

# بررسی و مروری بر آزمایش‌های انجام شده روی یخچال خورشیدی ترموالکتریک بدون باتری

مهران عامری<sup>۱</sup>؛ مجتبی وزین افضل<sup>ii</sup>

## چکیده

یخچال‌های خورشیدی به دو دسته کلی باتری‌دار و بدون باتری تقسیم‌بندی می‌شوند. آزمایش‌های میدانی بر روی یخچال‌های باتری‌دار در شرایط آب و هوایی متفاوت مشکلات فراوانی را نشان داده است. برای جلوگیری از این مشکلات و حمل و نقل ساده‌تر، می‌توان از یخچال‌های بدون باتری با ذخیره گرمایی به جای ذخیره الکتریکی استفاده کرد. برای انجام این کار باید از ماده‌ای تغییر فاز دهنده (PCM) به عنوان ذخیره گرمایی در داخل یخچال استفاده کرد. در این تحقیق، یخچال خورشیدی ترموالکتریک بدون باتری که از آب خالص به عنوان ماده تغییر فاز دهنده استفاده می‌کند، بدون هیچ گونه وسیله جانبی به پانل‌های فتوولتائیک متصل شده و نتایج آزمایش‌ها در فصول مختلف سال مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

## کلمات کلیدی

یخچال خورشیدی، ترموالکتریک، پانل‌های خورشیدی، ماده تغییر فاز دهنده.

## *An Experimental Investigation on Battery-Free Thermoelectric Solar Refrigerator*

M. Ameri; M. Vazin Afzal

### ABSTRACT

Solar refrigerators are divided in two general groups: battery-powered refrigerators and battery-free refrigerators. Field experiments on the battery-powered refrigerators in different weather conditions have shown many problems. To avoid these problems and easier transportation, we can use battery-free refrigerator, which has thermal storage instead of electrical storage. Therefore, we must use a phase-change material (PCM) as a thermal storage in the refrigerator. In this research, battery-free thermoelectric solar refrigerator that uses pure water as (PCM) has been connected to the photovoltaic panels without any accessory devices, and the results of experiments in different seasons have been investigated

### KEYWORDS

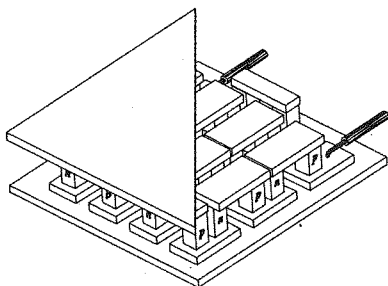
Solar Refrigerator, Thermoelectric, Photovoltaic Panels, Phase-Change Material.

<sup>i</sup> استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان: ameri\_mm@mail.uk ac.ir

<sup>ii</sup> کارشناس ارشد گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان: vazinafzal@yahoo.com



رسیدن به نیمه‌های نوع n، الکترون‌ها به موقعیت انرژی بالاتری دست می‌یابند. به همین دلیل در نقطه اتصال دو نیمه‌های انرژی جذب می‌کنند که باعث به وجود آمدن اتصال سرد می‌شود. همچنین هنگام عبور از نیمه‌های n و رسیدن به نیمه‌های p به دلیل رسیدن به موقعیت انرژی پایین‌تر انرژی را به صورت گرما در نقطه اتصال دو نیمه‌های دفع می‌کنند و بنابراین اتصال گرم به وجود می‌آید [۱]. معکوس شدن جهت جریان باعث عکس شدن جای اتصال سرد و گرم می‌شود. یک مدول یک مرحله‌ای (با اندازه  $50 \times 50 \times 4/8 \text{ mm}^3$ ) می‌تواند اختلاف دمایی معادل با  $70^\circ\text{C}$  و جابجایی گرمایی معادل با W ۱۸۶ ایجاد نماید. برای ایجاد اختلاف دمایی بالاتر می‌توان از ترموالکتریک‌های چند مرحله‌ای استفاده کرد.



شکل (۱): نمای شماتیک مدول ترموالکتریک

ترموالکتریک‌ها دمای کاری مشخصی دارند که اگر دمای سطوح از این دما بالاتر باشد تاثیر بسزایی در کاهش ضریب عملکرد آنها خواهد داشت. به همین دلیل در تمامی ترموالکتریک‌ها برای انتقال حرارت بهتر از چشمه حرارتی<sup>۲</sup> استفاده می‌شود [۲]. بنابراین یک خنک‌کننده پلتیر از سه قسمت شامل مدول پلتیر و دو چشمه حرارتی در اتصال سرد و گرم مدول تشکیل شده است. سطح خنک شونده می‌تواند در تماس مستقیم با صفحه سرامیکی خنک باشد و یا می‌تواند از طریق چشمه حرارتی که شامل جریان سیال و یا جابجایی اجباری است کاهش دما پیدا کند. اتصال گرم مدول نیز می‌تواند از طریق چشمه حرارتی که شامل جریان سیال و یا جابجایی اجباری است کاهش دما پیدا کند.

خنک‌کننده‌هایی که از اثر پلتیر استفاده می‌کنند، در خنک کردن وسایل اندازه‌گیری، بیوتکنولوژی، داروسازی و الکترونیک کاربرد فراوانی دارند. این وسایل بی سر و صدا بوده و به دلیل نداشتن سیال عامل محیط را آلوده نمی‌کنند. همچنین به دلیل نداشتن قسمت متحرک عمری بسیار طولانی دارند. در سال‌های اخیر تحقیقات فراوانی در مورد یخچال‌های ترموالکتریک انجام شده است [۳]-[۷]. بانسل و مارتین [۸] کارایی سیکل تبخیر-تراکمی، سیکل جذبی و سیستم ترموالکتریک را بررسی کرده‌اند. هارا و همکاران [۹] در مورد

امروزه استفاده از وسایل خنک‌کننده برای تازه نگه داشتن مواد غذایی در زندگی مردم به صورت امری مهم و اجتناب ناپذیر درآمده است. اما نمی‌توان از آسایش حاصل از این خنک‌کننده‌ها در بیرون از منزل استفاده کرد. راه حل این مشکل استفاده از یخچال‌های خورشیدی است. در این سیستم‌ها با تبدیل انرژی تابش خورشید به انرژی الکتریکی توان لازم برای کارکرد یخچال فراهم می‌شود. خنک سازی خورشیدی را می‌توان به وسیله یکی از سه روش زیر انجام داد.

