ISME2014-XXXX

طراحی و ساخت آب‌سردکن ترموالکتریک

اکرم غلامی‌پره[۱]، زهرا اوجاقی سیدسران[۲]، مجتبی مکتبی فرد[۳] . فرشاد ترابی[۴]

[۱]دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، akram_gholami@yahoo.com
[۲]دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ، roshnk_ojaghi@yahoo.com
[۳] دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک ، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ، maktabifard@gmail.com
[۴]استادیار دانشکده مهندسی مکانیک ، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ، ftorabi@kntu.ac.ir

چکیده

سردکننده‌های ترموالکتریکی، مجموعه‌ای الکتریکی ساخته شده از مواد نیمه رسانا هستند که همانند یک پمپ حرارتی کوچک عمل می‌کنند. قانون اولیه ترموالکتریک‌ها اثر پلتیر است. اثر پلتیر زمانی اتفاق می‌افتد که جریان الکتریکی در دو رسانای غیر یکسان جاری شود. با اعمال ولتاژ یک‌سو به مدول ترموالکتریک، گرما از یک سمت مدول به سمت دیگر دفع می‌شود. با استفاده از این فناوری لیوان قابل حملی طراحی و ساخته شده است، که توانایی سرد و یا گرم نگه داشتن مایع داخل خود را دارد. در این روش زمان خنک شدن آب (از دمای محیط، ۲۵ درجه سانتی‌گراد تا حدود ۱۰ درجه سانتی‌گراد) حدود ۲۲ دقیقه است. عملکرد لیوان با استفاده از نرم‌افزار SolidWorks، قسمت Flow Simulation شبیه‌سازی شده است.

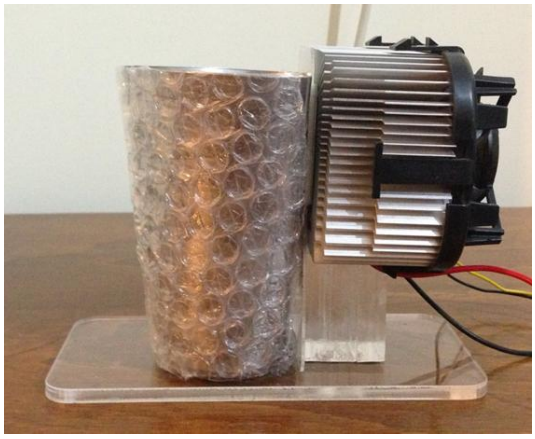
واژه‌های کلیدی

ترموالکتریک، ترموکوپل، قانون پلتیر، لیوان ترموالکتریک.

مقدمه

مزایای ترموالکتریک‌ها باعث شده، از سرمایش ترموالکتریک در جاهایی که از سرمایش معمول نمی‌توان استفاده نمود استفاده کرد. از دلایل انتخاب مدول ترموالکتریک به جای سیکل تراکمی می‌توان به قیمت پایین، اندازه کوچک، ضریب ایمنی بالا، دقت بالا، عدم وجود قطعه متحرک و عمر بالای بیست سال و امکان استفاده از گرمای تولید شده در سمت گرم المان اشاره کرد. البته باید به نقاط ضعف ترموالکتریک‌ها نیز اشاره کرد. سردکننده‌های ترموالکتریک معمولاً بازده ۵ تا ۱۰ درصدی نسبت به سیکل ایده‌آل (چرخه کارنو) دارند که در مقابل بازده ۴۰ تا ۶۰ درصدی سیکل‌های تبرید تراکمی به نظر کم می‌رسد ولی مزایای خاص خود را دارد که باعث استفاده‌ی آن در صنایع خاص می‌شود. ترموالکتریک‌ها برای ابعاد بزرگ اقتصادی نیستند و نسبت به ولتاژ بسیار حساس هستند و اگر با ولتاژ مناسب کار نکنند، راندمان آن‌ها به شدت افت می‌کند. [۲]

در این پروژه با ایده گرفتن از سردکن‌های قوطی نوشابه‌های رایج، لیوان قابل حملی (شکل (۱))، طراحی و ساخته شده است، که با استفاده از فناوری ترموالکتریک توانایی سرد و یا گرم نگه داشتن مایع داخل خود را دارد. با توجه به پروژه‌ی پیشین انجام شده در این زمینه [۱]، هدف اصلی این پروژه بر پایه رفع مشکلات قبلی بنا شده است.



شکل ۱: لیوان ترموالکتریک

از دلایل ساخت این سردکن قابل حمل، می‌توان به گران و سنگین بودن محصولات با عملکرد مشابه موجود در بازار و همچنین مدت زمان طولانی که برای خنک سازی بطری‌های آب در یخچال‌های معمولی صرف می‌شود، اشاره کرد. معمولاً این زمان در یخچال‌های معمولی در حدود یک ساعت است که با این روش زمان خنک شدن آب (از دمای محیط، ۲۵ درجه سانتی‌گراد تا حدود ۱۰ درجه سانتی‌گراد) حدود ۲۲ دقیقه است.

