



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

سال چهل و پنج، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۲، صفحه ۸۳ تا ۹۱
Vol. 45, No.1, Summer 2013, pp. 83-91



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی مکانیک)

Amirkabir Journal of Science & Research (Mechanical Engineering)
(AJSR - ME)

بهینه‌سازی مولد ترموالکتریک چند قطعه‌ای و محاسبه عملکرد با روش دقیق

مهدی زارع جعفرآبادی^۱، هادی رامین^۲، رضا حسینی ابرده^{۳*}

۱ کارشناس ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲ کارشناس ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳ عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت ۱۳۸۹/۱۱/۶، پذیرش ۹۲/۳/۵)

چکیده

در این مقاله مطالعه جامعی بر روی مواد ترموالکتریک شناخته شده در سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۰ انجام شده و از بین این مواد، بهترین مواد ترموالکتریک برای بازه‌های دمایی مشخص انتخاب شده است. یک مولد ترموالکتریک چند قطعه‌ای برای عملکرد در بازه دمایی ۳۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه کلون با استفاده از مواد ترموالکتریک انتخاب شده، بهینه‌سازی شده است. سپس با استفاده از دو روش سوانسون و روش دقیق، ماکزیمم بازده ژنراتور بهینه شده، با فرض قابل صرف‌نظر بودن مقاومت تماسی و عایق بودن سطوح جانبی پایه‌ها، محاسبه شده است. بیشینه بازده ۲۳/۴٪ برای چیدمان بهینه شده به دست آمده است که افزایش ۵/۳٪ را نسبت به آخرین کار منتشر شده، نشان می‌دهد. قدرت و جریان الکتریکی قابل دستیابی به وسیله ژنراتور معرفی شده در بیشینه بازده محاسبه شده است. سایر مشخصات مورد نیاز برای طراحی ژنراتور، شامل طول، مقاومت خارجی و سطح مقطع تک تک قطعات به دست آمده و نتایج با پژوهش‌های قبلی مقایسه شده است.

کلمات کلیدی

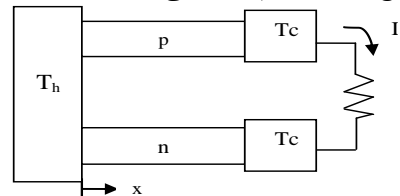
ترموالکتریک، مولد ترموالکتریک چند قطعه‌ای، محاسبه بازده، بهینه‌سازی، مواد ترموالکتریک جدید، ضریب تزویج

* نویسنده مسئول وعده دار مکاتبات Email: hoseinir@aut.ac.ir

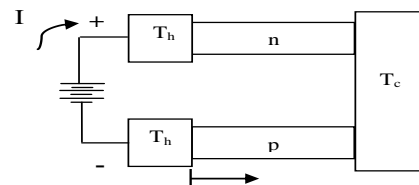
۱- مقدمه

مبانی تئوری پدیده ژنراتور و خنک‌کننده ترموالکتریک در سال‌های ۱۹۰۹ و ۱۹۱۱ به طور قابل قبولی توسط آلتن کریچ بیان شد. وی نشان داد که برای هر دو کاربرد موادی مورد نیاز است که دارای ضریب ترموالکتریک بالا یا به عبارتی دارای ضریب هدایت الکتریکی بالا برای کاهش اثر ژول و ضریب هدایت حرارتی پایین برای کاهش حرارت اتلافی باشد. به علت این خواسته‌های تقریباً متضاد، استفاده از ترموالکتریک تا شناخت نیمه‌هادی‌ها، توسعه چندانی نیافت.

یک ژنراتور ترموالکتریک از اتصال دو پایه نیمه هادی N و P بین دو منبع حرارتی سرد و گرم تشکیل شده است. این دو پایه از نظر حرارتی موازی و از نظر الکتریکی به صورت سری به هم هستند. در شکل (۱) شماتیکی از یک ژنراتور ترموالکتریک و در شکل (۲) نیز نمایی از یک خنک‌کننده ترموالکتریک نشان داده شده است. در یک وسیله ترموالکتریک هدف آنست که انتقال حرارت فقط توسط حرکت حاملان بار صورت پذیرد. بنابراین ترموالکتریک ارتباط بین انتقال حرارت و جریان الکتریکی را به صورت مستقیم برقرار می‌نماید، به طوری که در ژنراتور در اثر انتقال حرارت از منبع گرم به سرد، جریان الکتریکی تولید و در خنک‌کننده در اثر جریان الکتریکی انتقال حرارت از منبع سرد به گرم ایجاد می‌شود.



شکل (۱): مولد ترموالکتریک



شکل (۲): یخچال ترموالکتریک

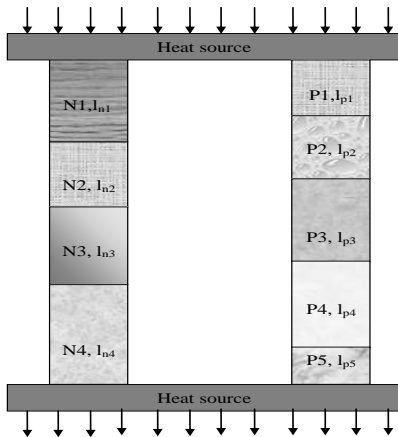
امروزه استفاده از ترموالکتریک به عنوان خنک‌کننده و مولد الکتریسته، توسعه زیادی یافته است. از جمله کاربردهای این پدیده می‌توان به خنک‌کاری وسایل الکترونیکی، یخچال‌های قابل حمل و تهویه‌کننده هوا، مولدهای جریان الکتریکی توان پایین و بالا، سنسورهای انرژی حرارتی و استفاده از حرارت اتلافی در سامانه‌های دیگر، اندازه‌گیری دما با دقت بالا،