۱- سیکل تبرید-تراکمی

۲- سیکل جذبی

۳- سیستم ترموالکتریک

در سیستم اول از یک کمپرسور برای بالا بردن فشار و دمای سیال عامل استفاده می‌شود که می‌توان با تامین برق مورد نیاز این سیستم از طریق انرژی خورشیدی آن را به یخچال خورشیدی تبدیل کرد. سیستم دوم از انرژی گرمایی (مانند انرژی خورشیدی) به عنوان محرک اولیه و ترکیبی از ماده خنک کننده / جذب کننده به عنوان سیال عامل بهره می‌برد و ضریب عملکرد آن کمتر از سیکل تبخیر-تراکمی است.

یخچال‌های مکانیکی ضریب عملکرد بالایی دارند و می‌توانند سال‌های زیادی بدون احتیاج به مراقبت و نگهداری زیادی کار کنند. این یخچال‌ها پر سر و صدا بوده و به علت امکان آسیب‌دیدگی فراوان نمی‌توان از آنها به عنوان وسیله قابل حمل و نقل در بیرون از منزل یا محل کار استفاده کرد. مساله مهمتر این است که سیال مبرد در این یخچال‌ها به مرور زمان از یخچال به اتمسفر نفوذ می‌کند، در حالی که این گاز می‌تواند اثرات بسیار مخربی بر محیط داشته باشد.

یخچال‌های ترموالکتریک در مقایسه با دو نوع قبل سبک، قابل اطمینان، بی سر و صدا و در صورتی که به تولید انبوه برسند قیمت پایین‌تری دارند. در این سیستم‌ها به جای سیال مبرد الکترون‌ها وظیفه انتقال گرما را بر عهده دارند. شکل (۱) نمایی شماتیک از یک مدول ترموالکتریک را نشان می‌دهد. این قطعه از تعدادی ترموکوپل که از نظر الکتریکی به صورت سری و از نظر گرمایی به صورت موازی نصب شده‌اند، تشکیل شده است. یکی از صفحات، صفحه سرد و دیگری صفحه گرم است.

کار یخچال ترموالکتریک بر مبنای اثر پلتیر<sup>۱</sup> است. هنگامی که جریان DC از یکی از کوپل‌های ترموالکتریک شامل یک جفت نیمه‌های p و n عبور می‌کند، در جهت حرکت الکترون‌ها (عکس جهت قراردادی جریان) هنگام عبور از نیمه‌های نوع p و

کلاهی که سطح درونی آن به وسیله سیستم ترموالکتریک خورشیدی خنک می‌شود تحقیق کرده‌اند. با وجود اینکه سیستم ترموالکتریک نسبت به دو یخچال تبخیر-تراکمی و جذبی ضریب عملکرد پایین‌تری دارند، می‌توان با بهره‌گیری از پانل‌های خورشیدی از این یخچال‌ها بیرون از منزل، در محل کار و برای حمل و نقل دارو و یا حوادث غیر مترقبه استفاده کرد.

اولین بار استفاده از پانل‌های خورشیدی در یخچال‌ها، در سال ۱۹۸۰ برای اجرای برنامه واکسیناسیون سازمان بهداشت جهانی همراه با نصب چندین یخچال و فریزر خورشیدی در آفریقا و آسیا انجام شد [۱۰]. مساله مهم در طراحی این یخچال‌ها ذخیره سازی انرژی برای استفاده در ساعات غیرآفتابی و شب‌ها است. در نمونه‌های قبلی از باتری برای انجام این کار استفاده شده است. اما اندازه‌گیری‌ها و آزمایش‌های انجام شده نشان داده‌اند که استفاده از باتری مشکلاتی را در بر دارد [۱۱]. این مشکلات شامل موارد زیر است:

۱- خرابی باتری

۲- نگهداری باتری که ۲۰٪ از هزینه کل استفاده از دستگاه را در بر دارد.

۳- عمر محدود باتری و لزوم تعویض آن

برای پرهیز از به وجود آمدن این مشکلات، می‌توان به جای ذخیره الکتریکی از ذخیره گرمایی در دیواره یخچال استفاده کرد. مواد تغییر فاز دهنده<sup>۲</sup> (PCM) با توجه به بالا بودن انرژی نهان ذوبشان، بهترین انتخاب برای ذخیره گرمایی هستند. مزیت دیگر این مواد تغییر فاز در دمای ثابت بوده که برای خنک‌کننده‌های ترموالکتریک بسیار مناسب است. به ویژه در سیستم‌هایی که برای نگهداری دارو و مواد غذایی استفاده می‌شوند و به کنترل دقیق دما نیاز دارند. در این روش، ماده ذکر شده در طول روز تغییر فاز می‌دهد و در ساعات غیرآفتابی با تغییر فاز مجدد و تبدیل شدن به مایع اتلاف حرارتی را جبران می‌نماید. هم اکنون ناسا (NASA) برای نگهداری طولانی مدت مواد غذایی در فضا، در حال تحقیق، ساخت و آزمایش این‌گونه یخچال‌ها است. مزایای استفاده از این روش عبارتند از:

۱- عدم نیاز به تعمیر و نگهداری باتری

۲- ساده‌تر شدن سیستم

۳- حجم کمتر به دلیل نداشتن باتری و وسایل جانبی

۴- سبک‌تر شدن و قابلیت حمل و نقل ساده‌تر به طوری که می‌توان از آن به عنوان یخچال بیرون از منزل استفاده کرد.

۰- قیمت ارزانتر به دلیل نداشتن باتری و وسایل جانبی

در این مقاله، نتایج آزمایش بر روی یک یخچال ترموالکتریک خورشیدی بدون باتری که از آب خالص به عنوان ماده تغییر فاز دهنده استفاده کرده ارایه می‌شود. نتایج آزمایش در فصول مختلف سال مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد که نشان داده می‌شود که از این یخچال می‌توان در مناطقی که امکان انتقال خطوط برق وجود ندارد به منظور نگهداری واکسن، دارو و مواد غذایی استفاده نمود.

