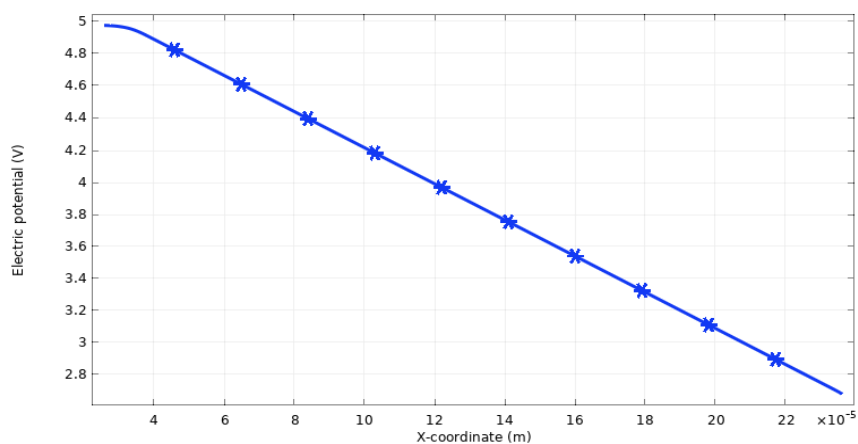
شکل ۷- توزیع سطحی دما



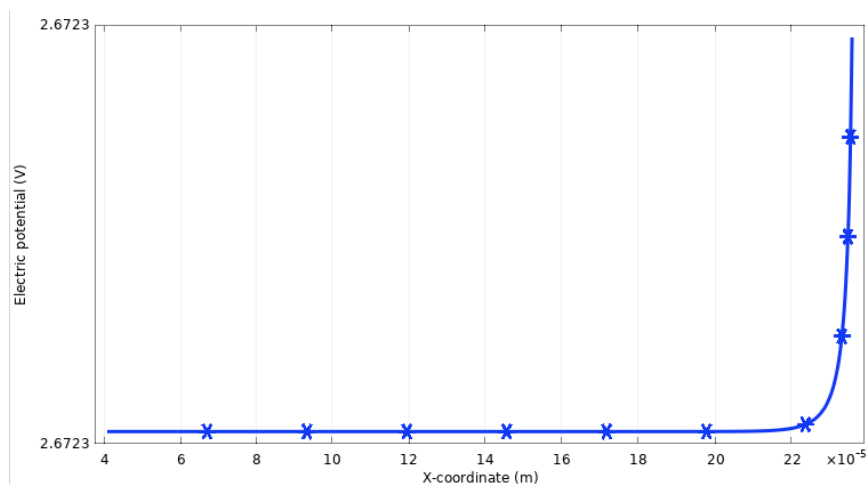
شکل ۸- توزیع پتانسیل الکتریکی

میزان تغییرات پارامترهای اندازه گیری شده نشان داده شده است. در نمودار ۹ میزان ولتاژ ایجاد شده در طول بازوی وسطی نشان داده شده است. همچنین در نمودار ۱۰ و ۱۱ نیز میزان ولتاژ ایجاد شده در طول بازوی کوچک و بازوی بزرگ نشان داده شده است.