کاربردهای نظامی دوربین‌های مادون قرمز برای دید در شب، ایستگاه‌های موبایل و ایستگاه‌های هواشناسی دور از دسترس و غیره اشاره نمود [۱]. پدیده ترموالکتریک دارای ویژگی‌های برجسته‌ای نسبت به سایر روش‌های تبدیل انرژی است، که مهم‌ترین آنها عبارتند از:

- به دلیل نداشتن قسمت متحرک، نیازمند تعمیرات و نگهداری بسیار کمتری می‌باشد.
- دارای قابلیت اطمینان نسبتاً بالا می‌باشد.
- قطعات ترموالکتریک طول عمر زیادی دارند، که موارد آزمایشگاهی برای کارکرد یکنواخت طول عمر بیش از ۱۰۰۰۰۰ ساعت را تایید می‌نماید.
- خنک‌کننده ترموالکتریک از کلروفلوروکربن‌ها استفاده نمی‌کنند که نیاز به شارژ دوباره داشته باشند.
- ترموالکتریک در جاهایی که محدودیت‌های مکانی یا شرایط خاص وجود دارد، قابل استفاده می‌باشد.
- نسبت جرم به قدرت تولیدی بسیار کمتری نسبت به بسیاری از مکانیزم‌های تبدیل انرژی دارد.

دلایل بالا کافی است که استفاده از ترموالکتریک در صنایع هوافضا به شدت گسترش یابد. از جمله معایب این روش تبدیل انرژی می‌توان به راندمان پایین و نیاز به منبع گرم اشاره نمود. بنابراین مطالعات زیادی برای افزایش بازده ترموالکتریک انجام شده و اکنون نیز ادامه دارد. از جمله روش‌هایی که برای افزایش بازده مورد استفاده قرار گرفته است، می‌توان به دو مورد زیر اشاره نمود:

- ابداع و ساخت مواد ترموالکتریک جدید با بازده بالا.
- استفاده از پایه‌های قطعه قطعه (شکل (۳)).



شکل (۳): مولد ترموالکتریک با پایه‌های چند قطعه‌ای

در مورد روش اول افزایش بازده می‌توان به ماده‌ای که در سال ۲۰۰۸ محققان دانشگاه MIT و Boston بدان دست

خواص فیزیکی مواد وابسته است. به دلیل آنکه خواص فیزیکی وابسته به دما هستند، محاسبه کار و گرما کار آسانی نیست، بنابراین برای محاسبه بازده، روش‌های متفاوتی ارائه شده است. این روش‌ها شامل روش متوسط‌گیری، چند مرحله‌ای و روش دقیق است که در ادامه هر یک از آنها به صورت مختصر توضیح داده می‌شود.

۲-۱- روش متوسط‌گیری

در این روش ضریب تزویج به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho k} \quad (2)$$

که در آن α ضریب سیبک، ρ ضریب مقاومت الکتریکی و k ضریب هدایت حرارتی است. برای محاسبه بازده بهینه، مقدار بهینه این عوامل به صورت روابط (۳) و (۴) به دست می‌آید:

$$Z_{opt} = \left(\frac{\overline{\alpha_{pn}}}{(\rho_p k_p)^{1/2} + (\rho_n k_n)^{1/2}} \right)^2 \quad (3)$$

$$\alpha_{pn} = \alpha_p - \alpha_n \quad (4)$$

که در آن زیروندهای p و n به ترتیب بیانگر پایه‌های p و n هستند. علامت بار نشان دهنده متوسط مقادیر در دماهای T_c و T_h است. سپس عدد بدون بعد ضریب تزویج به صورت $Z_{opt} T_m$ تعریف می‌شود که در آن T_m دمای متوسط در طول المان ترموالکتریک است. سپس بازده به صورت رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$\eta_{max} = \frac{\Delta T}{T_h} \frac{\mu_{opt} - 1}{\mu_{opt} + T_c / T_h} \quad (5)$$

که در آن عامل بدون بعد μ_{opt} به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود:

$$\mu_{opt} = \sqrt{1 + Z_{opt} T_m} \quad (6)$$

۲-۲- روش چندمرحله‌ای

در این روش پایه‌ها به قطعات کوچکتر تقسیم می‌شود که بازده هر کدام از این قطعه‌ها به روش متوسط‌گیری محاسبه شده و سپس بازده کل با روندی که در زیر آمده است، با استفاده از این بازده‌ها محاسبه می‌شود. راندمان قطعه i ام از یک مولد چند قطعه‌ای را می‌توان به صورت رابطه (۷) نوشت:

$$\eta_i = \frac{W_i}{Q_{hi}} = \frac{q_{hi} - q_{ci}}{q_{hi}} = 1 - \frac{q_{ci}}{q_{hi}} \quad (7)$$

یافتند، اشاره نمود که با استفاده فناوری نانو به افزایش قابل توجهی در بازده رسیدند [۲].

در مورد روش دوم افزایش بازده نیز کارهای زیادی انجام شده است که در ادامه به چند نمونه اشاره شده است. سوانسون و همکارانش در سال ۱۹۶۱ یک سامانه ترموالکتریک قطعه به قطعه پیشنهاد دادند، که در بازه دمایی ۳۰۰ و ۹۷۳ درجه کلون، به بازده ۱۱/۴۸٪ رسیدند [۳]. گفتنی است که هدف اصلی آنها ارائه روش محاسبه مشخصات طراحی یک ژنراتور ترموالکتریک قطعه‌ای بود. فلوریال و همکارانش در سال ۱۹۹۷ سیستم ترموالکتریک قطعه‌ای که بین دمای ۳۰۰ تا ۹۷۵ بازده تئوری حدود ۱۵٪ داشت را معرفی نمودند [۴]. کانگ و همکارانش در سال ۱۹۹۸، یک پایه ترموالکتریک نوع p ، ارائه دادند و به بازده ۱۷٪ برای این پایه ترموالکتریک سه‌قطعه‌ای به صورت تجربی دست یافتند [۵]. پژوهشکده JPL که یکی از زیر مجموعه‌های ناسا است، کارهای زیادی در مورد چیدمان‌های مختلف انجام داده است که در این مورد به کارهای ارزشمند کابلت و اشنايدر می‌توان اشاره نمود. در سال ۲۰۰۴ اشنايدر و همکارانش، سامانه ترموالکتریک قطعه‌ای با در نظر گرفتن فاکتور سازگاری پیشنهاد دادند که در بازه دمایی ۲۵ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، به بازده ۱۸/۱٪ رسیدند [۶]. گلین و همکارانش در سال ۱۹۹۱ بازده ۲۳/۳٪ را برای سامانه ترموالکتریک سیلیکان ژرمانیم پیش‌بینی نمودند [۷].