گروه اصلی که با این وسیله در ارتباط هستند، اشخاص علاقه‌مند به فعالیت‌های خارج از خانه هستند و همچنین این وسیله برای افرادی که در محل کارشان یخچال وجود ندارد مفید است.

فناوری ترموالکتریک

کوچکترین بخش یک المان ترموالکتریک، ترموکوپل است. ترموکوپل از دو رسانای الکتریکی با ضریب سیبک متفاوت، تشکیل شده است. ترموکوپل‌ها معمولاً از مواد نیمه رسانا ساخته می‌شوند، امروزه مواد نیمه‌رسانایی که در ترموالکتریک‌ها به کار می‌رود آلیاژی از بیسموت تلورید است، که به قطعاتی با ناحیه خاصیت p و n ساخته شده‌اند. کوپل‌های ترموالکتریکی از نظر الکتریکی سری و از نظر حرارتی موازی هستند. [۳]

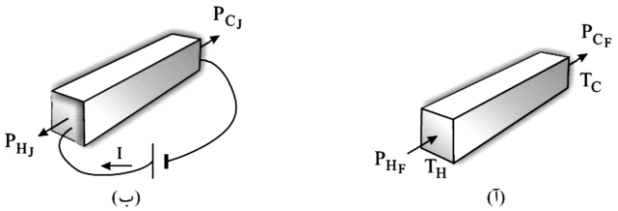
آنالیز حرارتی

یک میله رسانا حرارتی را در نظر بگیرید که دو انتهای آن در دو دمای T_h و T_c قرار دارد (شکل ۳ (آ)). واضح است که این اختلاف دما باعث می‌شود توان حرارتی معادل P_{h_f} از سمت دمای بیشتر وارد میله شود و از سمت دیگر توان حرارتی P_{c_f} خارج گردد. اگر دیواره‌های میله را عایق فرض کنیم، معادله (۱) نتیجه موازنه‌ی انرژی خواهد بود.

$$P_{h_f} = P_{c_f} = \Lambda(T_h - T_c) \qquad (۱)$$

اگر همان میله در یک دمای یکنواخت قرار گیرد توسط یک جریان الکتریکی تا دمایی بالاتر از دمای دو سر آن گرم می‌شود (شکل ۳ (ب)). بنابراین از آنجا که دمای میله از دو سر خود بالاتر است توان حرارتی از میله خارج می‌شود. توان حرارتی تولید شده توسط جریان الکتریکی برابر است با RI^2 است. این گرما از دو سر میله خارج می‌شود و بنابراین گرمای خارج شده در هر سمت با معادله (۲) نشان داده می‌شود.

$$P_{h_j} = P_{c_j} = \frac{1}{2}RI^2 \qquad (۲)$$



شکل ۳: شکل شماتیک یک میله هادی حرارت و الکتریسته بوده که در یک اختلاف دما قرار گرفته‌اند.

جهت فلش‌ها در شکل (۳) نشان‌دهنده جهت جریان حرارتی به میله است. طبق این علامت‌گذاری، میزان انرژی همواره مثبت خواهد بود. حال فرض شود مدول ترموالکتریکی هم‌زمان تحت اختلاف دما و اختلاف ولتاژ قرار بگیرد. نتیجه تست تجربی مربوط به مدول ترموالکتریک، نشان می‌دهد که می‌توان P_h را با یک منحنی درجه دو با تقریب مناسبی برازش کرد. معادله (۳) معادله این منحنی است.

$$P_h = \Lambda(T_h - T_c) - \frac{1}{2}RI^2 + \Pi I \qquad (۳)$$

در رابطه (۳) میزان حرارت فوریه کاملاً مشخص است و مقدار ثابتی دارد. همچنین حرارت ژول نیز به صورت تابعی درجه دو از جریان ورودی است. این رابطه همواره مثبت است و به جهت جریان بستگی ندارد. علاوه بر این دو سهم، جمله دیگری در حرارت ورودی مؤثر است که به صورت خطی با جریان ورودی تغییر می‌کند. این جمله، با تغییر جهت جریان ورودی تغییر علامت می‌دهد و بدان معنی است که با تغییر جهت جریان می‌توان حرارت را از منبع سرد به منبع گرم منتقل نمود. بنابراین جمله خطی در این رابطه به صورت برگشت‌پذیر بوده و به نام اثر پلتیر که به آن اشاره شد، معروف است.

