# تبدیل مستقیم انرژی (I)

نوشته :

تقی ابتکار .Ph. D

دانشکده فنی

**مقدمه :**

یکی از فعالترین رشته های تحقیقاتی فیزیک عملی امروز عبارتست از مبحث تبدیل انرژی‌ها. این موضوع هم در صنایع جدید وهم درمسائل علوم فضائی حائزاهمیت فراوان است. انرژی ووقت دانشمندان و مهندسین و تکنسین های بیشماری در راه تکمیل رشته های مختلف تکنیک تبدیل انرژی‌ها بیکدیگر بکار رفته و میرود.

منظور از تبدیل مستقیم انرژی اینست که بطریق مستقیمی یک نوع انرژی موجود را تبدیل بیک انرژی مفید وقابل مصرف نمایند. در یک سانترال توربین بخار، انرژی حرارتی (از زغال یا مازوت و غیره) درکوره به دیگ که محتوی آب است داده میشود و بخارآب که وسیله نقل انرژی است انرژی را به توربین بخار برده و پس از انبساط قدرت خودش را بصورت قدرت مکانیکی به توربین بخار میدهد. عملا در اغلب موارد این انرژی مکانیکی روی محور توربین بخار مستقیماً قابل استفاده نیست. اینست که چنانکه میدانیم در نیروگاههای برق با یک مولد الکتریکی تبدیل به انرژی مفید الکتریکی میشود. ملاحظه میشود که در این سیستم توربین بخار حداقل دو واسطه انتقال انرژی وارد میگردد تا انرژی نهائی مفید یعنی انرژی برق تولید شود. مسلم است که مانند هرمورد دیگر همین واسطه‌ها باعث کاهش بازده کلی سیستم خواهندشد.

در سانترال توربین گاز سیستم باز خود محصول احتراق کوره وارد توربین میشود و با حذف بخار آب بعنوان واسطه اول تنها یک واسطه درکار خواهد آمد تا نیروی برق تولید شود دراینجا بازهم انرژی الکتریکی مستقیماً تولید نشده است.

بیان این دومثال ساده صنعتی تاحدی بایدتکلیف دستگاههائی را که درجستجوی آنها هستیم روشن کند. این دستگاهها را دستگاههای تبدیل مستقیم انرژی نام گذاری کرده‌اند. هدف دستگاههای تولید

انرژی و دستگاههای تبدیل مستقیم انرژی اینست که انرژی‌های موجود درطبیعت را گرفته تبدیل به‌انرژی الکتریکی نمایند (البته جز در موارد استثنائی).

**مبدل‌های تبدیل مستقیم انرژی :**

انواع مبدلهای تبدیل مستقیم انرژی معلوم و شناخته شده‌اند و در این سلسله مقالات درباره آنها بشکل جداگانه بحث خواهد شد. البته جهت‌آشنائی کامل بااین‌سیستم‌ها خواننده لازمست تاحدی باترمو-دینامیک غیر برگشتنی و فیزیک حالت جامدات آشنائی داشته باشد. دراین مقالات سعی میشود تاحدممکن بشکل ساده مطالب عنوان گردد.

مبدلهای تولید مستقیم انرژی عبارتند از :

۱- مبدل ترموالکتریک Thermoelectric converter

۲- مبدل محفظه سوخت Fuel cell converter

۳- مبدل فتوولتیک Photovoltacs converter

٤- مبدل ترمیانیک Thermionics converter

٥- مبدل مگنوهیدرودینامیک Magnetohydrodynamics (MHD)

## ۱- مبدل ترموالکتریک

**۱- ۱- معرفی‌وآشنائی -** باکوپل ترموالکتریک یعنی پدیده‌ای که درآن اختلاف درجه حرارت دو فلز باعث تولید الکتریسیته میشود کم و بیش آشنا هستیم.

اولین بار درآمریکا از ترموالکتریک برای قطع اتوماتیک جریان سوخت کوره‌ها درصورت خاموش شدن (شمع روشن کن) استفاده شد و فریتس (5 , 6) Fritts درگسترش این‌صنعت بسیارکمک کرده است.

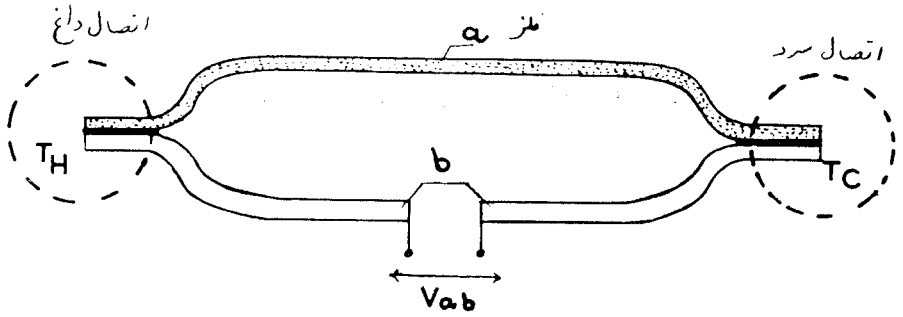
امروزه درجاهائیکه وسائل‌مولد الکتریک قابل حمل کوچک لازمست درموارد نظامی و غیرنظامی درایستگاههای اتوماتیک کنترل هوا ودرسراکزدورافتاده و بالاخره درتولید الکتریسیته لازم‌برای کپسولهای فضائی از مبدل ترموالکتریک استفاده میشود.

