طراحی و شبیه‌سازی مولد RTGبا توان میلی‌وات بر اساس چشمه ^{90}Sr

ابوالحسن خواجه پور[۱]، فائزه رحمانی [۲]

[۱]دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها

[۲] دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی،دانشکده فیزیک

چکیده:

در این کار مولد توان RTGبا توان 2mW و جریان mAطراحی و شبیه‌سازی شد. با توجه به توان الکتریکی و بازه دمایی کاربرد (پایه گرم ۳۱۲ و پایه سرد ۳۱۰K)، چشمه ^{90}Sr، ترموالکتریک۱۲۷ پایه Bi-Te، کپتون-کرایوترم (به ترتیب 2.45, 0.78 mm) به عنوان عایق حرارتی سلول سوخت و یک محفظه استیل حول سوخت استفاده شد.طراحی اولیه هندسه سلول سوخت با توجه به ابعاد ماده ترموالکتریک انجام و سپس با شبیه‌سازی با کد MCNPمقدار ^{90}Sr ۴۰۰۰ کوری تعیین شد. برای تعیین طرح بهینه نهایی از طرح اولیه توزیع دما در قسمت‌های مختلف مولد به همراه توان حرارتی اتلافی و ورودی به ماژولبا نرم افزار ANSYSتعیین شد تا دمای متوسط سلول صفحه گرم ماژول ترموالکتریک بر مقدار تعیین شده منطبق باشد.

کلمات کلیدی: مولد گرما الکتریکی رادیوایزوتوپی، استرانسیوم ۹۰، ترموالکتریک بیسموت-تلورایدANSYS، COMSOL، MCNP

مقدمه

مولد رادیوایزوتوپی ترموالکتریکی ((Radioisotope Thermoelectric Generator (RTG اولین بار در دهه ۱۹۵۰ برای تولید الکتریسیته از یک انرژی پاک به منظور استفاده در فضاپیماها ساخته شد. مولدهای RTGشامل سه بخش اساسی است: سلول سوخت شامل ماده رادیواکتیو و عایق اطراف (تولید گرمای حاصل از واپاشی وانتقال گرما فقط به ماژول ترموالکتریک) و ماژول ترموالکتریک(تبدیل توان حرارتی بر اساس پدیده ترموالکتریک به توان الکتریکی). علاوه بر فضاپیماها، توان فانوس‌های دریایی و برج های ناوبری که نیازی به تعمیر و نگهداری ندارند،ذخیره‌سازی اطلاعات و ارتباطات رادیویی وابسته به نظارت‌ها، بررسی‌های هواشناسی و اقیانوس‌شناسی، ایستگاه‌های لرزه نگاری و کابردهای فضایی و باتوانی در مرتبه میلی‌وات طراحی هستندبه این وسیله تأمین می‌شود[۱]. برخی از این مولدها به‌وسیله سوخت استرانسیوم بارگذاری شده‌اند که بسیار قابل اعتماد هستند. از دیگر مزایای این RTG ها قابلیت تولید توان الکتریکی پایا در مدت زمان عملیاتی طولانی می‌باشد. بیشتر از ۱۰۰نمونهRTG با سوخت استرانسیوم ساخته شده است.