## ۲- روابط حاکم

زاویه مناسب برای نصب پانل‌ها از روابط زیر به دست می‌آید. این زاویه فقط یکبار در روز تنظیم می‌شود. زاویه راستای سطح و زاویه شیب ( $\beta$ ) در پانل‌ها طوری تنظیم می‌شوند که در هنگام ظهر خورشیدی، زاویه بین اشعه خورشید و خط عمود بر سطح (زاویه برخورد) صفر درجه باشد [۱۲].

$$\delta = 23.45 \times \sin\left(360 \times \frac{284 + n}{365}\right) \quad (1)$$

$$\beta = |\phi - \delta| \quad (2)$$

$\delta$  در روابط بالا زاویه انحراف بر حسب درجه و  $n$  شماره روز سال به تقویم میلادی است.  $\phi$  نیز عرض جغرافیایی محل آزمایش است.

برای به دست آوردن طول روز، زاویه ساعت غروب خورشید تعریف می‌شود.

$$\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta \quad (3)$$

از آنجا که طول هر ساعت معادل با ۱۵ درجه گردش کره زمین می‌باشد، با توجه به تقارن طلوع و غروب نسبت به ظهر خورشیدی، طول روز از هنگام طلوع تا غروب آفتاب بر حسب تعداد ساعات از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (4)$$

پارامترهای مورد استفاده در محاسبات مربوط به ترموالکتریک از روابط زیر به دست می‌آیند [۱۲].

$$V = \alpha(T_H - T_C) + IR \quad (5)$$

که در آن  $\alpha$  (V/K) ضریب سیبک<sup>۳</sup>،  $I$  شدت جریان،  $R$  ( $\Omega$ ) مقاومت الکتریکی مدول ترموالکتریک،  $T_H$  و  $T_C$  به ترتیب دمای قسمت گرم و سرد ترموالکتریک می‌باشند.

توان ورودی، توان سرمایش و ضریب عملکرد به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$P = \alpha I(T_H - T_C) + I^2 R \quad (6)$$

$$Q_C = \alpha I T_C - \frac{1}{2} I^2 R - K_i(T_H - T_C) \quad (7)$$

توان مورد نیاز یخچال توسط سه عدد پانل خورشیدی تامین می‌شود که مشخصات پانل‌ها در جدول (۲) آمده است. ماده تغییر فاز دهنده در این سیستم مقدار ۳۰۰ ml آب خالص است.

جدول (۲): مشخصات پانل‌های خورشیدی

۲۰/۵	ولتاژ مدار بدون بار (V)
۱۶/۳	ولتاژ در حالت ماکزیم توان (V)
۲/۹۸	شدت جریان در حالت اتصال کوتاه (A)
۲/۷۶	شدت جریان در حالت ماکزیم توان (A)
۴۵	توان اسمی هر پانل (W)
%۱۱/۵	بازده

با توجه به مشخصات پانل‌ها برای افزایش شدت جریان، پانل‌ها به صورت موازی به یکدیگر متصل شده‌اند. در این حالت حداکثر جریان تولیدی پانل‌ها ۸/۲۸ A خواهد بود. توان مصرفی فن‌ها در حالت اسمی ۵/۸ W وات با ولتاژ ۱۲ V است. با توجه به رابطه ۵، مقدار شدت جریان و ولتاژ ورودی به ترموالکتریک‌ها تعیین‌کننده اختلاف دمای دو اتصال سرد و گرم ترموالکتریک‌ها می‌باشد. بنابراین نسبت جریان و ولتاژ ورودی باید با توجه به اختلاف دمای مطلوب، تعیین شود. پس توان ترموالکتریک‌ها با توجه به اختلاف دمای مورد نیاز متغیر است. در سیستم مورد نظر، اگر پانل‌ها توانایی تامین ۱۲ V و ۸/۲۸ A را داشته باشند با توجه به مصرف فن‌ها به هر یک از ترموالکتریک‌ها ۱۲ V و ۲/۷ A می‌رسد و ۸۴°C اختلاف دما بین دو اتصال ترموالکتریک ایجاد می‌شود. به نظر می‌رسد با توجه به مشخصات پانل‌ها و ترموالکتریک مورد استفاده این امر امکان‌پذیر است. اما باید توجه کرد که:

۱- با توجه به نمودار عملکرد پانل‌ها ولتاژ تولیدی در اکثر موارد بیشتر و شدت جریان تولیدی کمتر از مقدار فرض شده است.

۲- مقاومت سیم‌های رابط موجب افت شدید ولتاژ ورودی از پانل‌ها می‌شود به طوری که ولتاژی که به دو سر ترموالکتریک‌ها می‌رسد کمتر از ۱۲ V است.

۳- رابطه ۵ برای حالت دایم نوشته شده است اما تغییر مداوم شدت تابش خورشید موجب تغییرات مداوم جریان و ولتاژ تولیدی پانل‌ها می‌شود. بنابراین اختلاف دمای دو اتصال به طور مداوم در طول روز تغییر می‌کند. ترموالکتریک‌ها به تغییرات مداوم شدت جریان و ولتاژ حساس می‌باشند و در نتیجه حداکثر کارایی را ندارند.

اگر یخچال از باتری تغذیه می‌کرد، ولتاژ و شدت جریان برای کارکرد مناسب یخچال ۱۲ ولت و ۶/۵ تا ۷ آمپر بود که با در نظر گرفتن افت ولتاژ در سیم‌ها و مدار یخچال، ولتاژی که

$$COP = \frac{Q_c}{P} \quad (۸)$$

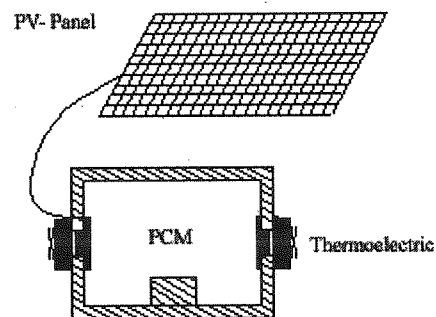
که در روابط بالا  $K_f (W/K)$  ضریب هدایت گرمایی مدول ترموالکتریک است.