باوجود اینکه تولید قدرت ترموالکتریک بعلت‌جوان بودن تکنیک‌آنها هنوز ببازار صنعت نیامده‌اند ودستگاههای موجود کوچک میباشند ولی بعلت اهمیت فیزیکی مسئله واهمیتی که سیستم ترموالکتریک در صنایع خودکار دارد ما در رأس وسائل تبدیل مستقیم انرژی این‌مبدلها را مورد مطالعه قرار میدهیم.

**۱-۲- پدیده شناسی :**

درسال ۱۸۲۱ سیبک Seebek به‌آکادمی‌پروس گزارش داد که دراثر گرم کردن محل اتصال دو فلز غیرمتجانس میتوان یک پتانسیل الکتریکی دردوسرآن دوفلز ایجاد کرد ضریب سیبک رابطه بین‌اختلاف درجه حرارت و پتانسیل مزبور را بشکل زیر بیان کرد : به‌شکل (۱) مراجعه شود

$$\alpha_{ab}(T) = \lim_{\Delta T \to 0} \frac{\Delta V_{ab}}{\Delta T} \qquad (1)$$




شکل ۱

دررابطه (۱) :

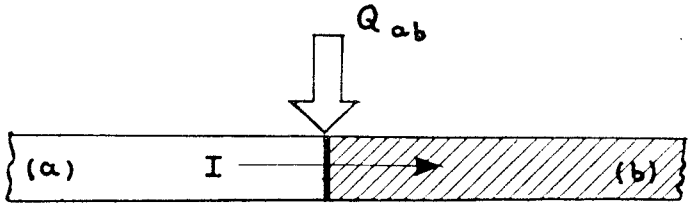
$$\Delta T = T_h - T_c$$

$T_h$ عبارتست از حرارت منبع گرم برحسب درجه کلون و $T_c$ درجه حرارت منبع سرد است $\Delta V_{ab}$ اختلاف پتانسیل بین نقاط a و b است.

در سال ۱۸۳٤ پلتیر Peltier کشف کرد که عکس‌العمل عبور جریان الکتریک از محل اتصال دوفلز غیرمتجانس عبارتست از ایجاد حرارتی برگشتنی. حتی چهار سال بعد عملا لنز Lenz توانست نشان دهد که ممکن است مقدار آبی را که روی محل اتصال قرار دارد تبدیل به یخ کرد و سپس با تغییر جهت جریان برق میتوان مجدداً آنرا ذوب کرد. ضریب پلتیر بتوسط رابطه زیر تعریف میشود :

$$\Pi_{ab}(T) = \frac{Q_{ab}}{I} \qquad (2)$$

$Q_{ab}$ عبارتست از حرارت ایجاد شده درمحل اتصال فلزات a و b و I شدت‌جریان الکتریسیته است بشکل (۲) مراجعه شود.



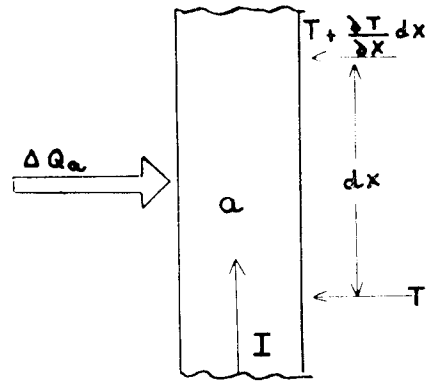

شکل ۲

پدیده ترموالکتریک تا مدت بیست سال بعد از پلتیر دست نخورده ماند تااینکه درسال ۱۸۵٤ لرد کلون همراه کشفیات شگرف خود در ترمودینامیک توانست رابطه بین پتانسیل سیبک $V_{ab}$ و حرارت پلتیر را پیدا کند (به صفحات بعد مراجعه شود).

او در همان زمان توانست به آثار پدیده سوم ترموالکتریک یعنی حرارت تمسون (Thomson) که ذیلاً می‌آید پی ببرد وحتی آنرا اندازه گرفت. باید توجه داشت که کلون موقعی این تحلیل را انجام داد که اصل دوم ترمودینامیک فقط چهار سال عمر داشت.

حالا به تعریف حرارت تمسون می‌پردازیم. اگر درداخل یک جسم هادی یک گرادین درجه حرارت وجود داشته باشد (شکل ۳) ضریب تمسون عبارت خواهد بود از:

$$\tau_a(T) = \lim_{\Delta T \to o} \frac{\frac{\Delta Q}{I}}{\Delta T} \qquad (۳)$$




شکل ۳

علاوه بر سه اثر ترموالکتریک مذکور درفوق دراجسام هادی الکتریسیته پدیده‌های ترمودینامیکی مشهور دیگری هم پیش می‌آیند که عبارتند از حرارت ژول وهدایت گرما که اولی توسط رابطه:

$$Q = I^2 R$$

بیان میشود که البته یک پدیده غیر برگشتنی است. هنگامیکه گرادین درجه حرارت وجود داشته یک شار حرارتی در جسم وجوددارد وتوسط رابطه زیر بدست می‌آید که به‌معادله فوریه مشهور است.

$$q = -k\nabla T \qquad (٤)$$

$\nabla T$ گرادین درجه‌حرارت است و k عبارتست از ضریب هدایت‌حرارتی (Thermal conduction) که غالباً تابع جهت انتخاب شده است و همین‌امر باعث شد که انسایگر Onsager بتواند قانون متقارن بودن ضرائب مزدوج (Coupling) معادلات پدیده ترمودینامیک غیر برگشتنی را پیدا کند که بعداً مختصراً خواهیم دید.

