



طراحی و ساخت یخچال خورشیدی با استفاده از المان سردکننده ترموالکتریک

معراج رجایی^{1*}، مینا جلالی²

1- استادیار، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران
2- دانشجوی دکتری، مهندسی برق-الکترونیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
* تهران، کدپستی: 1617766651، mrajaee@tvu.ac.ir

چکیده

در عصر حاضر، با افزایش تقاضا برای انرژی الکتریکی و توجه به منابع پاک، انرژی خورشیدی به عنوان راه حلی پایدار مطرح شده است. این مقاله به طراحی و ساخت یک یخچال خورشیدی قابل حمل می پردازد که با استفاده از پنل های خورشیدی و المان های ترموالکتریک، امکان سرمایش را در شرایط دور از دسترس برق شهری فراهم می کند. المان های ترموالکتریک، با بهره گیری از اثر پلتیر، گرما را از یک طرف به طرف دیگر منتقل کرده و امکان سرمایش بدون نیاز به کمپرسور را فراهم می آورند. این ویژگی، یخچال های خورشیدی را به گزینه ای ایده آل برای مناطق دورافتاده و شرایط اضطراری تبدیل می کند. یخچال طراحی شده، با بدنه مقاوم از جنس ورق گالوانیزه، قابلیت حمل آسان و عملکرد سرمایشی مطلوب، می تواند دمای محیطی 28 درجه سلسیوس را تا 6 درجه سلسیوس کاهش دهد. این امر، امکان نگهداری مواد غذایی و دارویی حساس به دما را در شرایط مختلف فراهم می کند. آزمایش های انجام شده نشان می دهد که این یخچال خورشیدی، با عملکرد قابل قبول و کارایی مناسب، می تواند به عنوان یک راه حل پایدار و قابل اعتماد در شرایط گوناگون مورد استفاده قرار گیرد. کاربردهای احتمالی این یخچال، شامل استفاده در سفرهای کمپینگ، مناطق دورافتاده، حمل و نقل مواد غذایی و دارویی، و مواقع اضطراری است. با توجه به پیشرفت های روزافزون در فناوری های مرتبط با انرژی خورشیدی و المان های ترموالکتریک، انتظار می رود که یخچال های خورشیدی، نقش مهمی در تامین نیازهای سرمایشی در آینده ایفا کنند.

کلیدواژه ها: المان سرد کننده، یخچال خورشیدی، ترموالکتریک، یخچال

Design and construction of a solar refrigerator using a thermoelectric cooling element

Meraj Rajae^{1*}, Mina Jalali²

1- Assistant Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran

2- PhD Student, Department of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University (TMU), Tehran, Iran

Tehran, Iran, P.O.B. 1617766651, mrajaee@tvu.ac.ir

Received: 07 June 2025 Accepted: 10 September 2025

Abstract

In the present era, with the increasing demand for electrical energy and attention to clean sources, solar energy has emerged as a sustainable solution. This article focuses on the design and construction of a portable solar refrigerator that utilizes solar panels and thermoelectric elements to provide cooling in areas with limited or no access to grid electricity. Thermoelectric elements, employing the Peltier effect, transfer heat from one side to the other, enabling cooling without the need for a compressor. This feature makes solar refrigerators an ideal option for remote areas and emergency situations. The designed refrigerator, with a durable galvanized steel body, easy portability, and efficient cooling performance, can reduce the ambient temperature from 28 degrees Celsius to 6 degrees Celsius. This capability allows for the storage of temperature-sensitive food and pharmaceutical products in various conditions. The conducted tests demonstrate that this solar refrigerator, with its acceptable performance and appropriate efficiency, can be used as a sustainable and reliable solution in diverse environments. Potential applications include camping trips, remote areas, transportation of food and pharmaceuticals, and emergency situations. Given the continuous advancements in solar energy and thermoelectric element technologies, it is expected that solar refrigerators will play a significant role in meeting cooling needs in the future.

Keywords: Cooling element, solar refrigerator, thermoelectric, refrigerato

1- مقدمه

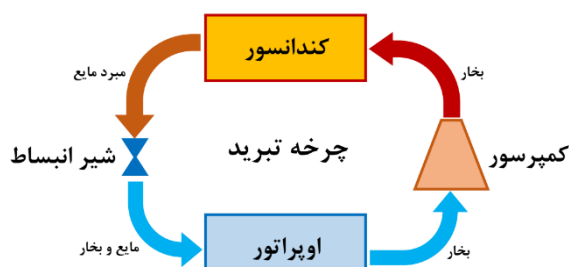
افزایش دمای آن نیز خواهد شد. کمپرسورها دارای یک موتور الکتریکی بوده که با مصرف برق، کار مکانیکی بر روی مبرد انجام می‌دهند.

1-1-3- کندانسور

کندانسور یا چگالنده نیز همانند اواپراتور، یک مبدل حرارتی بوده، اما در این قسمت وظیفه دفع حرارت از مبرد به محیط بیرون را بر عهده دارد. از کندانسور به عنوان مبدل دما بالا نیز یاد می‌شود.

1-1-4- شیر انبساط

شیر انبساط، یک شیر کنترل فشار بوده که دارای روزه کوچکی برای عبور مبرد است. وجود این شیر باعث کاهش فشار و دمای مایع مبرد شده و پس از شیر انبساط، به یک مخلوط مایع-بخار اشباع در فشار اواپراتور تبدیل می‌شود و تبدیل فاز آن به حالت دوفازی می‌گردد. بنابراین، مبرد خروجی از این شیر دارای شرایط مناسب برای ورود مجدد به اواپراتور و جذب حرارت است.



شکل 1 مراحل سیکل تراکمی

در دوران باستان، مردم برای نگهداری مواد غذایی از یخ طبیعی استفاده می‌کردند. این یخ که از منابع طبیعی مانند دریاچه‌ها و رودخانه‌ها جمع‌آوری می‌شد، در انبارهای مخصوص نگهداری می‌شد تا در فصول گرم استفاده شود. این روش به دلیل نیاز به حمل و نقل و نگهداری یخ، محدودیت‌های زیادی داشت و تنها در مناطقی که یخ به طور طبیعی در دسترس بود، کارآمد بود. این استفاده از یخ طبیعی در تمدن‌های باستانی مانند چین و مصر به چشم می‌خورد [1]. در ایران نیز در گذشته یخ‌ها در مکان‌هایی با سقف گنبدی شکل به نام یخچال معروف بود، نگهداری می‌شدند.

با پیشرفت‌های علمی در قرن نوزدهم، تلاش‌ها برای ایجاد دستگاه‌های خنک‌کننده مکانیکی آغاز شد. یکی از نخستین اختراعات در این زمینه، یخچال مکانیکی جاکوب پرایس در سال ۱۸۳۴ بود که از یک سیستم کمپرسور گاز برای خنک‌سازی استفاده می‌کرد. این دستگاه‌ها که به دلیل عدم کارایی بالا و هزینه‌های زیاد، محدود به استفاده‌های صنعتی بودند، در پی توسعه‌های بعدی بهبود یافتند. اختراع یخچال تراکمی توسط کارل فون لینده در سال ۱۸۷۶ نقطه عطفی در این مسیر بود. لینده با استفاده از یک کمپرسور مکانیکی و چرخه ترمودینامیکی، اولین سیستم خنک‌کننده قابل‌اعتماد و کارآمد را ارائه داد که به سرعت به استاندارد صنعتی تبدیل شد [2].