۲- روابط ریاضی حاکم بر مسئله

اولین بار شرمن و همکارانش [۸] روش‌های محاسبات مورد نیاز برای بدست آوردن بازده یک ژنراتور ترموالکتریک و ضریب عملکرد یک خنک کننده ترموالکتریک را ارائه کردند. پس از آنها سوانسون و همکارانش [۳]، روش دیگری برای محاسبه عوامل مورد نیاز در طراحی سامانه‌های ترموالکتریک که بر پایه سامانه‌های چند قطعه‌ای بود، را ارائه نمودند. علاوه بر بازده سایر عوامل طراحی نیز بوسیله آن قابل محاسبه بود. در سال ۲۰۰۳ جینک و همکارانش روش ارائه شده توسط سوانسون را بهبود بخشیدند [۹].

بازده یک سیستم مولد ترموالکتریک با تقسیم توان حاصل شده بر میزان حرارت گرفته شده از منبع به وسیله رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$\eta = \frac{W}{Q_h} \quad (1)$$

از آنجایی که توان خروجی و گرمای ورودی وابسته به خواص فیزیکی مواد ترموالکتریک است، بنابراین بازده به شدت به

و q_h است که هر کدام از آنها مستقیماً نیازمند داشتن توزیع دما در طول پایه‌های ترموالکتریکی هستند. که مقادیر آنها از روابط (۱۵) و (۱۶) قابل محاسبه است [۸]:

$$q_c = \pi_c I + k_p(T_c) \frac{dT_p}{dx}(l) + Ak_n(T_c) \frac{dT_n}{dx}(l) \quad (15)$$

$$q_h = \pi_h I - k_p(T_c) \frac{dT_p}{dx}(0) - Ak_n(T_h) \frac{dT_n}{dx}(0) \quad (16)$$

که در آن سطح مقطع پایه p برابر واحد و سطح مقطع n برابر A در نظر گرفته شده است و ضریب پلتیر، $\pi(T)$ نیز به صورت رابطه (۱۷) تعریف می‌شود:

$$\pi(T) = \alpha_{pn} T \quad (17)$$

توزیع دما در هر یک از بازوها با استفاده معادله (۱۸) که از نوشتن بقای انرژی برای بازوها بدست آمده است، قابل محاسبه می‌باشد

$$\frac{d}{dx} [k(T)T'(x)] - \gamma(T)JT'(x) + \rho(T)J^2 = 0 \quad (18)$$

که در آن $\gamma(T)$ عبارتست از ضریب تامپسون در دمای T که به صورت رابطه (۱۹) با ضریب سبک مرتبط می‌باشد:

$$\gamma(T) = T \frac{d\alpha}{dT} \quad (19)$$

با تغییر متغیر زیر می‌توان روابط را به شکل مناسب‌تری نوشت:

$$\gamma(T) = -\frac{k(T)}{J} \frac{dx}{dT} \quad (20)$$

$$J_p = I, J_n = \frac{I}{A} \quad (21)$$

در این رابطه J دانسیته جریان الکتریکی عبوری از پایه‌ها می‌باشد. با تغییر متغیر بالا روابط (۱۵) و (۱۶) و (۱۸) به صورت زیر خواهند شد:

$$\frac{q_c}{I} = \pi_c + y_p(T_c) - y_n(T_c) \quad (22)$$

$$\frac{q_h}{I} = \pi_h + y_p(T_h) - y_n(T_h) \quad (23)$$

$$\frac{dy}{dT} = -\gamma(T) + \frac{\rho(T)k(T)}{y} \quad (24)$$

با استفاده از روابط (۲۲) و (۲۳) بازده به صورت رابطه (۲۵) به دست می‌آید

$$\eta = 1 - \frac{\pi_c + y_p(T_c) - y_n(T_c)}{\pi_h + y_p(T_h) - y_n(T_h)} \quad (25)$$

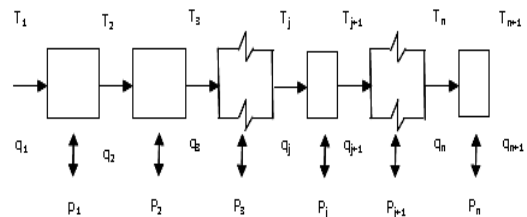
روش حل بدین صورت است که ابتدا یک y_p و y_n در دمای T - h حدس زده می‌شود، معادله (۲۴) برای پایه های p و n حل می‌شود، y_p و y_n در دمای T_c به دست می‌آید، سپس با