در ژنراتور ترموالکتریک همه پدیده‌های فوق مشترکاً و بشکل مزدوج وارد عمل میشوند یعنی گرم کردن اتصال فلزات a و b و سرد کردن طرف دیگر آنها (شکل ۱) باعث ایجاد جریان الکتریک میشود و بموجب رابطه (۱) یک پتانسیل بین a و b ایجاد میشود از طرفی بموجب رابطه (۲) عبور جریان تولید حرارت پلتیر را میکند که واضح است که ربطی به گرمای ژول ندارد و دلیلی دردست نیست که خود این

گرما نوزاد تازه‌ای که همان جریان الکتریسیته است تولید نکند. ضمناً چون درداخل جسم هادی مثلاً a یک گرادین درجه حرارت وجود دارد بموجب رابطه (۳) ایجاد حرارت تمسون اجتناب‌ناپذیر است. خلاصه آنالیز کامل پدیده ترموالکتریک باید بتوسط دوقسمت زیر صورت گیرد:

۱- ترمودینامیک غیر برگشتنی (ازنقطه نظر مزدوج بودن و مرتبط بودن وعدم استقلال پدیده‌ها)

۲- ترانسپورت الکترون (ازنظر تعیین کمیت پارامترها).

در قسمت (۱) ضرائب مزدوج معادلات پدیده شناسی[1] انسایگر Onsager به ضرائب معرفی‌شده در بالا مرتبط میشود.

معادلات مشهور پدیده شناسی [1] (Phenonienological) برای شار انتروپی $J_S$ و شار انرژی $J_e$ درسیستم ترموالکتریک بشکل زیر خلاصه میشوند :

$$J_S = L_{SS}X_S + L_{Se}X_e \qquad (۵)$$

$$J_e = L_{eS}X_S + L_{ee}X_e \qquad (۶)$$

در این معادلات $L_{ij}$ ضرائب ثابتی هستند و $X_i$ عبارتند از توابع نیرو و عموماً از یک پتانسیل مشتق میشوند و دراینمورد داریم :

$$X_S = T\nabla\left(\frac{1}{T}\right)$$

$$X_e = -\frac{\nabla\mu}{T}$$

T دمای مطلق کلون است و $\mu$ پتانسیل الکتریکی - شیمیائی میباشد.

این همان پارامتری است که در معادله گیبس داده میشود :

$$Tds = du - \mu dn$$

قانون ضرائب مزدوج انسایگر درمورد ضرائب معادلات ۵ و ۶ نشان می‌دهد که :

$$L_{eS} = L_{Se} \qquad (۷)$$

این مطلب پیش‌بینی کلون را اثبات کرد که تولید انتروپی بتوسط پدیده‌های غیر برگشتنی یک پدیده مزدوج است (Coupling effetcs).

اگرچه هدف این‌مقاله‌اثبات معادلات ترمودینامیک غیر برگشتنی‌نیست ولی‌بجاست که این‌مطلب از روی معادله گذر آنتروپی در هادی‌های ترموالکتریک که بصورت زیر اثبات شده است بیان گردد :

$$S^\circ = \frac{K(\nabla T)^2}{T^2} + \frac{J_e^2}{\sigma T} + \frac{(L_{Se}-L_{eS})}{L_{ee}} J_e X_S \qquad (۸)$$

جمله اول طرف راست این معادله منحصر به تولید انتروپی است بموجب شار حرارتی در سیستم

---

۱- منظور ازمعادلات پدیده شناسی روابطی هستند که مبتنی براصول اولیه تجربی ومشاهدات بوده و سپس از نظر تئوری بسط یافته‌اند.

ترموالکتریک جمله دوم که درآن σ ضریب هدایت‌الکتریکی‌است ، عبارتست از ترقی‌آنتروپی بموجب گرمای ژول ، بالاخره جمله سوم طرف راست معادله (۸) عبارتست‌از اثر متزدوج که اگر رابطه (۷) وجود نمی‌داشت باعث تولید انتروپی می‌شد.

درمورد ضرائب معادلات (۵) و (۶) میتوان تحقیق کرد که روابط زیر برقرار است :

$$L_{cc}=\sigma T$$

$$k=L_{SS}-\frac{L_{Sc}-L_{cS}}{L_{ck}}$$

k عبارتست از ضریب هدایت حرارتی. بنابراین ضرائب مزبور به مشخصات فیزیکی جنس مواد الکترودهای ژنراتور ترموالکتریک بستگی خواهند داشت.

از مطالعه قسمت دوم مذکور در بالا یعنی ترانسپورت الکترون بسهولت میتوان اندازه دقیق پارامترهای فیزیکی پدیده ترموالکتریک را پیدا کرد. مثلا رابطه‌ای پیدا میشود که درآن σ به جرم‌الکترون وتعداد الکترون‌ها درهادی و انرژی الکترون و بالاخره زمان متوسط $<t>$ برخورد الکترون‌ها بستگی‌دارد. ومیتوان ضریب سیبک را (α) مستقیماً توسط پارامترهای الکترونی پیدا کرد و بهمین‌ترتیب سایر پارامترهای مورد لزوم دقیقاً قابل محاسبه هستند.

مطالعه مشروح ترمودینامیک غیر برگشتنی و ترانسپورت الکترون خود بحثی جداگانه است که در پدیده ترموالکتریک ازآنها بعنوان ابزار کار استفاده میشود.