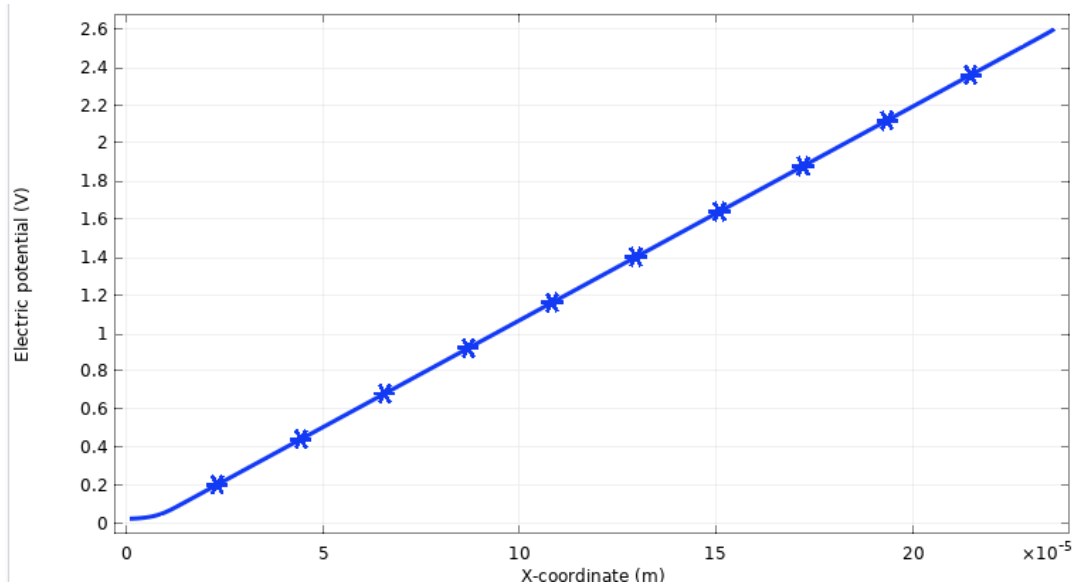
در شکل ۸ مشاهده می شود که ماکزیمم ولتاژ ایجاد شده برابر با ۵ ولت در سطح طرح پیشنهادی می باشد که برای یک طرح نانو ولتاژ بسیار بزرگی می باشد و این نشان از برتری طرح پیشنهادی نسبت به هموعان قدیمی خود می باشد. در نمودارهای ۹ الی ۱۱ نیز در نرم افزار متلب



شکل ۹- ولتاژ ایجاد شده در بازوی وسطی



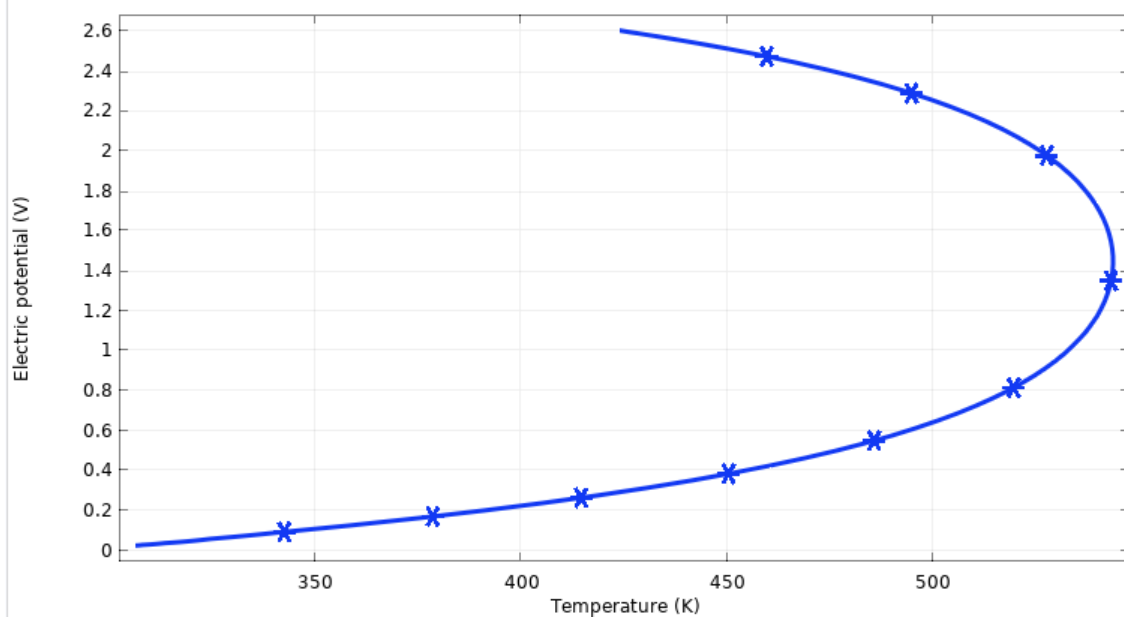
شکل ۱۰- ولتاژ ایجاد شده در طول بازوی کوچک