اثر پلتیر یک اثر برگشت‌پذیر است بدان معنی که جهت انتقال حرارت به جهت جریان بستگی دارد. بنابراین با انتخاب مناسب جهت جریان می‌توان حرارت را از محیط سرد به محیط گرم منتقل نمود که نتیجتاً در این حالت ترموکوپل نقش یک پمپ حرارتی را ایفا می‌کند. حال باید محاسبه نمود که توان یک ترموکوپل در حالت پمپ حرارتی چقدر است و چقدر حرارت را می‌تواند منتقل کند. با توجه به روابط ترموکوپل، حرارت منتقل شده از منبع سرد به ترموکوپل برابر با معادله (۴) است.

$$P_c = -\Lambda\Delta T + \alpha T_c I - \frac{1}{2}RI^2 \qquad (۴)$$

انرژی الکتریکی که لازم است تا این میزان حرارت پمپ شود با رابطه‌ی (۵) بیان می‌شود.

$$P_e = \alpha\Delta T I + RI^2 \qquad (۵)$$

با توجه به تعریف ترمودینامیکی، ضریب عملکرد یک پمپ حرارتی، عبارت است از نسبت حرارت پمپ شده به انرژی ورودی که در اینجا همان الکتریسیته است. عملکرد برای یک ترموکوپل طبق معادله (۶) بیان می‌گردد.

$$COP = \frac{P_c}{P_e} = \frac{-\Lambda\Delta T + \alpha T_c I - \frac{1}{2}RI^2}{\alpha\Delta T I + RI^2} \qquad (۶)$$

میزان حرارت پمپ شده دارای یک مقدار بیشینه است، که این مقدار را به راحتی می‌توان با مشتق گرفتن از رابطه‌ی (۴) نسبت به جریان محاسبه نمود. رابطه‌ی (۷) بیشینه‌ی جریان سرمایش است.

$$I_{max,cooling} = \frac{\alpha T_c}{R} \qquad (۷)$$

حرارت منتقل شده در جریان بیشینه از معادله‌ی (۸) حاصل می‌گردد.

$$P_{c_{max}} = -\Lambda\Delta T + \frac{\alpha^2 T_c^2}{2R} \qquad (۸)$$

نکته دیگر که اهمیت دارد این است که این ترموکوپل تا چه دمایی می‌تواند خنک‌کاری را انجام دهد. برای پاسخ به این سؤال واضح است که در کمترین دما، میزان حرارت پمپ شده برابر صفر است ($P_c = 0$). با صفر قرار دادن مقدار $P_{c_{max}}$ در رابطه‌ی (۸)، معادله‌ی (۹) بدست می‌آید.

$$\frac{\alpha^2 T_c^2}{2R} = \Lambda(T_h - T_c) \qquad (۹)$$

با حل معادله (۹) نسبت به T_c، رابطه‌ی (۱۰) برای کمترین میزان T_c بدست می‌آید.

$$T_{c_{min}} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 2ZT_h}}{Z} \qquad (۱۰)$$

در این رابطه، Z با معادله‌ی (۱۱) بیان می‌شود.

$$Z = \frac{\alpha^2}{\Lambda R} \qquad (۱۱)$$

عملکرد کلی یک ترموکوپل تابعی از خواص ترموالکتریکی مواد است. مناسب بودن مواد برای سرمایش ترموالکتریک بر پایه مقداری است که شاخص برتری[1] نام دارد، و با معادله‌ی (۱۱) نشان داده می‌شود. آزمایشات نشان داده است که برای داشتن بالاترین پمپاژ حرارت، ترموکوپل باید ضریب سیبک بزرگ، مقاومت الکتریکی کوچک و رسانایی حرارتی کم داشته باشد. مجموع این ویژگی‌ها شاخص برتری را بیشینه می‌نماید.

[1] Figure of Merit

در بدست آوردن تمامی روابط، همواره فرض را بر این نهادیم که خواص مواد مانند α، Λ و R همگی مستقل از دما هستند. اما در عمل این فرض صحیحی نبوده و لازم است تا اثر وابستگی این پارامترها به دما در نظر گرفته شود. البته این فرض تضادی با معادلات بدست آمده، نداشته و تنها شکل معادلات تابعی از دما خواهند شد. این عمل باعث پیچیده شدن معادلات حاکم و حل آن‌ها خواهد شد اما تمامی روابطی که بیان شدند همچنان معتبر خواهند بود. [۱]

طراحی ظرف سیستم

دو لیوان برای این پروژه طراحی شده است. اولین مدل (شکل ۵)، لیوان استیل معمولی است که یک سمت آن به وسیله‌ی چکش صاف شده است. این کار به‌منظور چسباندن مدول ترموالکتریک به قسمت کناری لیوان انجام شده است. لیوان ساخته شده حجمی حدود ۳۰۰ میلی‌لیتر و مساحت جانبی برابر با ۲/۰۴ × $۱۰^{-۲}$ متر مربع دارد. طراحی و انتخاب *مدول ترموالکتریک* بر اساس لیوان اول انجام شده است.

