



Numerical Investigation of Channel Cross-section Effect on the Performance of Integrated Thermoelectric Power Generator

V. Mofidian¹, M. Kalteh² *, M. Hami¹

¹ Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran

ABSTRACT: Thermoelectric generators are a sustainable and environmentally friendly technology that can recover wasted heat energy and convert it to electricity. Meanwhile, integrated thermoelectric generators have been able to significantly increase the performance of thermoelectric generators. In this paper, the effect of flow channel cross-sections on integrated thermoelectric power generator performance is investigated numerically using the finite volume method. In this regard, various flow channel configurations including circles, trapezoids, squares, and rectangles have been taken into account and the effect of cross-sectional area ratio, semiconductor length, and Reynolds number on the performance of the device has been evaluated. In this study, the top and bottom of conductor surfaces are exposed to a cold temperature and a hot fluid with a constant velocity and temperature enters the channel. The results show that the power output, voltage, and thermal efficiency of 36 rectangular configurations are higher than other flow channels. Also, the heat input, power output, and thermal efficiency at a cross-sectional area ratio of 0.28 are respectively found to be 1.68, 1.77, and 1.52 times higher than at a cross-sectional area ratio of 0.68. In addition, an optimal length for a semiconductor is determined, in which the maximum output power is achieved.

Review History:

Received: Apr. 21, 2022

Revised: Jul. 17, 2022

Accepted: Sep. 10, 2022

Available Online: Sep. 24, 2022

Keywords:

Integrated thermoelectric

Flow channel

Power output

Numerical solution

1- Introduction

Thermoelectric devices are a viable and suitable technology that can be used to recover waste heat energy, convert it to electricity and reduce the harmful effects of fossil fuels [1, 2]. In order to increase the performance of conventional thermoelectric generators, an integrated thermoelectric device that uses an internal conductive connector between n-type and p-type materials has been used. A channel is created in the internal connector of the integrated thermoelectric and serves as a fluid flow passage [3, 4]. In recent years various studies have been conducted on thermoelectric devices. Chen et al. [5] investigated the performance of a single-stage thermoelectric device. They found that increasing the Reynolds number and hot fluid inlet temperature improves the performance of the device. Reddy et al. [6] by changing the configuration of the flow channel of an integrated thermoelectric generator with a constant coefficient, improved the heat transfer rate and the performance of the device. Garmjani and Hosseinpour [7] investigated the performance of thermoelectric generators by considering the objective functions of power, cost, and the second law of efficiency. They concluded that the counter-flow pattern can lead to higher power output than the co-flow pattern. According to the literature survey, it can be

concluded that the flow channel configuration is one of the most effective parameters in the performance improvement of integrated thermoelectric devices. In this study, different flow channel structures of an integrated thermoelectric generator including rectangle, 18 circles, 18 squares, 18 trapezoids, and 36 rectangles are investigated. In addition, finding the optimal length of the semiconductor to achieve the maximum power is another point that is addressed in this research. It should be noted that the properties of thermoelectric materials (thermal conductivity, specific resistance and Seebeck coefficient) are also considered as a polynomial function of temperature.

2- System Description and Governing Equations

Fig. 1 shows the schematic view of an integrated thermoelectric generator. According to this figure, a channel is created between the terminals of the thermoelectric material in order to pass the hot fluid inside it and this channel acts like a heat exchanger. Fig. 2 shows the types of flow channel configurations including rectangle, 18 circles, 18 squares, 18 trapezoids, and 36 rectangles. It should be noted that the cross-sectional area ratio (defined as the ratio of flow cross-sectional areas of an integrated fluid flow channels (A_c) and the main flow channel (A) is kept constant [6]:

*Corresponding author's email: m.kalteh@gu.ac.ir



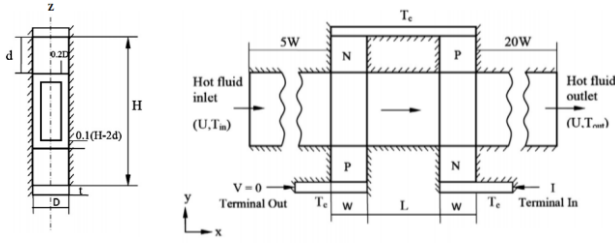


Fig. 1. Schematic view of an integrated thermoelectric generator [4].

$$\phi = \frac{A_c}{A} \quad (1)$$

The equations of continuity, momentum, and energy in the fluid region are shown as Eqs. (2) to (4), respectively [3, 4]:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$

$$\rho_f (u \cdot \nabla u) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u \quad (3)$$

$$(\rho_f c_{p,f})(u \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k_f \nabla T) \quad (4)$$

where u , T and P are velocity vector, temperature, and pressure of the fluid, respectively. Also ρ_f , k_f , μ and $C_{p,f}$ are density, thermal conductivity, dynamic viscosity, and specific heat of fluid, respectively. For conductors and semiconductors, the current density continuity equation (J) is determined from Eq. (5) [3, 4]:

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (5)$$

The energy equation in the conductor and semiconductor are shown in Eqs. (6) and (7), respectively [3, 4, 8]:

$$\nabla \cdot (k_s \nabla T) + \rho J^2 = 0 \quad (6)$$

$$\nabla \cdot (k_s \nabla T) + \rho J^2 - T J \cdot \left[(\nabla \alpha)_T + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T} \right) \nabla T \right] = 0 \quad (7)$$

Also, the electrical potential in thermoelectric devices consists of Ohmic potential (V_o) and Seebeck potential (V_s) [4]. In this study, governing equations are solved with ANSYS-FLUENT software based on finite volume method discretization.

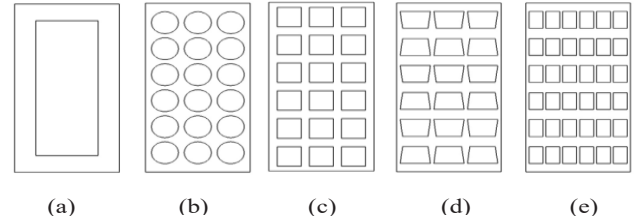


Fig. 2. Types of flow channel configurations (a) rectangle, (b) 18 circles, (c) 18 squares, (d) 18 trapezoids, and (e) 36 rectangles.

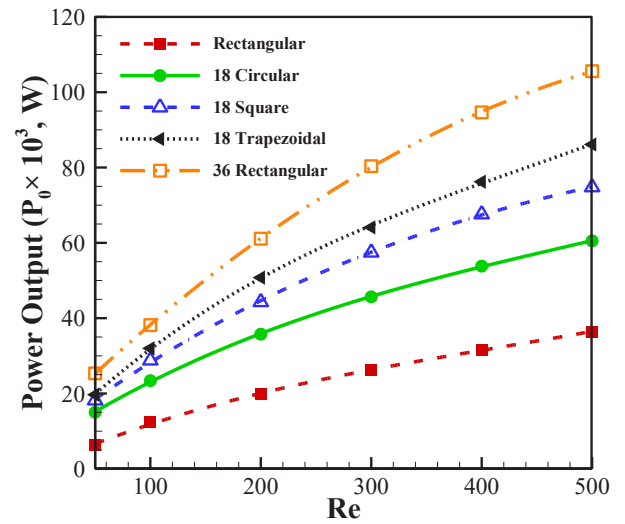


Fig. 3. The effect of Reynolds number on the power output of a thermoelectric generator with different flow channels.

3- Results and Discussion

Fig. 3 shows the effect of the Reynolds number on the power output of the thermoelectric generator. As the Reynolds number increases from 50 to 500, the rate of heat transfer between thermoelectric materials increases, and as a result more Seebeck voltage is generated. Therefore, the power output of this device increases with the increase of the Reynolds number. In addition, regardless of the value of the Reynolds number, the flow channel with the 36-rectangular configuration has a higher power output than other configurations. The variation of power output and heat input with the cross-sectional area ratio are shown in Fig. 4. According to this figure, by increasing the cross-sectional area ratio from 0.28 to 0.88, it has been observed that the power output and heat input decrease exponentially and linearly, respectively. This is due to the fact that as the temperature increases, the average velocity and rate of heat transfer between the fluid and the internal conductor decreases.

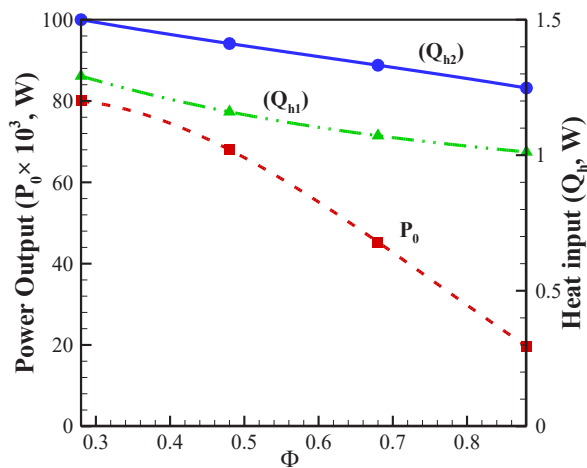


Fig. 4. The effect of different cross-sectional area ratios on power output and heat input.

4- Conclusion

In this research, the effect of the cross-section of the flow channel on the performance of an integrated thermoelectric device was studied using the finite volume method. According to the results, the structure of the flow channel has an impressive effect on the performance of the integrated thermoelectric device. The results showed that increasing the Reynolds number leads to an improvement in the power output. Also, the flow channel with the configuration of 36 rectangles has a higher power output compared to other configurations. In addition, due to the reduction of heat transfer surface area, as the cross-sectional area ratio increases, the power output, and heat input decrease. Moreover, at an optimal length of the semiconductor, the power output of the thermoelectric device reaches its maximum value and then reduces.

References

- [1] G.R.C. R, N. Krishna, A.K. Johny, A Numerical Study and Demonstration of Exhaust Gas Heat Recovery System Using Thermoelectric Generator, *International Journal of Innovative and Emerging Research in Engineering*, 4(3) (2017) 73-81.
- [2] T. Zhang, New thinking on modeling of thermoelectric devices, *Applied Energy*, 168 (2016) 65-74.
- [3] T. Ma, Z. Qu, X. Yu, X. Lu, Y. Chen, Q. Wang, Numerical study and optimization of thermoelectric-hydraulic performance of a novel thermoelectric generator integrated recuperator, *Energy*, 174 (2019) 1176-1187.
- [4] B. Reddy, M. Barry, J. Li, M.K. Chyu, Thermoelectric-hydraulic performance of a multistage integrated thermoelectric power generator, *Energy conversion and management*, 77 (2014) 458-468.
- [5] M. Chen, L.A. Rosendahl, T. Condra, A three-dimensional numerical model of thermoelectric generators in fluid power systems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(1-3) (2011) 345-355.
- [6] B. Reddy, M. Barry, J. Li, M. Chyu, Enhancement of Thermoelectric Device Performance Through Integrated Flow Channels, *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, 4 (2013).
- [7] H.A. Garmejani, S. Hossainpour, Single and multi-objective optimization of a TEG system for optimum power, cost and second law efficiency using genetic algorithm, *Energy Conversion and Management*, 228 (2021) 113658.
- [8] K.S. Oliveira, R.P. Cardoso, C.J. Hermes, Numerical assessment of the thermodynamic performance of thermoelectric cells via two-dimensional modelling, *Applied energy*, 130 (2014) 280-288.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

V. Mofidian, M. Kalteh, M. Hami, Numerical Investigation of Channel Cross-section Effect on the Performance of Integrated Thermoelectric Power Generator, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 54(9) (2022) 441-444.

