

## طراحی و ساخت یک سیستم برودتی بهینه فتوولتاییک در حضور شبکه هوشمند با رویکرد بهینه‌سازی چند هدفه

رسول جوی زادگان<sup>(۱)</sup> - مهدی مهدویان<sup>(۲)</sup>

(۱) کارشناس ارشد - گروه مهندسی برق، واحد نائین، دانشگاه آزاد اسلامی، نائین، ایران

(۲) مربی - گروه مهندسی برق، واحد نائین، دانشگاه آزاد اسلامی، نائین، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۷/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۱

**خلاصه:** امروزه بهینه‌سازی در سیستم‌های قدرت یک ضرورت انکارناپذیر است. کاهش شدت مصرف انرژی در تجهیزات الکتریکی و افزایش راندمان و کارایی آنها، کاهش تلفات الکتریکی و بهبود پروفیل ولتاژ در شبکه قدرت از نمونه‌های کاربرد بهینه‌سازی در سیستم‌های قدرت می‌باشند. سیستم‌های برودتی مانند یخچالها و فریزرها می‌توانند در کنار به کارگیری به همراه سیستم‌های فتوولتاییک در شبکه قدرت عامل تعادل بخشی در عرضه و تقاضای انرژی الکتریکی باشند به طوری که مازاد انرژی را به صورت انرژی سرمایه‌گذاری در خود ذخیره کرده و در شرایط لازم اجازه دهند که انرژی تولیدی توسط سیستم فتوولتاییک به شبکه قدرت تزریق گردد. در این مقاله به طراحی و ساخت یک سیستم برودتی (یخچال) فتوولتاییک متصل به شبکه و تنظیم بهینه عملکرد آن پرداخته شده است. توابع هدف هزینه و دمای میانگین یخچال به عنوان دو هدف اصلی در نظر گرفته شده و با به کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مغلوب جوابهای پارتو به دست آمده و سپس با به کارگیری روش مدل جمع وزنی جواب نهایی انتخاب گردیده است. نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار متلب و همچنین نتایج پیاده‌سازی سخت‌افزاری طرح پیشنهادی در غالب پروژه ساخت هر دو کارایی و عملکرد بهینه طرح پیشنهادی را تایید می‌نمایند.

**کلمات کلیدی:** شبکه هوشمند، یخچال خورشیدی، قیمت‌گذاری دینامیکی برق، الگوریتم NSGA-II، مدل جمع وزنی

## Design and Implementation of an Optimal PV Refrigeration System in the Smart Grid Considering Multi-Objective Optimization

Rasool Javizadegan<sup>(1)</sup> - Mehdi Mahdavian<sup>(2)</sup>

(1) MSc - Electrical Department, Naein Branch, Islamic Azad University, Naein, Iran  
ras\_javizadegan@gmail.com

(2) Indicator - Electrical Department, Naein Branch, Islamic Azad University, Naein, Iran  
meh\_mahdavian@yahoo.com

### Abstract:

Today, optimization in power systems is an unavoidable necessity. Energy intensity reduction in electrical devices and enhancement of their efficiency and performance, electricity loss reduction and voltage profile improvement of the power grid are some instances of optimization usage in power systems. Refrigerated systems, such as refrigerators can, in addition to exploiting PV systems in a power grid, be part of the supply and demand of electrical energy, so that they store energy as thermal energy and, in the necessary conditions, allow energy to inject into the power grid by a photovoltaic system. In this paper, the design and construction of a photovoltaic refrigeration system connected to the network and its optimal performance is discussed. The objective cost and refrigerating temperature functions are considered as two main goals and the final answer is chosen by using the non-dominated sorting genetic optimization algorithm and then using the weighted sum model method. The simulation results with MATLAB software as well as the results of implementing the proposed system's hardware system in the project verify both the effectiveness of the proposed system.

**Index Terms:** Smart grid, solar refrigerator, electricity dynamic pricing, NSGA-II algorithm, sum weighted model

## ۱- مقدمه

سیستم برودتی فتوولتائیک ترکیبی از به کارگیری همزمان یک سیستم سرماساز الکتریکی به همراه یک سیستم تولید انرژی الکتریکی با به کارگیری سلولهای خورشیدی در شبکه قدرت می باشد. یخچالها از تجهیزات الکتریکی هستند که به طور دائم در شبکه برق قدرت به عنوان یک مصرف کننده با توان مصرفی به نسبت بالا متصل می باشند. امروزه به کارگیری سیستم های فتوولتائیک جهت تامین حداقل بخشی از توان الکتریکی مورد نیاز این تجهیزات به دلایل زیادی توجیه پذیر و مورد توجه می باشد. با آغاز به ورود سیستم برق قدرت از شبکه سنتی به شبکه هوشمند به کارگیری منابع تجدیدپذیر تولید انرژی الکتریکی به خصوص به صورت غیرمتمرکز اجتنابناپذیر است. در این میان سرعت رشد استفاده و بکارگیری سیستم های فتوولتائیک به دلیل کاهش روز به روز قیمت آنها و افزایش راندمان تولید آنها و در نتیجه مقرون به صرفه تر شدن استفاده از این سیستم ها به طور قابل ملاحظه ای رو به گسترش می باشد.

در شبکه هوشمند و با وجود قابلیت اندازه گیری دوطرفه توان در کنتورهای هوشمند متصل به شبکه امکان و فرصت خرید و فروش برق برای مصرف کنندگان و تولیدکنندگان خرد و متوسط پدید آمده است. این مزیت بزرگ در کنار قیمت گذاری دینامیکی و به لحظه برق در شبکه هوشمند ایجاد می کند که تجهیزات مصرفی در شبکه قدرت به سوی هوشمندسازی ارتقا یابند و بتوانند به غیر از نقش مصرف کنندگی در شبکه، نقش تولیدکنندگی نیز برعهده گرفته و از این سو به طور توأمان منافع زیادی را هم نصیب به کارگیرندگان این تجهیزات و هم نصیب شبکه برق هوشمند نمایند. یکی از مشکلات عمده پیش روی گسترش سیستم های فتوولتائیک قیمت بالای باتری ها در این سیستم ها و نیاز به تعویض آنها پس از گذر عمر مفید آنها می باشد که به دغدغه ای برای محققین و متخصصین در این عرصه تبدیل شده است. نکته قابل تامل آن است که مواد اولیه تولید سلولهای خورشیدی به وفور در طبیعت موجود است در حالی که مواد اولیه مورد نیاز برای تولید باتریهای سیستم های فتوولتائیک از محدودیت شدیدی رنج می برند و لذا بخش باتری به گلوگاهی در مسیر توسعه سیستم های فتوولتائیک تبدیل شده است. در راستای حل این مشکل ایده ذخیره سازی سرما (به عنوان نمونه عملیاتی یک یخچال نگهداری بستنی) می تواند جایگزین ذخیره سازی انرژی الکتریکی سیستم فتوولتائیک در باتری های گران قیمت شود. این خود یک جنبه نوآوری مهم در حوزه به کارگیری سیستم های فتوولتائیک در شبکه قدرت است.