روش کار

اولین قدم در طراحی مولد توان گرما الکتریکی رادیوایزوتوپی انتخاب چشمه رادیواکتیو و ماده ترموالکتریک می‌باشد. انتخاب رادیوایزوتوپ براساس معیارهایی گوناگونی نظیر مدت عملیات (نیمه عمر رادیوایزوتوپ)، سطح توان الکتریکی، استفاده از سیستم به عنوان مولد حرارت علاوه بر الکتریسیته، جرم، خواص شیمیایی، واکنش‌پذیری، طبیعت و مد واپاشی، توان ویژه، هزینه و نزدیکی به تجهیزات حساس و مسائل بیولوژیکی صورت می‌گیرد. استرانسیوم به علت توان ویژه بالا، نیمه‌عمر بلند (۲۸/۵ سال) و هزینه کمتر نسبت به ایزوتوپ‌های آلفازا انتخاب شده است. ترکیب شیمیایی استرانسیوم که برایبارگذاری سلول سوخت مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌بایست هدایت حرارتی بالا، پایداری شیمیایی مطلوب در دما و فشارهای بالا و استحکام مکانیکی مناسبی برخوردار باشد که استرانسوم تیتانایت $(SrTiO3)$انتخاب شد[۲]. ماده ترموالکتریک بر اساس دمای محیط کاری انتخاب می‌شود. در دماهای کاری پایین (کمتر از $200^{\circ}C$) ماده ترموالکتریک بیسموت تلوراید (مقاومت الکتریکی (ρ) 5-1.07e Ω.m ، ثابت سیبک (α_{pn}) $390\ \frac{\mu V}{K}$، هدایت حرارتی1.77 W/m.K) و آلیاژهای آن به دلیل ضریب شایستگی بزرگ‌تر، بازدهی بیشتری را نشان می‌دهند[۳-۵]. تعیین ابعاد و تعداد پایه‌های آنبر اساستوان الکتریکی خروجی، ولتاژ بار (یا مقاومت الکتریکی بار)، دمای اتصالات گرم و سرد پایه‌ها (به ترتیب 300-310K) و در نهایت خواص ماده ترموالکتریک انتخاب شد. طبق روش ارائهشده، تعداد کوپل‌های ترموالکتریک و ابعاد هر پایه مشخص شد که مبنای تعیین ابعاد کلی ماژول ترموالکتریک است[٦]. پس از آن به منظور تعیین ولتاژ مدار باز و توزیع دما با استفاده از نرم‌افزار COMSOLشبیه‌سازی ماژول ترموالکتریک انجام شد. پس از اطمینان از دست‌یابی به ولتاژ مدار باز مورد نظر، توان حرارتی ورودی به ماژول وتوان حرارتی کل مورد نیاز با احتساب توان حرارتی اتلافی محاسبه شد. بر اساس توان حرارتی کل مقدار ماده رادیواکتیو مشخص شده و تقریب اولیه از هندسه سلول سوخت به دست آمد. با استفاده از کد MCNPتوان حرارتی کل بر جای گذاشته شده در سلول سوخت تعیین و با مقدار محاسبه شده مقایسه شد. آنالیز حرارتی کلی مولد شامل سلول سوخت، ماژول ترموالکتریک و عایق حرارتی مولد با استفاده از نرم‌افزار ANSYS صورت گرفت. بر اساس نتایج، ابعاد سلول سوخت و لایه‌های عایق پیرامون آنقدر تغییر داده شد تا توزیع دما بر روی صفحه گرم ماژول ترموالکتریک با مقدار محاسبه شده و شبیه‌سازی شده با COMSOLهمخوانی داشته باشد.

نتایج

در ادامه خلاصه روابط استفاده شده (رابطه ۱-۱۱) و نتایج آن برای طراحی بیان شده است.

$$V_{oc} = 0.0003$$

$$KR = 4\rho k = 0$$

$$Z = \frac{\alpha^2}{KR}$$
$$= 0.0020047$$
$$m = \sqrt{1+<T}$$
$$nR_{coupl} = R_{in}$$
$$I = \sqrt{\frac{P_L}{R_L}} = 0.0$$
$$n = \frac{V_L + nR_{co}}{V_{OC}}$$
$$R_{in} = \frac{2n\rho h}{A_{leg}} \rightarrow$$