دومین مدل (شکل ۵)، لیوانی با مقطع مربع از جنس گالوانیزه است. لیوان ساخته شده دارای حجمی در حدود ۳۰۰ میلی‌متر و مساحت جانبی برابر ۲/۵ × $۱۰^{-۲}$ است. دور و کف لیوان‌ها از پلاستیک حبابدار، به عنوان عایق حرارتی، پوشانده شده است.

شکل۵: لیوان

مراحل انتخاب سردکننده ترموالکتریک

۱. محاسبه‌ی بار حرارتی

سه نوع بار حرارتی در سیستم‌های ترموالکتریکی وجود دارد: فعال[۲] و غیر فعال[۳]، و یا ترکیبی از هر دو. بار حرارتی فعال، گرمایی است که توسط دستگاه برای سرمایش تولید می‌شود. معمولاً برابر با توان ورودی به دستگاه است. بار حرارتی غیر فعال طبیعتی پارازیتی دارد و ممکن است از تشعشع، جابه‌جایی و یا رسانش تشکیل شود. [۴]

گرمای ژولی از انواع بار حرارتی فعال به‌شمار می‌آید، با توجه به اینکه ترموالکتریک‌ها دارای مقاومتی در حدود ۲ تا ۳ اهم هستند، و سیستم با ولتاژ پایین کار می‌کند، فرض شده جریان الکتریکی عبوری از ترموالکتریک ۲ آمپر باشد. بنابراین طبق رابطه‌ی (۱۲) مقدار Q_{active} برابر خواهد شد با:

$$Q_{active} = \frac{V^۲}{R} = VI = I^۲R \qquad (۱۲)$$

$$Q_{active} = \left(۳\right)\left(۲^۲\right) = ۱۲\ w$$

با توجه به عایق کردن لیوان و پایین بودن اختلاف دمایی از Q_{rad} صرف نظر کرده و مقدار آن را در محاسبات برابر با صفر در نظر می‌گیریم.

$$Q_{rad} = ۰$$

از بدنه و دهانه‌ی لیوان انتقال حرارت جابه‌جایی صورت می‌گیرد. ضریب جابه‌جایی $۱۰ W m^{-۲}°C$ فرض می‌گردد. با توجه به تحقیقات انجام شده دمای مناسب برای نوشیدنی‌های خنک حدود ۱۰ درجه سانتی‌گراد است و در محاسبات دمای محیط برابر با ۲۵ درجه در نظر گرفته می‌شود. طبق رابطه‌ی (۱۳) Q_{conv} محاسبه می‌شود.

$$Q_{conv} = (h)(A)(T_{air} - T_c) \qquad (۱۳)$$

$$Q_{conv} = \left(۵\right)\left(\pi\left(۴۰\times۱۰^{-۳}\right)^۲ + \pi\left(۲۵\times۱۰^{-۳}\right)^۲ + ۲/۰۴\times۱۰^{-۲}\right)\left(۲۵ - ۱۰\right) = ۲/۰۵۴\ W$$

با توجه به روکش بودن و همچنین کوتاه بودن سیم‌ها از اتلاف حرارتی از طریق آنها صرف نظر می‌گردد، و با توجه به آنکه تنها راه برای صورت گرفتن رسانش هستند، Q_{cond} در محاسبات ۰ در نظر گرفته می‌شود.

$$Q_{cond} = ۰$$

$$Q_{total} = ۱۴/۰۵۴\ W$$

۲. تعیین دماها

با توجه به دمای مناسب برای نوشیدنی‌های خنک، دمای سمت سرد ترموالکتریک را برابر با ۵ درجه سانتی‌گراد و دمای سمت گرم را در حدود ۳۰ درجه در نظر می‌گیریم.

$$\Delta T = (T_h - T_c) = ۳۰-۵ = ۲۵\ °C$$

۳. محاسبه تعداد مرحله مدول ترموالکتریک مورد نیاز

با توجه به ΔT محاسبه شده در مرحله‌ی ۲، ۲۵ درجه سانتی‌گراد، و جدول (۱)، یک مرحله مدول ترموالکتریک برای سیستم کافی است.

تعداد مرحله	ΔT_{max} در فشار ۱ اتمسفر	ΔT_{max} در خلاء
۱	۶۴	۶۷
۲	۸۴	۹۱
۳	۹۵	۱۰۹
۴	–	۱۱۵
۵	–	۱۲۱
۶	–	۱۲۷

جدول ۱: بیشینه‌ی ΔT برای مدول ترموالکتریک‌های تک مرحله‌ای و چند مرحله‌ای

۴. انتخاب ترموالکتریک مناسب

[۲] Active Heat Load
[۳] Passive Heat Load

نمودارهای عملکردی که در این پروژه استفاده شده، برای تهیه منحنی جهانی برای ترموالکتریک‌های تک یا دو مرحله‌ای برای بیشینه مقادیر شناخته شده، قاعده‌مند شده است. با استفاده از نسبت مقدار عملکرد واقعی به مقدار بیشینه، عملکرد ترموالکتریک را می‌توان برای بازه‌ی وسیعی از شرایط تخمین زد. [۴]