برای تعیین میزان کارایی ترموالکتریک ضریب شایستگی  $Z (K^{-1})$  به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$Z = \frac{\alpha^2}{K_f R} \quad (۹)$$

### ۳- دستگاه آزمایش

جزئیات دستگاه مورد آزمایش در شکل (۲) نشان داده شده است. ابعاد داخلی جعبه خنک‌مورد استفاده،  $cm^3$   $11 \times 20 \times 32$  است. برای عایق‌بندی مناسب، در هر دیواره ۱۱ cm عایق به کار رفته است، که ۹ cm پلی اورتان و ۲ cm از آن جداره چوبی می‌باشد. در این دستگاه از دو عدد ترموالکتریک مدل Frost-72 (ساخت شرکت Kryotherm) به صورت اتصال موازی استفاده شده است. مشخصات ترموالکتریک‌های اشاره شده در جدول (۱) آمده است [۱۴]. تغییرات مشخصات مزبور با دمای قسمت سرد و گرم ترموالکتریک در محدوده دمایی یخچال‌ها بسیار ناچیز است و می‌توان مقادیر آنها را ثابت در نظر گرفت [۱۲].



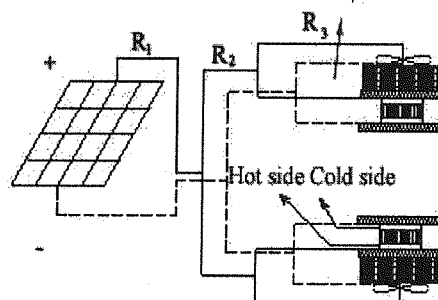
شکل (۲): شماتیک دستگاه آزمایش

جدول (۱): مشخصات ترموالکتریک مورد استفاده

$K_f (W/K)$	$R (\Omega)$	$\alpha (V/K)$	$Z (K^{-1})$
۰/۵۳۳	۲	۰/۰۵۳۳	$۲/۷ \times ۱۰^{-۳}$

روی قسمت گرم‌تر هر ترموالکتریک، یک عدد چشمه حرارتی و یک عدد فن به منظور ایجاد جابجایی اجباری نصب شده است. فن‌ها نیز از نظر الکتریکی به صورت موازی با اجزا مدار نصب شده‌اند. برای جلوگیری از تماس مستقیم طرف سردتر ترموالکتریک با رطوبت داخل یخچال، یک صفحه آلومینیومی روی آن قرار گرفته است. جنس دیواره نیز آلومینیومی است.

به دو سر ترموالکتریکها می‌رسید حدود ۹۷ می‌شد. در تقسیم جریان ورودی بین ترموالکتریکها نیز باید مقدار جریان مصرفی فن‌ها را در نظر گرفت. در این صورت، در بهترین حالت انتظار می‌رود که اختلاف دمایی بین ۶۲-۵۷°C بین اتصال سرد و گرم ترموالکتریک ایجاد شود. اما همان‌طور که ذکر شد، ولتاژ و شدت جریان تولیدی پانل‌ها در طول روز با این مقادیر تفاوت دارد. بنابراین نتایج عملی آزمایش‌ها با مقادیر نظری که در حالت دایم محاسبه می‌شوند متفاوت خواهند بود. نحوه اتصال و سیم‌کشی کل مدار در شکل (۳) نشان داده شده است که مقاومت سیم‌های رابط نیز در شکل مشخص است.



شکل (۳): نحوه اتصال و سیم‌کشی مدار دستگاه آزمایش

## ۴- آزمایش

آزمایش‌ها در چهار فصل، بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب در روزهای ۲۰ اردیبهشت، ۱۲ تیر، ۲۶ آبان و ۲۱ اسفند، در شهر کرمان با عرض جغرافیایی ۳۰ درجه انجام گرفته است. در شرایطی که پانل‌ها در محیط بیرون و یخچال در آزمایشگاه قرار گرفتند. بر اساس محاسبات انجام شده با استفاده از رابطه (۲) شیب پانل‌ها در روزهای آزمایش به ترتیب ۱۲، ۷، ۴۹ و ۳۵ درجه محاسبه شده و زاویه راستای سطح، صفرگردید. ذرات گرد و غبار موجب کاهش بازده پانل می‌شود و بارش باران، عاملی برای تمیز شدن سطح پانل‌ها است اما شیب کمتر از ۱۵ درجه مانع جاری شدن آب بر سطح پانل می‌شود و گفتنی است که نصب پانل‌ها با زاویه‌ای کمتر از ۱۵ درجه رایج نیست. بنابراین در روزهای ۲۰ اردیبهشت و ۱۲ تیر پانل‌ها با شیب ۱۵ درجه نصب شده‌اند.

طبق محاسبات انجام شده تعداد ساعات خورشیدی در این روزها به ترتیب حدود ۱۳/۵، ۱۴، ۱۰/۵ و ۱۱/۵ ساعت بوده است. اما پانل‌ها در تمامی ساعات روز قادر به تولید توان لازم برای راه‌اندازی یخچال نیستند. این پدیده به چند علت اتفاق می‌افتد که مهم‌ترین آنها عبارتند از:

۱- در روزهایی که تعداد ساعات آنها بیش از ۱۲ ساعت است در ابتدای صبح و انتهای روز زاویه بین راستای جنوب با

تصویر اشعه خورشید روی سطح افق (زاویه راستای خورشید) بزرگ‌تر از ۹۰ درجه است. بنابراین در این ساعات خورشید در پشت پانل‌ها قرار می‌گیرد.

۲- نور خورشید در ابتدای صبح و انتهای روز برای رسیدن به سطح زمین مسافت طولانی‌تری را در جو طی می‌کند و بر اثر برخورد با ذرات معلق و گرد و غبار، پراکنده می‌شود بنابراین در این ساعات شدت تابش دریافتی روی سطح زمین نسبت به بقیه ساعات روز کمتر است.