### ۱ـ ۳ـ مشخصات ژنراتور ترموالکتریک :

بدواً رابطه بین ضریب سیبک معادله (۱) و ضریب پلتیر رابطه (۲) را پیدا میکنیم :

درضمن کار مدار الکتریکی و ترمودینامیکی شکل (۱) چنانکه گذشت عکس‌العمل‌های حرارتی متعددی بین سیستم ترموالکتریک ومحیط خارج انجام میشود. بموجب اصل اول ترمودینامیک :

$$du=\delta Q+\delta w$$

چون فرض اینست که درجه حرارت و میزان پتانسیل بدست آمده تغییری نخواهد کرد انرژی داخلی مقدار ثابتی خواهد ماند :

$$du=o$$

کار تولیدی توسط سیستم عبارتست از :

$$\delta w=IV_{ab}dt$$

درعبارت حرارت $\delta Q$ حرارتهای پلتیر و تمسون وارد میشوند یعنی :

$$\delta Q=I\left\{\left[\Pi_{ab}(T_c)-\Pi_{ab}(T_h)\right]+\int_{T_c}^{T_h}(\tau_a-\tau_b)\,dT\right\}dt$$

که درآن $T_h$ درجه حرارت منبع گرم و $T_c$ درجه حرارت منبع سرد است. بنابراین خواهیم داشت :

$$V_{ab} = \Pi_{ab}(T_h) - \Pi_{ab}(T_c) - \int_{T_c}^{T_h} (\tau_a - \tau_b)\, dT$$

اگر اختلاف درجه حرارت منابع گرم و سرد کم باشد داریم :

$$\frac{dV_{ab}}{dT} = \frac{d\Pi_{ab}}{dT} - (\tau_a - \tau_b) \qquad (۹)$$

درحالیکه :

$$\frac{d\Pi_{ab}}{dT} = \lim_{\Delta T \to 0} \frac{\Pi_{ab}(T_h) - \Pi_{ab}(T_c)}{\Delta T}$$

$$\Delta T = T_h - T_c$$

درضمن ضریب سیبک بشکل زیر تعریف میشود :

$$\alpha_{ab} = \frac{dV_{ab}}{dT}$$

اکنون اصل دوم ترمودینامیک برای عکس‌العمل های حرارتی سیستم ترموالکتریک نوشته میشود سیستم برگشتنی فرض میشود و درمورد حرارتهای پلتیر و تمسون داریم :

$$dS = I \left\{ \frac{\Pi_{ab}(T_c)}{T_c} - \frac{\Pi_{ab}(T_h)}{T_h} + \int_{T_c}^{T_h} (\tau_a - \tau_b) \frac{dT}{T} \right\} dt$$

برای تحویل آدریاباتیک و برگشتنی :

$$dS = 0$$

و اگر فرض شود $T_h \to T_c$ این معادله نتیجه زیر را می‌دهد :

$$\frac{d}{dT}\left(\frac{\Pi_{ab}(T)}{T}\right) - \frac{(\tau_a - \tau_b)}{T} = 0$$

$$\frac{1}{T}\frac{d}{dT}\Pi_{ab}(T) - \frac{\Pi_{ab}(T)}{T^2} - \frac{\tau_a - \tau_b}{T} = 0$$

و یا :

$$\frac{d\Pi_{ab}(T)}{dT} = (\tau_a - \tau_b) + \frac{\Pi_{ab}(T)}{T} \qquad (۱۰)$$

بموجب معادله (۹) خواهیم داشت :

$$\frac{d\,\Pi_{ab}}{dT} = \alpha_{ab} + (\tau_a - \tau_b) \qquad (۱۱)$$

ازاین روابط نتیجه میشود که :

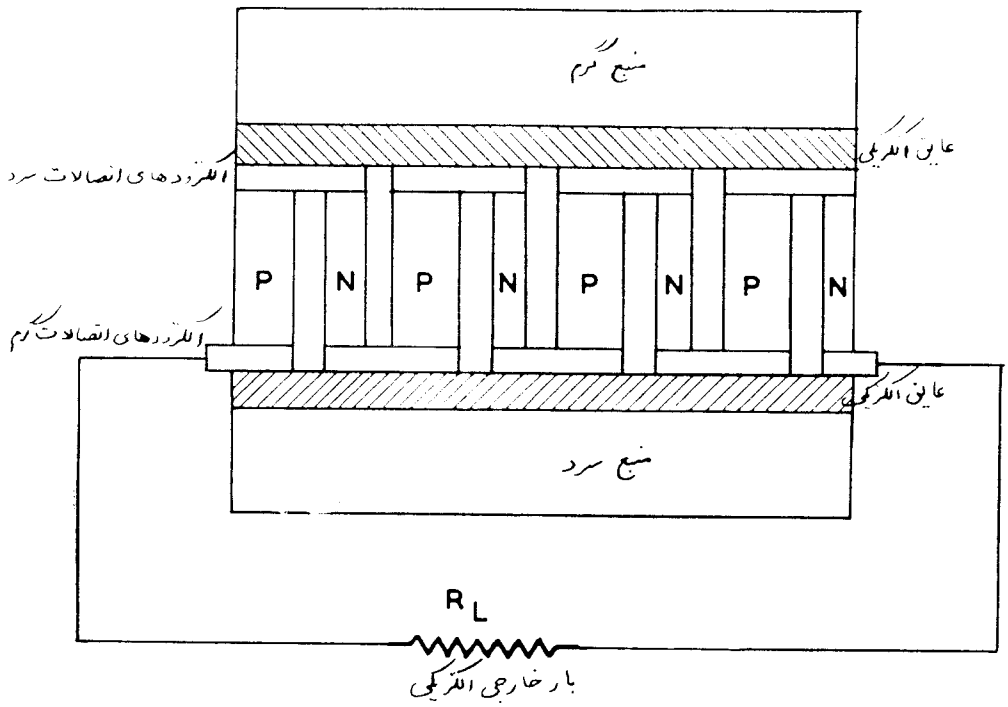
$$\boxed{\alpha_{ab} = \frac{\Pi_{ab}(T)}{T}} \qquad (۱۲)$$