بهینه سازی عملکرد تجهیز مورد تحقیق در این مقاله از اهمیت بالایی برخوردار است. بهینه سازی منفعت دارندگان اینگونه تجهیزات مهمترین هدف در این راستا است که می تواند به تشویق بیشتر به کارگیرندگان این تجهیزات بینجامد. هدف اصلی آن است که سیستم کنترل این تجهیز توانایی آن را داشته باشد که تشخیص دهد دقیقاً چه زمانهایی باید انرژی تولیدی توسط سیستم فتوولتائیک به شبکه تزریق گردد و چه زمانهایی در اختیار یخچال قرار گیرد تا به انرژی سرمایشی تبدیل شود.

در این بین بدیهی است که محدودیتهایی هم وجود دارند. به عنوان مثال دمای داخل یخچال نباید از مقادیر مجاز کمینه و بیشینه تعیین شده تجاوز کند. از محدودیتهای دیگر آن است که انرژی سرمایشی مازاد در صورت وجود، قابلیت تبدیل به انرژی الکتریکی را نداشته و لذا این یک محدودیت و ضعف در مقابل به کارگیری باطری در سیستم های فتوولتائیک می باشد. از این رو در صورت تنظیم بهینه تجهیز می توان تا حد امکان از بروز چنین مشکلاتی جلوگیری نمود.

## ۱-۱- مروری بر منابع

در مرجع [۱]، بررسی تجربی یک سیستم چند منظوره یخچال فتوولتائیک مورد تحقیق قرار گرفته است. در این مقاله بر لزوم استفاده از یخچالهای برقی فتوولتائیک در مناطق دوردست که یا به انرژی الکتریکی شبکه قدرت دسترسی ندارند و یا نقاطی از شبکه قدرت که امکان تامین توان الکتریکی با کیفیت لازم را برای چنین مصرف کنندگانی ندارد تاکید شده است. در این مطالعه، یک سیستم یخچال چند منظوره که توسط پنل فتوولتائیک طراحی شده است، در دانشگاه هاران واقع در جنوب شرقی ترکیه مورد آزمایش قرار گرفته است. سیستم یخچال فتوولتائیک مستقل از شبکه برق محلی است. کارایی روزانه و فصلی یخچال فتوولتائیک به صورت آزمایشی مورد بررسی قرار گرفته است.

در مرجع [۲]، ارزیابی عملکرد تجربی یک سیستم یخچال PV مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است. در این آزمایش تجربی یک یخچال ۵۰ لیتری، ۷۶ واتی به همراه یک پنل خورشیدی ۳۰۰ واتی، یک باتری سرب اسیدی ۸۰ آمپر ساعتی، یک مبدل به عنوان درایور برای موتور یخچال و یک دستگاه کنترل شارژ باتری مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین دمای داخل یخچال روی ۱ درجه سانتیگراد تنظیم گردیده است.

در مرجع [۳]، بر روی خصوصیت یابی و مانیتورینگ یک یخچال پایه فتوولتائیک خود ساختار مطالعه شده است. در این مقاله یک کیت یخچال خورشیدی PV شامل یک فضای یخچال، یک واحد ذخیره سازی و یک پنل فتوولتائیک به همراه واحد کنترل آن به صورت تجربی پیاده سازی و تست شده است.

برای طراحی یخچال، یک مدل حرارتی ساده سازی شده پیشنهاد شده است. همچنین در این تحقیق یک نمونه اولیه در ابعاد کوچک، واقعی سازی شده و تست آن در محیط آزمایشگاهی انجام شده است. در این تحقیق نشان داده شده است که ماژول اصلی یخچال فتوولتائیک با ظرفیت خالص ۲۵۰ لیتر و ظرفیت ذخیره یخ با ظرفیت ۱۲/۵ کیلوگرم قادر به حفظ دمای داخلی زیر ۱۰ درجه سانتیگراد حتی در شرایط مرزی بحرانی می باشد.

در مرجع [۴]، تجهیزات ذخیره سرما برای مجتمع سازی شبکه هوشمند مورد توجه و مطالعه قرار گرفته است. ذخیره سازی سرما پتانسیل بکارگیری به عنوان بار کنترل پذیر در محیط شبکه هوشمند را دارد. این تحقیق بر روی توسعه ذخیره سرمای مناسب در شبکه قدرت هوشمند متمرکز شده است. استفاده از ذخیره سازی سرما می تواند به عنوان بار قابل کنترل در یک محیط شبکه هوشمند عمل کند.

همچنین چالشهای موجود و پیش رو برای شبکه‌های توزیع هوشمند مورد بررسی قرار گرفته است و جهت گیری‌های تحقیق و مطالعه آینده بر روی شبکه‌های توزیع هوشمند پیشنهاد شده است.

در مرجع [۱۱]، مشکل قیمت‌گذاری پویای برق در یک بازار خرده‌فروشی مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق، قیمت‌گذاری ساعتی روز پیش رو برای پاسخ تقاضای توزیع در محیطهای پویا و غیرمعلوم مورد مطالعه قرار گرفته است. طرح پیشنهادی این مقاله برای قیمت‌گذاری، استرس مصرف‌کننده از عدم قیمت‌گذاری قطعی را کاهش می‌دهد و به بازار خرده‌فروشی اجازه می‌دهد تا قیمت خرده‌فروشی برق را منطبق با شرایط تعیین کند. جنبه نوآوری این تحقیق، معاوضه بین مازاد مصرف مصرف‌کنندگان و سود خرده‌فروشی در بازار برق می‌باشد.