DOI: 10.22060/mej.2022.21327.7426





بررسی عددی اثر سطح مقطع کانال جریان بر عملکرد مولد توان ترموالکتریک یکپارچه

وحید مفیدیان^۱، محمد کلته^{۲*}، مسعود حامی^۱

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۱

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۹

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۷/۰۲

کلمات کلیدی:

ترموالکتریک یکپارچه

کانال جریان

توان خروجی

حل عددی

خلاصه: مولدهای ترموالکتریک یک تکنولوژی بادوام و سازگار با محیط زیست هستند که یکی از مهم‌ترین کاربردهای آن‌ها، بازیابی حرارت هدررفته از مصرف سوخت‌های فسیلی و تبدیل آن به الکتریسیته می‌باشد. در این میان، مولدهای ترموالکتریک یکپارچه که با ایجاد کانال جریان در پایه‌های دستگاه ساخته می‌شود، توانسته‌اند عملکرد دستگاه را به مقدار قابل توجهی افزایش دهند. هدف از انجام این تحقیق، بررسی عددی اثر ساختار سطح مقطع کانال جریان بر عملکرد مولد توان ترموالکتریک یکپارچه می‌باشد. به این منظور، هندسه‌های مختلفی برای سطح مقطع کانال جریان شامل دایره، دوزنقه، مربع و مستطیل در نظر گرفته شده و اثرات نسبت مساحت کانال جریان، طول نیمه‌هادی و عدد رینولدز بر روی عملکرد دستگاه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در مطالعه حاضر، اتصال دهنده‌های مولد ترموالکتریک دارای دمای ثابت سرد بوده و حرارت با وارد شدن سیال گرم با سرعت یکنواخت به دستگاه اعمال می‌شود. بررسی نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در یک نسبت مساحت کانال جریان و طول نیمه‌هادی ثابت، عملکرد دستگاه ترموالکتریک برای کانال جریان دارای ۳۶ مستطیل از سایر کانال‌های ذکر شده بیشتر است. علاوه بر این، با افزایش مقدار نسبت مساحت کانال جریان از ۰/۲۸ به ۰/۶۸، مقادیر گرمای ورودی، توان خروجی و راندمان حرارتی به ترتیب ۱/۶۸، ۱/۷۷ و ۱/۵۲ برابر می‌شوند. در ضمن، در این تحقیق یک طول بهینه برای نیمه‌هادی محاسبه شده‌است که در آن، توان خروجی حداکثر حاصل می‌شود.

۱- مقدمه

امروزه بیشتر انرژی مورد نیاز انسان از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود. استفاده از این سوخت‌ها، باعث ایجاد اثرات مخربی مانند آزاد کردن گازهای گلخانه‌ای، تشکیل باران‌های اسیدی و تخریب لایه اوزون می‌شود که در نهایت آلودگی آب و هوا و گرم شدن زمین را به دنبال دارد. علاوه بر این، تقریباً دو سوم این انرژی‌ها از طریق گرمای اتلافی از دست می‌رود. همه این عوامل سبب گردیده است تا تحقیقات و بررسی‌ها برای ساخت دستگاه‌هایی با راندمان بالا و سازگار با محیط زیست افزایش یابد. در این میان، یک راه حل مناسب استفاده از دستگاه ترموالکتریک می‌باشد [۱-۳]. این دستگاه با استفاده از اثر سبیک^۱ (تبدیل اختلاف دما به اختلاف پتانسیل الکتریکی)، به عنوان مولد جریان برق کار می‌کند. از طرف دیگر، با استفاده از اثر پلتیر^۲ (تبدیل اختلاف پتانسیل به اختلاف دما)، نقش یک سیستم حرارتی را ایفا می‌کند [۴]. دستگاه‌های ترموالکتریک در خنک‌کننده‌های الکترونیکی،

1 Seebeck

2 Peltier

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.kalteh@gu.ac.ir

بسته‌های نگهداری محصولات غذایی و آشامیدنی قابل حمل و سیستم‌های تهویه مطبوع وسایل نقلیه مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵].

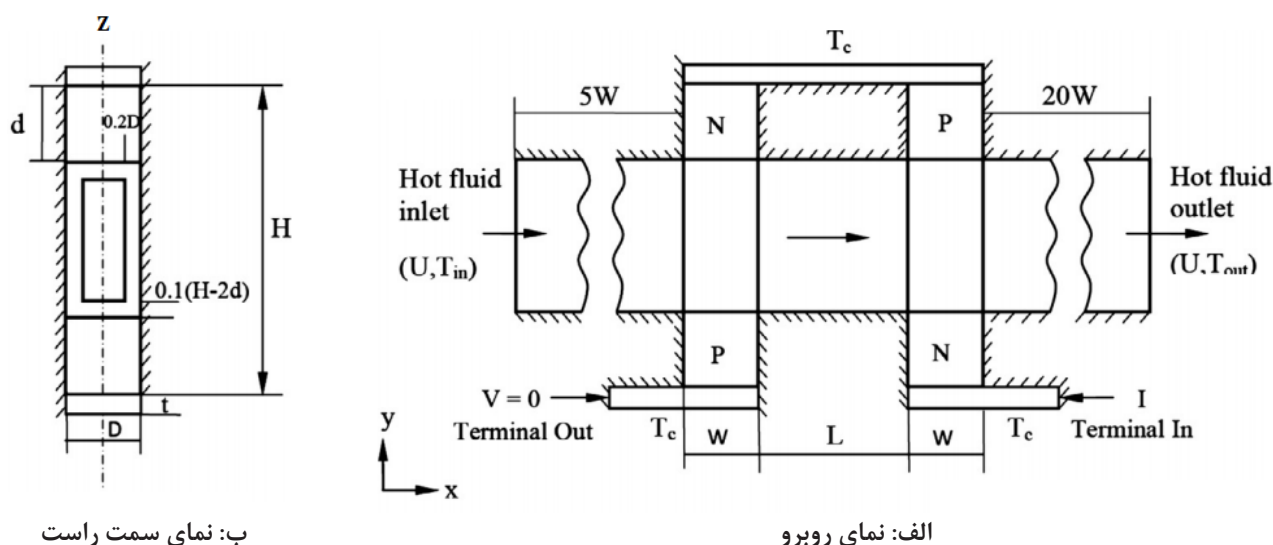
مولدهای ترموالکتریک معمولی، ترموالکتریک کامپوزیت و ترموالکتریک یکپارچه از جمله ساختارهایی هستند که راندمان دستگاه را تا حد مطلوبی افزایش داده‌اند. لازم به ذکر است که دستگاه‌های ترموالکتریک معمولی و کامپوزیتی از دو اتصال دهنده از جنس مس در بالا و پایین که هر کدام دارای دمای سرد و گرم می‌باشند و هم‌چنین دو پایه عمودی ساخته می‌شوند [۶]. به منظور افزایش بیشتر عملکرد ترموالکتریک‌های کامپوزیتی، دستگاه ترموالکتریک یکپارچه که از یک اتصال دهنده داخلی رسانا در بین مواد نوع n و نوع p بهره می‌گیرد، استفاده شده‌است. برای عبور سیال از اتصال دهنده داخلی، کانالی در آن ایجاد گردیده است و سیال از محیط وارد کانال می‌شود و از طرف دیگر آن خارج می‌گردد. اتصال دهنده داخلی ایجاد شده، وظیفه انتقال حرارت بین سیال و مواد نیمه‌هادی را بر عهده دارد. این نوع طراحی نسبت به سایر ساختارهای ترموالکتریک از اطمینان بالاتری برخوردار است. بر خلاف دستگاه‌های ترموالکتریک معمولی و کامپوزیتی



که یکی از اتصال‌دهنده‌های بالایی دارای دمای گرم و دیگری دمای سرد می‌باشند، در ترموالکتریک یکپارچه هر دو اتصال‌دهنده بالایی دارای دمای سرد هستند و حرارت از طریق کانال جریان به دستگاه داده می‌شود [۹-۷]. در سال‌های اخیر پژوهش‌های مختلفی درباره دستگاه‌های ترموالکتریک انجام گرفته است. شبائو و همکاران [۱۰] از یک دستگاه ترموالکتریک به منظور بازیابی انرژی تلف‌شده از موتور اتومبیل استفاده نمودند. آن‌ها دریافتند که با افزایش دمای آب سردکننده و سرعت اتومبیل، اختلاف درجه حرارت بین نقطه اتصال سرد و گرم افزایش می‌یابد. همچنین نشان دادند که با افزایش اختلاف دما، ولتاژ خروجی (ولتاژ سیبک) افزایش یافته و علاوه بر این، توان خروجی دستگاه و بازده دمایی بهبود می‌یابد. چن و همکاران [۱۱] عملکرد یک دستگاه ترموالکتریک تک‌مرحله‌ای را به صورت سه‌بعدی مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. آن‌ها در این تحقیق از سیال داغ برای ایجاد دمای گرم استفاده کردند و خواص مواد را به صورت وابسته به دما در نظر گرفتند. آن‌ها دریافتند که افزایش عدد رینولدز و دمای ورودی سیال گرم، عملکرد دستگاه را بهبود می‌بخشد.

ردی و همکاران [۴] با مطالعه عددی بر روی دستگاه ترموالکتریک یکپارچه، به بررسی تأثیر عدد رینولدز، دما، طول نیمه‌هادی و مقدار مقاومت داخلی بهینه به منظور دستیابی به توان خروجی و عملکرد بهتر پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد، عدد رینولدز و دما به طور قابل توجهی می‌توانند بر عملکرد این دستگاه تأثیر مثبت داشته باشند. همچنین با ثابت در نظر گرفتن نرخ جریان ورودی و دما دریافتند، زمانی که مقاومت بار به مقاومت درونی میل می‌کند، توان خروجی و عملکرد دستگاه به بیشینه مقدار خود می‌رسد. در مطالعه دیگری، ردی و همکاران [۱۲] با تغییر دادن شکل کانال جریان با یک ضریب ثابت، توانستند سطح انتقال حرارت را در مولد ترموالکتریک یکپارچه افزایش دهند و عملکرد دستگاه ترموالکتریک را بهبود بخشند. علاوه بر این، آن‌ها دریافتند که دمای ورودی سیال و عدد رینولدز نیز تأثیر مطلوبی بر بهبودی عملکرد دستگاه‌های ترموالکتریک دارند. ردی و همکاران [۹] با استفاده از حل عددی به بررسی عملکرد دستگاه ترموالکتریک یکپارچه با کانال مستطیلی چندمرحله‌ای پرداختند. آن‌ها دریافتند که افزایش عدد رینولدز و همچنین دمای ورودی سیال باعث افزایش ولتاژ و در نتیجه منجر به افزایش توان خروجی و عملکرد دستگاه می‌گردد. علاوه بر این، در این تحقیق اثر طول اتصال‌دهنده داخلی مورد بررسی قرار گرفت و برای رسیدن به بیش‌ترین مقدار توان خروجی، یک طول بهینه انتخاب گردیده است. مانیکاندان و کاوشیک [۱۳] به بررسی عددی و تحلیلی روی یک دستگاه ترموالکتریک حلقوی با در نظر گرفتن اثرات پلتیر، ژول و قانون فوریه