که q_{hi} و q_{ci} به ترتیب گرمای خروجی و ورودی قطعه i است، که در شکل (۴) نشان داده شده است. با توجه به شکل می‌توان بازده کل را به صورت رابطه (۸) بدست آورد

$$\eta_{tot} = \frac{W_{tot}}{Q_{h1}} \quad (8)$$

حال با نوشتن موازنه انرژی برای کل سامانه داریم:

$$W_{tot} = Q_{h1} - Q_{cn} \quad (9)$$



شکل (۴): پایه ترموالکتریک n قطعه‌ای

در نتیجه می‌توان نوشت:

$$\eta_{tot} = \frac{Q_{h1} - Q_{cn}}{Q_{h1}} = 1 - \frac{Q_{cn}}{Q_{h1}} \quad (10)$$

$$= 1 - \frac{Q_{cn}}{Q_{c(n-1)}} \cdot \frac{Q_{c(n-1)}}{Q_{c(n-2)}} \cdot \frac{Q_{c(n-2)}}{Q_{c(n-3)}} \dots \frac{Q_{c2}}{Q_{c1}} \cdot \frac{Q_{c1}}{Q_{h1}}$$

$$Q_{ci} = Q_{h(i+1)} \quad (11)$$

با جایگزینی رابطه (۱۱) در (۱۰) داریم:

$$\eta_{tot} = 1 - \frac{Q_{cn}}{Q_{hn}} \cdot \frac{Q_{c(n-1)}}{Q_{h(n-1)}} \cdot \frac{Q_{c(n-2)}}{Q_{h(n-2)}} \dots \frac{Q_{c3}}{Q_{h3}} \cdot \frac{Q_{c1}}{Q_{h1}} \quad (12)$$

$$= 1 - \prod_i (1 - \eta_i)$$

می‌توان نشان داد که هرگاه n به سمت بی‌نهایت میل نماید،

بازده از رابطه (۱۳) قابل محاسبه خواهد بود:

$$\eta_{tot} = 1 - \exp \left[- \int_{T_c}^{T_h} \varepsilon(T) \frac{dT}{T} \right] \quad (13)$$

که در آن $\varepsilon(T)$ به صورت رابطه (۱۴) تعریف می‌شود که در

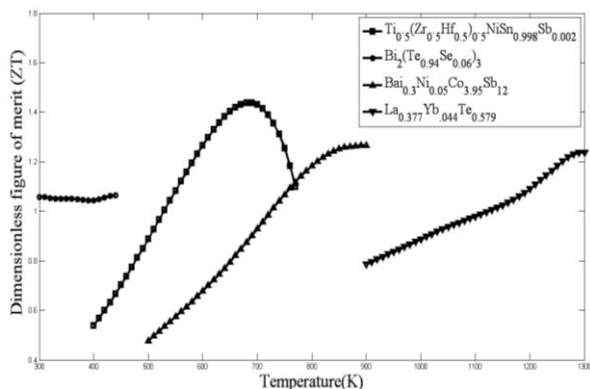
حقیقت همان η_i است:

$$\varepsilon(T) = \frac{\Delta T}{T_h} \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \quad (14)$$

۲-۳- روش دقیق

در حالت کلی برای محاسبه بازده، نیاز به به‌دست آوردن Q_c

	Sb _{0.002} [۱۷]
۷۷۰-۹۰۰	Ba _{0.3} Ni _{0.05} Co _{3.95} Sb ₁₂ [۱۸]
۹۰۰-۱۳۰۰	La _{0.377} Yb _{0.044} Te _{0.579} [۱۹]



شکل (۶): نمودار ضریب تزویج بدون بعد مواد انتخابی پایه N

همانگونه که دیده می‌شود، برای بازه دمایی بالاتر از ۸۰۰ درجه کلوین، مواد با ضریب تزویج بالا وجود ندارد و در مراجع نیز کارهای زیادی در این بازه انجام نشده است. می‌توان دو دلیل اصلی برای این مسئله در نظر گرفت؛ محدودیت‌های متالورژیکی و محدودیت‌های آزمایشگاهی. بنابراین انتظار می‌رود با رفع مشکلات موجود، بتوان در آینده موادی با ضریب تزویج بالاتر برای این بازه دمایی یافت که می‌تواند به افزایش بیشتری در بازه منجر شود. در جدول (۲) چیدمان پایه N، نشان داده شده است. در شکل (۶) نمودار ضریب تزویج برای مواد انتخابی برای استفاده در پایه N نشان داده شده است. که در اینجا نیز مشکل نبود مواد مناسب برای بازه‌های دمایی بالا مشخص است.

۴- محاسبات بازده

محاسبات انجام شده در این مقاله بر پایه کار شرمین است [۸]. روش استفاده شده برای به‌دست آوردن بازده، روش چند قطعه‌ای است. در این روش ابتدا هر پایه به تعداد زیادی قطعه تقسیم می‌شود، که ضریب تزویج برای هر یک با استفاده از رابطه (۲۷) محاسبه می‌شود:

$$Z = \left[\frac{\alpha_{pn}}{(\rho_p k_p)^{1/2} + (\rho_n k_n)^{1/2}} \right]^2 \quad (27)$$

سپس با استفاده از رابطه (۲۸) بازده هر مرحله محاسبه می‌شود:

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h} \times \frac{(1 + Z\bar{T})^{1/2} - 1}{(1 + Z\bar{T})^{1/2} + \frac{T_c}{T_h}} \quad (28)$$