در مرجع [۱۲]، مدل‌سازی و کنترل بهینه یک سیستم خنک‌سازی هوای هیبریدی فتوولتائیک مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا یک مجموعه خنک‌سازی هوا به همراه پنل‌های خورشیدی و واحد کنترل مورد طراحی و پیاده‌سازی عملی قرار گرفته است. یک مدل دینامیکی برای اجزاء سیستم در ابتدا با استفاده از قوانین بقای ماده و انرژی معرفی شده است. طراحی انجام شده به طور امیدوارکننده‌ای بهبود کارایی سیستم خنک‌سازی را در کنار راندمان انرژی بالا به همراه دارد.

در مرجع [۱۳]، پیکربندی بهینه برای طراحی سیستم فتوولتائیک قائم بر خود مورد تحقیق قرار گرفته است. در این تحقیق، یک مدل استاندارد بر اساس تعادل انرژی روزانه برای تعیین اندازه‌گیری سیستم، به کار گرفته شده و روشهای عددی بر پایه شبیه‌سازی‌های جزئیات رفتار سیستم فتوولتائیک مورد استفاده قرار گرفته است.

در مرجع [۱۴]، طراحی سیستم سرماسازی فتوولتائیک مورد مطالعه قرار گرفته است. در این تحقیق یک سیستم یخچال به همراه دو واحد خورشیدی که هر کدام ۳۶ سلول دارند طراحی، تولید و توسعه پیدا کرده است. در این مقاله یک مرور نظام‌مند با توجه به اهمیت انرژی خورشیدی ارائه شده است. نتایج آزمایش فرآیندهای شارژ و دشارژ برای باتری بر روی ولتاژ نشان می‌دهند که کارایی سیستم یخچال خورشیدی مورد مطالعه به طور قابل توجهی مناسب و مورد توجه است.

## ۱-۲- نتیجه گیری کوتاه

ایده ذخیره‌سازی سرما به وسیله تجهیزات سرمایشی در بسیاری از مطالعات مورد توجه قرار گرفته است. قیمت‌گذاری پویای برق در شبکه قدرت و مدیریت سمت تقاضا در شبکه هوشمند و نیز توسعه روز افزون به کارگیری سیستم‌های فتوولتائیک در تولید توان الکتریکی در کنار توجه به ایده مذکور می‌تواند به ارائه یک نوآوری منجر گردد. طراحی و ساخت یک یخچال فتوولتائیک با رویکرد بهینه‌سازی چند هدفه نوآوری مذکور بر اساس مطالعات انجام گرفته در بخش مقدمه می‌باشد. ادامه این مقاله بر اساس چهار بخش دیگر پیکربندی شده است. بخش (۲) به ارائه مدل پیشنهادی مورد مطالعه این مقاله پرداخته است. در بخش (۳) نتایج شبیه‌سازی‌ها و در بخش (۴) پیاده‌سازی عملی طرح پیشنهادی ارائه شده‌اند. در نهایت قسمت نتیجه‌گیری در بخش (۵) ارائه شده است.

در مرجع [۵]، مدل مفهومی ذخیره‌سازی سرما در سردخانه به همراه تولید انرژی الکتریکی فتوولتائیک در یک شبکه هوشمند مورد تحقیق قرار گرفته است.

در مرجع [۶]، بررسی هنر به کارگیری تجهیزات ذخیره‌ساز حرارتی (به خصوص سرمایشی) در مدیریت سمت تقاضا در شبکه برق هوشمند مورد مطالعه قرار گرفته است. بر اساس تعریف، مدیریت سمت تقاضا در شبکه برق هوشمند ابزاری است که بر روی بهره‌وری اقتصادی بارهای الکتریکی جهت بهینه‌سازی کامل شبکه قدرت از تولید تا مصرف تمرکز می‌نماید. اهمیت بالقوه برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا بر آن است که بیند چه مقدار از انرژی‌های نو مانند سیستم‌های فتوولتائیک قادر به پیوند به مدیریت سمت تقاضا می‌باشند.

در مرجع [۷]، تحقیق بر روی موانع و پتانسیلهای مدیریت بار برای سیستم‌های سرمایشی (یخچالها) مورد انجام قرار گرفته است. در مواجهه با رشد روزافزون و چشمگیر به کارگیری انرژی‌های نو به خصوص سیستم‌های فتوولتائیک در شبکه برق قدرت، تطبیق مصرف توان مکمل گسترش شبکه قدرت و تنظیم نیروگاههای توان و ذخیره‌سازی فیزیکی انرژی الکتریکی می‌باشد. در سمت تقاضا در شبکه قدرت حضور تجهیزات سرمایشی برقی یک اینرسی حرارتی قوی جهت ذخیره موقت انرژی در راستای انجام تکنیکهای جابجایی و تنظیم مصرف سیستم‌های سرمایشی در شبکه قدرت را ایجاد می‌کنند. نتایج این تحقیق به خوبی قابلیت به کارگیری ذخیره‌سازی سرما را به عنوان راه حلی مناسب جهت مدیریت مصرف در سمت تقاضا نشان می‌دهد.

در مرجع [۸]، بر روی بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های ذخیره یخ در مدیریت بار الکتریکی از طریق فرآیند روش اعتباری تحقیق شده است. تهویه مطبوع با ذخیره‌سازی یخ روشی است که برای ذخیره انرژی حرارتی از یخ استفاده می‌کند. از مزایای جایگزینی سیستم‌های تهویه مطبوع موجود با نوع بر پایه ذخیره این است که اضافه بار از زمان‌های اوج (پیک بار) به زمانهای غیر اوج منتقل گردد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که به کارگیری سیستم‌های تهویه با ذخیره‌سازی یخ می‌تواند به انتقال اضافه بار از ساعات پیک به ساعات غیر پیک و یکنواخت‌تر شدن منحنی بار شبکه برق قدرت کمک نماید.