شکل ۱۱- ولتاژ ایجاد شده در طول بازوی بزرگ

ادامه ولتاژهای ایجاد شده در دمای سطح نشان داده

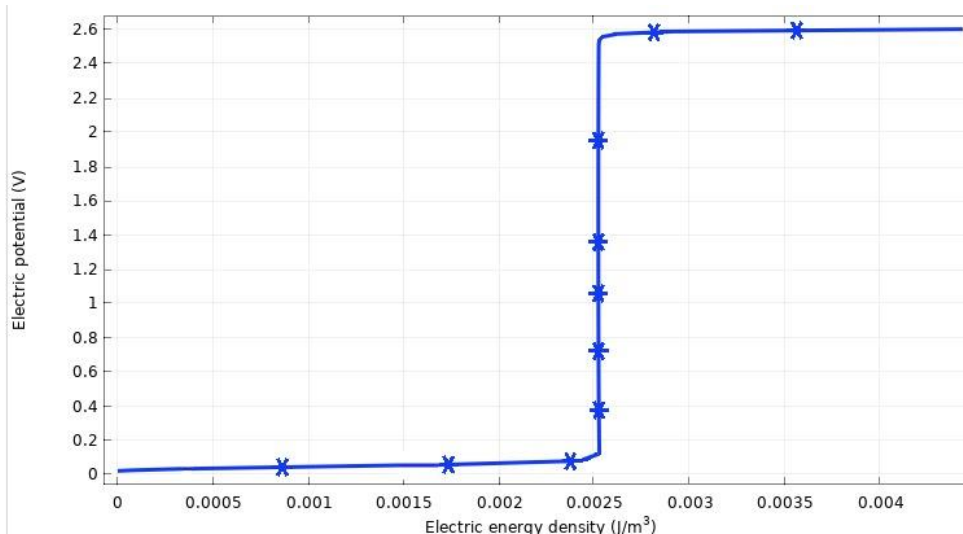
شده است.



شکل ۱۲- ولتاژ ایجاد شده بر دمای سطح

ر شکل ۱۳ نیز ولتاژ ایجاد شده به ازای غلظت انرژی

کتریکی در سطح نشان داده شده است.



شکل ۱۳- ولتاژ ایجاد شده در واحد سطح غلظت انرژی

۴- مقایسه با کارهای مشابه

در این مقاله ساختار جدیدی برای تولید توان الکتریکی به کمک بازیابی حرارت اتلافی یک محرک انعطاف پذیر ارائه شده است. محرک انعطاف پذیر مورد نظر از بازوهای گرم و سرد برای کنترل دما و تولید توان الکتریکی استفاده می‌کند. این محرک‌ها به طور گسترده در سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی (MEMS)^۱ به ویژه در تولید محصولات میکرو^۲، RF، سیستم‌های نوری^۳ و کلیدهای میکرومکانیکی^۴ مورد استفاده قرار می‌گیرند. کاربرد اولیه این بازوها در ایجاد حرارت غیریکنواخت در ساختار می‌باشد و استراتژی‌های مختلفی برای تولید اثر حرارتی نامتقارن در چند سال اخیر ارائه شده است [۲۸-۳۶].

روش تحریک خیلی از این ساختارها به صورت یک جهت و از یک ورودی به ساختار می‌باشد، ولی در روش پیشنهادی این امکان بصورت دو جهت برقرار می‌باشد. اثرات حرارت‌های انگلی (حرارت‌های انگلی همان دماهایی می‌باشند که سطح یا بازو از دست می‌دهد و دمایش دچار تغییرات غیرقابل پیش بینی می‌شود) در بازوی سرد می‌تواند بهره وری را کاهش دهد که این موضوع

برای بازوی گرم نیز برقرار می‌باشد که قابلیت اطمینان را کاهش می‌دهد، ولی در روش پیشنهادی از چند نقطه با دمای ثابت به کمک پایه‌ها برای حل این مشکل استفاده شده است. حتی در برخی طرح‌ها ممکن است اثرات نامطلوب خم شدن غیرعادی و حتی تماس بین بازوها نیز رخ دهد که با اعمال فاصله مطمئن بین بازوها، انتخاب مواد مناسب و ساختار بهینه این اثرات در روش پیشنهادی کمتر دیده می‌شود. به منظور ارزیابی عملکرد این محرک پیشنهادی، نتایج حاصله را با چندین مرجع معتبر که در چند سال اخیر به چاپ رسیده‌اند، در جدول ۱ مورد مقایسه قرار می‌دهیم.