پرداختند. آن‌ها همچنین در تحقیقات خود از اثر تامسون نیز استفاده نمودند. با بررسی نتایج بدست آمده و مقایسه با ترموالکتریک تخت (معمولی) آن‌ها دریافتند که توان، انرژی و راندمان تبدیل دستگاه ترموالکتریک حلقوی در مقایسه با ترموالکتریک تخت (معمولی) دارای مقدار کمتری می‌باشد. منگ و سوزوکی [۱۴] دریافتند که تعداد جفت‌های نیمه هادی‌ها، طول پایه‌ها و نسبت سطح نیمه هادی‌ها بر عملکرد دستگاه ترموالکتریک تأثیر برجسته‌ای دارد. آن‌ها تحقیقات خود را بر پایه بهینه‌سازی چند منظوره (بهینه‌سازی توان خروجی و راندمان تبدیل) انجام دادند و دریافتند که توان خروجی و راندمان تبدیل دستگاه در صورتی که پارامترهای هندسی بهینه شوند، افزایش می‌یابد. هازاما و همکاران [۱۵] یک مولد ترموالکتریک استوانه‌ای خورشیدی که با سیال آب عمل می‌کند را در معرض نور مستقیم خورشید آزمایش نمودند. در ابتدا آن‌ها به منظور افزایش عملکرد ترموالکتریک تا حد امکان مقاومت داخلی آن را کاهش دادند. در ادامه، با استفاده از مواد مختلف، توانستند نورهای منعکس‌شده از سطح گرم ترموالکتریک را افزایش و خاصیت گرمایی آن را بهبود بخشند. به این ترتیب، ترموالکتریک گستره دمایی بیشتری را تحمل نموده و عملکرد دستگاه افزایش می‌یابد. یان و همکاران [۱۶] به بررسی عملکرد مولدهای ترموالکتریک نصب‌شده بر روی کانال‌هایی با پنج نوع مقطع مختلف پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که دستگاه ترموالکتریک با کانال مستطیلی شکل، دارای بالاترین توان خروجی و راندمان تبدیل حرارتی است. علاوه بر این، با افزایش عدد رینولدز، توان خالص و راندمان تبدیل حرارتی تا یک عدد رینولدز خاص بهبود می‌یابد و سپس روند کاهش پیدا می‌کند. گرمجانی و حسین‌پور [۱۷] با در نظر گرفتن توابع هدف توان، هزینه و راندمان قانون دوم به شکل‌های تک‌هدفه و چندهدفه یک مولد ترموالکتریک را بهینه کردند. آن‌ها دریافتند که ترموالکتریک با جریان مخالف می‌تواند توان خروجی بالاتری را نسبت به جریان موافق تولید نماید. با توجه به مطالعات پیشین، می‌توان دریافت که شکل‌های مختلف دستگاه ترموالکتریک مانند کامپوزیتی و یکپارچه در مقایسه با ساختار معمولی دارای بازده بالاتری است. در ضمن، شکل و ساختار مولد ترموالکتریک از جمله طول و سطح مقطع اتصال‌دهنده و نیمه‌هادی‌ها، خواص مواد استفاده شده و نوع منبع حرارتی نیز تأثیر بسیاری بر عملکرد آن دارد. از تحقیقات پیشین برمی‌آید که هندسه کانال جریان یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر بهبود عملکرد دستگاه می‌باشد. به عبارت دیگر، افزایش یا کاهش سطح انتقال حرارت باعث تغییر در نرخ انتقال حرارت و ولتاژ سیبک می‌گردد که در نهایت بر بازده دستگاه تأثیرگذار است. هر چند اثر ساختار هندسه کانال جریان در یک مولد ترموالکتریک معمولی (غیریکپارچه) بررسی شده‌است



شکل ۱. نمای کلی ترموالکتریک یکپارچه [۹].

Fig. 1. Schematic view of an integrated thermoelectric generator [9].

سیال گرم با دمای ثابت (T_{in}) و سرعت یکنواخت (U) به کانال اصلی با سطح مقطع ثابت ($D \times (H - 2d)$) وارد می‌شود، از داخل آن عبور می‌کند و در نهایت از انتهای آن خارج می‌شود. دیواره کانال، سطوح بالا و پایین اتصال‌دهنده داخلی، انتقال حرارت را از سیال گرم به مواد ترموالکتریکی منتقل می‌کنند. سطح بالایی اتصال‌دهنده بالا و همچنین سطوح پایینی اتصال‌دهنده پایین، تحت دمای ثابت سرد (T_c) قرار دارند. سطوح باقی‌مانده و کانال اصلی جریان، آدیاباتیک می‌باشند. جدول ۱ ابعاد اصلی هندسه مورد نظر را نمایش می‌دهد.

جدول ۱. ابعاد هندسه مسئله حاضر (تمام ابعاد بر حسب میلی‌متر هستند) [۹].

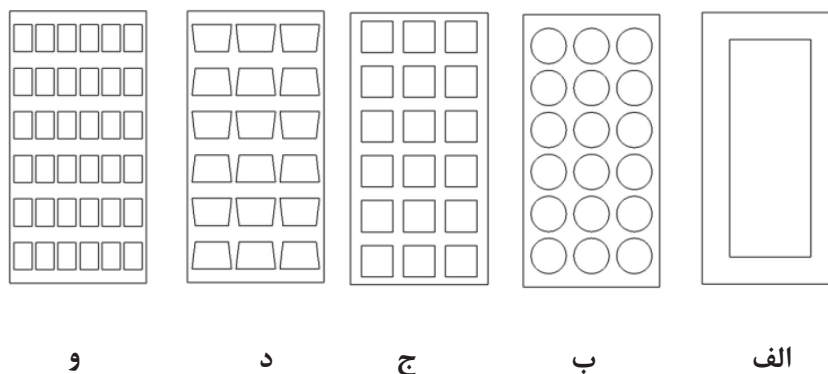
Table 1. Dimensions of the geometry of the present study (all dimensions are in millimeters) [9].

اندازه (mm)	اجزای ترموالکتریک
۲۰	ارتفاع پایه (H)
۵	عمق پایه (D)
۵	عرض (W)
۱/۵	ضخامت اتصال‌دهنده (t)
۱۰	فاصله بین دو پایه (L)
۵	اندازه مواد نیمه‌هادی (d)

[۱۴-۱۶] اما فقط در مرجع [۱۲]، اثرات ساختار سطح مقطع کانال جریان بر عملکرد دستگاه ترموالکتریک یکپارچه (که از ایجاد کانال در پایه‌های دستگاه ساخته می‌شود) در نظر گرفته شده‌است که آن هم برای هندسه‌های محدود و برای یک جفت نیمه‌هادی نوع n و p انجام شده‌است. بنابراین، بررسی ساختارهای مختلف کانال جریان در یک مولد ترموالکتریک یکپارچه شامل مستطیل، ۱۸ دایره، ۱۸ مربع، ۱۸ دوزنقه و ۳۶ مستطیل مهم‌ترین هدف و نوآوری تحقیق حاضر می‌باشد. علاوه بر این، یافتن طول بهینه نیمه‌هادی برای دستیابی به توان حداکثر موضوع دیگری است که در این پژوهش به آن پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که خواص مواد ترموالکتریک (هدایت حرارتی، مقاومت ویژه و ضریب سیبک) نیز به صورت تابعی چند جمله‌ای از دما در نظر گرفته شده‌است.

۲- معرفی مسئله

شکل ۱ نمای کلی مولد ترموالکتریک یکپارچه را نشان می‌دهد که توسط ردی و همکاران [۴] معرفی شده‌است. مطابق این شکل، یک کانال در بین پایه‌های مواد ترموالکتریکی به منظور عبور سیال گرم از داخل آن ایجاد شده‌است. به عبارت دیگر، این کانال مانند یک مبادله‌کن حرارتی عمل می‌کند. سطح مقطع پایه‌ها به شکل مربعی با اندازه $(W \times d)$ ، ارتفاع هر یک از آن‌ها برابر (H) و فاصله بین آن‌ها برابر (L) است. شکل اتصال‌دهنده داخلی به صورت مستطیل با اندازه $(0.16D \times 0.16(H - 2d) \times W)$ می‌باشد.



شکل ۲. انواع پیکربندی‌های کانال جریان (الف) مستطیل، (ب) ۱۸ دایره، (ج) ۱۸ مربع، (د) ۱۸ دوزنقه و (و) ۳۶ مستطیل.

Fig. 2. Types of flow channel configurations (a) rectangle, (b) 18 circles, (c) 18 squares, (d) 18 trapezoids, and (e) 36 rectangles.

در رابطه (۲) n_c ، n_s ، n_t و n_r به ترتیب تعداد دایره‌ها، مربع، دوزنقه و مستطیل‌ها را نشان می‌دهد. در این تحقیق $n_r = 6 \times 6$ ، $n_c = n_s = n_t = 6 \times 3$ و همچنین $\phi = 0.48$ (به جز در بخش ۵-۳) ثابت فرض شده‌است. با توجه به ثابت بودن A و ϕ می‌توان اندازه طول هر کدام از اضلاع سطح مقطع کانال‌های جریان مختلف را مشخص نمود. اکنون در شرایط یکسان، به بررسی عملکرد دستگاه ترموالکتریکی پرداخته و سپس با نتایج بدست آمده از هندسه‌های مختلف (دایروی، دوزنقه، مستطیل و مربعی)، عملکرد دستگاه مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. جدول ۲ اندازه اضلاع کانال‌های جریان ذکر شده را نشان می‌دهد.

همان‌طور که اشاره گردید، هدف از انجام مطالعه حاضر، بررسی اثر ساختار سطح مقطع کانال جریان بر عملکرد دستگاه ترموالکتریک می‌باشد. بنابراین با ثابت لحاظ نمودن ابعاد اصلی مطابق مطالعه ردی و همکاران [۹]، از هندسه‌های مختلف کانال در مطالعه حاضر استفاده شده‌است. مستطیل، ۱۸ دایره، ۱۸ مربع، ۱۸ دوزنقه و ۳۶ مستطیل با انتهای نیم‌دایره هندسه‌های کانال جریان بکار گرفته شده به منظور حل عددی می‌باشند. لازم به ذکر است که ابعاد هر کانال به گونه‌ای است که نسبت سطح مقطع‌های جریان عبوری از کانال یکپارچه (A_c) و کانال اصلی عبوری سیال (A) ثابت باشد [۱۲]:

$$\phi = \frac{A_c}{A} \quad (1)$$

همان‌طور که اشاره گردید با توجه به شکل پایه، $A = D \times (H - 2d)$ است. در ادامه، A_c برای کانال‌های با ساختار مختلف در رابطه (۲) آورده شده‌است:

$$A_c = \begin{cases} a \times b & \text{rectangle} \\ n_c \pi r^2 & \text{circle} \\ n_s a^2 & \text{square} \\ n_t \left(\frac{a+b}{2} \times h \right) & \text{trapezoid} \\ n_r (a \times b) & \text{rectangle} \end{cases} \quad (2)$$

جدول ۲. اندازه ضلع‌های کانال‌های جریان مختلف (بر حسب میلی‌متر).

Table 2. Dimensions of different flow channels (in millimeters).

مستطیل ۳۶	۱۸ دوزنقه	۱۸ مربع	۱۸ دایره	مستطیل
$a = 1$ $b = 0.67$	$a = 1/45$ $b = 1/22$ $h = 1$	$a = 1/15$	$r = 6$	$a = 8$ $b = 3$

۳- معادلات حاکم و شرایط مرزی

در روابط فوق ρJ^2 بیان گر گرمایش ژول است. در ضمن، $(\nabla \alpha)_T$ و $TJ \cdot \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T} \right) \nabla T$ به ترتیب نشان دهنده اثرات پلتیر و تامسون هستند. همچنین، پتانسیل الکتریکی در دستگاه‌های ترموالکتریکی مطابق رابطه (۹)، از دو بخش پتانسیل اهمیک (V_o) و پتانسیل سیبک (V_s) تشکیل شده است [۹]:

$$V = V_o + V_s \quad (9)$$

علاوه بر این، رابطه‌ی دیگری نیز برای پتانسیل الکتریکی وجود دارد که بیان می‌کند پتانسیل الکتریکی ناشی از ایجاد اختلاف دمای موجود در مواد و همچنین جاری شدن جریان الکتریکی می‌باشد [۹]:

$$\nabla V = -\rho J - \alpha \nabla T \quad (10)$$

حال با استفاده از خاصیت خطی‌سازی گرادیان و تلفیق روابط بالا (۹) و (۱۰) [۹]:

$$\nabla V = \nabla V_o + \nabla V_s = -\rho J - \alpha \nabla T \quad (11)$$

۳-۲- شرایط مرزی

همان‌طور که در هندسه مسئله (شکل ۱) نشان داده شده است، سیال گرم با دمای ثابت (T_m) و سرعت یکنواخت (U) به کانال اصلی وارد می‌شود. سطح بالایی اتصال دهنده بالا و همچنین سطوح پایینی اتصال دهنده پایین، تحت دمای ثابت سرد (T_c) قرار دارند. علاوه بر این، سطوح باقی‌مانده و کانال اصلی جریان، آدیاباتیک می‌باشند. بنابراین برای شرایط مرزی الکتریکی، حرارتی و هیدرودینامیکی می‌توان نوشت [۹]:

در پایانه ورودی:

$$J = \frac{I}{A_c} = \frac{V_{oc}}{A_c (R_i + R_L)}, \quad \frac{\partial T}{\partial \zeta} = 0 \quad (12)$$

که در آن I ، V_{oc} ، ζ ، A ، R_i و R_L به ترتیب بیان گر جریان الکتریکی، ولتاژ مدار باز، بردار نرمال عمود بر سطح، سطح مقطع، مقاومت داخلی و

در کار حاضر، معادلات با فرض جریان پایا، آرام و تراکم‌ناپذیر بررسی می‌گردند. علاوه بر این، مواد ترموالکتریک، ناهمگن و ایزوتروپ و خواص ترموفیزیکی سیال ثابت می‌باشد.