در مرجع [۹]، یک طرح قیمت‌گذاری تعاملی بلادرنگ برای بیشینه کردن رفاه اجتماعی بازیگران در برنامه پاسخ تقاضای بلادرنگ در شبکه برق هوشمند پیشنهاد شده است. در این راستا، ابتدا زیر مسائل مصرف‌کنندگان برای تعیین پاسخهای تقاضای بهینه به قیمت برق اعلامی به خرده‌فروشان برق مورد حل قرار گرفته است. برای به دست آوردن پاسخ تقاضای بهینه، یک تابع ریاضی جامع بر اساس ترکیب پنج تابع تجهیزات مصرف‌کنندگان توسعه داده شده است. روش پیشنهادی در این تحقیق با توجه به توابع هزینه‌های خرده‌فروشی متنوع و رفتار مصرف‌کنندگان مورد ارزیابی و سنجش قرار گرفته است.

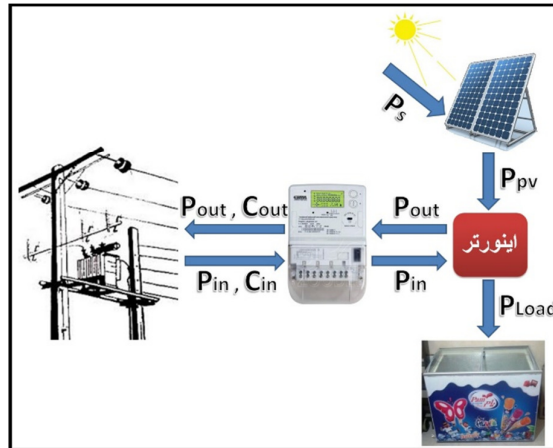
در مرجع [۱۰]، مدیریت بازار برق با توجه به قیود سیستم قدرت در شبکه توزیع هوشمند مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. در این تحقیق به بررسی جامع شبکه‌های توزیع هوشمند پرداخته شده است.

## ۲- مدلسازی سیستم پیشنهادی

### ۱-۲ مدل پیشنهادی

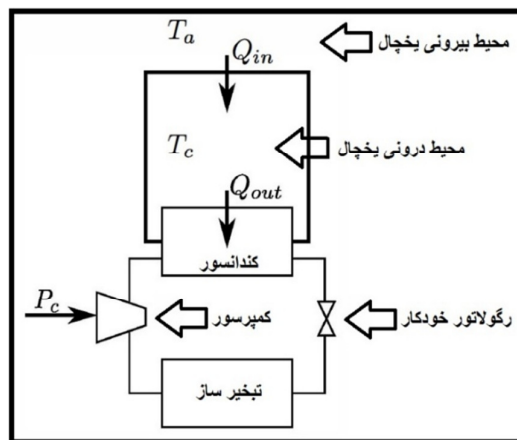
شکل (۱) شمای مدل پیشنهادی در این تحقیق را برای سیستم یخچال فتوولتائیک متصل به شبکه نشان می‌دهد. در این شکل  $P_s$  توان تابشی خورشید،  $P_{pv}$  توان الکتریکی تولیدی پنل‌های خورشیدی،  $P_{Load}$  توان

تزریقی به بار (یخچال نگهداری بستنی)،  $P_{in}$  توان تزریقی از شبکه به سیستم یخچال فتوولتائیک،  $P_{out}$  توان تزریقی از سیستم فتوولتائیک به شبکه،  $C_{in}$  هزینه برق ورودی از شبکه به سیستم یخچال فتوولتائیک و  $C_{out}$  درآمد برق خروجی از سیستم فتوولتائیک به شبکه برق هوشمند می‌باشند.



شکل (۱): مدل پیشنهادی برای یخچال فتوولتائیک متصل به شبکه هوشمند

Fig. (1): Proposed model for photovoltaic refrigerator connected to smart grid



شکل (۲): مدل مفهومی ساده برای یخچال [۵]

Fig. (2): Simple conceptual model for refrigerator

## ۲-۲ مدلسازی سیستم برودتی الکتریکی

شکل (۲) نمایش یک مدل ساده برای یخچال نگهداری بستنی می‌باشد. در این مدل  $T_a$  دمای محیط بیرونی ذخیره‌ساز سرما،  $T_c$  دمای محیط داخلی ذخیره‌ساز سرما،  $Q_{in}$  جریان حرارتی ورودی به محیط ذخیره‌ساز سرما،  $Q_{out}$  جریان حرارتی خروجی از محیط ذخیره‌ساز سرما و  $P_c$  توان سرمایشی سیستم می‌باشد.

فرمول تعادل انرژی در یخچال در رابطه (۱) آمده است که در این رابطه  $C_p$  ظرفیت سرمایشی نهایی محیط داخلی یخچال است. مقدار نفوذ حرارتی به یخچال را می‌توان با رابطه (۲) تقریب زد. در این رابطه  $U$  ضریب انتقال حرارت و  $A$  سطح بیرونی یخچال است. مقدار نفوذ حرارتی از یخچال به بیرون را می‌توان با رابطه (۳) تقریب زد که  $\beta$  در اینجا

ضریب راندمان می‌باشد. با جایگذاری روابط (۲) و (۳) در رابطه (۱)، رابطه (۴) حاصل می‌گردد. این رابطه را می‌توان به صورت روابط (۵) تا (۸) نوشت که ضرایب  $a$  و  $b$  تحت روابط (۹) و (۱۰) تعریف می‌شوند. شایسته به ذکر است که روابط (۱) تا (۱۰) از مرجع [۵] اقتباس شده‌اند.

$$C_p \frac{dT_c}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (1)$$

$$Q_{in} = U \cdot A (T_a - T_c) \quad (2)$$

$$Q_{out} = \beta P_c \quad (3)$$

$$C_p \frac{dT_c}{dt} = U A (T_a - T_c) - \beta P_c \quad (4)$$

$$b = \frac{\beta \Delta t}{C_p} \quad (10)$$

با توجه به معادلات بالا و برای به دست آوردن ضرایب این معادلات اقدام به تست یخچال مورد مطالعه در این تحقیق در دو حالت بی باری (خالی بودن یخچال) و بارداری (یخچال پر از بستنی) گردیده است. نتایج آزمایشهای عملی در جداول (۱) و (۲) نشان داده شده‌اند. همچنین شکل‌های (۳) و (۴) به ترتیب منحنی زمان-دما یخچال را در حالتی که یخچال روشن و پر از بستنی (بار کامل) و با توان نامی کار می‌کند و در حالتی که با بار کامل خاموش می‌باشد را نشان می‌دهند.