جدول ۱- مقایسه نتایج طرح پیشنهادی با مقالات مشابه

³ optical systems

⁴ micromechanical switching

¹ microelectromechanical

² micromanipulation

ردیف	مرجع	سال	کاربرد	جابجایی بازو	الکتریسیته	ابعاد	دما (سلسیوس)	ساختار	FOM ^۱
۱	[۲۸]	2018	Microgripper	8 um	0.7 V	1300 × 610 um	218	۲ بازوی موازی	$\frac{1.54}{V \times \frac{^{\circ}C}{mm}}$
۲	[۲۹]	2018	Microgripper	17 um	0.65 V	1000 × 180 um	210	۵ بازوی موازی	$\frac{12.9}{V \times \frac{^{\circ}C}{mm}}$
۳	[۳۰]	2016	Position platform	5 um	54.8 mW 1.5 V	177 × 119 um	120	۴ بازوی موازی	$\frac{42.7}{V \times \frac{^{\circ}C}{mm}}$
۴	[۳۱]	2017	Micromirror	10.3 um	2.5 V	1028 × 1028 um	115	۳ بازوی موازی در ۴ ساختار	$\frac{2.8}{V \times \frac{^{\circ}C}{mm}}$
۵	[۳۲]	2015	Micromirror	70 um	2 V	1500 × 1500 um	-*	۲ بازوی موازی	$\frac{6.2}{V \times \frac{^{\circ}C}{mm}}$
۶	[۳۳]	2015	Micromirror	312 um	3 V	2500 × 2500 um	200	۲ بازوی موازی در ۴ ساختار	$\frac{29.95}{V \times \frac{^{\circ}C}{mm}}$
۷	[۳۴]	2018	Chevron electrothermal	10.94 um	0.2 V	650 × 125 um	448	۴ بازوی موازی	$\frac{12.05}{V \times \frac{^{\circ}C}{mm}}$
۸	[۳۵]	2015	Microgripper	9.1 um	[0.5-7] V [0-5] mA	277 × 142 um	400	۲ بازوی موازی در ۲ ساختار موازی	$\frac{647.1}{V \times \frac{^{\circ}C}{mm}}$
۹	[۳۶]	2016	Micromirror	356.4 um	[0.7-6] V	712 × 450 um	270	۳ بازوی موازی	$\frac{1802.4}{V \times \frac{^{\circ}C}{mm}}$
۱۰	پیشنهادی	۲۰۱۹	Microgripper	3 um	5 V	40 × 250 um	277	۳ بازوی موازی	$\frac{4155.8}{V \times \frac{^{\circ}C}{mm}}$

* با توجه به عدم ارائه دمای کاری در مقاله به صورت پیش فرض ۱۰۰ در نظر گرفته شده است.

می‌کنیم که این ضریب شایستگی برای طرح پیشنهادی در مقایسه با دیگر مقالات مشابه، عملکرد خیلی خوبی از خود نشان می‌دهد.

۵- نتیجه گیری

این مقاله به طراحی و شبیه سازی یک محرک انعطاف پذیر حرارتی جدیدی پرداخته و روشی جدید برای بازیابی حرارت اتلافی و تبدیل آن به الکتریسیته و بلعکس را ارائه می‌دهد. طراحی مورد نظر پس از معرفی و ارائه روابط متناظر گرمایی در نرم افزار کامسول پیاده سازی شده و نتایج آن با نتایج چندین مرجع معتبر مورد مقایسه و

برای مقایسه عملکرد روش پیشنهادی با روش‌های دیگر، یک ضریب شایستگی بصورت رابطه ۱۹ ارائه شده و بر اساس پارامترهای این رابطه می‌توان مقالات را باهم مورد مقایسه قرار داد.

$$FOM = \frac{d \times V \times T}{A} \quad (19)$$

در این رابطه d بیان کننده ی جابجایی بازو یا بیشینه خم شدن بازو، V بیان کننده ولتاژ ایجاد شده و یا ولتاژ بایاس، T ماکزیمم دمای موجود در سطح که ساختار پیشنهادی توانایی تحمل این دما را دارد و A مساحت اشغالی توسط ساختار می‌باشد. با دقت در جدول ۱ مشاهده

via solar pond heat extraction. *Energy Conversion and Management*, 135, 74-83.

[8] Shu, G., Zhao, J., Tian, H., Liang, X., & Wei, H. (2012). Parametric and exergetic analysis of waste heat recovery system based on thermoelectric generator and organic rankine cycle utilizing R123. *Energy*, 45(1), 806-816.