۳-۱- معادلات حاکم

معادلات پیوستگی، ممتوم و انرژی در بخش سیال به ترتیب به صورت روابط (۳) تا (۵) می‌باشند [۷ و ۹]:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (3)$$

$$\rho_f (u \cdot \nabla u) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u \quad (4)$$

$$(\rho_f c_{p,f}) (u \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k_f \nabla T) \quad (5)$$

که u بردار سرعت، T دما و P فشار سیال است. در ضمن، ρ_f ، k_f ، μ و $c_{p,f}$ به ترتیب بیانگر چگالی، هدایت حرارتی، ویسکوزیته دینامیکی و ظرفیت گرمایی ویژه سیال هستند. برای اتصال دهنده و نیمه‌های، معادله پیوستگی چگالی جریان (J) از رابطه (۶) تعیین می‌شود [۷ و ۹ و ۱۸]:

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (6)$$

معادله انرژی در بخش اتصال دهنده و نیمه‌هایها به ترتیب روابط (۷) و (۸) می‌باشند که k_s و α به ترتیب هدایت حرارتی و ضریب سیبک هستند [۷ و ۹ و ۱۸]:

$$\bar{\nabla} \cdot (k_s \nabla T) + \rho J^2 = 0 \quad (7)$$

$$\bar{\nabla} \cdot (k_s \nabla T) + \rho J^2 - TJ \cdot \left[(\nabla \alpha)_T + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T} \right) \nabla T \right] = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \zeta} = 0, \quad \frac{\partial V}{\partial \zeta} = 0 \quad (iTED) \quad (17)$$

در ورودی کانال جریان:

$$x = 0: u = U, \quad v = w = 0, \quad T = T_{in} \quad (18)$$

در خروجی کانال جریان:

$$x = 5W + N(2W + L) + 20W, \quad \frac{\partial u}{\partial \zeta} = \frac{\partial T}{\partial \zeta} = v = w = 0 \quad (19)$$

در ناحیه بین مواد نیمه‌هادی و اتصال دهنده داخلی،

پیوستگی دما، چگالی جریان و شار حرارتی به صورت زیر است:

$$T_{c,ic} = T_{n,p}, \quad J_{c,ic} = J_{n,p}, \quad -\frac{\partial T_{c,ic}}{\partial \zeta} = -\frac{k_{n,p}}{k_{c,ic}} \frac{\partial T_{n,p}}{\partial \zeta} \quad (20)$$

توان خروجی و حرارت ورودی به ترموالکتریک یکپارچه به ترتیب از روابط (۲۱) و (۲۲) محاسبه می‌شوند:

$$P_o = I^2 R_L \quad (21)$$

$$Q_h = \sum_{i=1}^{2N} \frac{1}{As_i} \int k_f \frac{\partial T}{\partial \zeta} As_i \quad (22)$$

در معادله (۲۲)، بیانگر سطح اتصال دهنده داخلی در معرض سیال

گرم می‌باشد. هم‌چنین راندمان تبدیل ترموالکتریک یکپارچه از تقسیم توان خروجی بر گرمای ورودی بدست می‌آید:

$$\eta = \frac{P_o}{Q_h} \quad (23)$$

مقاومت بار خارجی می‌باشند. لازم به ذکر است که V_{oc} از مجموع پتانسیل سیبک در نقطه اتصال مواد نیمه‌هادی و اتصال دهنده محاسبه می‌شود:

$$V_{oc} = \sum_{j=n,p} \sum_{i=1}^{2N} \frac{1}{A_{ji}} \int |\alpha_{ji}| \frac{\partial T}{\partial \zeta} dA \quad (13)$$

که A سطح مقطع بین نقطه اتصال مواد ترموالکتریک و اتصال دهنده است. هم‌چنین R_i مقاومت الکتریکی داخلی کل می‌باشد که از حاصل جمع مقاومت‌های الکتریکی نیمه‌هادی‌های نوع n و p اتصال دهنده و اتصال دهنده داخلی بدست می‌آید:

$$R_i = \sum_{j=n,p,c,ic} \sum_{l=1}^{2N} \frac{H_{ji}}{A_{ji}} \left[\frac{1}{V_{ji}} \int \rho_{ji} dv \right] \quad (14)$$

که H و V به ترتیب ارتفاع و حجم مواد ترموالکتریک می‌باشند. دو معادله (۱۳) و (۱۴)، ز نشان دهنده نوع ماده (اتصال دهنده و اتصال دهنده داخلی نوع n و p)، i تعداد پایه‌های عمودی و N تعداد مدول‌های ترموالکتریک می‌باشد. با توجه به رابطه (۱۴) هر کدام از قسمت‌های مولد ترموالکتریک دارای مقاومت الکتریکی می‌باشند و مجموع تمام مقاومت‌های الکتریکی، مقاومت الکتریکی کل مدار را تشکیل می‌دهند. این مقاومت در نهایت برای محاسبه جریان الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۹ و ۲۰].

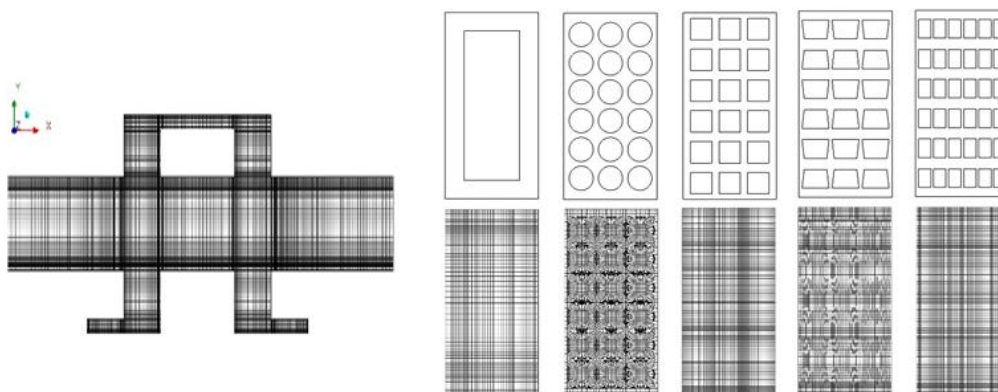
در پایانه خروجی:

$$V = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial \zeta} = 0 \quad (15)$$

در سطح بالایی اتصال دهنده بالایی و سطح پایینی اتصال دهنده پایینی:

$$T = T_c, \quad \frac{\partial V}{\partial \zeta} = 0 \quad (16)$$

در سایر سطوح در معرض محیط:



شکل ۳. نحوه شبکه‌بندی دستگاه ترموالکتریک یکپارچه و کانال جریان با پیکربندی‌های مختلف.

Fig. 3. Mesh structure of an integrated thermoelectric device and flow channel with different configurations

اعتبارسنجی حل عددی تحقیق حاضر برای گرمای ورودی، توان خروجی و راندمان حرارتی برای مولد ترموالکتریک یکپارچه با کانال مستطیلی در اعداد رینولدز مختلف در دمای ۴۵۰ کلوین در شکل ۴ نشان داده شده‌است. با مقایسه نتایج بدست آمده از حل عددی حاضر با کار ردی و همکاران [۹] مشاهده می‌شود که شبیه‌سازی حاضر از دقت خوبی برخوردار می‌باشد.

۵- نتایج و بحث

در این تحقیق از هوا به عنوان سیال کاری در داخل کانال استفاده شده‌است. لازم به ذکر است که، برای بررسی و تحلیل مسئله حاضر، عدد رینولدز در محدوده $50 \leq Re \leq 500$ و دمای ورودی سیال گرم در بازه $350 K \leq T_{in} \leq 550 K$ تغییر داده شده‌است.

۵-۱- بررسی تأثیر عدد رینولدز

شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب کانتورهای سرعت و دما را برای کانال جریان با پیکربندی‌های مختلف در دو عدد رینولدز ۱۰۰ و ۵۰۰ نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که کانتورهای سرعت و دما برای هندسه‌های دایره، مربع و دوزنقه با توجه به شکل ۱، در نقطه $z = 0$ و برای هندسه ۳۶ مستطیل در $z = 0.45$ mm رسم شده‌اند. با مقایسه کانتورهای موجود، می‌توان دریافت که با تغییر هندسه کانال جریان از ۱۸ دایره به ۳۶ مستطیل، میانگین سرعت در داخل کانال به طور پیوسته در حال افزایش و دمای توده سیال در حال کاهش می‌باشد و در نتیجه انتقال حرارت بین بخش‌های ترموالکتریک در

۴- بررسی استقلال از شبکه و صحت‌سنجی نتایج

در کار حاضر، مدل سازی عددی با روش حجم محدود و با استفاده از نرم افزار انسیس-فلوئنت^۱ انجام گرفته است. کوپل فشار- سرعت با استفاده از الگوریتم سیمپل^۲ حل شده است. مدل‌سازی هندسه مسئله و شبکه‌بندی در نرم‌افزار انسیس-ورک‌بنچ^۳ اعمال گردیده است. چگالی جریان پیوسته (معادله (۶))، توزیع پتانسیل سیبک و توزیع پتانسیل الکتریکی اهمیک (معادله (۱۱)) با استفاده از یو دی اس^۴ اعمال گردیده است. گرمایش اهمیک، اثرات پلتیر و تامسون به عنوان یک منبع اصلی در معادله (۸) گنجانده شده‌است. ضریب سیبک، مقاومت الکتریکی و هدایت گرمایی به صورت تابعی چند جمله‌ای از دما به هر یک از مواد ترموالکتریک (مس و مواد نیمه‌هادی‌ها) اعمال و در انتها معیارهای همگرایی برای معادلات بقای جرم، ممنتوم، انرژی، چگالی جریان و پتانسیل الکتریکی اهمیک به ترتیب برابر 10^{-5} ، 10^{-12} ، 10^{-10} ، 10^{-10} و 10^{-10} انتخاب می‌شوند. شکل ۳ نحوه شبکه‌بندی کانال‌های جریان مختلف مانند دایره، مستطیل، دوزنقه و مربع را نشان می‌دهد. علاوه بر این، نتایج حاصل از استقلال از شبکه هندسه‌های مختلف در جدول ۳ نمایش داده شده‌است. با محاسبه مقدار اختلاف بدست آمده برای پارامترهای مختلف، مناسب‌ترین تعداد شبکه به منظور ادامه حل مسئله انتخاب می‌شود. در جدول ۳، اعداد پررنگ نشان‌دهنده تعداد شبکه استفاده‌شده به منظور ادامه حل مسئله می‌باشند.