$$C_p \frac{\Delta T_c}{\Delta t} = UA (T_a - T_c) - \beta P_c \quad (5)$$

$$C_p \frac{[T_c(k+1) - T_c(k)]}{\Delta t} = UA (T_a(k) - T_c(k)) - \beta P_c(k) \quad (6)$$

$$[T_c(k+1) - T_c(k)] = \frac{UA \Delta t}{C_p} (T_a(k) - T_c(k)) - \frac{\beta \Delta t}{C_p} P_c(k) \quad (7)$$

$$T_c(k+1) = (1-a) T_c(k) + a T_a(k) - b P_c(k) \quad (8)$$

$$a = \frac{U A \Delta t}{C_p} \quad (9)$$

جدول (۱): تست دمایی یخچال در حالت روشن و بارداری

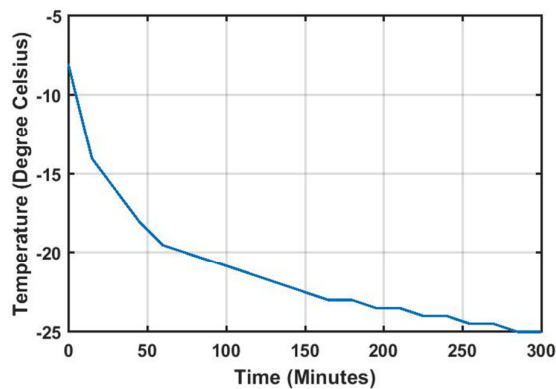
Table (1): Thermal test of refrigerator in ON and full load mode

زمان (دقیقه)	۰	۱۵	۳۰	۴۵	۶۰	۷۵	۹۰	۱۰۵	۱۲۰
دما (°C)	-۸	-۱۴	-۱۶	-۱۸	-۱۹/۵	-۲۰	-۲۰/۵	-۲۱	-۲۱/۵
زمان (دقیقه)	۱۳۵	۱۵۰	۱۶۵	۱۸۰	۱۹۵	۲۱۰	۲۲۵	۲۴۰	۲۵۵
دما (°C)	-۲۲	-۲۲/۵	-۲۳	-۲۳	-۲۳/۵	-۲۳/۵	-۲۴	-۲۴	-۲۴/۵
زمان (دقیقه)	۲۷۰	۲۸۵	۳۰۰						
دما (°C)	-۲۴/۵	-۲۵	-۲۵						

جدول (۲): تست دمایی یخچال در حالت خاموش و بارداری

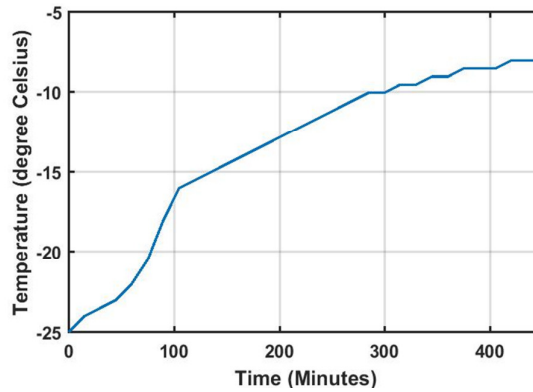
Table (2): Thermal test of refrigerator in OFF and full load mode

زمان (دقیقه)	۰	۱۵	۳۰	۴۵	۶۰	۷۵	۹۰	۱۰۵	۱۲۰
دما (°C)	-۲۵	-۲۴	-۲۳/۵	-۲۳	-۲۲	-۲۰/۵	-۱۸	-۱۶	-۱۵/۵
زمان (دقیقه)	۱۳۵	۱۵۰	۱۶۵	۱۸۰	۱۹۵	۲۱۰	۲۲۵	۲۴۰	۲۵۵
دما (°C)	-۱۵	-۱۴/۵	-۱۴	-۱۳/۵	-۱۳	-۱۲/۵	-۱۲	-۱۱/۵	-۱۱
زمان (دقیقه)	۲۷۰	۲۸۵	۳۰۰	۳۱۵	۳۳۰	۳۴۵	۳۶۰	۳۷۵	۳۹۰
دما (°C)	-۱۰/۵	-۱۰	-۱۰	-۹/۵	-۹/۵	-۹	-۹	-۸/۵	-۸/۵
زمان	۴۰۵	۴۲۰	۴۳۵	۴۵۰	۴۶۵	۴۸۰	۴۹۵	۵۱۰	۵۲۵
دما	-۸/۵	-۸	-۸	-۸	-۷/۵	-۷/۵	-۷/۵	-۷	-۷



شکل (۳): منحنی زمان-دما یخچال (حالت روشن و بار کامل)

Fig. (3): Temperature-Time curve of refrigerator (On and full load mode)



شکل (۴): منحنی زمان-دما یخچال

(حالت خاموش و بار کامل)

Fig. (4): Temperature-time curve of refrigerator (OFF and full load mode)

نورسرخ لترون LX-1128 توان تابشی خورشیدی در بیستم اردیبهشت ماه ۱۳۹۶ در شهر اصفهان و در یک روز کاملاً آفتابی اندازه‌گیری و نتایج در جدول (۳) آمده است. مدل ریاضی برای این منحنی توسط رابطه (۱۳) قابل بیان می‌باشد.