استفاده از معادله (۲۴) بازده محاسبه می‌شود، این روند با فرض - های اولیه متفاوت برای yp و yn در دمای Th، تکرار می‌شود، تا زمانی که حداکثر میزان راندمان بدست می‌آید. تابع متناظر y- p(T) و yn(T) برای محاسبه Jp و Jn به وسیله رابطه (۲۶) استفاده می‌شود:

$$\int_{T_c}^{T_h} \frac{k(T)}{y} dT = -JL \quad (26)$$

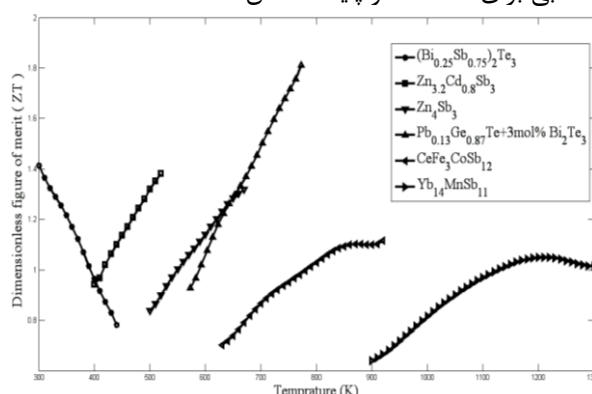
۳- مواد به کار رفته

در این مقاله جدیدترین مواد ترموالکتریکی شناخته شده، در طراحی بهینه مولد ترموالکتریک مورد استفاده قرار گرفته است. از بین این مواد بهترین ماده برای بازه‌های مختلف دمایی که در آن بازه بیش‌ترین ضریب تزویج را داشته باشد، انتخاب شده است. در جدول (۱) چیدمان پایه P، نشان داده شده است.

جدول (۱): مواد انتخابی برای چیدمان پایه P

بازه دمایی (کلوین)	ماده پیشنهادی
۳۰۰-۴۴۰	(Bi _{0.25} Sb _{0.75}) ₂ Te ₃ [۱۰]
۴۴۰-۵۲۰	Zn _{3.2} Cd _{0.8} Sb ₃ [۱۱]
۵۲۰-۶۷۰	Zn ₄ Sb ₃ [۱۲]
۶۷۰-۹۲۰	Pb _{0.13} Ge _{0.87} Te+3mol% Bi ₂ Te ₃ [۱۳]
۹۲۰-۱۳۰۰	CeFe ₃ CoSb ₁₂ [۱۴]
	Yb ₁₄ MnSb ₁₁ [۱۵]

هم‌چنین در شکل (۵) نمودار ضریب تزویج برای مواد انتخابی برای استفاده در پایه P نشان داده شده است.



شکل (۵): نمودار ضریب تزویج بدون بعد مواد انتخابی پایه P

جدول (۲): مواد انتخابی برای چیدمان پایه N

بازه دمایی (کلوین)	ماده پیشنهادی
۳۰۰-۴۴۰	Bi ₂ (Te _{0.94} Se _{0.06}) ₃ [۱۶]
۴۴۰-۷۷۰	Ti _{0.5} (Zr _{0.5} Hf _{0.5}) _{0.5} NiSn _{0.998}

ترتیب در جدول‌های (۳) و (۴) آورده شده است. همان‌گونه که در این جدول‌ها دیده می‌شود بیش‌ترین بازده موادی برای پایه‌های n و p به ترتیب برابر ۲۴/۴۰ و ۲۲/۹۷ برای ماده‌های $Ti_{0.5}(Zr_{0.5}Pb_{0.13}Ge_{0.87}Te+3mol\% Bi_2Te_3)$ و $Hf_{0.5}Ni_{0.998}Sb_{0.002}$ است که متناظر با بیش‌ترین مقدار $(ZT)_{ave}$ نیز است. با توجه به جدول‌ها واضح است که مواد انتخابی بیشتر دارای بازده موادی حدود ۲۰٪ می‌باشند. مواد دارای بازده موادی بالاتر از نظر ترموالکتریکی مناسب‌تر هستند زیرا این بازده فقط به خواص مواد وابسته بوده و مستقل از بازه دمایی است. با ضرب این بازده در بازه کارنو، مقدار بازده کلی به دست می‌آید که اثر بازه دمایی را نیز در نظر می‌گیرد. با دقت در جدول‌ها این نکته مشخص است که مواد استفاده شده در بازه‌های دمایی بالا، یعنی $YbMnSb$ در پایه P و $LaYbTe$ در پایه N، دارای کم‌ترین بازده موادی، در هر پایه است که تاییدی بر نیاز به کار بیشتر برای این بازه‌ها است. با مقایسه مقدار ضریب مقاومت الکتریکی این دو ماده با سایر مواد، دلیل این موضوع مشخص می‌شود، زیرا این مواد بیش‌ترین ضریب مقاومت الکتریکی متوسط را دارند. این جدول‌ها نشان می‌دهند که به طور میانگین بازده پایه P بیشتر از پایه N است، با دقت در اعداد مربوط به ضریب هدایت الکتریکی مواد، مشخص است که ضریب هدایت الکتریکی پایه N به صورت میانگین از پایه P بیشتر است، که می‌تواند دلیل اصلی این امر باشد. امروزه این نقص با استفاده از فناوری نانو قابل برطرف کردن است. در ستون آخر جدول‌های (۳) و (۴) طول المان‌های هر پایه بهینه شده نیز ارائه شده است، طول کل پایه‌ها برابر با ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است؛ بازه دمایی مورد استفاده برای مواد نیز در ستون دوم این جدول‌ها نشان داده شده‌اند. در این بازه دمایی این مواد دارای ضریب تزویج بالاتری نسبت به سایر مواد هستند. برای بهینه شدن بازده چیدمان، نیازمند اصلاح و بهبود خواص فیزیکی مواد هستیم، که از مهم‌ترین آنها کاهش ضریب مقاومت الکتریکی و ضریب هدایت حرارتی است. امروزه استفاده از فناوری نانو برای کاهش ضریب هدایت حرارتی روبه رشد است. با نگاه عمیق‌تر به جدول‌ها و در نظر گرفتن بازه‌های دمایی، می‌توان گفت که طول قطعات بیشتر از سایر خواص تحت تاثیر K یا ضریب هدایت حرارتی است که این نشان می‌دهد استفاده از رابطه (۳۸) به عنوان تقریب اولیه در محاسبه طول‌ها مناسب خواهد بود:

برای مقایسه بهتر مواد با یکدیگر راندمان موادی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_m = \frac{(1+Z\bar{T})^{1/2} - 1}{(1+Z\bar{T})^{1/2} + \frac{T_c}{T_h}} \quad (29)$$

که این بازده، مستقل از محدوده دمایی بوده و فقط تحت تاثیر خواص مواد است.