با پیشرفت‌های علمی در قرن نوزدهم، تلاش‌ها برای ایجاد دستگاه‌های خنک‌کننده مکانیکی آغاز شد. یکی از نخستین اختراعات در این زمینه، یخچال مکانیکی جاکوب پرایس در سال ۱۸۳۴ بود که از یک سیستم کمپرسور گاز برای خنک‌سازی استفاده می‌کرد. این دستگاه‌ها که به دلیل عدم کارایی بالا و هزینه‌های زیاد، محدود به استفاده‌های صنعتی بودند، در پی توسعه‌های بعدی بهبود یافتند. اختراع یخچال تراکمی توسط کارل فون لینده در سال ۱۸۷۶ نقطه عطفی در این مسیر بود. لینده با استفاده از یک کمپرسور مکانیکی و چرخه ترمودینامیکی، اولین سیستم خنک‌کننده قابل‌اعتماد و کارآمد را ارائه داد که به سرعت به استاندارد صنعتی تبدیل شد [2].

1-2- یخچال‌های جذبی

این نوع یخچال‌ها که بیشتر در کمپینگ‌ها و خودروهای کاروانی استفاده می‌شوند، از ترکیبی از آب، آمونیاک و هیدروژن برای فرآیند خنک‌سازی بهره می‌برند. سیستم جذبی با استفاده از منبع حرارتی خارجی مانند گاز طبیعی یا برق، آمونیاک را از محلول آب-آمونیاک جدا کرده و به کمک هیدروژن به عنوان عامل جاذب، فرآیند خنک‌سازی را انجام می‌دهد [2].

یک سیستم جذبی از چهار جزء اصلی ژنراتور، کندانسور، اواپراتور و جاذب تشکیل شده است. به جای استفاده از کمپرسور و انرژی الکتریسیته، از سیستمی حرارتی استفاده می‌کند. در اواپراتور، مبرد با جذب گرما تبخیر شده و محیط اطراف را خنک می‌کند. بخار ایجاد شده توسط محلول جاذب جذب می‌شود. محلول به‌وسیله پمپ به ژنراتور رفته و توسط حرارت، مایع مبرد از جاذب جدا گردیده و بخار توسط کندانسور متراکم می‌شود. سپس از طریق یک شیر انبساط فشار آن کاهش یافته و به اواپراتور باز می‌گردد. مایع جاذب نیز به جاذب باز می‌گردد [4].

1-3- یخچال‌های ترموالکتریک (پلتیر)

این یخچال‌ها از المان‌های ترموالکتریک که بر اساس اثر پلتیر عمل می‌کنند، برای خنک‌سازی استفاده می‌کنند. این سیستم‌ها بدون نیاز به قطعات مکانیکی متحرک عمل کرده و به دلیل صدای کم و عدم استفاده از گازهای سرد کننده مضر، محبوبیت زیادی پیدا کرده‌اند [5,6].

1-1- یخچال‌های تراکمی

این یخچال‌ها که به طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند، با استفاده از کمپرسورهای مکانیکی و گازهای سردکننده عمل می‌کنند. سیستم‌های تراکمی به دلیل کارایی بالا و قابلیت کنترل دقیق دما، به یکی از پرکاربردترین نوع یخچال‌ها تبدیل شده‌اند. این سیستم‌ها با استفاده از گازهای سردکننده تحت فشار کمپرسور، گرمای داخل یخچال را به بیرون منتقل می‌کنند و دمای داخلی را کاهش می‌دهند [1]. مهم‌ترین تجهیزات یخچال‌های سیکل تراکمی شامل موارد زیر می‌شود و نحوه ارتباط بین آن‌ها در شکل 1 نشان داده شده است.

1-1-1- اواپراتور

اواپراتور یا تبخیرکننده یک مبدل حرارتی بوده که مایع مبرد در آن به گردش درآمده و با جذب گرما به صورت غیرمستقیم از محیط داخلی، گرمای پیرامون اواپراتور را جذب کرده و باعث تبدیل آن به بخار شود. این فرآیند باعث کاهش دما در محیط داخلی و اطراف اواپراتور می‌گردد.

1-1-2- کمپرسور

کمپرسور نقش اصلی یک سیکل تبرید تراکمی را بر عهده دارد. این تجهیز وظیفه افزایش فشار مبرد را بر عهده داشته که این فشرده‌سازی نیز منجر به

¹ Peltier Effect

مورد بررسی قرار دادند. یخچال‌های ترموالکتریک خورشیدی مزایای متعددی دارند، از جمله وزن سبک، قابلیت اطمینان، بی‌صدا بودن، استحکام و هزینه کم. همچنین، استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان منبع انرژی تجدیدپذیر، منجر به کاهش وابستگی به برق شبکه و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود [11-13].

با وجود مزایا، چالش‌هایی نیز در استفاده از این سیستم‌ها وجود دارد. ضریب عملکرد پایین در مقایسه با سیستم‌های تبرید سنتی، هزینه اولیه سیستم و نیاز به باتری برای ذخیره انرژی خورشیدی از جمله این چالش‌ها هستند. یخچال‌های ترموالکتریک خورشیدی برای حمل و نقل نمونه‌های پزشکی و مواد حساس به دما نیز کاربرد دارند. یوسف و همکاران [14] یک یخچال کوچک قابل حمل خورشیدی را طراحی کردند که می‌تواند نمونه‌های پزشکی را برای مدت طولانی‌تری نسبت به جعبه‌های خنک‌کننده سنتی نگهداری کند. استفاده از انرژی خورشیدی برای تامین انرژی یخچال‌های خودروهای یخچال‌دار نیز مورد توجه قرار گرفته است. ماک و همکاران [15] یک خودروی یخچال‌دار مبتنی بر فتوولتائیک را توسعه دادند. یخچال‌های ترموالکتریک خورشیدی به عنوان یک راه‌حل پایدار و کارآمد برای نگهداری مواد حساس به دما، به ویژه در مناطق دورافتاده و بدون دسترسی به برق پایدار، پتانسیل بالایی دارند. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که با بهبود عملکرد سیستم‌ها و کاهش هزینه‌ها، می‌توان این فناوری را به طور گسترده‌تری در کاربردهای پزشکی و سایر زمینه‌ها مورد استفاده قرار داد.