[9] Yazawa, K., & Shakouri, A. (2011). Cost-efficiency trade-off and the design of thermoelectric power generators. *Environmental science & technology*, 45(17), 7548-7553.

[10] Remeli, M. F., Tan, L., Date, A., Singh, B., & Akbarzadeh, A. (2015). Simultaneous power generation and heat recovery using a heat pipe assisted thermoelectric generator system. *Energy Conversion and management*, 91, 110-119.

[11] Zheng, X. F., Liu, C. X., Yan, Y. Y., & Wang, Q. (2014). A review of thermoelectrics research—Recent developments and potentials for sustainable and renewable energy applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, 32, 486-503.

[12] Fleurial, J. P. (2009). Thermoelectric power generation materials: Technology and application opportunities. *Jom*, 61(4), 79-85.

[13] Li, G., Zhang, G., He, W., Ji, J., Lv, S., Chen, X., & Chen, H. (2016). Performance analysis on a solar concentrating thermoelectric generator using the micro-channel heat pipe array. *Energy Conversion and Management*, 112, 191-198.

[14] Li, G., Zhang, G., He, W., Ji, J., Lv, S., Chen, X., & Chen, H. (2016). Performance analysis on a solar concentrating thermoelectric generator using the micro-channel heat pipe array. *Energy Conversion and Mana*

[15] Cao, Q., Luan, W., & Wang, T. (2018). Performance enhancement of heat pipes assisted thermoelectric generator for automobile exhaust heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 130, 1472-1479.

[16] Remeli, M. F., Date, A., Orr, B., Ding, L. C., Singh, B., Affandi, N. D. N., & Akbarzadeh, A. (2016). Experimental investigation of combined heat recovery and power generation using a heat pipe assisted thermoelectric generator system. *Energy conversion and management*, 111, 147-157.

[17] Sasaki, K., Horikawa, D., & Goto, K. (2015). Consideration of thermoelectric power generation by using hot spring thermal energy

ارزیابی قرار گرفته است. برتری طرح پیشنهادی در کنترل حرارت‌های اتلافی روی کوتاه‌ترین بازوی محرک توسط پایه‌ها بوده و برخلاف روش تحریک خیلی از ساختارهای بررسی شده که از یک ورودی اعمال شده به آنها بدست آمده‌اند، در روش پیشنهادی این امکان بصورت دو جهته برقرار می‌باشد و به صورت همزمان می‌توان دما و الکتریسیته را کنترل نمود. نتایج شبیه سازی نشان از برتری طرح پیشنهادی نسبت به طرح‌های مشابه با FOM بالایی می‌باشد که نسبت به بهترین طرح موجود برتری ۲/۳ برابری داشته و نسبت به بدترین طرح ارائه شده نیز حدود ۲۷۰۰ برابر بهبود حاصل شده است.

مراجع

[1] Liu, X., Deng, Y. D., Li, Z., & Su, C. Q. (2015). Performance analysis of a waste heat recovery thermoelectric generation system for automotive application. *Energy Conversion and Management*, 90, 121-127.

[2] Remeli, M. F., Date, A., Orr, B., Ding, L. C., Singh, B., Affandi, N. D. N., & Akbarzadeh, A. (2016). Experimental investigation of combined heat recovery and power generation using a heat pipe assisted thermoelectric generator system. *Energy conversion and management*, 111, 147-157.

[3] Zou, S., Kanimba, E., Diller, T. E., Tian, Z., & He, Z. (2018). Modeling assisted evaluation of direct electricity generation from waste heat of wastewater via a thermoelectric generator. *Science of The Total Environment*, 635, 1215-1224.

[4] Zhang, H., Kong, W., Dong, F., Xu, H., Chen, B., & Ni, M. (2017). Application of cascading thermoelectric generator and cooler for waste heat recovery from solid oxide fuel cells. *Energy Conversion and Management*, 148, 1382-1390.

[5] Junior, O. H. A., Calderon, N. H., & de Souza, S. S. (2018). Characterization of a Thermoelectric Generator (TEG) System for Waste Heat Recovery. *Energies*, 11(6), 1-13.

[6] Patil, D. S., Arakerimath, R. R., & Walke, P. V. (2018). Thermoelectric materials and heat exchangers for power generation—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 95, 1-22.

[7] Ding, L. C., Akbarzadeh, A., Singh, B., & Remeli, M. F. (2017). Feasibility of electrical power generation using thermoelectric modules