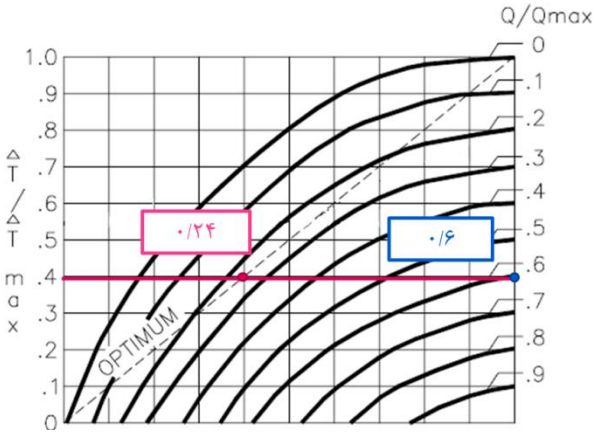
بر روی نمودار عملکردی اول، شکل (۶)، خطی افقی با توجه به مقدار محاسبه شده برای $\frac{\Delta T}{\Delta T_{max}}$ رسم می‌شود.

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_{max}} = \frac{\Delta T \text{ مرحله دوم}}{\Delta T_{max} \text{ مرحله سوم}} = \frac{۲۵}{۶۴} = ۰/۴$$

خط رسم شده، خط چین $\frac{Q}{Q_{max}}$ بهینه را در مقدار ۰/۲۴ و محور عمودی انتهای سمت راست را در مقدار ۰/۶ قطع می‌کند. مجموع بار حرارتی (از مرحله‌ی اول) بر ضرایب بدست آمده از نمودار عملکردی، برای محاسبه‌ی مقدار بیشینه و بهینه‌ی Q_{max}، تقسیم می‌شود.

بهینه $Q_{max} = ۱۴/۰۵۴ \div ۰/۲۴ = ۵۸/۵۵\ W$

بیشینه $Q_{max} = ۱۴/۰۵۴ \div ۰/۶ = ۲۳/۴۲\ W$



شکل ۶: نمودار عملکردی اول

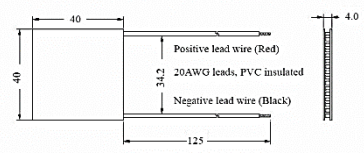
اکنون می‌توان ترموالکتریکی که Q_{max} آن بیشتر از بیشینه‌ی Q_{max}، اما کمتر از Q_{max} بهینه باشد را از لیست ترموالکتریک‌ها انتخاب کرد. درنظر داشته باشید که ترموالکتریکی با Q_{max} نزدیک به Q_{max} بهینه دارای بالاترین راندمان است، و Q_{max} نزدیک به Q_{max} بیشینه، ترموالکتریکی کوچکتر و ارزان‌تر است.

با توجه به بازار در ایران مدل TEC-12705 که ساخت کشور چین است انتخاب شده است. در شکل (۷) قسمتی از کاتالوگ ترموکوپل استفاده شده در پروژه آورده شده است. [۵]

Performance Specification Sheet

Th (°C)	27	50	Hot side temperature at environment: dry air, N_2
DT_{max} (°C)	70	79	Temperature Difference between cold and hot side of the module when cooling capacity is zero at cold side
U_{max} (Voltage)	16.0	17.2	Voltage applied to the module at DT_{max}
I_{max} (amps)	5.4	5.4	DC current through the modules at DT_{max}
Q_{Cmax} (Watts)	54.1	59.1	Cooling capacity at cold side of the module under DT=0 °C
AC resistance (ohms)	2.0~2.5	2.2~2.7	The module resistance is tested under AC

Geometric Characteristics Dimensions in millimeters



شکل (۷): کاتالوگ ترموکوپل استفاده شده در پروژه

تخمین عملکرد سردکننده ترموالکتریک

اکنون که سردکن ترموالکتریک انتخاب شده است، قدم بعدی تخمین عملکرد آن است. برای تخمین عملکرد، از مقادیر عملکردی ترموالکتریک در دمای پایه ۲۷ درجه سانتی‌گراد استفاده می‌شود. [۴]

بر روی نمودار عملکردی دوم، شکل (۸)، نمودار بالا، خطی افقی با توجه به مقدار $\frac{\Delta T}{\Delta T_{max}}$ رسم می‌شود.