این همان رابطه بین ضریب سیبک و ضریب پلتیر است. درضمن :

$$\frac{d\alpha_{ab}}{dT} = \frac{\tau_a - \tau_b}{T} \qquad (۱۳)$$

همین روابط مأخذ کشف کلون درباره حرارت تمسون بود. این معادلات نشان می‌دهند که اگر ضریب سیبک تابع درجه حرارت نباشد مقدار خالص حرارت تمسون‌صفر است. باین‌ترتیب مقدمات لازم‌جهت محاسبه ژنراتور ترموالکتریک با مشخصات ثابت مورد بررسی ومطالعه قرار گرفت.

باید دانست که سیکل ژنراتور مزبور عیناً مانند سیکل رانکین است که سیال عامل آن «گازالکترون» میباشد در اینحال سطح انرژی الکترونی در اتصال داغ بالا رفته وسطح انرژی مزبور در اتصال سرد پائین خواهد بود عیناً مانند میزان حرارت بخار در دیگ و میزان حرارت آب در کندانسور در سیستم توربین بخار. باید توجه داشت سطح مقایسه‌ای که درمورد الکترون بآن مراجعه میشود همان سطح مراجعه فرمی است (Fermi Level) در ژنراتور ترموالکتریک انتقال حرارت درطول میله‌های هادی عموماً همراه است با یک اتلاف حرارتی شدید و برای نسبت هدایت حرارتی به مقاومت الکتریکی الکترودها یک وضع اپتیمم وجود دارد. تحلیلی از میزان بهره ژنراتور با پارامترهای ثابت این مسئله را روشن می کند.




شکل ٤

شکل (٤) یک وضع شماتیک از یک ترموپیل (Thermopile) را نشان می‌دهد که الکترودها یا میله‌های ترموالکتریک باعلامتهای متوالی P و N (که نشان‌دهنده فلزات‌نیمه‌رسانای مثبت ومنفی‌میباشند) نشان داده شده‌اند. حرارت ورودی از منبع گرم به‌داخل‌سیستم‌توسط دوقسمت تأمین میشود یعنی یک‌قسمت

حرارت پلیتر مطابق رابطه (۲) و قسمت دیگر توسط معادله (٤) بیان میگردد چون مسئله یک بعدی است بنابراین حرارت انتقالی بتوسط این رابطه عبارت ساده‌تری دارد حرارت تمسون وارد معادله نخواهد شد زیرا فرض اینست که ضریب سیبک تابع درجه حرارت نیست بنابراین گرمای تمسون صفر است. پس :

$$Q = I\Pi(T_h) + kA\frac{dT}{dX} \qquad (١٤)$$

A سطح مقطع پایه است و X جهت محور طولی پایه را نشان می‌دهد.

همواره میتوان ضریب پلتیر را بتوسط رابطه کلون (۱۲) پیدا کرد.

$$\alpha = \frac{\Pi}{T}$$

معادله دیفرانسیل استاندارد توزیع حرارت دراینجا عبارتست از :

$$k\frac{d^2T}{dX^2} + J^2\rho = o \qquad (١٥)$$

که درآن :

$$J = \frac{I}{A}$$

دانسیته جریان است و ρ همان رزیستیویته می‌باشد شرایط سرحدی معادله (۱۵) عبارتند از :

$$\begin{cases} T(o) = T_h \\ T(L) = T_c \end{cases} \qquad (١٦)$$

جواب کامل معادله دیفرانسیل (۱۵) باشرایط (۱۶) عبارتست از :

$$T(x) = \left[\frac{J^2\rho}{2k}X + \frac{T_h - T_c}{L}\right](L - X) + T_c \qquad (١٧)$$

L طول الکترودها است. شارحرارتی درعنصر از روی گرادین درجه‌حرارت برای $X = o$ بدست می‌آید یعنی:

$$q = -k\left(\frac{dT}{dX}\right)_{X=o} = k\left(\frac{\Delta T}{L}\right) - \frac{J^2\rho L}{2} \qquad (١٨)$$

مشاهده میشود که نصف گرمای ژول نیز وارد معادله شده است.

مقاومت وهدایت کلی الکتریکی پایه‌ها مطابق شکل (٥) بطریق زیر تعیین میشوند :

$$\begin{cases} K = \left(\frac{kA}{L}\right)_N + \left(\frac{kA}{L}\right)_P \\ R = \left(\frac{\rho L}{A}\right)_N + \left(\frac{\rho L}{A}\right)_P \end{cases} \qquad (١٩)$$

اندیس‌های N و P برای پایه‌های منفی ومثبت نوشته شده است که البته بطور سری قرار دارند.

بنابراین کل حرارت ورودی به پایه‌ها درمحل اتصال داغ میشود.

$$Q = I\alpha T_h + K\Delta T - \frac{I^2R}{2} \qquad (22)$$

درحالیکه $\alpha$ تفاضل ضرائب سیبک پایه‌ها است.