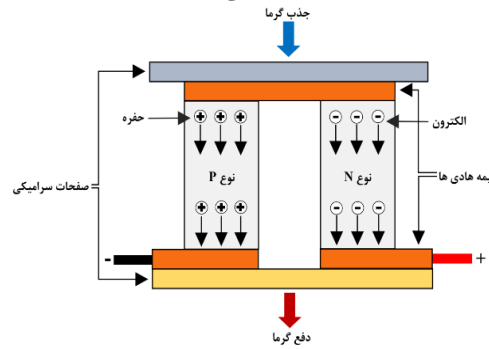
در دهه‌های اخیر، با توجه به نیاز به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، یخچال‌های خورشیدی به عنوان یکی از نوآوری‌های برجسته در زمینه خنک‌سازی معرفی شدند. این یخچال‌ها با استفاده از پنل‌های خورشیدی و المان‌های سردکننده ترموالکتریک، به‌ویژه در مناطق دورافتاده و بدون دسترسی به شبکه برق، کاربرد پیدا کردند. استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان منبع انرژی، موجب کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای شده است [16,17].

در پژوهش حاضر، محاسبه مقاومت حرارتی (R_{th})، توان دفع حرارت، و انتخاب پنل خورشیدی و هیت‌سینک بر اساس مدل‌سازی و آزمون در شرایط واقعی تابش خورشید، تغییرات دما و بار حقیقی انجام شده است؛ رویکردی که برخلاف طراحی‌های آزمایشگاهی گزارش شده در منابع پیشین می‌باشد. همچنین، استفاده از ترموستات و تایمر سورین به همراه نمایشگر، به منظور پایش عملکرد و جلوگیری از روشن‌بودن غیرضروری المان سردکننده، از دیگر نوآوری‌های این طرح محسوب می‌شود. این راهکار موجب افزایش طول عمر سیستم و کاهش مصرف انرژی شده است.

3- معرفی سیستم

کشور ایران نیز به دلیل دارا بودن 300 روز آفتابی در سال و متوسط تابش 4/5 تا 5/5 کیلووات ساعت بر متر مربع در هر روز از کشورهای با پتانسیل بالا در زمینه انرژی خورشیدی می‌باشد. با توجه به موقعیت و پتانسیل تابش خورشید در ایران می‌تواند از کشورهای بسیار مناسب در زمینه تولید برق از انرژی خورشید باشد. از طرفی با توجه به عدم وجود دسترسی به منبع الکتریسیته متصل به شبکه در موارد بحرانی و صحرها و مناطقی از این قبیل، لزوم وجود یخچالی دارای المان سردکننده و قابل حمل که از انرژی خورشیدی استفاده کند به عنوان هدف تحقیق مورد انتخاب قرار گرفت. همچنین افزایش تولید انرژی خورشیدی با کاهش تقاضای سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، به آینده‌ای پاک‌تر و پایدارتر کمک می‌کند. همچنین، توسعه این

المان سردکننده ترموالکتریک (TEC) از اثر پلتیر¹ بهره می‌برد که در آن جریان الکتریکی از طریق دو ماده رسانای متفاوت عبور کرده و باعث ایجاد اختلاف دما می‌شود. اثر پلتیر اولین بار توسط فیزیکدان فرانسوی ژان شارل پلتیر کشف شد. او دریافت که با عبور جریان الکتریکی از طریق دو ماده رسانای متفاوت، گرما از یک اتصال گرفته شده و در اتصال دیگر آزاد می‌شود [6]. یک ماژول ترموالکتریک شامل تعداد زیادی جفت ترموالکتریک (تروژنراتور) است که به صورت الکتریکی به هم متصل شده‌اند. هر جفت ترموالکتریک شامل دو نیمه‌رسانای نوع n و p است. با عبور جریان الکتریکی، الکترون‌ها و حفره‌ها از ناحیه داغ به ناحیه سرد حرکت می‌کنند، گرما را از یک طرف جذب کرده و به طرف دیگر منتقل می‌کنند [5] (شکل 2).



شکل 2 یک المان سردکننده

مواد نیمه‌رسانا که در ساختار ماژول‌های ترموالکتریک استفاده می‌شوند، معمولاً تولید بیسموت (Bi_2Te_3) هستند. این مواد به دلیل ضریب زتای بالا (ZT) که نشان‌دهنده کارایی ترموالکتریک است، به طور گسترده‌ای در ماژول‌های TEC استفاده می‌شوند [7]. این سیستم‌ها با داشتن مزایای زیادی مانند اندازه کوچک و عدم وجود قطعات متحرک، در بسیاری از کاربردهای خنک‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

2- مرور ادبیات

با توجه به نیاز روزافزون به نگهداری مواد حساس به دما، به‌ویژه در مناطق دورافتاده و بدون دسترسی به برق پایدار، یخچال‌های ترموالکتریک خورشیدی (STER) به عنوان یک راه‌حل پایدار و کارآمد، با بهره‌گیری از اثر پلتیر و انرژی خورشیدی، این نیاز را برآورده می‌کنند. تحقیقات نشان داده است که عملکرد این سیستم‌ها به شدت تحت تأثیر شدت تابش خورشید و اختلاف دمای بین طرف گرم و سرد ماژول‌های ترموالکتریک قرار دارد. آلام و همکاران [8] حداکثر اختلاف دمای 29/9 درجه سلسیوس را در شرایط محیطی با دمای 34/8 درجه سلسیوس گزارش کردند و استفاده از ماژول‌های دوگانه و فن‌های داخلی نیز منجر به بهبود عملکرد و ضریب عملکرد شد. نگهداری داروهایی مانند انسولین در دمای 2 تا 8 درجه سلسیوس، نیازمند سیستم‌های خنک‌کننده قابل اعتماد است. نوهی و همکاران [9] یک یخچال قابل حمل خورشیدی را برای این منظور طراحی و ساختند که با استفاده از پنل‌های خورشیدی 3/5 وات و باتری اسید سرب 12 ولت 100 آمپر، دمای مطلوب را بین 2-8 درجه سلسیوس با ضریب عملکرد متوسط 0/004 حفظ می‌کند. این تحقیقات شامل هدف بهبود عملکرد این سیستم‌ها انجام شده است. این تحقیقات شامل توسعه مواد ترموالکتریک، بهینه‌سازی جریان سیال و طراحی هندسی سینک حرارتی است. ساسیده‌ران و همکاران [10] در یک بررسی جامع، پیشرفت‌ها و چالش‌های اخیر در اجرای سیستم‌های تهویه مطبوع ترموالکتریک (TEC) را

13 ورق گالوانیزه 1

جدول 2 ویژگی‌های ماژول TEC1-12706

پارامتر	مقدار
محدوده ولتاژ کارکرد	12 v, 14/4 v
ماکزیمم جریان	6/4 A
حداقل مقاومت	Ω 1/98
حداکثر مقاومت	Ω 2/3
ضخامت	3/3 mm
محدوده دمای کارکرد	25- 50°C

جدول 3 مشخصات پنل خورشیدی مدل RTM050M

پارامتر	مقدار
ماکزیمم توان خروجی (Pmax)	50 w
ولتاژ خروجی در بیشترین توان (Vmp)	14 v
جریان خروجی در بیشترین توان (Imp)	3/57 A
ولتاژ مدار باز (Voc)	17/2 v
جریان اتصال کوتاه (Ioc)	4/1 A

شکل 3 نشان دهنده نحوه ارتباط قطعات مورد استفاده است. یخچال خورشیدی طراحی شده از یک سامانه تأمین انرژی ترکیبی متشکل از پنل خورشیدی با توان نامی ۵۰ وات و یک منبع تغذیه سوئیچینگ ۱۲ ولت بهره می‌برد. هر دو منبع تغذیه به شارژکنترلر متصل بوده و فرآیند مدیریت توان، شامل شارژ باتری و تغذیه مستقیم مصرف‌کننده‌ها، توسط این واحد انجام می‌شود. باتری استفاده شده از نوع ۱۲ ولت با ظرفیت ۵۰ آمپر-ساعت بوده که قابلیت ذخیره انرژی جهت عملکرد خارج از شبکه را فراهم می‌کند.