- 1 ANSYS-FLUENT
- 2 SIMPLE
- 3 ANSYS-WORKBENCH
- 4 UDS

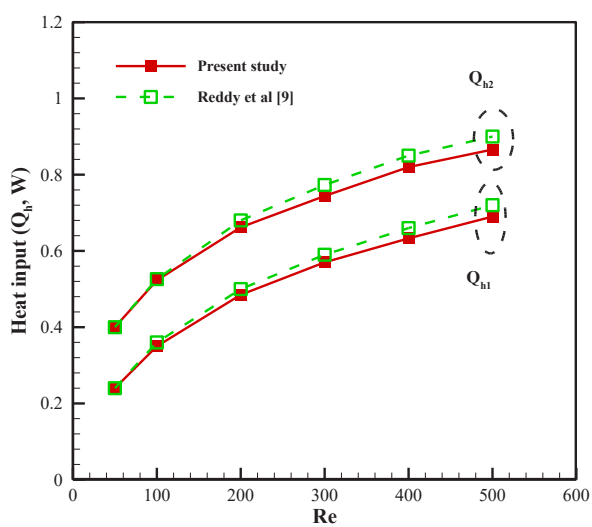
جدول ۳. بررسی استقلال از شبکه مولد ترموالکتریک با کانال جریان در پیکربندی‌های مختلف

$$(Re = 500, T_c = 300 K, d = 5 mm, R_L = 6/5 \times 10^{-3} \Omega)$$

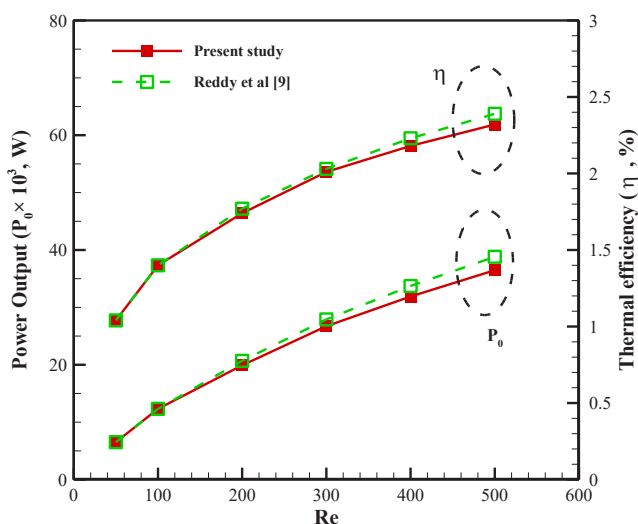
Table 3. Grid independency analysis of an integrated thermoelectric device and flow channel with different configurations.

$$Re = 500, T_c = 300 K, d = 5 mm, R_L = 6.5 \times 10^{-3} \Omega$$

اختلاف (%)	راندمان تبدیل	اختلاف (%)	گرمای ورودی (W)	اختلاف (%)	توان خروجی (W)	تعداد شبکه	هندسه
	۴/۱۷۵		۳/۲۱۵		۰/۱۳۴	۹۷۳۶۲۶	۱۸ دایره
۱/۰۱	۴/۲۱۷	۱/۶۱	۳/۲۶۸	۲/۶۰	۰/۱۳۸	۱۵۲۱۹۳۷	
۰/۶۲۹	۴/۲۴۴	۱/۰۸	۳/۳۰۴	۱/۷۱	۰/۱۴۰	۲۶۹۲۷۵۴	
۰/۲۰۱	۴/۲۵۲	۰/۴۸۷	۳/۳۳۲	۰/۶۸۷	۰/۱۴۱	۳۱۲۷۴۳۷	
	۴/۴۶۲		۳/۸۶۲		۰/۱۷۲	۶۰۹۱۸۲	۱۸ مربع
۳/۷۱	۴/۶۳۴	۱/۷۹	۳/۷۹۴	۱/۹۹	۰/۱۷۶	۸۹۲۶۳۴	
۱/۹۷	۴/۷۲۷	۰/۷۵۴	۳/۷۶۶	۱/۲۳	۰/۱۷۸	۱۵۶۳۹۸	
۰/۶۳۵	۴/۷۵۷	۰/۳۷۶	۳/۷۸۰	۱/۰۱	۰/۱۸۰	۲۱۳۷۹۶۸	
	۵/۱۰۲		۴/۱۹۰		۰/۲۱۴	۶۷۲۶۷۵	۱۸ دوزنقه
۰/۷۹۲	۵/۰۶۲	۱/۰۱	۴/۱۴۸	۱/۸۱	۰/۲۱۰	۹۴۵۶۱۲	
۰/۵۵۹	۵/۰۳۴	۰/۸۱۴	۴/۱۱۴	۱/۳۸	۰/۲۰۷	۱۶۷۶۷۲۷	
۰/۳۸۳	۵/۰۵۳	۰/۳۷۵	۴/۱۳۰	۰/۷۶	۰/۲۰۸	۲۲۸۶۱۲۹	
	۵/۸۲۹		۴/۵۶۳		۰/۲۶۶	۷۸۳۴۱۷	۳۶ مستطیل
۰/۵۵۴	۵/۸۶۲	۱/۰۸	۴/۶۱۳	۱/۶۳	۰/۲۷۰	۱۱۱۶۲۵۶	
۰/۳۲۱	۵/۸۸۱	۰/۶۳۳	۴/۶۴۲	۰/۹۵۲	۰/۲۷۳	۱۹۸۲۴۳۶	
۰/۲۱۱	۵/۸۹۳	۰/۲۲۲	۴/۶۵۰	۰/۳۷۷	۰/۲۷۴	۲۶۴۱۸۷۳	



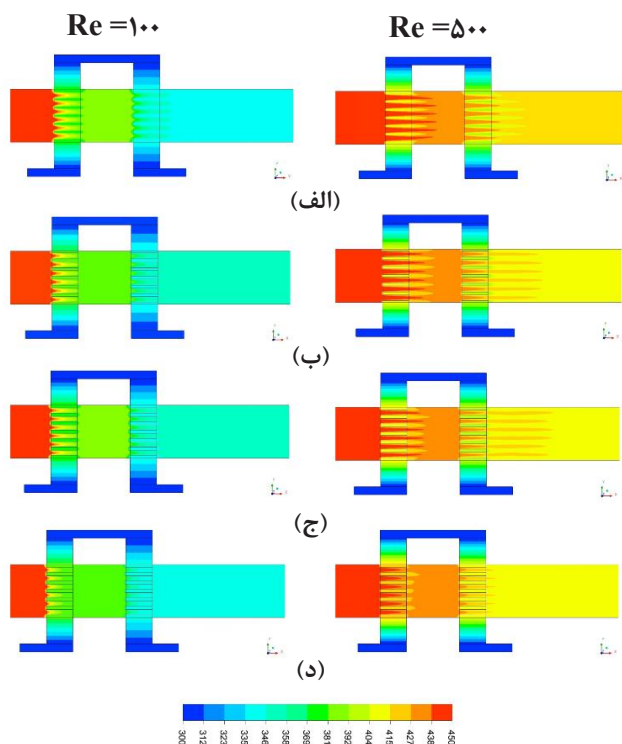
(ب)



(الف)

شکل ۴. اعتبار سنجی پارامترهای مختلف (الف) توان خروجی و راندمان حرارتی و (ب) گرمای ورودی.

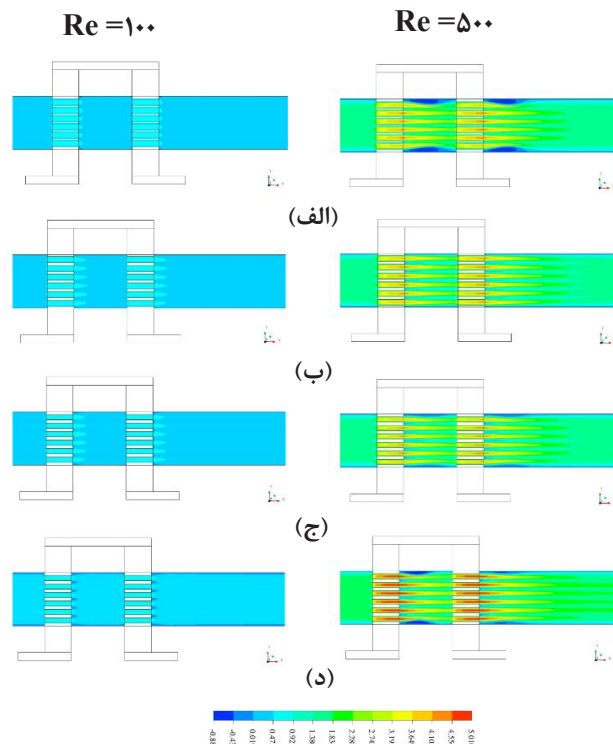
Fig. 4. Validation of different parameters (a) power output and thermal efficiency and (b) heat input.



شکل ۶. کانتور دما برای هندسه‌های مختلف در دو عدد رینولدز ۱۰۰ و ۵۰۰ (الف) ۱۸ دایره، (ب) ۱۸ مربع، (ج) ۱۸ دوزنقه و (د) ۳۶ مستطیل.

Fig. 6. Temperature contour for different geometries in two Reynolds numbers of 100 and 500 (a) 18 circles, (b) 18 squares, (c) 18 trapezoids, and (d) 36 rectangles.

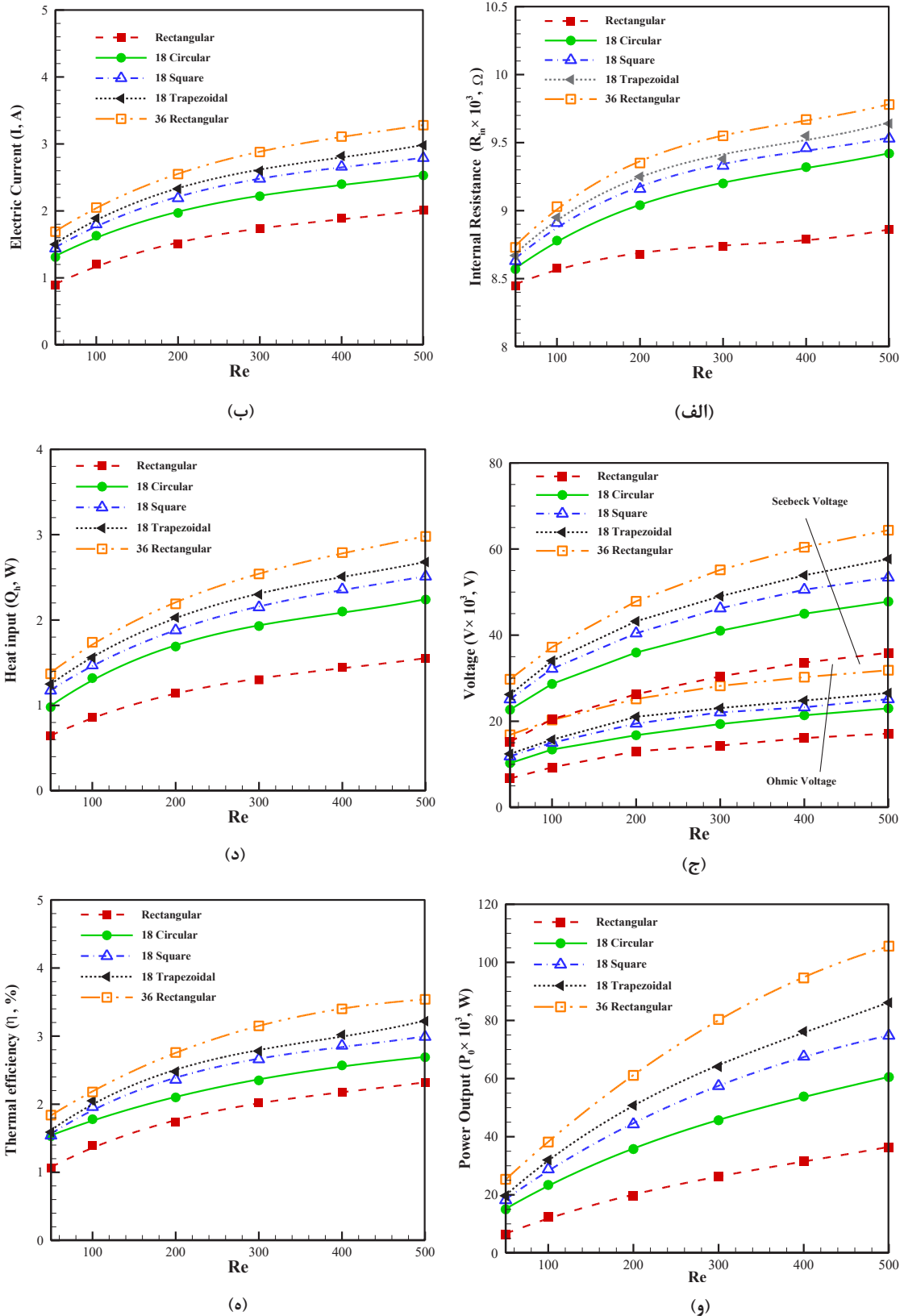
در شکل ۷ تأثیر عدد رینولدز به ترتیب بر روی مقاومت داخلی، جریان الکتریکی، ولتاژ سیبک و اهمیک، گرمای ورودی، توان خروجی و راندمان مولد ترموالکتریک نشان داده شده است. مطابق این شکل، با افزایش عدد رینولدز از ۵۰ به ۵۰۰، سرعت سیال در طول کانال جریان افزایش می‌یابد. افزایش سرعت سیال، گرادیان دما و در نتیجه اختلاف دمای بیشتری را نتیجه می‌دهد. با افزایش عدد رینولدز، میزان نرخ انتقال حرارت بین مواد ترموالکتریک افزایش یافته است. این افزایش در نرخ انتقال حرارت به تولید ولتاژ سیبک بیشتر کمک بسزایی می‌کند. ولتاژ سیبک تولید شده باعث تولید جریان الکتریکی در سیستم می‌شود و در نهایت ولتاژ اهمیک بالاتری تولید می‌گردد. از طرفی مقاومت داخلی و جریان الکتریکی مولد ترموالکتریک نیز افزایش یافته است. بنابراین توان خروجی این دستگاه با افزایش عدد رینولدز زیاد می‌شود. به عنوان مثال برای کانال با هندسه دوزنقه‌ای در $Re = 500$ میزان نرخ انتقال حرارت، توان خروجی و راندمان به ترتیب $1/71$ ، $2/66$ و $1/55$ برابر مقدار خود در $Re = 100$ می‌باشند. در $Re = 500$ مقدار نرخ انتقال