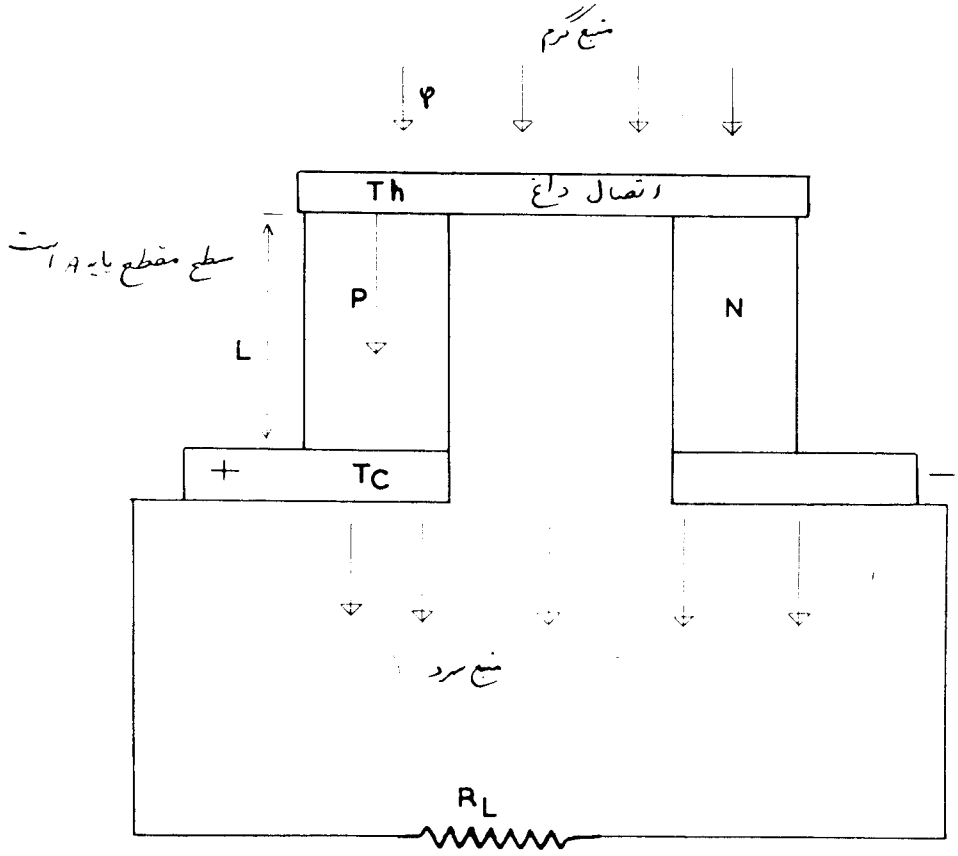
$$\alpha = \alpha_N - \alpha_P$$

با ورود این گرما به سیستم، سیستم ترموالکتریک تولید انرژی‌الکتریکی خواهد کرد وآن‌عبارتست از حاصلضرب میزان پتانسیل الکتریکی در شدت جریان تولیدی و چنانکه میدانیم پتانسیل الکتریکی محل اتصال همان پتانسیل سیبک است که در رابطه (۱) تعریف شده از این مقدار البته باید اتلاف داخلی ژول ($R^2I$) را کم کرد. یعنی انرژی تولیدی میشود :

$$P = I\alpha\Delta T - I^2R \qquad (23)$$

بهره ژنراتور ترموالکتریک عبارتست از نسبت انرژی تولیدی به گرمای مصرفی یعنی :

$$\eta = \frac{P}{Q} = \frac{\alpha\Delta T - IR}{\alpha T_h + \frac{K\Delta T}{I} - \frac{IR}{2}} \qquad (24)$$




شکل ۵

باید دانست کـه رابطه (۲۱) را میتوان از روی میزان بار خارجی $R_L$ و شدت جریان مدار پیدا کرد .

$$P=R_L I^2$$

حالا باید شدت جریان I را پیدا کرد از مشاهده شکل ۵ معلوم میشود که پتانسیل سیبک ($\alpha\triangle T$) باید جریان I را در مقاومتهای سری داخلی و خارجی بگرداند یعنی :

$$I = \frac{\alpha\triangle T}{R+R_L} \qquad (۲۳)$$

اگر فرض کنیم :

$$m=\frac{R_L}{R}$$

باشد معادله مربوط به بهره دستگاه میشود :

$$\eta = \frac{\triangle T}{T_h}\frac{m}{\left[1+m-\frac{\triangle T}{2T_h}+\frac{(1+m)^2 RK}{\alpha^2 T_h}\right]} \qquad (۲۴)$$

این بهره البته نمیتواند از بهره سیکل کار نو بیشتر شود .

### ۱-٤- بهره اپتیمم :

در معادله (۲٤) پارامترهای مختلف وارد شده‌اند که باید نسبت بآنها وضع بهره را تعیین کرد .

درمورد پارامتر مهم حاصلضرب RK بموجب روابط (۱۹) داریم :

$$RK = \left[\left(\frac{kA}{L}\right)_N+\left(\frac{kA}{L}\right)_P\right]\left[\left(\frac{\rho L}{A}\right)_N+\left(\frac{\rho L}{A}\right)_P\right] \qquad (۲۵)$$

نسبت طول به سطح مقطع پایه‌های N و P یک پارامتر مشخص هندسی است و توسط g نشان داده میشود .

$$g \equiv \frac{\left(\frac{L}{A}\right)_N}{\left(\frac{L}{A}\right)_P} \qquad (۲۶)$$

ملاحظه میشود که حاصلضرب رزیستانس و کنداکتانس RK فقط تابع g است . کافی‌است مشتق معادله (۲۵) نسبت به g صفر گذاشته شود تا وضع اپتیمم RK بدست آید .

$$\frac{d\,(RK)}{dg} = 0 = \frac{d}{dg}\left(K_N\rho_N + \frac{K_N\rho_P}{g} + K_P\rho_N g + K_P\rho_P\right)$$

و ازآنجا :

$$g = \sqrt{\frac{K_N\rho_P}{K_P\rho_N}} \qquad (۲۷)$$

و سپس RK اپتیمم بدست می‌آید :

$$(RK)_{OPT} = \left(\sqrt{(\rho K)_N} + \sqrt{(\rho K)_P}\right)^2$$

و خلاصه بهره میشود :

$$\eta_{OPT} = \eta_c \frac{m}{\left(1 + m - \frac{\Delta T}{2T_h} + \frac{(1+m)^2}{ZT_h}\right)} \qquad (28)$$

البته :

$$\eta_c = \frac{\Delta T}{T_h}$$

بهره کارنو است.