بخش سرمایش سیستم بر پایه یک المان ترموالکتریک همراه با هیت‌سینک و فن خنک‌کننده طراحی شده است. عملکرد این مجموعه توسط یک ترموستات و تایمر هوشمند، به همراه سنسور دمای TM-2D، کنترل می‌شود و دمای داخلی بر روی نمایشگر دیجیتال نشان داده می‌شود. این سازوکار کنترل، امکان جلوگیری از روشن بودن غیرضروری المان سرمایشی و در نتیجه افزایش طول عمر سامانه و کاهش مصرف انرژی را فراهم می‌آورد. محفظه داخلی یخچال از یک یخدان یونولیتی عایق حرارتی ساخته شده و با پوشش ورق گالوانیزه جهت بهبود مقاومت مکانیکی و بهداشتی تجهیز شده است. برای روشنایی داخلی نیز از یک چراغ LED کم‌مصرف استفاده شده است. فن داخلی علاوه بر تأمین جریان هوای یکنواخت درون محفظه، به همراه فن‌های جانبی بیرونی وظیفه دفع حرارت از سمت گرم ماژول ترموالکتریک را بر عهده دارد. جریان انرژی و عملکرد بخش‌های مختلف سیستم در شکل شماتیک ارائه شده نشان داده شده است.

بخش فرصت‌های شغلی جدید ایجاد کرده و رشد اقتصادی را در صنعت انرژی‌های تجدیدپذیر تحریک می‌کند. بنابراین، سرمایه‌گذاری در انرژی خورشیدی برای دستیابی به یک سیستم انرژی پایدار و حفظ محیط زیست توصیه می‌شود [18].

در جدول 1 قطعات استفاده شده در این محصول نوشته شده است. در فرآیند طراحی و انتخاب قطعات، ابتدا بار سرمایشی (Cooling Load) یخچال برآورد شد. سپس با توجه به این بار، دمای محیط و دمای هدف داخل یخچال، میزان تغییرات دمای مورد نیاز (ΔT) محاسبه گردید. بر اساس مقادیر ΔT و بار سرمایشی، تعداد و نوع ماژول‌های ترموالکتریک انتخاب شد. به عنوان نمونه، در صورتی که دمای محیط 50 درجه سلسیوس و دمای فضای داخلی 6 درجه سلسیوس در نظر گرفته شود، ΔT برابر با 44 درجه سلسیوس خواهد بود. با انتخاب ماژول TEC1-12706 به عنوان عنصر سرمایشی (جدول 2)، الزامات طراحی برای این اختلاف دما برآورده می‌گردد.

در پنل‌های خورشیدی، ولتاژ مدار باز (V_{oc}) با کاهش دما افزایش می‌یابد؛ این مقدار در داده‌برگ (Datasheet) پنل درج شده است. از آنجا که ولتاژ مدار باز به ورودی شارژکنترلر اعمال می‌شود، در انتخاب این تجهیز باید ملاحظات لازم در نظر گرفته شود. بر همین اساس، شارژکنترلری بر مبنای مقدار V_{oc} پنل انتخاب شد که قابلیت کارکرد در ولتاژهای 12 و 24 ولت و جریان نامی 20 آمپر را دارد و از نظر ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه با پنل به‌کاررفته سازگاری کامل دارد. جدول 3 مشخصات پنل خورشیدی استفاده شده را نشان می‌دهد.

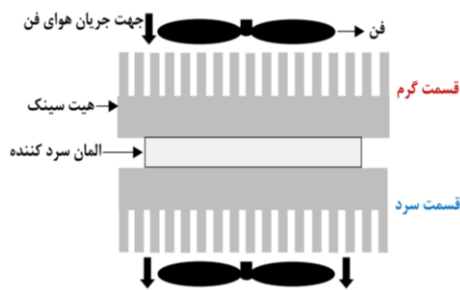
در سامانه‌های خورشیدی خارج از شبکه (Off-Grid)، باتری‌ها به‌منظور پشتیبانی سیستم و ذخیره انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ظرفیت باتری بر اساس توان مصرفی روزانه و تعداد روزهای ذخیره‌سازی انرژی تعیین شد. همچنین، با توجه به حرارت دفعی از سمت گرم ماژول‌های ترموالکتریک (Hot Side)، مشخصات هیت‌سینک شامل مساحت، میزان جریان هوای عبوری و نوع فن به گونه‌ای طراحی شد که الزامات دفع حرارت سیستم را به طور کامل برآورده نماید.

جدول 1 قطعات مورد استفاده در یخچال خورشیدی

ردیف	مدل و قطعات استفاده شده	تعداد
1	پنل 50 وات مدل RTM060M	4
2	ترموستات و تایمر هوشمند برند سورین	1
3	سنسور و نمایشگر دماسنج روپنلی مدل TM-2D	2
4	منبع تغذیه سوئیچینگ 12 ولت مدل LUX-200-12	1
5	هیت‌سینک	5
6	المان سرد کننده مدل TEC1-12706	3
7	لامپ ال ای دی	1
8	فن 12 ولت مدل 8025 12VDC	2
9	فن مدل Intel A80856-002 S478	1
10	شارژکنترلر خورشیدی EPEVER مدل VS2024A	1
11	باتری 12 ولت 50 آمپر	1
12	یخدان یونولیتی به ابعاد 34.5cm×39cm×57cm	1

هیت سینک متصل می‌شوند. این فن‌ها با ایجاد جریان هوا، گرمای جذب شده توسط هیت سینک را به محیط اطراف منتقل می‌کنند. برای بهبود تماس حرارتی بین المان و هیت سینک، از خمیر سیلیکون استفاده می‌شود. خمیر سیلیکون فضاهای خالی بین سطوح را پر کرده و انتقال حرارت را بهینه می‌کند. در سمت سرد المان، سه هیت سینک دیگر به آن متصل می‌شوند. این هیت سینک‌ها وظیفه جذب سرمای تولید شده توسط المان و انتقال آن به محیط داخل یخچال را بر عهده دارند. همانند سمت گرم، از خمیر سیلیکون برای بهبود تماس حرارتی بین المان و هیت سینک‌ها استفاده می‌شود (شکل 5). میزان سرمای تولید شده در سمت سرد المان، به طور مستقیم با میزان دمای سمت گرم آن مرتبط است. هر چه دمای سمت گرم کمتر باشد، سرمای تولید شده در سمت سرد بیشتر خواهد بود.

عدم وجود یک سیستم خنک‌کننده مناسب در سمت گرم، منجر به افزایش بیش از حد دمای این سمت می‌شود. افزایش بیش از حد دما، علاوه بر کاهش کارایی سرمایشی، می‌تواند باعث آسیب جدی و سوختن المان سردکننده شود.