برای محاسبه نسبت سطح مقطع‌ها از رابطه (۳۰) استفاده شده است:

$$A = \left(\frac{\rho_n K_p}{\rho_p K_n} \right) \quad (30)$$

هم‌چنین برای محاسبه توان، حرارت گرفته شده از منبع گرم و شدت جریان الکتریکی روابط (۳۱) و (۳۲) و (۳۳) به ترتیب مورد استفاده قرار گرفته‌است:

$$w = \alpha_{pn}^2 \Delta T^2 \frac{\mu}{(R_p + R_n)(\mu + 1)^2} \quad (31)$$

$$q_h = \alpha_{pn}^2 \Delta T \frac{\mu}{(R_p + R_n)(\mu + 1)} \left(T_h + \frac{\mu + 1}{Z} - \frac{1}{2} \frac{\Delta T}{\mu + 1} \right) \quad (32)$$

$$I = \alpha_{pn} \frac{\Delta T}{(R_p + R_n)(\mu + 1)} \quad (33)$$

طولها با استفاده از رابطه (۳۴) محاسبه شده است:

$$Q_{c,i} = Q_{h,i+1} \quad (34)$$

در روابط (۳۰)، (۳۱)، (۳۲) و (۳۳) از مقادیر متوسط استفاده شده است به صورت رابطه (۳۵) تعریف می‌شوند:

$$\rho_{ave} = \frac{1}{T_h - T_c} \int_{T_c}^{T_h} \rho(T) dT \quad (35)$$

$$K_{ave} = \frac{1}{T_h - T_c} \int_{T_c}^{T_h} K(T) dT \quad (36)$$

$$Z_{ave} = \frac{1}{T_h - T_c} \int_{T_c}^{T_h} Z(T) dT \quad (37)$$

۵- نتایج و بحث

برای بهتر نشان دادن اثر عوامل مختلف بر روی بازده، خواص متوسط دمایی، محدوده کاری هر المان، بازده هر المان، بازده موادی و طول هر المان برای مواد انتخابی در پایه‌های p و n به

$$\frac{K_i \Delta T_i}{L_i} = \frac{K_{i+1} \Delta T_{i+1}}{L_{i+1}} \quad (38)$$

ترموالکتریک نوع P است نه ژنراتور ترموالکتریک. در جدول (۶) عوامل طراحی ژنراتور بهینه شده به همراه مقادیر متناظر برای چیدمان فلوریال آورده شده است. مقدار گرمای گرفته شده از منبع گرم برای دو چیدمان نشان داده شده است که در چیدمان فعلی این مقدار به میزان ۲۷/۳ درصد کمتر از چیدمان فلوریال است درحالیکه بازده حدود ۱۰ درصد بیشتر از آن می‌باشد. این را می‌توان به این دلیل دانست که بیشتر کارهای انجام شده برای بهبود خواص ترموالکتریکی مواد، در زمینه کاهش ضریب هدایت حرارتی است. این جدول افزایش حدود ۳۷/۵ درصدی در توان تولیدی را نشان می‌دهد.

در جدول (۵) تعدادی از چیدمان‌های مختلف ارائه شده، به همراه بازده‌شان با چیدمان کنونی مقایسه شده است. در این جدول بازه دمایی استفاده شده برای چیدمان و نیز مواد ترموالکتریک به کار رفته در پایه‌های P و n نیز به صورت مجزا نشان داده شده‌اند. در ردیف انتهای جدول نیز بیش‌ترین میزان بازده قابل دستیابی با این چیدمان نشان داده شده است. بازه دمایی چیدمان اشنایدر تقریباً همان بازه چیدمان کنونی است، بنابراین می‌توان افزایش ۵/۳ درصدی بازده نسبت به کارهای قبلی را دید. چیدمان کنونی در بازه‌های ۳۰۰ تا ۹۷۵ و ۳۰۰ تا ۱۰۷۳ به ترتیب ۱۹/۵۴ و ۲۰/۶۶ است. چیدمان ارائه شده توسط کانگ فقط یک پایه

جدول (۳): مقادیر متوسط خواص، بازده و طول مواد انتخابی برای پایه P

ماده	محدوده دمایی (K)	ρ_{ave} (mΩ-cm)	$k_{ave}(\frac{W}{m.K})$	$\alpha_{ave}(\frac{\mu V}{K})$	$(ZT)_{ave}$	η	η_c	طول هر المان (mm)
$(Bi_{0.25}Sb_{0.75})_2Te_3$	۴۴۰-۳۰۰	۱/۲۷۱۲	۱/۴۰۲۲	۲۲۷/۸۴	۱/۱۰۷۷	۶/۸۶	۲۱/۵۶	۱/۸۲۱
$Zn_{3.2}Cd_{0.8}Sb_3$	۵۲۰-۴۴۰	۲/۴۵۹۳	۰/۴۱۱۲	۱۶۱/۸۲	۱/۲۴۴۰	۲/۲۷	۲۱/۲۲	۰/۳۰۵
Zn_4Sb_3	۶۷۰-۵۲۰	۲/۹۵۵۳	۰/۵۹۸۶	۱۸۲/۷۱	۱/۱۲۵۸	۴/۵۸	۲۰/۴۵	۰/۸۳۳
$Pb_{0.13}Ge_{0.87}Te+3m$ 01% Bi_2Te_3	۷۷۰-۶۷۰	۲/۱۷۱۶	۱/۴۳۱۲	۲۶۰/۵۹	۱/۵۷۶۴	۳/۱۷	۲۴/۴۰	۱/۳۲۸
$CeFe_3CoSb_{12}$	۹۲۰-۷۷۰	۱/۲۷۹۲	۲/۲۸۵۰	۱۹۲/۴۱	۱/۰۶۹۸	۳/۱۵	۱۹/۳۰	۳/۱۷۹
$Yb_{14}MnSb_{11}$	۱۳۰۰-۹۲۰	۵/۰۵۷۹	۰/۷۱۹۰	۱۷۴/۳۸	۰/۹۳۲۲	۵/۴۲	۱۸/۵۵	۲/۵۳۴