پارامتر جدید Z عبارتست از :

$$Z \equiv \frac{\alpha^2}{(RK)_{OPT}} \qquad (29)$$

و با پارامترهای مشخصه مواد سازنده پایه‌های ژنراتور ترموالکتریک این تابع جدید میشود :

$$Z = \frac{(\alpha_N - \alpha_P)^2}{\left(\sqrt{(\rho K)_N} + \sqrt{(\rho K)_P}\right)^2} \qquad (29\text{ الف})$$

تابع Z فوق‌العاده درصنعت ترموالکتریک حائزاهمیت‌است وآنرا «شکل یاپارامتر تحسین» گفته‌اند (Figurc of Merit).

رابطه بالا نشان میدهدکه بهره ژنراتور با بالا رفتن میزان پارامتر تحسین بالا میرود بنابراین در طرح فعلی که پارامترهای فیزیکی ثابت فرض شده‌اند بهترین مواد جنس پایه‌های ترموالکتریک (P و N) آلیاژهائی خواهند بود که دارای بزرگترین Z باشند.

اکنون میتوان میزان بهره را برای پارامتر $m_{OPT}$ پیدا کرد از معادله :

$$\frac{d\eta}{dm} = 0$$

نتیجه میشود :

$$\frac{m^2}{ZT_h} + \frac{1}{T_h}\left(\frac{\Delta T}{2} - \frac{1}{Z}\right) - 1 = 0$$

ازآنجا :

$$m_{OPT} = \sqrt{1 + Z\bar{T}} \equiv M \qquad (30)$$

درحالیکه : $\bar{T} = \frac{T_h + T_c}{2}$ برای این‌مقدار m معادله ۲۶ میشود :

$$\eta_{OPT} = \eta_c \frac{M}{\left(1 + M - \frac{\Delta T}{2T_h} + \frac{(1+M)^2}{ZT_h}\right)} \qquad (31)$$

بااین مقدار M جریان اپتیمم میشود :

$$I_{OPT.}=\frac{\alpha\triangle T}{R(M+1)} \qquad (32)$$

و پتانسیل اپتیمم :

$$V_{OPT.}=\frac{\alpha\triangle TM}{M+1} \qquad (33)$$

ازآنجا قدرت تولیدی اپتیمم میشود :

$$P_{OPT.}=\frac{M}{R}\left(\frac{\alpha\triangle T}{M+1}\right)^2 \qquad (34)$$

تمام مشخصات فوق اگر پارامترهای فیزیکی سیستم تابع درجه حرارت باشند متغیر خواهند بود. عملا تمام پارامترها مثلاً پارامتر تحسین Z نیز تابع درجه حرارت می‌باشند. مدل ریاضی فوق اساس محاسبات وطرح ژنراتور ترموالکتریک‌را تشکیل میدهد ومیتوان ثابت نمود که با تقریب کافی درعمل‌میتوان بهره را بصورت معادله ساده :

$$\eta\simeq\frac{1}{4}Z\triangle T$$

نشان‌داده واین رابطه ساده اجازه می‌دهد که آسانتر بتوان درمورد مواد سازنده الکترودها تصمیم گرفت‌اندازه پارامتر تحسین در میزان بهره تأثیر فوق‌العاده دارد و در جدول زیر برحسب مواد مختلف و اندازه اختلاف درجه حرارت منابع گرم وسرد میزان Z داده شده است.

این جدول از مأخذ شماره (۱) گرفته شده است.