شکل 5 نحوه اتصال المان سرد کننده به هیت سینک

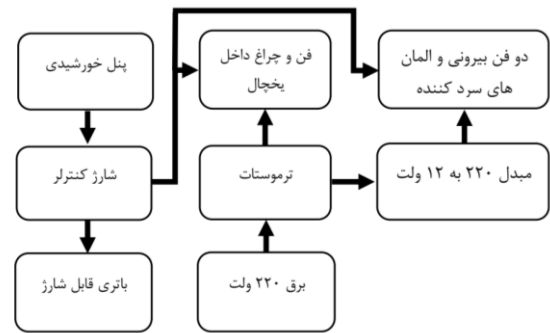
3-3- سیستم سرمایشی یخچال

یک یخدان یونولیتی با ابعاد مشخص $34/5\text{cm} \times 39/5\text{cm} \times 57\text{cm}$ انتخاب و در داخل بدنه فلزی ساخته شده قرار داده می‌شود. در مجاورت یخدان یونولیتی، شکافی به اندازه سه هیت سینک سمت سرد المان سردکننده ایجاد می‌گردد.

سینک‌های سمت سرد المان سردکننده در شکاف ایجاد شده نصب می‌شوند.

دو فن بیرونی بر روی هیت سینک سمت گرم المان سردکننده به گونه‌ای متصل می‌شوند که جهت باد آن‌ها به سمت هیت سینک‌ها باشد؛ بدین وسیله مقاومت حرارتی هیت سینک در برابر انتقال گرما کمتر می‌شود. و در نتیجه دمای سطح گرم پایین‌تر می‌آید، ΔT کمتر می‌شود و کارایی و ظرفیت سرمایی بیشتری خواهد داشت.

در داخل یخچال، بر روی شکاف ایجاد شده برای هیت سینک سمت سرد المان، تکه‌ای یونولیت به اندازه $30\text{cm} \times 25\text{cm}$ نصب می‌گردد. به اندازه فن 12 ولت، روبروی هیت سینک المان سرد، برش ایجاد شده و فن به گونه‌ای در داخل آن قرار داده می‌شود که جهت باد آن به داخل یخچال باشد. در مجاورت تکه یونولیت نصب شده، دو کانال $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ تا پشت فن داخل یخچال ایجاد می‌شود. این کانال‌ها، که روبروی هیت سینک متصل به سمت سرد المان هستند، برای گردش هوای سرد هیت سینک در داخل یخچال طراحی شده‌اند (شکل 6).



شکل 3 نحوه ارتباط قطعات

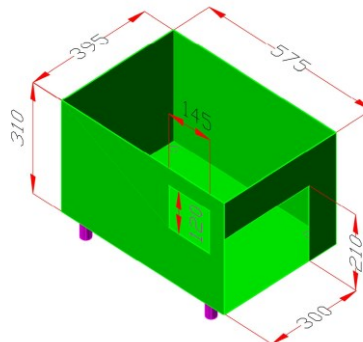
3-1- طراحی و ساخت بدنه یخچال

در مرحله نخست، طرح اولیه بدنه یخچال با استفاده از نرم‌افزار طراحی به کمک کامپیوتر (CAD) نظیر اتوکد، تهیه می‌شود. در این مرحله، ابعاد دقیق و جزئیات ساختاری بدنه، از جمله ابعاد کلی $34/5\text{cm} \times 39/5\text{cm} \times 57\text{cm}$ ضخامت ورق‌ها، و محل قرارگیری درب و سایر اجزاء، به دقت مشخص می‌گردد. هدف از این مرحله، ایجاد یک مدل دقیق و قابل اجرا از بدنه یخچال است (شکل 4).

پس از تکمیل طراحی، مواد اولیه مورد نیاز برای ساخت بدنه، که در این مورد ورق گالوانیزه است، تهیه می‌شود. انتخاب ورق گالوانیزه به عنوان ماده بدنه یخچال خورشیدی به دلیل مقاومت بالا در برابر زنگ‌زدگی و خوردگی و از نظر استحکام مقاوم است؛ که با توجه به ابعاد مشخص شده در طرح، ورق‌های گالوانیزه به دقت اندازه‌گیری و برش داده می‌شوند. در این مرحله، دقت در برش و اندازه‌گیری، از اهمیت بالایی برخوردار است تا از انطباق دقیق قطعات در مراحل بعدی اطمینان حاصل شود.

قطعات برش داده شده، با استفاده از روش‌های اتصال مناسب، نظیر جوشکاری یا پرچ، به یکدیگر متصل می‌شوند. در این مرحله، توجه به استحکام و دوام اتصالات، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است تا بدنه یخچال، مقاومت لازم را در برابر ضربه و فشار داشته باشد. به منظور سهولت در جابه‌جایی یخچال، چرخ‌هایی در قسمت پایین بدنه نصب می‌گردد.

پس از تکمیل ساخت بدنه، سطح آن به منظور افزایش مقاومت در برابر خوردگی و زنگ‌زدگی، رنگ‌آمیزی می‌شود. رنگ آمیزی علاوه بر محافظت از بدنه، به زیبایی ظاهری محصول نیز کمک می‌کند.



شکل 4 بدنه طراحی شده در اتوکد

3-2- اتصالات المان سردکننده

المان سردکننده در سمت گرم خود، به یک هیت سینک متصل می‌شود. هیت سینک به عنوان یک رسانای حرارتی عمل می‌کند و گرمای تولید شده توسط المان را جذب می‌کند. برای افزایش کارایی انتقال حرارت، فن‌های بیرونی به

جلوگیری شود. این باتری‌ها به عنوان سیستم پشتیبان در نظر گرفته شدند تا زمانی که پنل‌های خورشیدی امکان تولید انرژی نداشتند، از آن‌ها استفاده شود. به همین خاطر از باتری‌های 12 ولت و 50 آمپر-ساعت استفاده شده است که تطابق کامل با ولتاژ دستگاه و جریان مورد نیاز دستگاه برای 3/5 ساعت داشته باشد.

برای افزایش جریان خروجی، پنل‌های خورشیدی به صورت موازی به یکدیگر متصل می‌شوند. پس از موازی کردن پنل‌ها، ترمینال‌های مثبت و منفی مجموعه پنل‌ها به ترمینال‌های مربوطه (مثبت و منفی) در شارژ کنترلر متصل می‌شوند. در این مرحله نیز، رعایت قطبیت صحیح بسیار مهم است (شکل 8).



شکل 6 دیواره پشت فن‌های بیرونی

3-4- سیم‌کشی و اتصال اجزای الکتریکی یخچال

در قسمت پایین فن‌های بیرونی، یک تغذیه سوئیچینگ 220 ولت به 12 ولت متصل می‌گردد. سیم‌های مثبت دو فن بیرونی و المان‌های سردکننده، به خروجی مثبت تغذیه سوئیچینگ و سیم‌های منفی آن‌ها، به خروجی منفی تغذیه سوئیچینگ متصل می‌شوند. برای تضمین ایمنی و پایداری، تغذیه AC ورودی از طریق فیوز به منبع سوئیچینگ منتقل می‌شود و به منظور جلوگیری از جریان برگشتی، مسیریابی جریان‌ها طوری طراحی شد که منبع سوئیچینگ بارها را در اولویت تغذیه قرار دهد ولی شارژ کنترلر مسئول مدیریت شارژ باتری باشد.