ابعاد پایه‌ها: $1mm \times 1mm \times 2.5mm$

با توجه به دمای اتصال گرم و سرد، جریان الکتریکی و خواص ترموالکتریکی پایه‌ها توان حرارتی وردی به ماژول و توان حرارتی کل برابر است با($R_L = 8.63$)

$$P_H = 2.26499$$
$$Q_{\text{H total}} = P_H -$$

بنابراین بازدهی ترموالکتریک برابر است با

$$\eta = \frac{P_L}{P_H} = 0.00$$

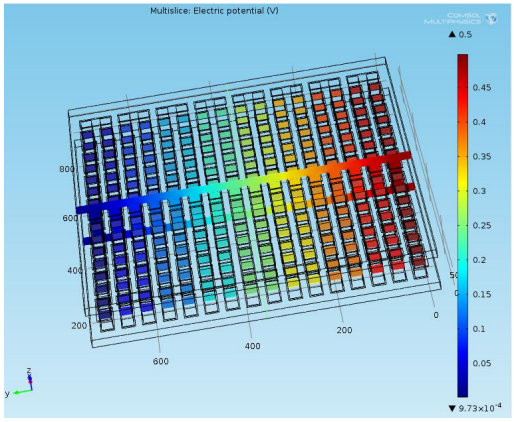
در شکل ۱ ولتاژ مدار باز، توزیع دما و گذر شار حرارتی از ماژول ترموالکتریک نشان داده شده است. ماژول طراحی شده دارای ۱۲۷ جفت پایه Pو Nمی‌باشد که ابعاد آنها در قسمت قبل محاسبه شده است. این پایه‌ها از لحاظ حرارتی به صورت موازی و به جهت الکتریکی به شکل سری به یکدیگر متصل شده و بین دو صفحه سرامیکی اکسید آلومینیوم با هدایت حرارتی بالا قرار داده شده‌اند. ولتاژ مدار باز با شبیه‌سازی 0.5 Vبه دست آمد که با مقدار تعیین شده یعنی 0.47 V در حدود 6% اختلاف دارد.

بر این اساس، مقدار ماده رادیواکتیو هندسه قرص سوخت و لایه‌های پیرامون آن به دست می‌آید. توان حرارتی بر جای گذاشته شده توسط ذرات بتا در داخل سلول سوخت با استفاده از کد MCNPمحاسبه شده است.

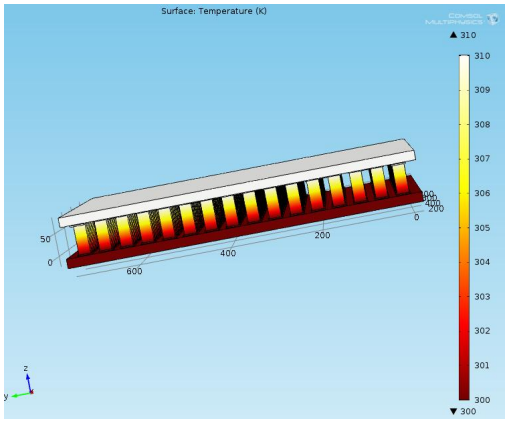
جدول۱: هندسه سلول سوخت به همراه هدایت حرارتی هر لایه و توان حرارتی یر جای گذاشته در هر لایه

سلول	حرارت تولیدی W	هدایت حرارتی W/m.K	چگالی g/cm^3	شعاع mm	ارتفاع mm
۱	2.37089	11.2	5.11	8.7574	8.7574
۲	0.07225	16.3	8	9.7574	10.7574
۳		126	10.22	11.97574	14.97574
۴		10	8.22	18.32574	27.6757

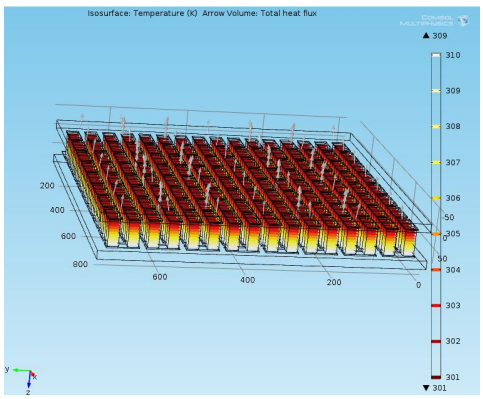
با توجه به توان حرارتی تولیدی کل و هندسه سلول سوخت پیکربندی عایق داخلی مولد تعیین می‌شود. حول سلول سوخت با یک لایه هوا با فشار 15 mtorr به ضخامت 10 mm و پس از آن دو لایه عایق کپتون و کرایوترم به ترتیب با ضخامت 0.8 mm و 2.45 mm پوشانده شده است. طرح‌واره مولد طراحی شده در شکل ۲ نشان داده شده است. آنالیز حرارتی اجزاء مختلف مولد شامل توزیع دما و توان حرارتی ورودی به ماژول و توان اتلافی توسط نرم‌افزار انسیس انجام شده است که نتایج آن در شکل ۱ نشان داده شده است.