شکل ۵. کانتور سرعت برای هندسه‌های مختلف در دو عدد رینولدز ۱۰۰ و ۵۰۰ (الف) ۱۸ دایره، (ب) ۱۸ مربع، (ج) ۱۸ دوزنقه و (د) ۳۶ مستطیل.

Fig. 5. Velocity contour for different geometries in two Reynolds numbers of 100 and 500 (a) 18 circles, (b) 18 squares, (c) 18 trapezoids, and (d) 36 rectangles.

حال افزایش است. مهم‌ترین دلیل برای توجیه این پدیده، افزایش سطح انتقال حرارت بین سیال و کانال جریان است که باعث بهبود انتقال حرارت و افزایش آن می‌شود. به عنوان مثال، سطح انتقال حرارت هندسه‌های ۱۸ دایره، ۱۸ مربع، ۱۸ دوزنقه و ۳۶ مستطیل به ترتیب $3/08$ ، $3/75$ ، $3/90$ ، $5/4$ برابر کانال مستطیلی ساده (که در مرجع [۹] مطالعه شده) می‌باشد. هم‌چنین زمانی که عدد رینولدز از ۱۰۰ به ۵۰۰ افزایش می‌یابد (یا به عبارت دیگر، با افزایش سرعت سیال) گرادیان دما در کانال زیاد می‌شود. از آنجایی که انتقال حرارت با گرادیان دما متناسب است در نتیجه نرخ انتقال حرارت نیز بالا می‌رود. با مشاهده کانتورها می‌توان مشاهده کرد که با افزایش عدد رینولدز، میزان دما در پایه سمت راست دستگاه ترموالکتریک افزایش یافته است. در واقع افزایش سرعت باعث گردیده است میزان سیال گرم بیشتری به قسمت راست پایه‌های ترموالکتریک برسد و دما افزایش یابد. این عامل به ولتاژ سیبک بالاتر در مواد ترموالکتریک و در نهایت به بهبود عملکرد دستگاه ترموالکتریک منجر می‌شود.



شکل ۷. اثر عدد رینولدز بر (الف) مقاومت داخلی، (ب) جریان الکتریکی، (ج) ولتاژ سبیک و اهمیک، (د) گرمای ورودی، (و) توان خروجی و (ه) راندمان مولد ترموالکتریک با کانال جریان مختلف.

Fig. 7. The effect of Reynolds number on (a) internal resistance, (b) electric current, (c) Seebeck and Ohmic voltage, (d) heat input, (e) power output, and (f) thermal efficiency of thermoelectric generator with different flow channels.

جدول ۴. ابعاد کانال جریان مستطیلی برای طول‌های مختلف نیمه هادی (برحسب میلی‌متر)

Table 4. Rectangular flow channel dimensions for different semiconductor lengths (in millimeters)

طول نیمه هادی	۰/۲۵	۱	۳	۵	۷
طول مستطیل	۳	۳	۳	۳	۳
عرض مستطیل	۱۵/۶	۱۴/۴	۱۱/۲	۸	۴/۸

جدول ۵. ابعاد کانال جریان مستطیلی برای نسبت مساحت کانال جریان مختلف.

Table 5. Rectangular flow channel dimensions for different flow channel area ratios.

نسبت مساحت کانال جریان	۰/۲۸	۰/۴۸	۰/۶۸	۰/۸۸
طول مستطیل (mm)	۲	۳	۴	۴/۶۸
عرض مستطیل (mm)	۷	۸	۸/۵	۹/۲

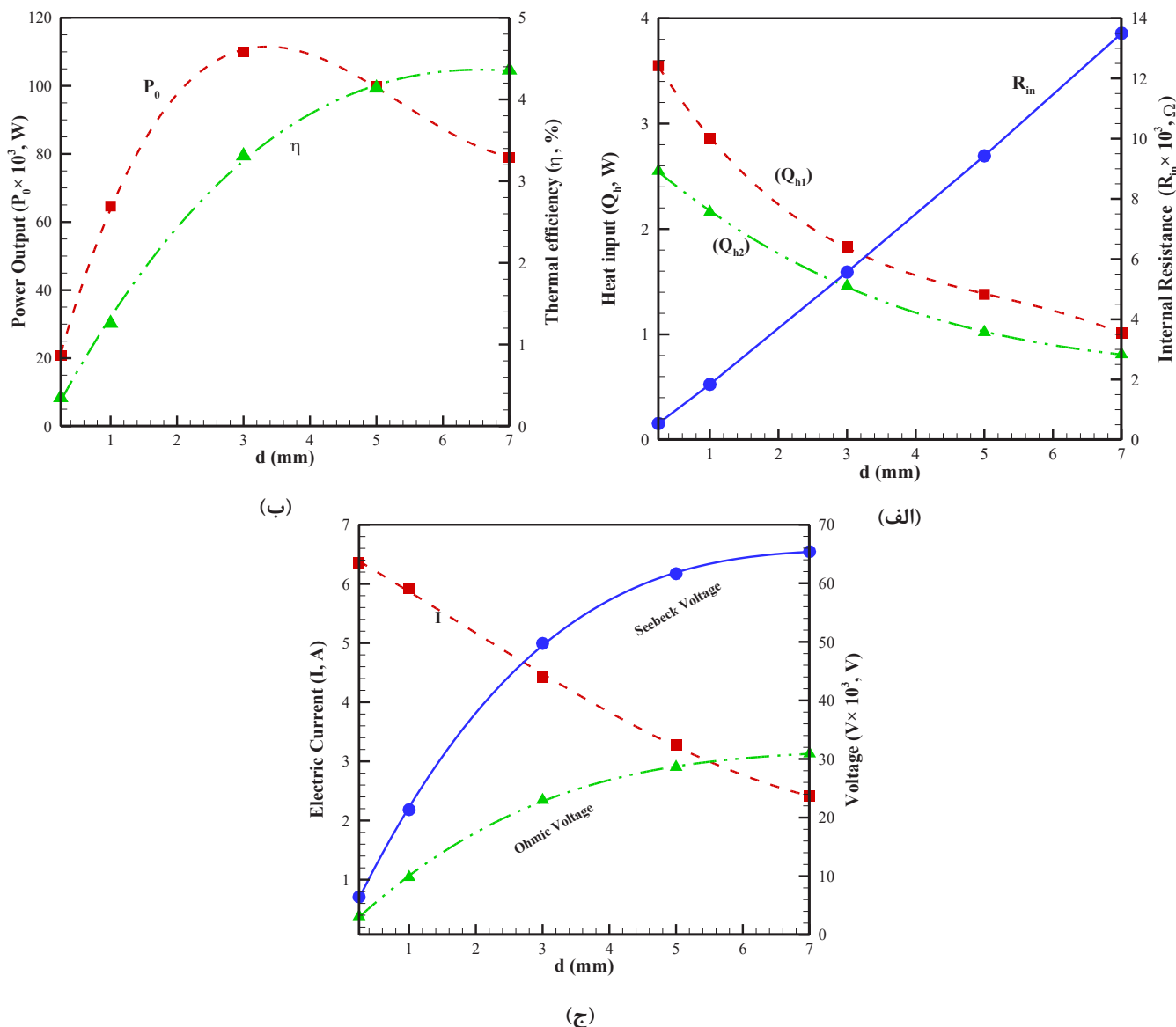
طول نیمه‌هادی یک پارامتر مهم برای دست‌یابی به عملکرد مطلوب می‌باشد. در این حالت با در نظر گرفتن هندسه ثابت مستطیل شکل برای ترموالکتریک یکپارچه، با تغییر طول نیمه‌هادی به بررسی عملکرد مولد توان ترموالکتریک یکپارچه پرداخته می‌شود. برای حل مسئله در این حالت، هندسه مستطیلی و $\phi = 0.48$ ثابت هستند. دمای ورودی سیال گرم ۵۵۰ کلوین و عدد رینولدز ۵۰۰ می‌باشند و از پنج طول مختلف نیمه‌هادی برای بررسی استفاده شده‌است. جدول ۴ اندازه ابعاد کانال جریان را برای طول‌های مختلف نیمه‌هادی نشان می‌دهد.

شکل ۸ عملکرد مولد ترموالکتریک بر حسب تغییرات طول نیمه‌هادی را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، طول نیمه‌هادی اثر برجسته‌ای بر مقاومت داخلی دارد و با افزایش طول نیمه‌هادی، مقاومت داخلی دستگاه به صورت خطی افزایش یافته‌است. به دلیل افزایش در مقاومت دمایی هر یک از پایه‌ها، گرمای ورودی دستگاه ترموالکتریک در حال کاهش است. لازم به ذکر است که گرمای ورودی در پایه سمت چپ دستگاه در مقایسه با پایه سمت راست بیشتر است. همچنین به علت رفتار متقابل بین جریان الکتریکی و مقاومت کل، توان خروجی دستگاه در $d = 3\text{mm}$ دارای بیشینه مقدار خود است. به همین ترتیب راندمان دستگاه به صورت نمایی زیاد می‌شود. باید به این نکته اشاره کرد که با افزایش طول نیمه‌هادی، سرعت متوسط و مقاومت هر یک از

حرارت برای کانال ۱۸ دایره و ۱۸ مربع در مقایسه با مقدار آن در $Re = 100$ ، $1/71$ و $1/69$ برابر افزایش داشته است. همچنین توان خروجی و عملکرد دستگاه ترموالکتریک با پیکربندی ۳۶ مستطیل به ترتیب $3/10$ و $1/87$ برابر زمانی است که دستگاه در $Re = 100$ کار می‌کند. بدون در نظر گرفتن مقدار عدد رینولدز، کانال جریان با هندسه ۳۶ مستطیل ولتاژ سیبک و جریان تولیدی بیشتری را نسبت به سایر هندسه‌های موجود دارا می‌باشد. علت این امر همان‌گونه که ذکر گردید، افزایش در سرعت و کاهش دمای توده در سیال می‌باشد. با افزایش سطح انتقال حرارت به مقدار $5/45$ برابر در کانال با پیکربندی ۳۶ مستطیل و همچنین $3/89$ برابر برای هندسه دوزنقه‌ای نسبت به هندسه مستطیلی ساده، می‌توان مشاهده نمود مقدار ولتاژ سیبک تولید شده به ترتیب $2/55$ و $1/9$ برابر حالت مستطیل ساده می‌باشند. همچنین در $Re = 500$ راندمان حرارتی کانال جریان ۳۶ مستطیل $1/20$ و $1/25$ و $1/41$ برابر کانال جریان دوزنقه، مربع و دایره‌ای شکل می‌باشد.