در قسمت جلوی یخچال، یک ترموستات نصب می‌گردد. ترموستات در این سیستم به عنوان کنترل‌کننده هوشمند روشن/خاموش شدن المان‌ها عمل می‌کند. وقتی دمای داخل یخچال به مقدار تنظیم شده (6+ درجه سلسیوس) برسد، ترموستات جریان المان‌ها و فن‌ها را قطع می‌کند. که منجر به صرفه‌جویی در انرژی می‌شود. نول تغذیه سوئیچینگ، به نول ترموستات متصل می‌گردد. ورودی فاز ترموستات، به قسمت کمپرسور متصل می‌شود (در این مورد، فن‌ها و المان‌ها جایگزین کمپرسور شده‌اند).

سوکت خروجی فن یخچال، ابتدا به یک مقاومت متغیر (برای تنظیم سرعت فن) و سپس به یک کلید درب (نصب شده در گوشه بالایی یخچال) متصل می‌شود. پس از کلید درب، سوکت خروجی به یک لامپ LED و فن داخلی یخچال متصل می‌گردد. این اتصال به گونه‌ای است که در هنگام باز بودن درب یخچال (عدم فشردن کلید)، لامپ داخلی روشن و فن داخلی خاموش می‌شود (برای جلوگیری از اتلاف سرما).

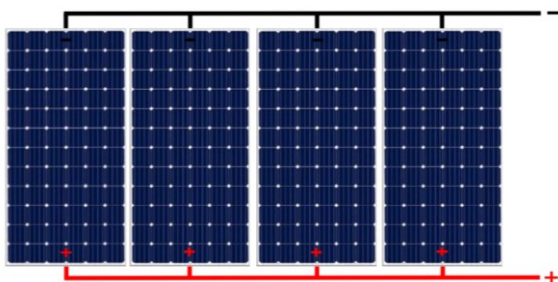
سوکت سنسور یخچال در ترموستات، به سنسور دما متصل می‌گردد. سنسور دما، در پشت فن و روی هیت سینک قسمت سرد المان قرار می‌گیرد. دلیل قرار گرفتن سنسور دما پشت هیت سینک سمت سرد اندازه‌گیری دقیق دمای سطح خنک‌کننده: چون این بخش مستقیماً دمای هوای داخلی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. دو نمایشگر دما مدل TM-2D، در کنار ترموستات نصب می‌شوند. سنسور یکی از نمایشگرهای دما، در فضای داخل یخچال و سنسور دیگری، روی هیت سینک قسمت گرم المان سردکننده نصب می‌گردد (شکل 7).

3-5- اتصال باتری و پنل‌های خورشیدی به شارژ کنترلر

ابتدا، ترمینال‌های مثبت و منفی باتری به ترمینال‌های مربوطه (مثبت و منفی) در شارژ کنترلر متصل می‌شوند. در این مرحله، رعایت قطبیت صحیح (مثبت به مثبت و منفی به منفی) بسیار مهم است تا از آسیب به باتری و شارژ کنترلر



شکل 7 سیم‌کشی و اتصال اجزای الکتریکی یخچال



شکل 8 نحوه موازی کردن پنل‌ها

هر پنل 3/57 آمپر است؛ موازی بستن پنل‌ها جریان خروجی سیستم را افزایش می‌دهد و به مقدار 14/28 آمپر می‌رساند که متناسب با نیاز مدار است.

$$P = V * I \quad (1)$$

حداکثر توان گرمایی المان از فرمول (2) بدست می‌آید که Q مقدار گرما بر حسب ژول (J)، m جرم مواد بر حسب کیلوگرم (kg) که در این مدل یخچال بین 0/5 تا 1 کیلوگرم متغیر است، C ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg×°C) و مقدار عددی آن با در نظر گرفتن مواد از نوع مواد غذایی و آب، 4186 (J/kg×°C) در نظر گرفته شده است. ΔT تغییر دما بر حسب درجه سلسیوس (°C) است که مقدار ماکزیمم Q، 51 (W) محاسبه می‌شود.

$$Q = mc\Delta T \quad (2)$$

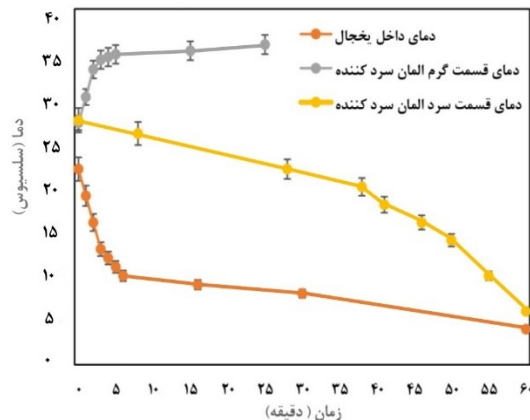
مقدار کارایی المان حاصل تقسیم مصرف برق بر حسب (وات) و مقدار توان گرمایی است که از فرمول (3) بدست می‌آید و نشان‌دهنده مقدار توان الکتریکی تبدیل شده به توان گرمایی است و مقدار آن در حالت ایده آل 0/7 محاسبه می‌شود.

$$COP = Q/W \quad (3)$$

مقدار تغییر دمایی که یک المان سرد کننده ایجاد می‌کند از فرمول (4) بدست می‌آید که حاصل تقسیم توان گرمایی بر حسب وات بر ضرب (m) جرم مواد بر حسب کیلوگرم (kg) در ظرفیت گرمایی (ژول بر کیلوگرم) و مقدار ماکزیمم آن طبق داده‌برگ (Datasheet) برابر 65°C می‌باشد.