جدول (۴): مقادیر متوسط خواص، بازده و طول مواد انتخابی برای پایه N

ماده	محدوده دمایی (K)	ρ_{ave} (mΩ-cm)	$k_{ave}(\frac{W}{m.K})$	$\alpha_{ave}(\frac{\mu V}{K})$	$(ZT)_{ave}$	η	η_c	طول هر المان (mm)
$Bi_2(Te_{0.94}Se_{0.06})_3$	۴۴۰-۳۰۰	۰/۶۰۷۱	۱/۸۸۰۰	۱۷۹/۶۳	۱/۰۵۱۶	۶/۵۸	۲۰/۶۸	۱/۳۱۱
$Ti_{0.5}(Zr_{0.5}Hf_{0.5})_{0.5}$ $NiSn_{0.998}Sb_{0.002}$	۷۷۰-۴۴۰	۱/۶۴۰۱	۳/۰۶۲۵	۳۰۹/۱۶	۱/۱۶۶۸	۹/۸۴	۲۲/۹۷	۵/۰۳۲
$Ba_{0.3}Ni_{0.05}Co_{3.95}Sb_{12}$	۹۰۰-۷۷۰	۰/۶۱۲۹	۳/۵۶۷۳	۱۷۸/۸۶	۱/۲۳۱۲	۳/۰۲	۲۰/۹۲	۲/۳۰۹
$La_{0.377}Yb_{0.044}Te_{0.579}$	۱۳۰۰-۹۰۰	۱۱/۸۹۶۸	۰/۶۷۷	۲۶۹/۰۶	۰/۹۹۳۹	۶/۰۱	۱۹/۵۴	۱/۳۴۸

جدول (۵): مقایسه چیدمان‌های مختلف ارائه شده

چیدمان حاضر	چیدمان اشنايدر	چیدمان کانگ	چیدمان فلوریل	مدلهای ارائه شده
۳۰۰-۱۳۰۰	۲۹۸-۱۲۷۳	۲۹۸-۱۰۷۳	۲۰۰-۹۷۵	محدوده دمایی (کلوین)
$Bi_2(Te_{0.94}Se_{0.06})_3 / Ti_{0.5}(Zr_{0.5}Hf_{0.5})_{0.5}NiSn_{0.998}Sb_{0.002} / Ba_{0.3}Ni_{0.05}Co_{3.95}Sb_{12} / La_{0.377}Yb_{0.044}Te_{0.579}$	$Bi_2Te_3/PbTe/CoSb_3 / La_2Te_3$	-	$Bi_2Te_{2.95}Se_{0.05} / CoSb_3$	مواد موجود در پایه n
$(Bi_{0.25}Sb_{0.75})_2Te_3 / Zn_{3.2}Cd_{0.8}Sb_3 / Zn_4Sb_3 / Pb_{0.15}Ge_{0.87}Te / CeFe_3CoSb_{12} / La_{0.377}Yb_{0.044}Te_{0.579}$	$Bi_2Te_3 / Zn_4Sb_3 / TAGS / CeFe_4Sb_{12} / Cu_4Mo_6Se_8$	$Bi_2Te_3 / PbTe / SiG$ e	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3 / Zn_3Sb_3 / CeFe_4Sb_{12}$	مواد موجود در پایه p
۲۳/۴	۱۸/۱	۱۷	۱۴/۷	بازده (درصد)

جدول (۲): سایر عوامل ژنراتور بهینه شده در مقایسه با ژنراتور فلوریل

پارامتر	چیدمان فلوریل ×	چیدمان حاضر
طول کل (میلی‌متر)، انتخاب شده	۱۰	۱۰
سطح مقطع پایه p (میلی‌متر مربع)، انتخاب شده	۱۰۰	۱۰۰
گرمای گرفته شده از منبع گرم (وات)	۶۶/۱۱	۵۱/۹۳۰۱
گرمای داده شده از منبع گرم (وات)	۵۸/۰۸	۳۹.۷۶۳۸
توان تولیدی (وات)	۸/۸۱	۱۱.۹۵۵۶
ماکزیم بازده محاسبه شده (درصد)	۱۳/۳۳	۲۳.۴۴۶۹
سطح مقطع پایه n (میلی متر مربع)	۸۸/۳۱	۹۶.۵۱
طول المانهای پایه p (میلی متر)	۴/۲۳۰ و ۰/۶۸۱ و ۵/۱۰۴	۲/۵۲۴ و ۳/۱۷۹ و ۱/۳۲۸ و ۸/۳۳ و ۳/۰۵ و ۱/۸۲۱
طول المانهای پایه n (میلی متر)	۵/۳۴۱ و ۴/۶۳۹	۱/۳۴۸ و ۲/۳۰۹ و ۵/۰۲۲ و ۱/۳۱۱
جریان بهینه (آمپر)	۳۴/۳۲۷	۳۹/۷۰
نسبت بهینه مقاومتها	۱/۴۸۱	۱/۵۴

* این چیدمان اولین بار توسط فلوریل و همکارانش [۴] ارائه شده ولی این عوامل طراحی آن، بوسیله جینک و همکارانش [۹] ارائه شده است.

۶- نتیجه‌گیری

بازه دمایی بهینه مواد انتخابی، که در این بازه دارای بیشترین ضریب تزویج هستند و طول بهینه آنها محاسبه شده است. بهبود بیشتر در بازده چیدمان نیازمند اصلاح و ترمیم خواص فیزیکی مواد و در راس آنها افزایش هدایت الکتریکی و کاهش هم‌زمان هدایت حرارتی است.