(۱۳)

$$SP(\text{time}) = \begin{cases} \sum_{n=1}^5 (a_n \sin(b_n \text{time} + c_n)) & 6 < \text{time} < 20 \\ 0 & \text{time} < 6 \text{ OR } \text{time} > 20 \end{cases}$$

که در این رابطه مقادیر مجهول به شرح زیر هستند.

$$a_1 = 3995, b_1 = 0.2126, c_1 = -1.208, a_2 = 54.67, b_2 = 0.3042, c_2 = -1.403, a_3 = 264.1, b_3 = 1.006, c_3 = -1.82, a_4 = 216.3, b_4 = 1.178, c_4 = -0.8156, a_5 = 58.82, b_5 = 2.205, c_5 = -1.331$$

در قسمت سیستم فتوولتائیک از پنل ۲۵۰ واتی مدل YL250Wp ساخت شرکت Yingli استفاده شده است. بر اساس کاتالوگ فنی این پنل مقدار تولید توان در تابشهای مختلف خورشیدی در جدول (۴) آمده است. رابطه بین این مقادیر را با اغماض می‌توان خطی در نظر گرفت و آن را بر اساس رابطه (۱۴) مدل نمود.

$$P_{pv} = \begin{cases} 0.2595 SP - 7.9 & 200 \leq SP \leq 1000 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

با استفاده از نرم‌افزار متلب یک مدل ساده برای منحنی زمان-دما یخچال (حالت روشن و بار کامل) توسط رابطه (۱۱) قابل بیان می‌باشد.

$$Temp_{on}(t) = \frac{p_1 t^2 + p_2 t + p_3}{(t + q_1)} \quad (11)$$

که در این رابطه مقادیر مجهول به شرح زیر هستند.

$$p_1 = -0.01134, p_2 = -23.12, p_3 = -202.7, q_1 = 25.22$$

همچنین مدل ریاضی برای منحنی زمان-دما یخچال (حالت خاموش و بار کامل) توسط رابطه (۱۲) قابل بیان می‌باشد.

$$Temp_{off}(t) = \sum_{n=1}^8 (a_n \sin(b_n t + c_n)) \quad (12)$$

که در این رابطه مقادیر مجهول به شرح زیر هستند.

$$a_1 = 26.91, b_1 = 0.004666, c_1 = -2.217, a_2 = 13.52, b_2 = 0.008291, c_2 = -0.1869, a_3 = 0.8601, b_3 = 0.02416, c_3 = -1.54, a_4 = 0.4531, b_4 = 0.03961, c_4 = 3.145, a_5 = 0.173, b_5 = 0.08203, c_5 = -0.7224, a_6 = 0.1109, b_6 = 0.09322, c_6 = -0.9278, a_7 = -0.2383, b_7 = 0.05312, c_7 = -1.1, a_8 = 0.2134, b_8 = 0.06996, c_8 = 0.1535.$$

### ۳-۲- مدلسازی سیستم فتوولتائیک

مدلسازی سیستم فتوولتائیک در این تحقیق شامل مدلسازی دو بخش تابش خورشیدی و سیستم پنل خورشیدی می‌باشد. سیستم پنل خورشیدی شامل پنلهای فتوولتائیک و اینورتر می‌باشد. با صرفنظر کردن از سایه‌های جزئی منحنی تابش خورشید با استفاده از یک دستگاه

جدول (۳): مقادیر اندازه‌گیری شده توان تابشی خورشید در تاریخ بیستم اردیبهشت ۱۳۹۶ شهر اصفهان  
Table (3): Measured values of solar irradiation power on 10 May 2017 in Isfahan city

زمان (ساعت)	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
تابش (وات بر مترمربع)	۰	۱۲۰۰	۲۰۰۰	۲۸۰۰	۳۳۰۰	۳۶۰۰	۳۸۵۰	۴۰۵۰	۳۸۰۰
زمان (ساعت)	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰			
تابش (وات بر مترمربع)	۳۶۵۰	۳۳۵۰	۲۸۰۰	۲۰۵۰	۱۰۰۰	۰			

جدول (۴): مقادیر توان خروجی پنل بر اساس میزان توان خورشیدی تابیده شده به آن

Table (4): Panel output power values based on irradiated solar power

توان تابشی خورشید (وات بر مترمربع)	۲۰۰	۴۰۰	۶۰۰	۸۰۰	۱۰۰۰
توان الکتریکی تولیدی پنل (وات)	۴۴	۹۵	۱۴۵	۲۰۰	۲۵۰

#### ۲-۴- مدل‌سازی قیمت برق در شبکه هوشمند

با توجه به اینکه کنترلر برق مورد استفاده در این تحقیق از نوع سه تعرفه‌ای و تجاری بوده است لذا مدل قیمت‌گذاری زمان استفاده<sup>۱</sup> بر اساس قیمت‌های رایج سال ۱۳۹۶ در ایران مدل‌سازی شده است. جدول (۵) قیمت برق در ساعات مختلف را نشان می‌دهد. رابطه بین این مقادیر بر اساس رابطه (۱۵) مدل شده است. با توجه به مبحث مالیات بر ارزش افزوده و عوارض قانونی فروش در این تحقیق قیمت برق تولیدی سیستم فتوولتاییک ۲۰ درصد کمتر از قیمت برق شبکه قیمت‌گذاری گردیده است.

جدول (۵): قیمت برق بر اساس قانون سه تعرفه ای در ایران سال ۱۳۹۶  
Table (5): Electricity price based on 3-tariff regulation in 2017 Iran