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_{max}} = \frac{\Delta T \text{ مرحله دوم}}{\Delta T_{max} \text{ ترموالکتریک انتخاب شده}} = \frac{۲۵}{۷۰} = ۰/۳۶$$

در محل تقاطع خط افقی رسم شده و مقدار $\frac{Q}{Q_{max}}$ محاسبه شده، خطی عمودی بر روی نمودار رسم می‌شود.

$$\frac{Q}{Q_{max}} = \frac{\text{Qمرحله اول}}{Q_{max} \text{ترموالکتریک انتخاب شده}} = \frac{۱۴/۰۵۴}{۵۴/۱} = ۰/۲۵$$

خط عمودی، محور افقی را در ۰/۳۶ قطع می‌کند. از ضرب عدد بدست آمده در بیشینه‌ی جریان ترموالکتریک انتخاب شده، جریان ترموالکتریک حاصل می‌گردد.

جریان $= (I_{max}) \times \left(\frac{I}{I_{max}}\right) = ۵/۴ \times ۰/۳۶ = ۱/۹۴\ A$

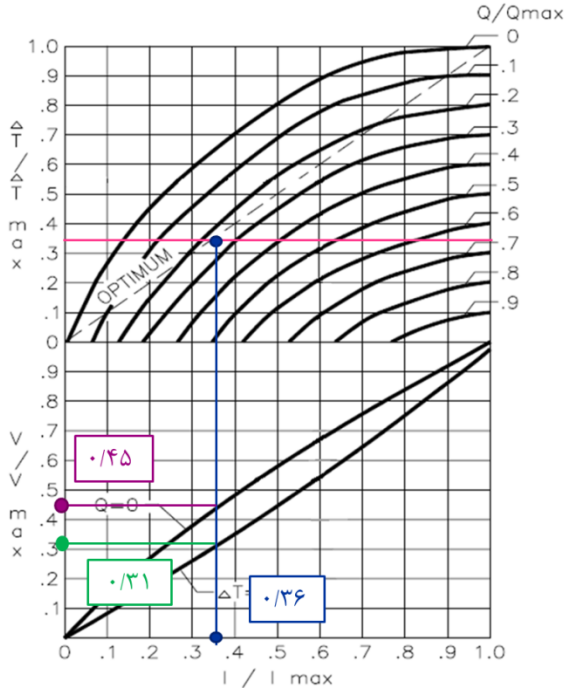
خطی افقی در محل تقاطع خط عمودی کشیده شده و دو منحنی در نیمه پایینی نمودار عملکرد دوم رسم می‌شود. خطوط رسم شده، محور افقی سمت چپ را در مقادیر ۰/۳۱ و ۰/۴۵ قطع می‌کند. از ضرب این ضرایب در بیشینه‌ی ولتاژ ترموالکتریک انتخاب شده، بازه‌ی ولتاژ حاصل می‌گردد.

ولتاژ بیشینه $= (V_{max}) \times \left(\frac{V}{V_{max}}\right) = ۱۶ \times ۰/۴۵ = ۷/۲\ V$

ولتاژ کمینه $= (V_{max}) \times \left(\frac{V}{V_{max}}\right) = ۱۶ \times ۰/۳۱ = ۴/۹۶\ V$

توان ترموالکتریک از ضرب جریان در ولتاژ بیشینه حاصل می‌گردد.

توان $= ۱/۹۴ \times ۷/۲ = ۱۳/۹۶\ W$



شکل ۸: نمودار عملکردی دوم

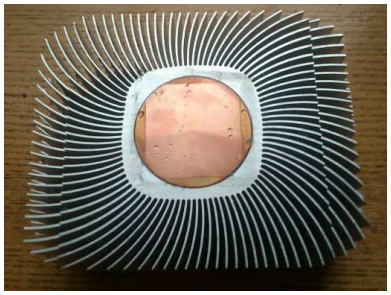
انتخاب چاه حرارتی

طراحی و انتخاب چاه حرارتی بر عملکرد کلی سیستم ترموالکتریک و انتخاب سردکن تأثیرگذار است. تمام سردکننده‌های ترموالکتریک به چاه حرارتی احتیاج دارند، و اگر بدون آن کار کنند، از بین می‌روند. دمای چاه حرارتی به‌طور مستقیم بر دمای سمت گرم سردکننده تأثیر می‌گذارد، که به تبع بر دمای سمت سرد که باید به دست آید نیز تأثیر گذار است.

رایج‌ترین چاه حرارتی که در سردکننده‌های ترموالکتریک استفاده می‌شود، جابه‌جایی اجباری است. مقاومت حرارتی چاه حرارتی جابه‌جایی اجباری بین بازه ۰/۰۲ تا ۰/۵ $^{\circ}CW^{-1}$ قرار دارد. چاه حرارتی استاندارد بسیاری وجود دارد که وقتی به یک فن مناسب وصل شود، برای تشکیل مجموعه خنک‌کاری کامل استفاده می‌شود. خنک‌کننده هوا ممکن است از یک فن یا دمنده تهیه شود و ممکن است جریان هوا در راستای طولی چاه حرارتی عبور کند و یا ممکن است به مرکز فین هدایت شود و از دو طرف خارج شود. نوع دوم جریان هوایی معمولاً بهترین عملکرد را به دنبال دارد، از آنجا که هوای دمیده شده به سطح چاه حرارتی آشفتگی بیشتری ایجاد نموده، در نتیجه انتقال حرارت بهتر انجام می‌شود.