طول پایه‌های ترموالکتریک (در یک بازه دمایی) بیشتر از سایر خواص متأثر از ضریب هدایت حرارتی است.

استفاده از مواد ترموالکتریک برای تولید توان به ویژه با استفاده از حرارت‌های اتلافی بسیار مناسب است. با توجه به تلاش‌های درحال انجام برای بهبود خواص ترموالکتریک و به ویژه با تکیه بر فناوری نانو، این روش تبدیل مستقیم انرژی، آینده درخشانی را نوید می‌دهد.

در این پژوهش یک ژنراتور ترموالکتریک چند قطعه ای با استفاده از مواد جدید ترموالکتریک طراحی شد. طول بهینه قطعات و فواصل دمایی بهینه بدست آمده و راندمان بیشینه تئوری قابل دستیابی محاسبه شده است.

براساس نتایج، راندمان % ۲۳/۴ برای چیدمان بهینه در بازه دمایی ۳۰۰ تا ۱۳۰۰ کلوین، بدست آمده که نسبت به چیدمان مشابه در محدوده دمایی کلی یکسان، % ۵/۳ افزایش در راندمان داشته است.

بر اساس نتایج بدست آمده بطور میانگین بازده پایه p بیشتر از پایه n است که می‌تواند به اختلاف ضریب هدایت الکتریکی دویا به مربوط باشد.

۷- مراجع

- [۱۱] T. Caillat., A. Borshchevsky., J-p. Fleurial; "High performance P-type thermoelectric materials and method of preparation", US-Patent, 2003/0066476 A1 USA, Apr 10, 2003.
- [۱۲] T. Caillat., J.P. Fleurial., A. Borshchevsky; "Preparation and thermoelectric properties of semiconducting Zn4Sb3", Journal of Physics and Chemistry of Solids, Vol. 58, 1-18, 1997.
- [۱۳] Y. Gelebstein., B. Dado; "High Efficient Ge-Rich GexPb1-xTe Thermoelectric Alloys", O.Ben-Yehuda; Journal of Electronic Materials, Vol. 39, 2049-2059, 2010.
- [۱۴] J. Fleurial., A. Borshchevsky., T. Caillat; "High Figure of Merit in Ce-Filled Skutterudites", 15th International Conference on Thermoelectrics, pasadena CA USA, 91-95, 1996.
- [۱۵] Sh.R. Brown., S.M. Kauzlarich., F. Gascoin., G. J. Snyder; "Yb14MnSb11: New High Efficiency Thermoelectric Material for Power Generation", J. of chemistry of materials, Vol. 18,1873-1877, 2006.
- [۱۶] O. Yamashita., S. Tomiyoshi; "High performance n-type bismuth telluride with highly stable thermoelectric figure of merit", J. of Applied Physics, Vol. 95, 6277-6283, 2004.
- [۱۷] N. Shutoh., S. Sakurada; "Thermoelectric properties of the TiX(Zr0.5Hf0.5)1-XNiSn half-Heusler compounds", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 389, 204-208, 2005.
- [۱۸] X. Tanga., Q. Zhang; "Synthesis and thermoelectric properties of p-type- and n-type-filled skutterudite RyMxCo4-xSb12,,R:Ce,Ba,Y;M:Fe,Ni", J. of Applied Physics, Vol. 97, 1-10, 2005.
- [۱۹] A.F. May., J. Fleurial., G.J. Snyder; "Optimizing Thermoelectric Efficiency in La3-xTe4 via Yb Substitution", Chemistry of materials, Vol. 22, 2995-2999, 2010.
- [۱] S. B. Riffat., Xiaoli Ma; "Thermoelectrics: a review of present and potential applications", J. of Applied Thermal Engineering, Vol. 23, 913-935., 2003
- [۲] G. Chen., M. Dresselhaus., Zh. Reng; "Nano Composites With High Thermoelectric Figure Of Merit", Us-patent, 2009/0068465 A1 USA, Mar 12, 2009.
- [۳] B.W.Swanson., E.V.Somer., R.R.Heikes; "Optimization of a Sandwiched Thermoelectric Device", j.of heat transfer, Vol. 3, 77-81, 1961.
- [۴] J.p.Fleurial., A. Borshchevsky., T.Caillat ., R.Ewell;"New materials and devices for thermoelectric applications", 32st Energy conversion engineering conference, Honolulu HI USA, 1080-1085, 1997.
- [۵] Y.S. Kang., M. Niino., I.A. Nishida., J. Yoshino; "Development and Evaluation of 3-Stage Segmented Thermoelectric Elements". ,17th International Conference on Thermoelectrics, Nogoya Japan, 429-432, 1998.
- [۶] G.J. Snyder; " Using the compatibility factor to design high efficiency segmented thermoelectric generators, report of Jet Propulsion Laboratory/Califomia Institute of Technology, 2005.
- [۷] A. Glen., Slack., A. Moayyed; "The maximum possible conversion efficiency of silicon-germanium thermoelectrk generators". J. of Applied Physics, Vol. 70, 2694-2718, 1991.
- [۸] B. Sherman., R.R. Heikes., R.W. Ure., JR; "Calculation of Efficiency of Thermoelectric Devices", J. of Applied physics, Vol. 31, 1-16, 1960.
- [۹] M.S. El-Genk., H.H. Saber; "High efficiency segmented thermoelectric uncouple for operation between 973 and 300 " , J. of Energy Conversion and Management, Vol. 44, 2003.
- [۱۰] O. Yamashita., S. Tomiyoshi; "Bismuth telluride compounds with high thermoelectric figures of merit", J.of Applied Physics, Vol. 93, 368-374, 2003.