زمان (ساعت)	۸-۰	۲۰-۸	۲۴-۲۰
قیمت (تومان)	۱۱۴	۲۲۸	۴۵۶

#### ۳- نتایج شبیه‌سازی

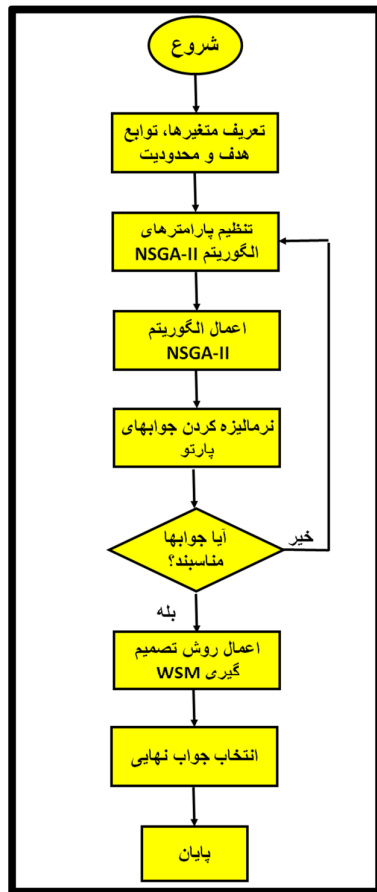
در این قسمت ابتدا به بیان و تعیین توابع هدف و محدودیت پرداخته شده است. رابطه (۱۵) معادله ریاضی تابع هدف هزینه سیستم را به عنوان یکی از دو تابع هدف مورد نظر در این مطالعه بیان می‌نماید. این تابع در حقیقت تفاضل هزینه کل برای انرژی مورد نیاز در سرمایش محیط یخچال و درآمد کل ناشی از فروش و یا استفاده از انرژی الکتریکی تولیدی توسط سیستم فتوولتاییک مورد نظر می‌باشد. روابط (۱۶) و (۱۷) معادلات حاکم بر هزینه و درآمد سیستم را نشان می‌دهند. روابط (۱۸) و (۱۹) معادلات حاکم بر پارامترهای دخیل در تابع هدف اول را بیان می‌نمایند. در ادامه معادله (۲۰) تابع هدف دوم که میانگین دمای محیط یخچال می‌باشد را نشان می‌دهد. معادله (۲۱) بیانگر تابع محدودیت سیستم می‌باشد. شکل (۵) روند نمای روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. شکل (۶) همه جوابهای ممکن را در فضای جواب مسئله مورد مطالعه نشان می‌دهد. در ادامه الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمغلوب<sup>۲</sup> برای یافتن جوابهای جبهه پارتو<sup>۳</sup> بر اساس مقادیر تنظیمی مطابق جدول (۶) در محیط متلب به کار گرفته شده و شکل (۷) نتایج حاصل از شبیه‌سازی در این رابطه را نشان می‌دهد.

جهت تعیین جواب نهایی از میان جوابهای پارتو از روش مدل جمع وزنی<sup>۴</sup> که یکی از رایج‌ترین و پرکاربردترین روشهای تصمیم‌گیری در فضای جوابهای پارتو می‌باشد استفاده شده است. روابط (۲۲) و (۲۳) معادلات حاکم بر روش مدل جمع وزنی را نشان می‌دهند. با توجه به اینکه مقادیر توابع هدف دارای واحدهای متفاوت می‌باشند بنابراین جهت استفاده از روش مدل جمع وزنی نیاز به نرمالیزه کردن مقادیر توابع هدف می‌باشد. شایان به ذکر است که در این مطالعه اولویتی بین توابع هدف مسئله مورد مطالعه در نظر گرفته نشده است و بنابراین مقدار ضرایب رابطه (۲۳) یعنی  $\alpha$  و  $\beta$  هر کدام ۰/۵ قرار داده شده‌اند. شایسته به ذکر است که در روابط مذکور  $Time_{Ref-off}$  و  $Time_{Ref-on}$

ترتیب زمانهای روشن و خاموش بودن یخچال در طول یک شبانه‌روز می‌باشند. همچنین  $\Pi_1$  و  $\Pi_2$  به ترتیب تعداد بار روشن و خاموش شدن یخچال در طول یک شبانه‌روز می‌باشند. جدول (۷) مقادیر توابع هدف برای جوابهای جبهه پارتو حاصل از الگوریتم NSGA-II، مقادیر توابع هدف نرمالیزه شده و نهایتاً مقادیر حاصل برای تابع هدف روش مدل جمع وزنی را نشان می‌دهند.

جدول (۶): پارامترهای تنظیمی الگوریتم NSGA-II  
Table (6): NSGA-II algorithm tuned parameters

نوع پارامتر	مقدار پارامتر
تعداد جمعیت	۳۰
تعداد نسل	۱۰۰
ضریب تقاطع	۰/۸
ضریب جهش	۰/۱۵



شکل (۵): روند نمای روش پیشنهادی

Fig. (5): Flowchart of the proposed method

$$\text{Objective Function } 1 = F_{\text{obj } 1} = \text{Cost} - \text{Income} \quad \text{Toman} \quad (15)$$

$$\text{Cost} = \frac{1}{60 * 1000} * \begin{cases} \sum_{i=1}^{n_1} \text{Time}_{\text{Ref-on}}(i) * (700 - P_{\text{pv}}(i)) * C_{\text{out}}(i) & 350 \leq P_{\text{pv}} \\ \sum_{i=1}^{n_2} \text{Time}_{\text{Ref-on}}(i) * (350 - 0.2 * P_{\text{pv}}(i)) * C_{\text{in}}(i) & 0 \leq P_{\text{pv}} \leq 350 \end{cases} \quad \text{Toman} \quad (16)$$

$$\text{Income} = \frac{1}{60 * 1000} * \sum_{j=1}^m \text{Time}_{\text{Ref-off}}(j) * P_{\text{pv}} * C_{\text{out}}(j) \quad \text{Toman} \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^n \text{Time}_{\text{Ref-on}}(i) + \sum_{j=1}^m \text{Time}_{\text{Ref-off}}(j) = 1440 \quad \text{Minutes} \quad (18)$$

$$n_1 + n_2 = n \quad (19)$$

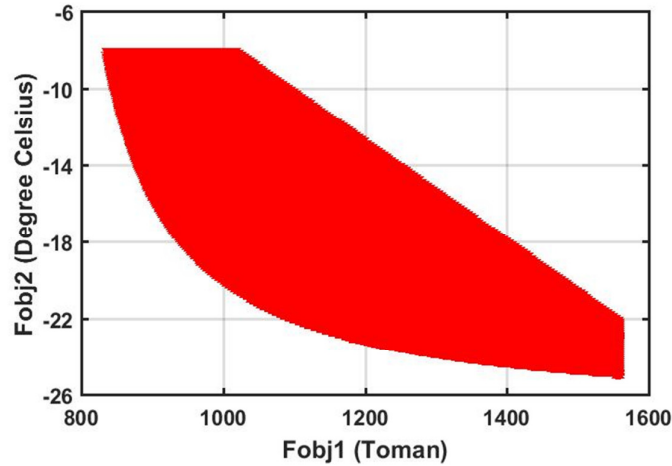
$$F_{\text{obj } 2} = \text{Average Temperature of Refrigerator} =$$

$$\frac{1}{2} \left( \int_{t=0}^{t=\text{Time}_{\text{Ref-on}}} \text{Temp}_{\text{on}}(t).dt + \int_{t=0}^{t=\text{Time}_{\text{Ref-off}}} \text{Temp}_{\text{off}}(t).dt \right) \quad \text{°C} \quad (20)$$

$$\text{Constraint Function} \quad -25 \text{°C} \leq \text{Temp}_{\text{Ref}} \leq -8 \text{°C} \quad (21)$$