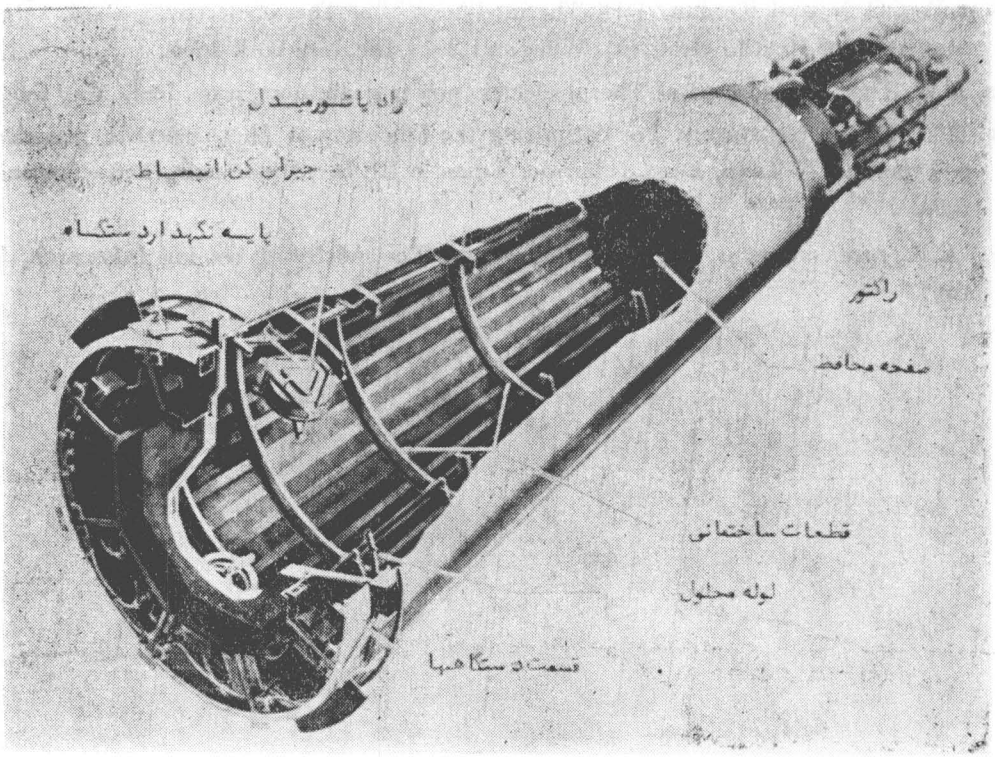
| مواد | $\triangle T°C$ | پارامتر تحسین $Z(°C^{-1})$ | $\frac{1}{4}Z\triangle T$ |
|---|---|---|---|
| AgSbTe | ۴۵۰ | ۰٫۰۰۱۵ | ۰٫۱۷ |
| SiGe | ۹۵۰ | ۰٫۰۰۰۶ | ۰٫۱۴ |
| PbTc | ۴۵۰ | ۰٫۰۰۱ | ۰٫۱۱ |
| PbSnTe | ۴۰۰ | ۰٫۰۰۱ | ۰٫۱۰ |
| BeBiTe | ۴۵۰ | ۰٫۰۰۱ | ۰٫۱۱ |
| CeS | ۱۰۵۰ | ۰٫۰۰۰۲ | ۰٫۰۵ |
| BiTe | ۱۰۰ | ۰٫۰۰۱۸ | ۰٫۰۴ |

درانتخاب مواد لازم جهت الکترودهای P و N که موضوع اصلی طرح ژنراتور ترموالکتریک‌است باید یادآور شد که هدف‌اصلی طرح‌اینست که حداکثر قدرت الکتریکی برای‌مقدار معین انرژی حرارتی‌بوجود آید. ازطرفی قدرت مزبور متناسب است باحاصلضرب پتانسیل در شدت جریان‌تولیدی. هردوی این‌پارامترها باید حداکثر ممکن را داشته باشند و ضمناً مانند هرژنراتور الکتریک باید امپدانس بارهای خارجی وداخلی باهم تطبیق داده شوند.

فلزات مواد خوبی برای انتخاب الکترودهای P و N نیستند زیرا اگرچه قدرت حمل مقدار زیادی

از شدت جریان را دارند متأسفانه در ژنراتور ترمو الکتریک از ایجاد پتانسیل زیاد عاجز هستند . مواد با مقاومت‌های الکتریکی (Resistors) بدلیل معکوس از میدان خارج میشوند تحقیقات جدید نشان می‌دهد که اجسام نیمه رسانا (Semicondnctors) عالیترین نوع مواد را برای این‌طرح تشکیل می‌دهند که‌چندتا از آنها در جدول بالا ذکر شده‌اند . بعلت مقاومت مکانیکی خوب در برابر ضربات و گرماهای تولیدی در ژنراتورهای مصرفی در کپسول‌های فضائی ازآلیاژ سیلیسیم و ژرمانیم Si Ge استفاده شده است .

شکل شماره ٦ مربوط است به ژنراتور کاملی که در سال ١٩٦٥ در کپسول فضائی در مدار زمین قرار گرفته است .




شکل ٦

منبع تولید حرارت ژنراتور ترموالکتریک عبارتست از راکتور اتمی که در رأس ژنراتور قرار دارد و توسط مایع NaK حرارت به الکترودها میرسد سایر قسمتها درشکل نشان داده شده‌است .

**خلاصه :**

برای تبدیل مستقیم انرژی حرارتی به انرژی الکتریکی میتوان از مبدل ترموالکتریک استفاده کرد دستگاههای ساخته‌شده فعلی باظرفیتهای کوچک میباشند . درطرح مبدل ترموالکتریک انتخاب مواد مهمترین قسمت را تشکیل می‌دهد . بااستمداد از روابط ترمودینامیک غیر برگشتنی و تئوریهای ترانسپورت الکترون می‌توان بهترین نوع مواد را از سری اجسام نیمه‌رسانا پیدا کرد .

درشماره بعد در باره محفظه سوخت Fuel cell بحث خواهد شد .

## مأخذ این مقاله


1- Mechanical Ergineering Vol, 88 No 8, Aug. 1966 P. 38

2- Degroot, S.R. Thermodynamics of Irreversible Processes, Interscience publishers, Incs. NewYork, 1451.

3- Hatsopoulos, G. N. and Keenan. J. H. Thermodynamics of Thermoelectricity chad. 15 in direct conversion of Heat to electricity, Wlley and Sons, Inc. NewYork 1960.

4- Fritts, R.W. The Development of Thermoelectric power genbrators, proc. Ieee. May 1963.

5- Fritts. R.W. Design parameters. For optimizing the Efficiency of Thermoelertric generator using p-Type, and N-Tayp, Lead Telluride. Trans. A.I.E.E. 78 (commun. and electronics) 817, 1960.

6- Joffe. A. F., Semiconductor, Thermoelemenrs and Thermoelectric cooling Infosearch, London, 1957.