۳- زاویه برخورد بسیار مایل در ابتدای صبح و انتهای روز باعث می‌شود که ولتاژ و شدت جریان خروجی از پانل‌ها در این ساعات کمتر از مقدار مورد نیاز برای راه‌اندازی یخچال باشد.

بنابراین تعداد ساعاتی که توان تولیدی کافی برای راه‌اندازی پانل‌ها وجود دارد در فصل‌های مختلف تفاوت چندانی با یکدیگر ندارد هر چند این ساعات در روزهای بهار و تابستان طولانی‌تر است. با وجود اینکه ترموالکتریک‌ها با ولتاژ و شدت جریان کمتر از مقدار در نظر گرفته شده، قادر به ایجاد اختلاف دما هستند اما ولتاژ و شدت جریان پایین موجب صدمه دیدن فن‌ها می‌شود. بنابراین زمان شروع آزمایش‌ها ساعاتی پس از طلوع خورشید و پایان آزمایش‌ها نیز ساعاتی قبل از غروب خورشید بوده است.

در آزمایش از دو عدد مولتی‌متر برای اندازه‌گیری شدت جریان و ولتاژ ورودی به یخچال استفاده شده است. دقت اندازه‌گیری ولتاژ ۰/۵٪ ± است. اندازه‌گیری دما به وسیله چهار عدد سنسور مدل Pt-100 انجام می‌شود که دمای قسمت سرد ترموالکتریک، دمای داخل یخچال، دمای آب و دمای محیط را نشان می‌دهند. دقت این سنسور ۱٪ ± است.

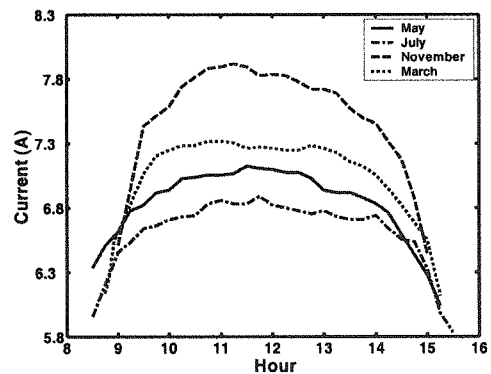
با توجه به شکل (۴) ولتاژ اندازه‌گیری شده در مسیر سیم‌کشی به دلیل مقاومت مدار کاهش می‌یابد. برای انجام محاسبات مقدار ولتاژی که به دو سر ترموالکتریک می‌رسد از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$V = V_m - IR_1 - \left(\frac{I}{2}\right)R_2 - \left(\frac{I}{2} - (0.041 \times I)\right)R_3 \quad (10)$$

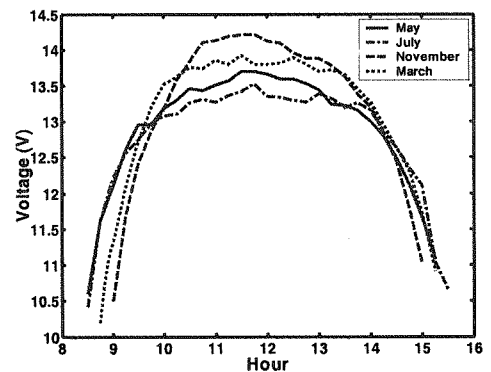
در رابطه (۱۰)،  $V_m$  مقدار اندازه‌گیری شده به وسیله مولتی‌متر قبل از عبور از سیم‌های رابط است. جریان مصرفی هر فن بر اساس آزمایش‌های انجام شده برابر با ۱/۴٪ از جریان کل است که این مقدار از آمپر مورد استفاده به وسیله ترموالکتریک کم شده است.

## ۵- بحث و بررسی نتایج آزمایش

آزمایش‌ها در چهار ماه اردیبهشت (May)، تیر (July)، آبان (November) و اسفند (March) و در روزهای ذکر شده، انجام شده است. شکل‌های (۴) و (۵) تغییرات ولتاژ و شدت جریان را نشان می‌دهند. ولتاژ و شدت جریان مورد نیاز برای کارکرد مناسب یخچال ۱۲ ولت و ۶/۵ تا ۷ آمپر است، در حالی که در ابتدای راه‌اندازی یخچال در ابتدای صبح و در انتهای کار یخچال، ولتاژ و شدت جریان خروجی از پانل‌ها حدود ۱۰ تا ۱۱ ولت و ۵/۸ تا ۶/۵ آمپر است. در مدت زمان کوتاهی پس از راه‌اندازی یخچال، ولتاژ و شدت جریان به حد مطلوب می‌رسد که هنگام ظهر در بیشترین حد است.



شکل (۴): نمودار شدت جریان اندازه‌گیری شده در ساعات مختلف روز



شکل (۵): نمودار ولتاژ اندازه‌گیری شده در ساعات مختلف روز

مقادیر تابش روزانه در روزهای آزمایش در جدول (۳) آمده است [۱۵]. طبق جدول مقدار تابش از ماه آبان تا تیر به ترتیب افزایش می‌یابد. اما ولتاژ و شدت جریان اندازه‌گیری شده در ساعات مختلف در این چهار ماه کاهش یافته است. این پدیده به چند علت اتفاق می‌افتد که عبارتند از:

۱- شیب پانل‌ها از رابطه (۲) محاسبه شده است که در ماه‌های اردیبهشت و تیر به دلایل ذکر شده این زاویه به ۱۵ درجه تغییر داده شده است. این زاویه از ماه آبان تا اردیبهشت

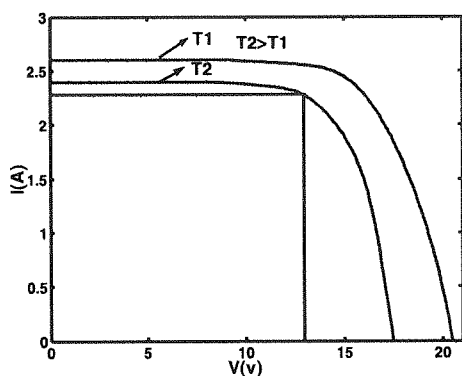
کاهش یافته است. کاهش شیب پانل‌ها باعث کاهش برخورد تابش بازتاب شده از سطح زمین با سطح پانل‌ها می‌شود. بنابراین تفاوت بین شدت تابش کلی که به سطح پانل‌ها می‌رسد کمتر است.