چاه حرارتی انتخاب شده برای سیستم از نوع جابه‌جایی اجباری است. چاه حرارتی انتخاب شده دارای هسته‌ی مسی و پره‌های بلند آلومینیومی است. این چاه حرارتی، فن سی‌پی‌یو با مشخصات زیر است و در شکل (۹) نشان داده شده است.

12VDC 0.55 A

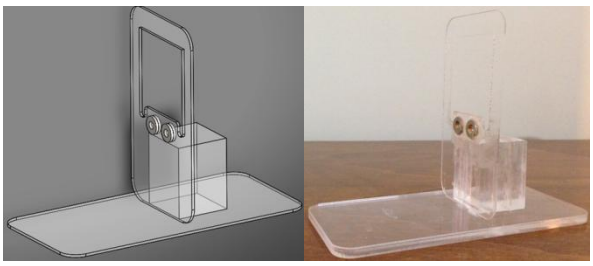


شکل۹: چاه حرارتی انتخاب شده برای سیستم

اتصالات

روش‌های بسیاری برای نصب مدول ترموالکتریک شامل قیدهای مکانیکی، قید اپکسی و لحیم مستقیم وجود دارد. نیازهای هر کاربرد مشخص می‌کند کدام روش بهتر است.

با توجه به گزینه‌های مطرح شده، از چسب سیلیکن مدل RTV برای اتصال مدول ترموالکتریک به چاه حرارتی، که قابلیت تحمل دماهای بالا را داشته و در مورد فلزات نیز می‌توان به کار برد، استفاده شد. البته از لحیم نیز می‌توان بهره برد ولی چسب گزینه‌ی بهتری است. همچنین برای رسیدن به قابلیت جدا شدن آسان مدول ترموالکتریکی از لیوان، برای اتصال مدول ترموالکتریک به لیوان از نیروی مغناطیسی استفاده می‌شود. سیستم طراحی شده بر روی یک پایه قرار می‌گیرد (شکل ۱۰)، که در دو قسمت پایه آهنربا قرار داده شده است. همچنین فین را می‌توان بر روی پایه قرار داد.

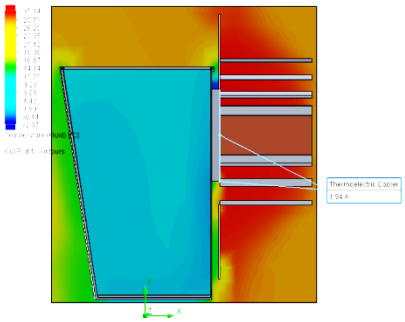


شکل ۱۰: پایه ساخته شده

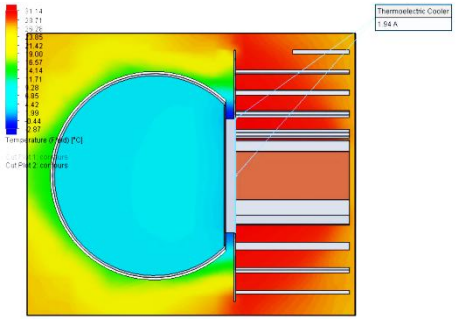
نتایج

بخش Flow simulation از نرم‌افزار SolidWorks ، یک ابزار قدرتمند CFD محسوب می‌شود که از روش حجم محدود[۴] بهره می‌برد و با کمک آن می‌توان مسائل سیالاتی و انتقال حرارتی را حل کرد. از دلایل استفاده از این نرم‌افزار در این پروژه می‌توان به سادگی کار با نرم‌افزار، تحلیل سریع و از همه مهم‌تر اینکه المان‌های سردکننده به عنوان پیش فرض در این نرم‌افزار وجود دارند، اشاره کرد و بهترین انتخاب برای تحلیل مسائل حاوی سردکن‌های ترموالکتریکی است.

در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) طرح دمایی در صفحات عمودی و افقی میانه‌ی لیوان دیده می‌شود. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود، آب درون لیوان در نزدیکی محل تماس لیوان و مدول ترموالکتریک به دمای حدود ۵ درجه سانتی‌گراد رسیده و در مناطق دورتر آب به دمای حدود ۹ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. همچنین دمای هوا در اطراف فین طراحی شده به حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد رسیده است.