۵-۲- بررسی تأثیر طول نیمه هادی

افزایش یا کاهش طول نیمه‌هادی در دستگاه ترموالکتریک یکپارچه باعث تغییر سطح مقطع کانال جریان می‌شود. از طرفی مقاومت داخلی سیستم نیز با تغییر طول نیمه‌هادی دچار تغییرات بسیاری می‌شود. بنابراین

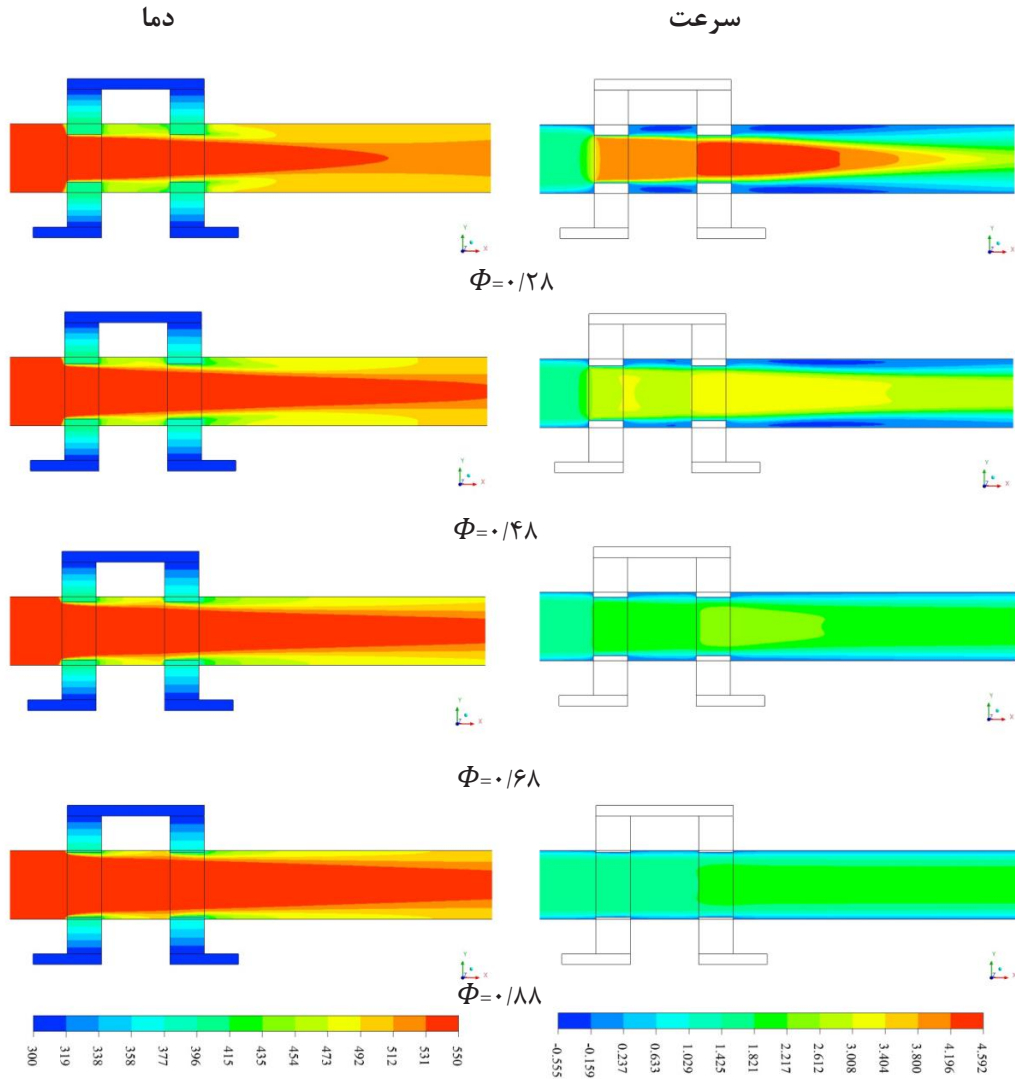


شکل ۸. اثر طول نیمه‌هادی بر (الف) گرمای ورودی و مقاومت درونی، (ب) توان خروجی و راندمان حرارتی و (ج) جریان الکتریکی و ولتاژ.

Fig. 8. The effect of semiconductor length on (a) heat input and internal resistance, (b) power output and thermal efficiency, and (c) electric current and voltage.

اگرچه راندمان کلی دستگاه را افزایش می‌دهد، اما توان خروجی دستگاه همواره افزایش نمی‌یابد. در واقع با افزایش طول نیمه‌هادی، توان خروجی به یک مقدار بیشینه خود رسیده‌است. بنابراین از آنجایی که توان خروجی پارامتر مهمی در ارزیابی عملکرد دستگاه می‌باشد، اگرچه راندمان در حال افزایش است، با این وجود این اندازه طول نیمه‌هادی، به دلیل حداکثر توان خروجی بدست آمده بهترین طول برای دست‌یابی به راندمان مورد نظر می‌باشد.

پایه‌ها بیشتر می‌شود و در نتیجه دمای دیواره اتصال دهنده داخلی افزایش پیدا می‌کند. به این ترتیب اختلاف دمای ناحیه سرد و گرم ($T_h - T_c$) در مولد ترموالکتریک بیشتر می‌شود و ولتاژ سیبک بیشتری تولید می‌گردد. بنابراین به علت افزایش مقاومت داخلی، جریان الکتریکی تولیدی با افزایش طول نیمه‌هادی کاهش و ولتاژ اهمیک افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که توان خروجی یکی از پارامترهای مهم در انتخاب دستگاه ترموالکتریک می‌باشد. با مقایسه نمودارهای بدست آمده می‌توان دریافت، افزایش طول نیمه‌هادی



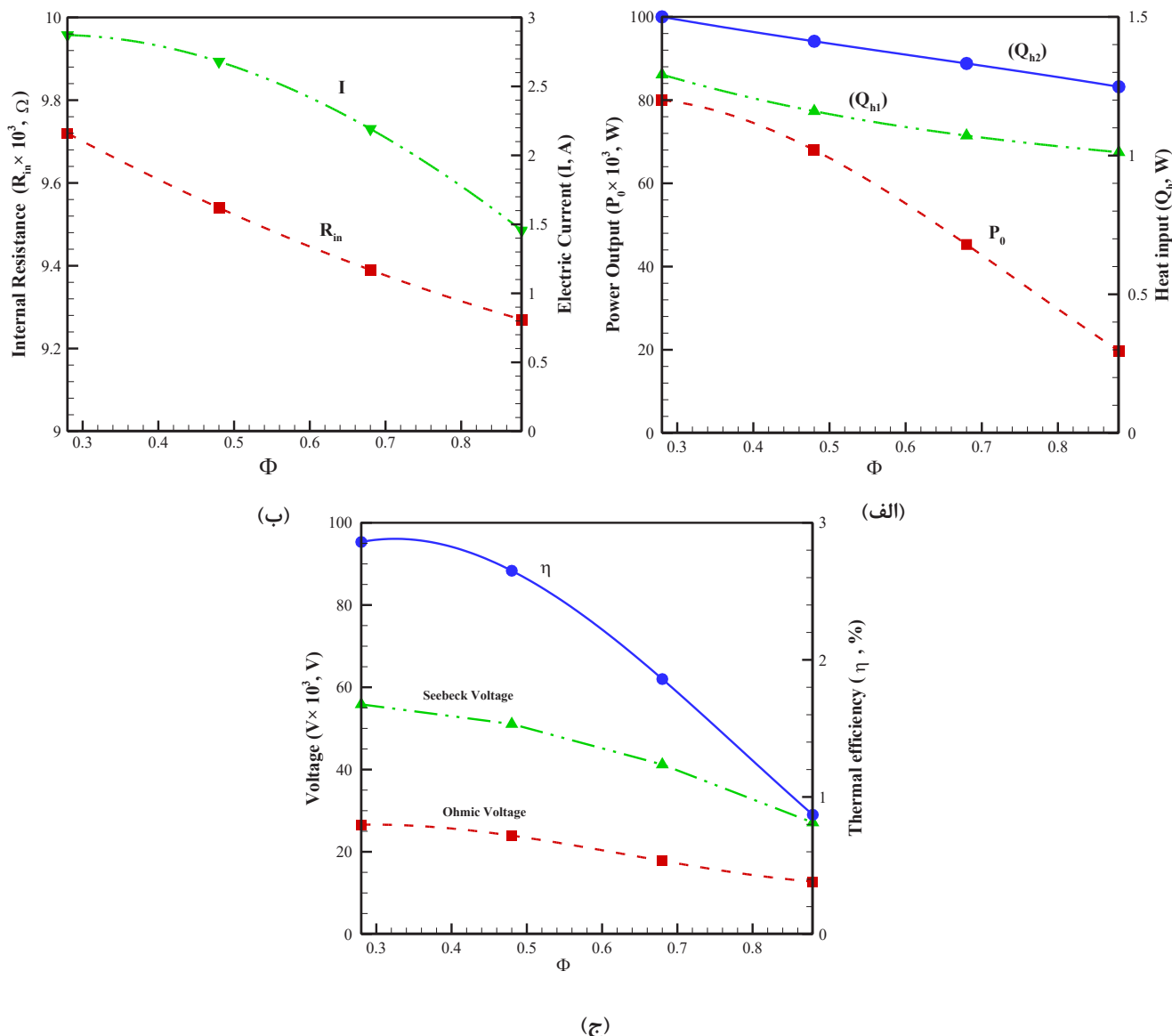
شکل ۹. کانتورهای سرعت و دما در نسبت مساحت کانال جریان مختلف.

Fig 9. Velocity and temperature contours in different cross-sectional area ratio.

به منظور حل مسئله در این حالت، دمای ورودی سیال گرم ۵۵۰ کلوین و عدد رینولدز سیال ۵۰۰ فرض گردیده است. شکل ۹ کانتور دما و سرعت را برای نسبت‌های مساحت کانال جریان مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این کانتورها برمی‌آید، با افزایش نسبت مساحت کانال جریان، از میزان متوسط سرعت کاسته شده‌است. هم‌چنین با توجه به کانتورهای دما مشاهده می‌شود، زمانی که نسبت مساحت کانال جریان افزایش می‌یابد، یعنی زمانی که حفره ورودی سیال در پایه‌های ترموالکتریک افزایش می‌یابد، میزان سطح انتقال حرارت بین سیال و اتصال‌دهنده داخلی که از جنس مس می‌باشد، کاهش می‌یابد. به همین دلیل میزان دمای حجم توده سیال

۵-۳- بررسی تأثیر نسبت مساحت کانال جریان

در این حالت با در نظر گرفتن هندسه ثابت مستطیل شکل برای مولد ترموالکتریک یکپارچه، با تغییر نسبت مساحت کانال جریان به بررسی عملکرد مولد توان ترموالکتریک یکپارچه پرداخته می‌شود. مساحت کانال اصلی جریان $(L - 2d) \times D$ ثابت می‌باشد. با در نظر گرفتن مقدار نسبت مساحت کانال جریان، اندازه کانال جریان جدید (در محل پایه‌ها) بدست خواهد آمد. بنابراین، طبق رابطه (۱) و با توجه به ثابت بودن (A) ، ابعاد کانال جریان جدید مستطیل شکل بدست خواهد آمد. جدول ۵ اندازه ضلع‌های این کانال جریان را برای نسبت مساحت کانال جریان مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. اثر نسبت مساحت کانال جریانهای مختلف بر (الف) توان خروجی و حرارت ورودی (ب) مقاومت درونی و جریان الکتریکی (ج) ولتاژ و راندمان حرارتی.