۲- افزایش دمای محیط بیرون از ماه آبان تا تیر باعث گرم شدن سطح پانل‌ها می‌شود که در نتیجه مقاومت درونی پانل‌ها افزایش یافته و باعث افت شدت جریان و ولتاژ تولیدی می‌شود. طبق نظر شرکت سازنده پانل‌های خورشیدی (شرکت فیبر نوری) به ازای هر درجه افزایش دمای سطح، کاهش ولتاژ ۰/۲۸٪ و کاهش شدت جریان ۰/۰۷٪ خواهد بود.

۳- شکل (۶) نمودار شدت جریان تولیدی بر حسب ولتاژ پانل را در دو دمای متفاوت نشان می‌دهد. بر روی شکل نقطه کارکرد پانل در دمای  $T_1$  و  $T_2$  نشان داده شده است. بالاتر رفتن دمای سطح علاوه بر افت آمپر و ولت با درصد مشخص شده، باعث می‌شود نقطه کارکرد پانل در قسمت منحنی شکل نمودار واقع شود و مقدار شدت جریان تولیدی خصوصاً در حوالی ظهر کمتر از مقدار پیش‌بینی شده گردد.

جدول (۳): مقادیر تابش روزانه در روزهای آزمایش

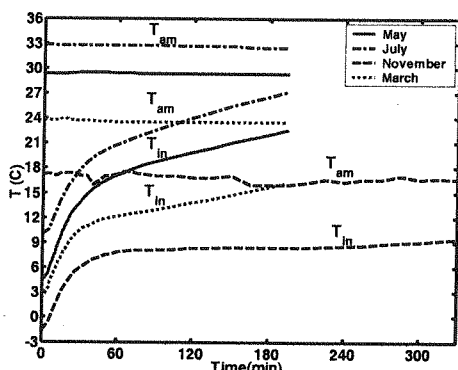
$24/3 \times 10^6 \text{ J/m}^2$	۲۰ اردیبهشت
$28/9 \times 10^6 \text{ J/m}^2$	۱۲ تیر
$14/9 \times 10^6 \text{ J/m}^2$	۲۶ آبان
$19/7 \times 10^6 \text{ J/m}^2$	۲۱ اسفند



شکل (۶): نمودار شدت جریان بر حسب ولتاژ تولیدی سلول‌های خورشیدی

شکل (۷) تغییرات دمای محیط آزمایشگاه و دمای داخل یخچال را در طول روز نشان می‌دهد. در ماه آبان طی مدت زمانی کمتر از ۱/۵ ساعت پس از راه‌اندازی، دمای داخل یخچال به صفر درجه سانتیگراد می‌رسد. در طول ساعات آفتابی بعدی، توان سرمایش یخچال صرف تغییر فاز آب می‌شود و

سطح سرد ترموالکتریک بالا رفته که موجب بالا رفتن دمای داخل یخچال می‌شود. برای رفع این مشکل یخچال‌های ترموالکتریک تحقیقاتی صورت گرفته است که هنوز نتیجه کاملاً مطلوبی بدست نیامده است [۲].

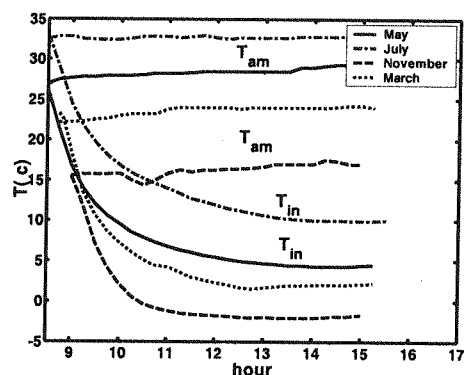


شکل (۸): نمودار تغییرات دمای داخل یخچال و دمای محیط هنگام خاموش شدن یخچال

در ماه آبان، پس از مدتی با هم‌دما شدن دو طرف ترموالکتریک افزایش دما به کندی صورت می‌گیرد که علت این امر وجود ماده تغییر فاز دهنده است چرا که تغییر فاز آب در این مرحله تقریباً باعث ثابت ماندن دمای داخل یخچال می‌شود. همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود حدود یک ساعت پس از خاموش شدن یخچال سرعت افزایش دما کاهش پیدا کرده و تا ۳ ساعت دیگر دما تقریباً ثابت می‌ماند. در انتهای ساعت پنجم تغییر فاز آب تقریباً به طور کامل انجام شده است و سرعت تغییر دما رو به افزایش است، در حالی‌که دما هنوز کمتر از  $10^{\circ}\text{C}$  است. این دما برای حمل و نقل دارو و واکسن دمای مطلوبی است. در ماه‌های اسفند، اردیبهشت و تیر چون تغییر فاز آب انجام نگرفته، تغییرات دمای داخل یخچال سریع‌تر اتفاق می‌افتد اما به هر حال وجود ماده تغییر فاز دهنده با ظرفیت گرمایی ویژه بالا سبب کاهش نرخ افزایش دما نسبت به زمانی که این ماده وجود ندارد، می‌شود.