$$\Delta T = Q/(mc) \quad (4)$$

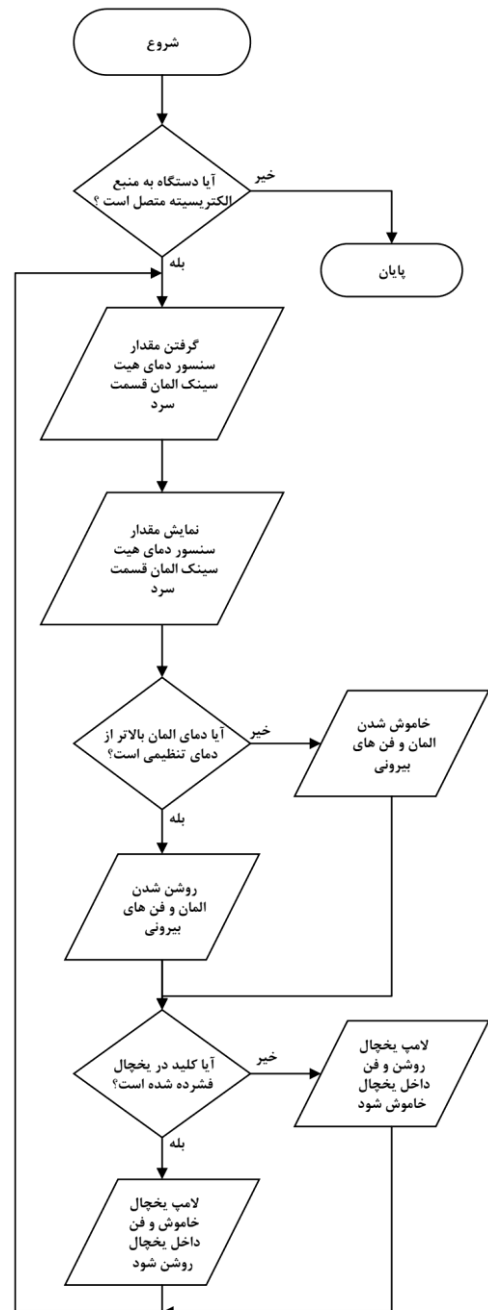
بر حسب تحقیقات زاویه بهینه برای پنل‌های خورشیدی در زوایای جغرافیایی کمتر از 65 درجه 0/9 عرض جغرافیایی محل است [19]. در شهر تهران، زاویه بهینه نصب پنل‌های خورشیدی نسبت به افق در محدوده ۳۲ تا ۳۶ درجه قرار دارد. این زاویه برای شهرهای شیراز، کرمان، یزد و اصفهان که از پتانسیل بالایی در بهره‌برداری از انرژی خورشیدی برخوردارند، بین ۲۸ تا ۳۳ درجه نسبت به افق برآورد شده است. مقادیر مذکور بر اساس میانگین نتایج محاسبات روش NRI در بازه تغییرات ۱۸۰ درجه نسبت به جهت جنوب ایران تعیین گردیده است [20,21].



شکل 10 تغییرات دمای قسمت‌های مختلف یخچال خورشیدی

شکل 10 نمودارهای تغییرات دما در قسمت‌های مختلف یخچال خورشیدی را نشان می‌دهد. سه بخش مختلف یخچال دارای تغییرات دمایی غیرخطی بودند که این موضوع امکان نمونه‌برداری در بازه‌های زمانی ثابت را از کاربر سلب می‌کرد. از این‌رو، تغییرات دما مورد بررسی قرار گرفت تا مدت‌زمان لازم برای رسیدن سیستم به حالت پایدار حرارتی تعیین شود.

در هنگام استفاده از یخچال در حالت تغذیه خورشیدی دو سیم خروجی شارژکنترلر را به فن و المان‌ها که به صورت موازی به هم متصل است وصل می‌شود. فلوجارت عملکرد کلی دستگاه در ذیل آمده است (شکل 9).



شکل 9 فلوجارت یخچال خورشیدی

4- تجزیه و تحلیل

هر المان سرد کننده در شرایط عملی حدود 4 آمپر-ساعت جریان مصرف می‌کند و در کل نیز مصرف المان‌ها و فن‌ها به حدود 14 آمپر-ساعت میرسد و با استفاده از فرمول توان (I) که (P/W)، ولتاژ (V) اعمال شده بر حسب ولت (V) و I جریان مصرفی بر حسب آمپر (A) است و بر حسب میزان توان محاسبه شده، از 4 پنل 50 واتی بصورت موازی در سیستم استفاده شد. از آنجایی که جریان

و کنترل هوشمند عملکرد المان‌های سرمایشی توسط ترموستات و تایمر نسبت داد. همچنین، داده‌های حاصل از سه بار تکرار آزمون، تطابق بالایی داشته و اختلاف کمتر از ۵٪ بین نتایج ثبت‌شده، نشان‌دهنده پایداری و قابلیت تکرارپذیری عملکرد سامانه می‌باشد. این ویژگی‌ها، یخچال خورشیدی طراحی‌شده را به یک راهکار پایدار، قابل اعتماد و مناسب برای شرایط دورافتاده، کمپینگ، حمل‌ونقل مواد غذایی و دارویی حساس به دما و شرایط اضطراری تبدیل می‌کند.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده موارد زیر مدنظر قرار گیرد: طراحی سیستم چندمرحله‌ای برای دستیابی به دماهای پایین‌تر؛ ارتقاء ظرفیت باتری و بهره‌گیری از فناوری‌های ذخیره‌سازی پیشرفته مانند ابرخازن‌ها برای افزایش مدت زمان عملکرد در شرایط بدون تابش خورشید؛ بهینه‌سازی عایق‌بندی حرارتی با استفاده از مواد نوین با ضریب هدایت حرارتی پایین به‌منظور کاهش تلفات حرارتی؛ انجام آزمایش‌های میدانی گسترده در شرایط اقلیمی مختلف به‌منظور بهینه‌سازی طراحی برای کاربردهای متنوع، که اجرای این موارد می‌تواند منجر به ارتقاء چشمگیر کارایی، افزایش پایداری عملکرد و گسترش دامنه کاربرد یخچال‌های خورشیدی قابل حمل گردد.

6- مراجع

- [1] McQuiston FC, Parker JD, Spitler JD, Taherian H. *Heating, ventilating, and air conditioning: analysis and design*, p. 41, Pondicherry: Wiley, 2023.
- [2] Kanoğlu, M., Çengel, Y.A., Dinçer, İ. *Efficiencies of Refrigeration Systems*, pp. 95-132, New York: Springer, 2012.
- [3] *What is the refrigeration cycle? Understanding its types and how it works*, Accessed August 2023; <https://farasard.com/refrigeration-cycle/>
- [4] Nikbakhti R, Wang X, Hussein AK, Iranmanesh A., Absorption cooling systems—Review of various techniques for energy performance enhancement, *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 59, No. 2, pp. 707-738, 2020.
- [5] Yan Q, Kanatzidis MG, High-performance thermoelectrics and challenges for practical devices, *Nature materials*, Vol. 21, No. 5, pp. 503-13, 2022.
- [6] Shi XL, Zou J, Chen ZG., Advanced thermoelectric design: from materials and structures to devices, *Chemical reviews*, Vol. 120, No. 15, pp. 7399-515, 2020.
- [7] Tohidi F, Holagh SG, Chitsaz A, Thermoelectric Generators: A comprehensive review of characteristics and applications, *Applied Thermal Engineering*. Vol. 201, p. 117793, 2020.
- [8] Alam N, Ali MS, Sajid S, Sharma D, Hasan Z, Experimental investigation and analysis of cooling performance of solar thermoelectric refrigerator. *Solar energy*, Vol. 263, p. 111892, 2023.
- [9] Nohay JA, De Belen JK, Claros JV, Lupo RB, Barrato AB, Cruz JC, Amado TM, Manuel MC, Design and fabrication of a portable solar powered thermoelectric refrigerator for insulin storage, *11th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)*, Malaysia, pp. 150-154, 2020.
- [10] Sasidharan M, Mohd Sabri MF, Wan Muhammad Hatta SF, Ibrahim S., A review on the progress and development of thermoelectric air conditioning system. *International Journal of Green Energy*, Vol. 21, No. 2, pp. 283-99, 2024.
- [11] Arjun KG, Pruthviraj BG, Chethan KY, Rashmi P., Design and implementation of peltier based solar powered portable refrigeration unit. *2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, India: IEEE, pp. 1971-1974, 2017.
- [12] Tsado J, Mahmood MK, Raji AG, Usman AU, Jiya IN., Solar powered DC refrigerator with a monitoring and control system. *In 2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, South Africa: pp. 591-594, 2018.
- [13] Karanian SE, Farhadi P, Gholampour M, Design, construction and evaluation of a solar refrigerator with TEC cooling element