Fig 10. The effect of different cross-sectional area ratio on (a) internal resistance and electric current, (b) power output and heat input, and (c) voltage and thermal efficiency.

عملکرد دستگاه ترموالکتریک بر حسب نسبت مساحت کانال جریان در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، با افزایش نسبت مساحت کانال جریان از $0/28$ به $0/88$ ، مشاهده شده است که مقاومت درونی دستگاه، جریان، توان خروجی و راندمان دستگاه به صورت تابعی نمایی در حال کاهش است. با کاهش اختلاف دما، ولتاژ سیبک و در نتیجه ولتاژ اهمیک پایین تری بدست می آید. ولتاژ سیبک در $\phi = 0/28$ نسبت به $\phi = 0/88$ و $\phi = 0/48$ به ترتیب حدود $2/06$ و $1/09$ برابر بزرگتر می باشد. علاوه بر این، می توان مشاهده کرد که روند تغییرات جریان و ولتاژ برحسب نسبت مساحت کانال جریان مشابه است. همچنین به دلیل کاهش سطح

افزایش یافته است. با این تفاسیر می توان به این نتیجه پی برد که میران انتقال حرارت برای نسبت مساحت کانال جریان بزرگتر، به تدریج در حال کاهش است. افزایش اختلاف دمای سرد و گرم بین عناصر ترموالکتریکی، باعث اعمال افت سیبک بالاتری می گردد. زمانی که مقدار نسبت مساحت کانال جریان از $0/88$ به $0/28$ کاهش می یابد، اختلاف درجه حرارت ناحیه سرد و گرم افزایش می یابد که باعث تولید سیبک بالاتری می شود. ولتاژ اهمیک از جاری شدن جریان الکتریکی در ترموالکتریک ایجاد می گردد و جریان الکتریکی با افزایش ولتاژ سیبک، روند صعودی را طی می کند. در نتیجه، ولتاژ اهمیک دستگاه نیز افزایش می یابد.

۷- فهرست علائم

A	سطح مقطع، mm^2
c_p	ظرفیت گرمایی ویژه سیال $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
d	اندازه مواد نیمه‌هادی، mm
D	عمق پایه ترموالکتریک، mm
D_h	قطر هیدرولیکی کانال اصلی، mm
H	ارتفاع پایه، mm
I	جریان الکتریکی، A
J	چگالی جریان الکتریکی، $A \text{ m}^{-2}$
k	هدایت گرمایی، $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
L	فاصله بین دو پایه، mm
P	فشار، N m^{-2}
P_o	توان خروجی، W
Q	انتقال حرارت، W
R	مقاومت الکتریکی، Ω
Re	عدد رینولدز
t	ضخامت اتصال دهنده، mm
T	دما، K
u	بردار سرعت، ms^{-1}
V	ولتاژ، V
u, v, w	سرعت در راستای x, y, z ، ms^{-1}
W	عرض، mm
α	ضریب سیبک، VK^{-1}
μ	ویسکوزیته دینامیکی، Ns m^{-2}
ρ	مقاومت ویژه الکتریکی، $\Omega \text{ m}$
σ	هدایت الکتریکی، Ω^{-1}
ρ_f	چگالی سیال، kg m^{-3}
η	راندمان تبدیل ترموالکتریک
ϕ	نسبت مساحت کانال جریان

انتقال حرارت از $\phi = 0.28$ به $\phi = 0.48$ ، حرارت خروجی دستگاه به صورت خطی کاهش می‌یابد. در ضمن به دلیل دمای بالاتر پایه سمت چپ نسبت به پایه سمت راست، میزان گرمای ورودی پایه سمت چپ بیشتر می‌باشد و در نتیجه توان خروجی و عملکرد دستگاه نیز با نسبت مساحت کانال جریان متغیر می‌باشند. حرارت ورودی، توان خروجی و عملکرد دستگاه در $\phi = 0.28$ به ترتیب $1/68$ ، $1/77$ و $1/52$ برابر $\phi = 0.48$ و تقریباً $5/23$ ، $4/1$ و $3/29$ برابر خود در $\phi = 0.88$ می‌باشند.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق به مطالعه عددی تأثیر سطح مقطع کانال جریان بر عملکرد دستگاه ترموالکتریک یکپارچه پرداخته شد. به منظور حل مسئله، با ثابت در نظر گرفتن نسبت مساحت کانال جریان، کانال‌های جریان دایروی، مربعی، دوزنقه‌ای و ۳۶ مستطیل در اعداد رینولدز و دماهای ورودی سیال گرم مختلف، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. نتایج به خوبی نشان داد که ساختار کانال جریان و هم‌چنین عدد رینولدز اثر برجسته‌ای بر عملکرد دستگاه ترموالکتریک یکپارچه دارد. در اعداد رینولدز یکسان و $\phi = 0.48$ کانال جریان با پیکربندی ۳۶ مستطیل در مقایسه با پیکربندی‌های دیگر دارای توان خروجی و راندمان بالاتری است. علت این امر افزایش سطح کانال‌های جریان با کاهش اندازه کانال می‌باشد. در ادامه با فرض کانال جریان ثابت مستطیلی، اثر طول نیمه‌هادی و نسبت مساحت کانال جریان مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. با مشاهده نتایج بدست آمده، هرچه از مقدار نسبت مساحت کانال جریان کاسته شود، سطح انتقال حرارت و در نتیجه نرخ انتقال حرارت بین مواد ترموالکتریکی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، افزایش نسبت مساحت کانال جریان، عملکرد دستگاه را افزایش داده‌است. لازم به ذکر است، در یک طول بهینه از نیمه‌هادی، توان خروجی دستگاه به حداکثر مقدار خود می‌رسد و سپس روند نزولی را طی می‌کند. با تغییرات هندسه کانال جریان از مستطیل به ۳۶ مستطیل و افزایش نسبت مساحت کانال جریان، مقدار مقاومت درونی و اختلاف دمای بین ناحیه سرد و گرم در ترموالکتریک نیز افزایش می‌یابد. با توجه به اصل سیبک، اختلاف دما باعث ایجاد ولتاژ در سیستم می‌گردد. حال با افزایش اختلاف دما، میزان ولتاژ سیبک و به تبع آن جریان الکتریکی و ولتاژ اهمیک نیز با تغییرات کانال جریان افزایش می‌یابند.

- [6] B. Reddy, M. Barry, J. Li, M.K. Chyu, Thermoelectric performance of novel composite and integrated devices applied to waste heat recovery, *Journal of heat transfer*, 135(3) (2013).
- [7] T. Ma, Z. Qu, X. Yu, X. Lu, Y. Chen, Q. Wang, Numerical study and optimization of thermoelectric-hydraulic performance of a novel thermoelectric generator integrated recuperator, *Energy*, 174 (2019) 1176-1187.
- [8] T. Ma, X. Lu, J. Pandit, S.V. Ekkad, S.T. Huxtable, S. Deshpande, Q.-w. Wang, Numerical study on thermoelectric-hydraulic performance of a thermoelectric power generator with a plate-fin heat exchanger with longitudinal vortex generators, *Applied Energy*, 185 (2017) 1343-1354.
- [9] B. Reddy, M. Barry, J. Li, M.K. Chyu, Thermoelectric-hydraulic performance of a multistage integrated thermoelectric power generator, *Energy conversion and management*, 77 (2014) 458-468.
- [10] Y. Hsiao, W. Chang, S. Chen, A mathematic model of thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine, *Energy*, 35(3) (2010) 1447-1454.
- [11] M. Chen, L.A. Rosendahl, T. Condra, A three-dimensional numerical model of thermoelectric generators in fluid power systems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(1-3) (2011) 345-355.
- [12] B. Reddy, M. Barry, J. Li, M. Chyu, Enhancement of Thermoelectric Device Performance Through Integrated Flow Channels, *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, 4 (2013).
- [13] S. Manikandan, S. Kaushik, Energy and exergy analysis of an annular thermoelectric cooler, *Energy Conversion and Management*, 106 (2015) 804-814.
- [14] X. Meng, R.O. Suzuki, Helical configuration for thermoelectric generation, *Applied Thermal Engineering*, 99 (2016) 352-357.
- [15] H. Hazama, Y. Masuoka, A. Suzumura, M. Matsubara, S. Tajima, R. Asahi, Cylindrical thermoelectric generator with water heating system for high solar energy conversion efficiency, *Applied energy*, 226 (2018) 381-388.

زیرنویس

دیوار/اتصال دهنده سرد	c
ورودی	in
سیال	f
دیوار گرم	h
داخلی/یکپارچه	i
اتصال دهنده داخلی	ic
بار	L
نیمه‌هادی نوع n	n
پتانسیل اهمیک	o
نیمه‌هادی نوع p	p
پتانسیل سبیک	s
بردار نرمال عمود بر سطح	ζ

منابع

- [1] G.R.C. R, N. Krishna, A.K. Johny, A Numerical Study and Demonstration of Exhaust Gas Heat Recovery System Using Thermoelectric Generator, *International Journal of Innovative and Emerging Research in Engineering*, 4(3) (2017) 73-81.
- [2] S.B. Riffat, X. Ma, Thermoelectrics: a review of present and potential applications, *Applied thermal engineering*, 23(8) (2003) 913-935.
- [3] T. Zhang, New thinking on modeling of thermoelectric devices, *Applied Energy*, 168 (2016) 65-74.
- [4] B. Reddy, M. Barry, J. Li, M.K. Chyu, Three-dimensional multiphysics coupled field analysis of an integrated thermoelectric device, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 62(12) (2012) 933-947.
- [5] Y.-S. Byon, J.-W. Jeong, Annual energy harvesting performance of a phase change material-integrated thermoelectric power generation block in building walls, *Energy and Buildings*, 228 (2020) 110470.

- assessment of the thermodynamic performance of thermoelectric cells via two-dimensional modelling, *Applied energy*, 130 (2014) 280-288.
- [19] A.Z. Sahin, B.S. Yilbas, The thermoelement as thermoelectric power generator: Effect of leg geometry on the efficiency and power generation, *Energy Conversion and Management*, 65 (2013) 26-32.
- [20] B. Reddy, M. Barry, J. Li, M.K. Chyu, Convective heat transfer and contact resistances effects on performance of conventional and composite thermoelectric devices, *Journal of Heat Transfer*, 136(10) (2014).
- [16] S.-R. Yan, H. Moria, S. Asaadi, H.S. Dizaji, S. Khalilarya, K. Jermsittiparsert, Performance and profit analysis of thermoelectric power generators mounted on channels with different cross-sectional shapes, *Applied Thermal Engineering*, 176 (2020) 115455.
- [17] H.A. Garmejani, S. Hossainpour, Single and multi-objective optimization of a TEG system for optimum power, cost and second law efficiency using genetic algorithm, *Energy Conversion and Management*, 228 (2021) 113658.
- [18] K.S. Oliveira, R.P. Cardoso, C.J. Hermes, Numerical

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

V. Mofidian, M. Kalteh, M. Hami, *Numerical Investigation of Channel Cross-section Effect on the Performance of Integrated Thermoelectric Power Generator, Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(9) (2022) 2195-2212.

DOI: [10.22060/mej.2022.21327.7426](https://doi.org/10.22060/mej.2022.21327.7426)