الف

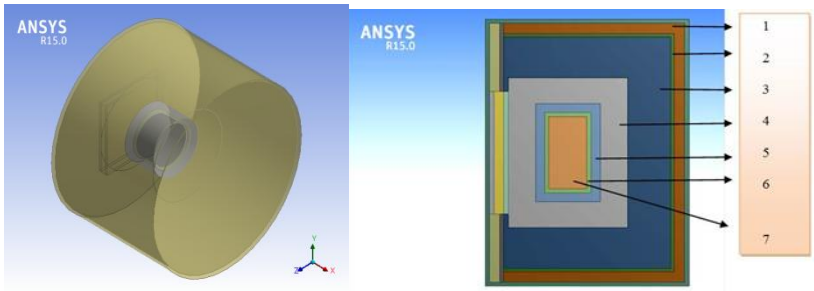


ب

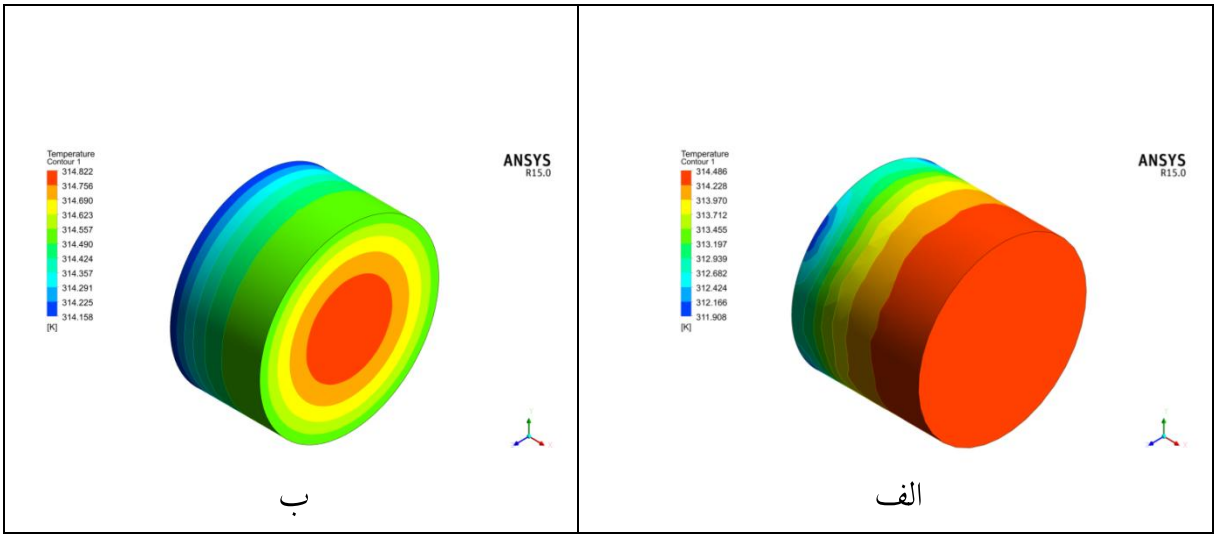


ج

شکل ۱: شکل‌های الف، ب و ج به ترتیب نشان دهنده توزیع ولتاژ، توزیع دما و انتقال شار حرارتی از ماژول ترموالکتریک طراحی شده می‌باشند.