شکل‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) تغییرات مقادیر ظرفیت سرمایش ( $Q_c$ ) و ضریب عملکرد ( $Cop$ ) را در مدت زمان کارکرد یخچال نشان می‌دهد. نمودار (۱۰) و (۱۱) هر دو مقادیر  $Cop$  را نشان می‌دهند با این تفاوت که در نمودار (۱۰) نسبت ظرفیت سرمایش به توان خالص دریافتی توسط ترموالکتریک که برابر با  $Cop$  پمپ حرارتی است و در نمودار (۱۱) نسبت ظرفیت سرمایش به توان دریافتی سیستم که برابر با  $Cop$  یخچال است نشان داده شده است. در نمودار (۱۰) افت ولتاژ درون سیم‌ها و شدت جریان مصرفی فن‌ها از توان کل ورودی کاسته شده است که باعث تفاوت آشکار نمودارهای (۱۰) و (۱۱) می‌گردد. از ماه آبان تا تیر، به دلیل کاهش توان

دمای داخل یخچال به  $2/1^{\circ}\text{C}$  می‌رسد. با توجه به شکل‌های (۴) و (۵) در این ساعات شدت جریان و ولتاژ ورودی در حالت بیشینه خود قرار دارند و توان لازم برای تغییر فاز آب بوجود می‌آید. بنابراین هر چه مدت زمان تغییر دمای داخل یخچال از دمای محیط به صفر درجه سانتیگراد کوتاه‌تر باشد، می‌توان مقدار ماده تغییر فاز دهنده بیشتری برای ساعات غیر آفتابی در نظر گرفت. در ماه اسفند حداقل دمای داخل یخچال به  $1/5^{\circ}\text{C}$  می‌رسد و به همین دلیل تغییر فاز آب اتفاق نمی‌افتد. در ماه اردیبهشت، حداقل دمای داخل یخچال  $4/3^{\circ}\text{C}$  و در ماه تیر  $9/9^{\circ}\text{C}$  است. علت این امر کاهش ولتاژ و شدت جریان تولیدی و همچنین بالا رفتن دمای محیط آزمایشگاه است. چون استفاده اصلی از این یخچال برای حمل و نقل دارو و واکسن می‌باشد، دستیابی به دمای کمتر از  $10^{\circ}\text{C}$  مطلوب است. بنابراین نیازی به رسیدن به دمای صفر درجه سانتیگراد وجود ندارد اما چون در ماه تیر مدت زمان لازم برای رسیدن به دمای کمتر از  $10^{\circ}\text{C}$  طولانی است، می‌توان از پانل‌های بیشتری برای رسیدن به دماهای پایین‌تر استفاده کرد.

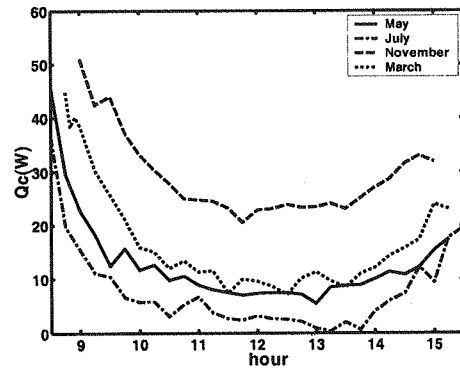


شکل (۷): نمودار تغییرات دمای داخل یخچال و دمای محیط هنگام کارکرد یخچال

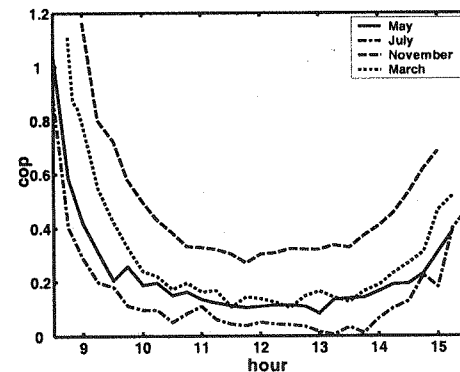
می‌توان به جای آب از مواد دیگری مانند ClimSel C7 استفاده کرد که در دمای  $7^{\circ}\text{C}$  تغییر فاز می‌دهد [۱۶]. هر چند استفاده از آب باعث ساده‌تر شدن سیستم می‌شود اما مزیت استفاده از ماده ذکر شده این است که در همه فصول امکان تغییر فاز وجود داشته و در ضمن در دمای  $7^{\circ}\text{C}$  یخچال ضریب عملکرد بالاتر و اتلاف حرارتی کمتری دارد. به علاوه لزومی ندارد که دما به صفر درجه سانتیگراد برسد. در انتهای ساعات کارکرد به دلیل کاهش ولتاژ و شدت جریان، مجدداً دمای داخل یخچال کمی افزایش پیدا می‌کند. کاهش بیشتر ولتاژ و شدت جریان باعث خاموش شدن یخچال می‌شود.

شکل (۸) نمودار تغییر دمای یخچال را در ماه‌های مختلف، هنگام خاموش شدن نشان می‌دهد. به محض خاموش شدن به دلیل هدایت گرمایی بین قسمت گرم و سرد ترموالکتریک، دمای

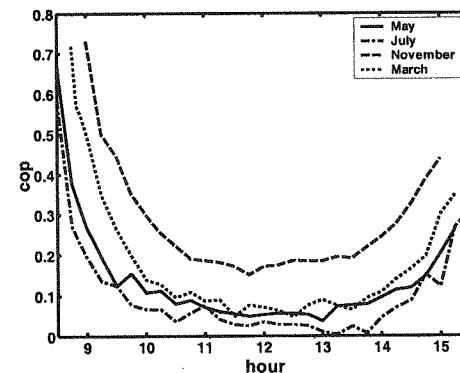
تولیدی و افزایش دمای محیط مقدار  $Q_c$  و  $Cop$  کاهش یافته است.



شکل (۹): نمودار ظرفیت سرمایش در ساعات مختلف روز



شکل (۱۰): نمودار ضریب عملکرد پمپ حرارتی در ساعات مختلف



شکل (۱۱): نمودار ضریب عملکرد یخچال در ساعات مختلف

در تمامی ماه‌ها مقدار  $Cop$  در ابتدای شروع به کار یخچال بالاتر است و پس از مدتی مقدار آن کم شده و سپس دوباره افزایش می‌یابد. علت این امر وابسته بودن  $Cop$  به دمای سطح سرد ترموالکتریک است بدین ترتیب که با کاهش دمای سطح سرد  $Cop$  کاهش و با افزایش دمای این سطح  $Cop$  افزایش پیدا می‌کند. در ابتدای راه‌اندازی یخچال به دلیل کم بودن تفاوت دمای بین دو اتصال سرد و گرم بیشترین مقدار  $Cop$  وجود دارد. بالا رفتن دمای محیط در ساعات بعد از ظهر موجب افزایش

دمای اتصال گرم ترموالکتریک نسبت به صبح می‌شود و در نتیجه مقدار  $Cop$  و  $Q_c$  نسبت به صبح کاهش می‌یابد. به همین دلیل نمودارها نسبت به ظهر متقارن نیستند. افزایش یا کاهش  $Q_c$  نیز طبق نمودار، شبیه به افزایش یا کاهش  $Cop$  است [۱۷].