جهت اطمینان از صحت داده‌های ارائه شده، آزمایش‌های مربوط به اندازه‌گیری دمای قسمت سرد المان سردکننده، دمای قسمت گرم و دمای داخل یخچال، در سه نوبت مجزا و در شرایط محیطی مشابه تکرار شد. نتایج حاصل از هر بار آزمایش تطابق خوبی با یکدیگر داشتند و اختلاف مقادیر ثبت شده در هر نقطه زمانی کمتر از ۵٪ بود. این موضوع نشان‌دهنده پایداری عملکرد سیستم و قابلیت تکرارپذیری نتایج گزارش شده است.

داده‌های ارائه شده در شکل 10 نشان می‌دهد که دمای داخلی محفظه طی مدت ۶۰ دقیقه از 22°C به 4°C کاهش یافته است (نمودار نارنجی رنگ). بیشترین میزان افت دما در سه دقیقه ابتدایی ثبت گردیده که بیانگر واکنش سریع اولیه سامانه به بار سرمایشی می‌باشد. با این حال، با گذشت زمان، نرخ کاهش دما به تدریج کمتر شده است؛ این روند را می‌توان به نزدیک شدن دما به نقطه تعادل ترموالکتریک و محدودیت انتقال حرارت ناشی از ظرفیت هدایت حرارتی هیت‌سینک نسبت داد. هدف از این آزمون، بررسی اثر عملکرد المان ترموالکتریک بر دمای ناحیه کاربردی دستگاه است.

نمودار زرد رنگ در شکل 10، نشان می‌دهد که دمای قسمت سرد المان سردکننده از 27°C درجه سلسیوس در شروع، به‌صورت پیوسته کاهش یافته و در پایان ۶۰ دقیقه به حدود 6°C درجه رسیده است. این روند بیانگر افزایش تدریجی کارایی خنک‌سازی و نزدیک شدن سیستم به دمای پایدار و مطلوب است.

در شکل 10، نمودار خاکستری رنگ، تغییرات دمای قسمت گرم المان سردکننده که به هیت‌سینک متصل است نشان داده شده است. روند تغییرات دمای سمت گرم المان ترموالکتریک را نشان می‌دهد. در شروع عملکرد، دمای این بخش به سرعت افزایش می‌یابد که نتیجه انتقال حرارت از سمت سرد و همچنین تولید گرمای ناشی از اثر ژول در ماژول است. با گذشت زمان، نرخ افزایش دما کاهش یافته و پس از حدود ۱۵ دقیقه به حالت پایدار می‌رسد. میزان و سرعت افزایش دما در این بخش به توان دفع حرارت هیت‌سینک، جریان هوای فن و شرایط محیطی بستگی دارد. عملکرد مطلوب هیت‌سینک باعث می‌شود که دمای سمت گرم در محدوده مشخصی ثابت بماند و از افت راندمان المان جلوگیری شود.

مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که زمان دستیابی به دمای کمتر از 5°C در سامانه حاضر کوتاه‌تر از نمونه‌های مشابه گزارش شده است. در برخی پروژه‌های مشابه، زمان موردنیاز برای رسیدن به این دما بین ۹۰ تا ۱۲۰ دقیقه گزارش شده است [22]؛ در حالی که در این پژوهش، این مقدار به طور قابل توجهی کاهش یافته است. بهبود عملکرد را می‌توان به عوامل متعددی، از جمله استفاده هم‌زمان از دو منبع تغذیه (انرژی خورشیدی و باتری پشتیبان)، بهینه‌سازی فرآیند انتقال حرارت با بهره‌گیری از هیت‌سینک مناسب، و کنترل هوشمند عملکرد المان‌های سرمایشی توسط ترموستات و تایمر نسبت داد.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، طراحی و ساخت یک یخچال خورشیدی قابل حمل مبتنی بر المان‌های ترموالکتریک و پنل‌های خورشیدی ارائه شد که قادر است دمای محیطی 28°C درجه سلسیوس را تا حدود 6°C درجه سلسیوس کاهش دهد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که سامانه حاضر در مقایسه با نمونه‌های مشابه، زمان کوتاه‌تری برای دستیابی به دمای کمتر از 5°C درجه سلسیوس نیاز دارد. این عملکرد بهینه را می‌توان به استفاده هم‌زمان از انرژی خورشیدی و باتری پشتیبان، بهینه‌سازی فرآیند انتقال حرارت با بهره‌گیری از هیت‌سینک مناسب،

- technology, *Journal of Energy Engineering Management*, Vol. 10, No. 1, pp. 112-121, 2020. (in Persian)
- [14] Yusof YW, Kassim M, Shuhaimi WA. Design and Analysis of Portable Solar Powered Refrigerator Unit. *In 2022 IEEE International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology (ICAET)*, Malaysia: IEEE, pp. 1-6, 2022.
- [15] Mak SH, Mei J, Cheng X, Cheng KE. Solar electric refrigerator truck development program. *7th International Conference on Power Electronics Systems and Applications-Smart Mobility, Power Transfer & Security (PESA)*, China: IEEE, pp. 1-4, 2017.
- [16] Rajaei M, Challasi K, Experimental study of the effect of pollution deposit on photovoltaic panels in open space, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 8, No. 15, pp. 13-20, 2020.
- [17] Wang D, Qi T, Liu Y, Wang Y, Fan J, Wang Y, Du H, A method for evaluating both shading and power generation effects of rooftop solar PV panels for different climate zones of China. *Solar Energy*, Vol. 205, No. 1, pp. 432-45, 2020.
- [18] Ostadzad AH, Solar energy and sustainable economic development in Iran, *Journal of Renewable and New Energies*, Vol. 11, No. 2, pp. 128-137, 2024. (in Persian)
- [19] Lubitz WD. Effect of manual tilt adjustments on incident irradiance on fixed and tracking solar panels. *Applied energy*, Vol. 88, No. 5, pp. 1710-9, 2011.
- [20] Rajaei M, Jalali M. Analysis and implementation of the solar tree by determining the optimal angle in Shiraz-Iran. *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*. Vol. 12, No. 1, pp. 95-107, 2022.
- [21] Rajaei M, Jalali M. Construction and analysis of smart solar bench with the optimal angle in four central cities of Iran. *Journal of Solar Energy Research*. Vol. 8, No. 1, pp. 1345-56, 2023.
- [21] Biswas O, Kandasamy P. Development and experimental investigation of portable solar-powered thermoelectric cooler for preservation of perishable foods. *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol. 30, No. 11, pp.1292-303. 2021.