شکل ۲: مقطع عرضی و طرح‌واره مولد استرانسیوم با عایق لایه‌ای در راستای ارتفاع مولد (محور x). ۱: کرایوترم، ۲: کپتون، ۳: هوا با فشار 15mtorr، ٤: هاستلوی ایکس، ٥: آلیاژ TZM، ٦: استیل ضد زنگ و ۷: استرانسیوم تیتانایت



ب الف

شکل۳: توزیع دمای سه بعدی در دو لایه سلول سوخت که به ترتیب شامل سلول ۱ (استرانسیوم تیتانایت) و سلول ٤ (هاستلوی ایکس) می‌باشد.

جدول۲: مشخصات و ابعاد اجزاء مختلف مولد گرما الکتریکی طراحی شده بر اساس چشمه استرانسیوم

مولد استرانسیوم	عایق کپتون–کرایوترم		
	ابعاد (mm)	دمای صفحات	
		گرم	سرد
مولد RTG	h= 47.2059 mmD= 65.112 mm		
مبدل ترموالکتریک	3	312.2	310
عایق حرارتی	کرایوترم با ضخامت 2.45 mm، صفحه کپتون 0.78 mm و لایه هوا 15 mtorr و ضخامت 10 mm		
محفظه استیل مولد	لایه استیل با ضخامت 1 mm		

جدول۳: عملکرد حرارتی و الکتریکی خروجی مولد طراحی شده بر اساس چشمه استرانسیوم

توان الکتری‌کی	توان حرارتی کل	توان حرارتی ورودی به ماژول	توان حرارتی اتلافی	ولتاژ بار	بازدهی کل
0.008 W	2.45 W	2.23919 W	0.203172 W	0.26 V	0.33 %

برای کاهش دز تابش ترمزی ایجاد شده در اطراف مولد نیز در نهایت یک لایه ۲ سانتیمتری سرب برر وی محفظـه خـارجی تعبیه خواهد شد.

بحث و نتیجه‌گیری

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود پیکربندی عایق و ابعاد آن به گونه‌ای طراحی شده است که بیشـترین مقـدار توان حرارتی تولیدی در سلول سوخت در راستای ماژول ترموالکتریک عبور کند. توزیع دمایی سلول ۱ و سـلول ٤ و صفحه گرم ماژول ترموالکتریک مؤید انتقال مناسب حرارت از داخلـی‌تـرین لایـه سـلول سـوخت (استرانسـیوم تیتانایت) به خارجی‌ترین لایه (آلیاژ هاستلوی ایکس) به واسطه مقاومت حرارتی پایین این لایه‌ها می‌باشد. با توجـه به دمای اتصال سرد (صفحه سرد ماژول) در شکل ۵ و توزیع دمای صـفحه گـرم مـاژول ترموالکتریـک (شـکل ۳) مشخص می‌شود که نوع مواد، چیدمان و ابعاد به کار رفته در سلول سوخت، ماژول ترموالکتریک و عـایق حرارتـی منجر به طرح مناسبی برای مولد توان گرمارادیوایزوتوپی شده‌اند.

[۱] J. C. Bass, "Preliminary development of a milliwatt generator for space," in *Thermoelectrics, 1998. Proceedings ICT 98. XVII International Conference on*, 1998, pp. 433-436.

[۲] R. Shor, R. Lafferty Jr, and P. Baker, "Strontium-90 heat sources," Oak Ridge National Lab., Tenn.(USA)1971.

[۳] T. Hayashi, M. Sekine, J. Suzuki, Y. Horio, and H. Takizawa, "Thermoelectric and Mechanical Properties of Angular Extruded Bi~ 0~.~ 4Sb~ 1~.~ 6Te~ 3 Compounds,"*Materials transactions,* vol. 48, p. 2724, 2007.

[٤] D. M. Rowe, *CRC handbook of thermoelectrics*: CRC press, 1995.

[٥] P. Walker, "The thermal conductivity and thermoelectric power of bismuth telluride at low temperatures," *Proceedings of the Physical Society,* vol. 76, p. 113, 1960.

[٦] D. Rowe and G. Min, "Design theory of thermoelectric modules for electrical power generation," *IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology,* vol. 143, pp. 351-356, 1996.