## ۶- نتیجه‌گیری

یک یخچال ترموالکتریک خورشیدی بدون باتری ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج آزمایش نشان داد که در فصل پاییز دمای داخل یخچال در مدت زمان کوتاهی پس از راه اندازی به کمتر از صفر درجه سانتیگراد می‌رسد و می‌تواند در ساعات آفتابی باقیمانده، از انرژی ورودی برای تغییر فاز آب به عنوان ماده تغییر فاز دهنده، استفاده کند. در فصول دیگر به دلیل کاهش توان تولیدی پانل‌های خورشیدی و افزایش دمای محیط تغییر فاز صورت نگرفت، اما دمای داخل یخچال به کمتر از  $10^{\circ}\text{C}$  رسید که دمایی مطلوب برای جابجایی واکسن و دارو است. برای این‌گونه یخچال‌ها بهتر است از ماده تغییر فاز دهنده‌ای با دمای تغییر فاز بالاتر از صفر درجه سانتیگراد استفاده شود. پس از خاموش شدن یخچال در ابتدا سرعت افزایش دما زیاد بوده اما به واسطه وجود ماده تغییر فاز دهنده بعد از مدتی این افزایش دما کند می‌شود. ضریب عملکرد یخچال بین  $0.7$  تا  $1/14$  متغیر است که در محدوده کاری ترموالکتریک‌ها رضایت بخش است [۵].

بنابراین با توجه به موارد ذکر شده و همچنین ساده و سبک بودن و همچنین قابلیت حمل و نقل ساده سیستم، از این یخچال می‌توان در مناطق دورافتاده‌ای که امکان انتقال خطوط برق وجود ندارد به منظور نگهداری واکسن، دارو و مواد غذایی استفاده نمود. قطعاً با افزایش ضریب شایستگی ترموالکتریک‌ها و افزایش راندمان پانل‌های خورشیدی و همچنین کاهش قیمت هر دو کارایی این یخچال‌ها افزایش می‌یابد.

## ۷- تقدیر و تشکر

انجام این پروژه در قالب اعتبار طرح تحقیقاتی سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان کرمان و در پژوهشکده انرژی و محیط زیست دانشگاه شهید باهنر کرمان صورت پذیرفته است. از این دو مرکز که در این زمینه همیاری نمودند، تشکر می‌گردد.



- [۱۰] Zaffran, M.; "Strategy for rural health and development", Inc Proc, 12<sup>th</sup> European PV and Solar Energy Conf, Amsterdam, p.p. 20742077 , 1994.
- [۱۱] Cherif, A.; Dhoub, A.; "Performance et parameters d'une unite de refrigeration LSS", Annales Maghrebins, vol. 5, p.p. 32-35, 1992
- [۱۲] Duffie, J. A.; Beckman, W. A.; Solar engineering of thermal process, second edition, 1990
- [۱۳] Huang, B. J.; Chin, C. J.; Duang, C. L.; "A design method of thermoelectric cooler", International Journal of Refrigeration, vol. 23, p.p. 208-218, 2000.
- [۱۴] Engineering and Production Firm KRYOTHERM, [www.kryotherm.spb.ru](http://www.kryotherm.spb.ru).
- [۱۵] صفاری پور، محمد حسن؛ انرژی خورشیدی قابل دسترس در استان کرمان و مدل‌های پیش‌بینی‌کننده، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۷۴.
- [۱۶] Huang, B. J.; Duang, C. L.; "System dynamic model and temperature control of a thermoelectric cooler", International Journal of Refrigeration, vol.23 p.p. 197-207, 2000.
- [۱۷] وزین‌افضل، مجتبی؛ طراحی، ساخت و آزمایش یخچال ترموالکتریک خورشیدی بدون باتری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۸۳.
- [۱] Egli (Ed.), P.H.; Thermoelectricity, John Wiley and Sons, New York, 1960.
- [۲] Riffat, S. B.; Omer, S. A.; Xiaoli, Ma; "A novel thermoelectric refrigeration system employing heat pipes and a phase change material: an experimental investigation", Renewable energy, vol. 23, p.p. 313-323, 2001
- [۳] Min, Gao.; Rowe, D. M.; "Cooling performance of integrated thermoelectric microcooler", Solid-State Electronics, vol. 43 p.p. 923-929, 1999.
- [۴] Khedari, J.; Maneewan, S.; N. Pratinthong et al, "Domestic hot water system combining solar and waste heat from thermoelectric air-conditioning", International Journal of Ambient Energy, vol. 22(1), p.p. 1928 2001
- [۵] Chen, J.; Anderson, B.; "The maximum coefficient performance of thermoelectric cooling systems", International Journal Ambient Energy, vol. 17, p.p. 22-28, 1996
- [۶] Chen, K.; William, SBB.; "An analysis of the heat transfer rate and efficiency of thermoelectric cooling systems", International Journal of Energy Research, vol. 20 p.p. 399-417, 1996
- [۷] Winder, EJ.; Ellis, AB; "Thermoelectric devices: solid-state refrigerators and electrical generators in the classroom", Journal of Chemical Education, vol. 73 p.p. 940-946, 1996
- [۸] Bansel, P. K.; Martin, A.; "Comparative study of vapor compression", thermoelectric and absorption refrigerators, International Journal of Energy Research, vol.24, p.p. 93-107, 200 .
- [۹] Hara, T.; Azuma, H.; Shimizu, H.; Obara, H.; Sato, S.; "Cooling performance of solar cell driven, Thermoelectric cooling prototype headgear", Applied Thermal Engineering, vol.18 p.p. 1159-1169, 1998

- <sup>۱</sup> Peltier Effect
- <sup>۲</sup> Heat Sink
- <sup>۳</sup> Phase-Change Material
- <sup>۴</sup> Seebeck Coefficient
- <sup>۵</sup> Cool Box