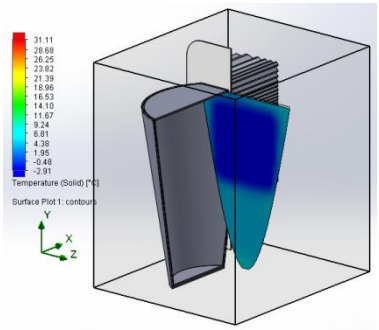
شکل ۱۱: طرح دمایی حاصل شده در صفحه عمودی میانه‌ی لیوان



شکل ۱۲: طرح دمایی حاصل شده در صفحه‌ی افقی میانه‌ی لیوان

در شکل (۱۳) طرح دمایی دیواره‌ی چسبیده شده به مدول ترموالکتریک مشاهده می‌شود. مطابق شکل محل در تماس با مدول ترموالکتریک به دمای حدود ۰ درجه سانتی‌گراد رسیده است.

[۴] Finite Element



شکل ۱۳: طرح دمایی حاصل شده در دیواره‌ی لیوان

با طراحی‌های انجام شده در پروژه و با توجه به نتایج تحلیل نرم‌افزار SolidWorks بدست آمده، آب درون لیوان را از دمای محیط، ۲۵ درجه سانتی‌گراد، به دمای کمتر از ۱۰ درجه سانتی‌گراد رسانده شد. مدت زمان خنک‌سازی آب از رابطه‌ی (۱۴) محاسبه می‌گردد.

$$t = \frac{(\rho)(V)(C_p)(\Delta T)}{Q} \qquad (۱۴)$$

$$t = \frac{(۱۰۰۰)(۳\times۱۰^{-۴})(۴/۱۸۷\times۱۰^{۳})(۲۵-۱۰)}{۱۳/۹۶} = ۱۳۴۹\ s = ۲۲\ min$$

در مدل‌سازی لیوان ترموالکتریک اتصال بین مدول ترموالکتریک و لیوان کاملاً ایده‌آل در نظر گرفته شد، در ساخت مدل نتوانستیم به اتصال ایده‌آل دست پیدا کنیم، به همین علت نتایج مورد نظر در ساخت حاصل نشد.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

مراحل انجام شده در این پروژه به شرح زیر است:

مطالعه فناوری ترموالکتریک و مدل‌سازی ریاضی ترموکوپل

طراحی سیستم آب سردکن ترموالکتریکی

شبیه‌سازی با نرم‌افزار SolidWorks

ساخت نمونه

پروژه‌ی پیشین طراحی و ساخت سردکن قوطی‌های نوشابه بود. مهمترین مشکلات این طرح، صورت نگرفتن جابه‌جایی آزاد، عدم وجود سطح تماس بین نگهدارنده و قوطی نوشابه است. در این پروژه نواقص طرح قبلی برطرف شده و عملکرد ترموالکتریک بهینه شد. همچنین طرح قبلی مختص قوطی‌های نوشابه بود، ولی در این طرح محدودیتی برای استفاده از هر نوع مایعات وجود ندارد. در جدول (۲) خلاصه‌ی نتایج پروژه فعلی و پیشین آورده شده است.

جدول ۲: مقایسه نتایج دو پروژه

نتایج پروژه فعلی	نتایج پروژه پیشین	
۱/۹۴	۵/۲	جریان الکتریکی
کمتر از ۱۰ درجه سانتی‌گراد	۱۴-۱۵ درجه سانتی‌گراد	دمای متوسط آب
صورت گرفت	صورت نگرفت	جابه‌جایی آزاد
۳۱ درجه سانتی‌گراد	۳۷ درجه سانتی‌گراد	دمای فین

فهرست علائم

A	مساحت،	$m^{۲}$
h	ضریب جابه‌جایی حرارتی،	$Wm^{-۲}°C$
I	جریان الکتریکی،	A
n	Negative	
p	Positive	
P	توان،	W
R	مقاومت الکتریکی،	Ω
t	زمان،	s
T	دما،	°C ،K
Q	بار حرارتی،	W
V	ولتاژ،	V
Z	شاخص برتری،	$K^{-۱}$

علائم یونانی

α	ضریب سیبک،	$VK^{-۱}$
Λ	رسانایی حرارتی،	$WK^{-۱}$
Π	ضریب پلتیر،	V

زیرنویس

c	سرد
e	الکتریکی
f	گرمای فوریه
h	گرم
j	گرمای ژول

مراجع

[۱] مجتبی مکتبی‌فرد، ۱۳۹۲، طراحی و ساخت آب سردکن ترموالکتریک با پنل‌های فتوولتائیک، پایان‌نامه کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی،

[2] Liang Bo, Cheng Yawen, Potable Beverage Can Cooler, Bachelor's thesis, Saimaa University of Applied Sciences, 2010.

[3] Dr. Jens Thielmann, Thermoelectric Cooling Technology, see also URL http://www.binder-world.com/en/

[4] Marlow industries, inc. 1998. Thermoelectric Cooling Systems Design Guide.

[5] Specification of Thermoelectric Module TEC1-12705, see also URL www.thermonamic.com