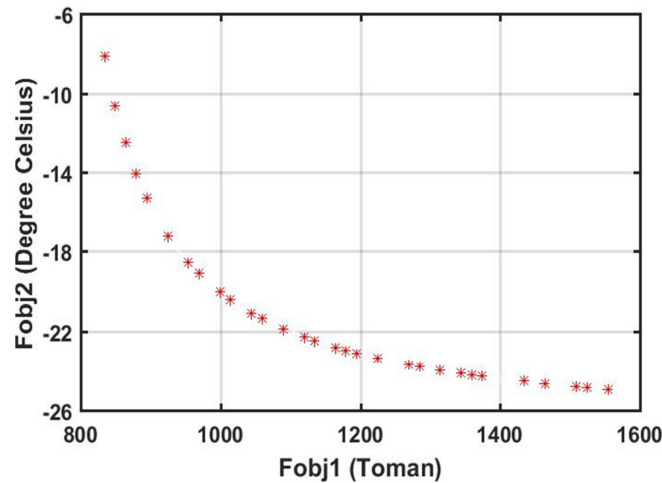
$$F_{\text{obj}}^{\text{WSM}} = \alpha * \left( \frac{F_{\text{obj } 1}}{F_{\text{obj } 1}^{\text{max}}} \right) + \beta * \left( \frac{F_{\text{obj } 2}}{F_{\text{obj } 2}^{\text{max}}} \right) \quad (22)$$

$$\alpha + \beta = 1 \quad (23)$$



شکل (۶): تمام جوابهای ممکن (فضای جواب) برای مسئله مورد مطالعه

Fig. (6): All possible solutions (solution space) for the problem study



شکل (۷): جوابهای پارتو (۳۰ جواب بهینه) حاصل از به کارگیری الگوریتم NSGA-II در مسئله مورد مطالعه

Fig. (7): Pareto solutions (30 optimum solution) resulted of using NSGA-II algorithm in the problem study



جدول (۷): مقادیر توابع هدف، مقادیر نرمالیزه شده و مقادیر محاسبه شده برای روش مدل جمع وزنی

Table (7): Values of objective functions, normalized values and calculated values for weighted sum model

شماره جواب	(Fobj <sub>1</sub> ) هزینه (تومان)	(Fobj <sub>2</sub> ) متوسط دما (°C)	(Fobj <sub>1</sub> / Fobj <sub>1max</sub> )	(Fobj <sub>2</sub> / Fobj <sub>2max</sub> )	Fobj <sup>WSM</sup>
۱	۸۳۴	- ۸/۱	۰.۵۳۶۷	۱	۰/۷۶۸۳
۲	۸۵۰	- ۱۰/۶	۰/۵۴۷	۰/۷۶۴۲	۰/۶۵۵۶
۳	۸۶۳	- ۱۲/۵	۰/۵۵۵۳	۰/۶۴۸	۰/۶۰۱۷
۴	۸۷۹	- ۱۴	۰/۵۶۵۶	۰/۵۷۸۶	۰/۵۷۲۱
۵	۸۹۵	- ۱۵/۲	۰/۵۷۵۹	۰/۵۲۲۹	۰/۵۵۴۴
۶	۹۲۳	- ۱۷/۱	۰/۵۹۴	۰/۴۷۳۷	۰/۵۳۳۸
۷	۹۵۴	- ۱۸/۵	۰/۶۱۳۹	۰/۴۳۷۸	۰/۵۲۵۹
۸	۹۷۱	- ۱۹/۱	۰/۶۲۴۸	۰/۴۲۴۱	۰/۵۲۴۴
۹	۱۰۰۱	- ۲۰/۱	۰/۶۴۴۱	۰/۴۰۳	۰/۵۲۳۵
۱۰	۱۰۱۴	- ۲۰/۴	۰/۶۵۲۵	۰/۳۹۷۱	۰/۵۲۴۸
۱۱	۱۰۴۳	- ۲۱	۰/۶۷۱۲	۰/۳۸۷۵	۰/۵۲۸۵
۱۲	۱۰۵۷	- ۲۱/۲	۰/۶۸۰۲	۰/۳۸۲۱	۰/۵۳۱۱
۱۳	۱۰۹۲	- ۲۱/۹	۰/۷۰۲۷	۰/۳۶۹۹	۰/۵۳۶۳
۱۴	۱۱۱۸	- ۲۲/۲	۰/۷۱۹۴	۰/۳۶۴۹	۰/۵۴۲۱
۱۵	۱۱۳۶	- ۲۲/۵	۰/۷۳۱	۰/۳۶	۰/۵۴۵۵
۱۶	۱۱۶۴	- ۲۲/۸	۰/۷۴۹	۰/۳۵۵۳	۰/۵۵۲۱
۱۷	۱۱۸۱	- ۲۲/۹	۰/۷۶	۰/۳۵۳۷	۰/۵۵۶۹
۱۸	۱۱۹۳	- ۲۳	۰/۷۶۷۷	۰/۳۵۲۲	۰/۵۵۹۹
۱۹	۱۲۲۵	- ۲۳/۳	۰/۷۸۸۳	۰/۳۴۷۶	۰/۵۶۸
۲۰	۱۲۶۹	- ۲۳/۶	۰/۸۱۶۶	۰/۳۴۳۲	۰/۵۷۹۹
۲۱	۱۲۸۴	- ۲۳/۷	۰/۸۲۶۳	۰/۳۴۱۸	۰/۵۸۴
۲۲	۱۳۱۴	- ۲۳/۹	۰/۸۴۵۶	۰/۳۳۸۹	۰/۵۹۲۳
۲۳	۱۳۴۳	- ۲۴	۰/۸۶۴۲	۰/۳۳۷۵	۰/۶۰۰۹
۲۴	۱۳۶۱	- ۲۴/۲	۰/۸۷۵۸	۰/۳۳۴۷	۰/۶۰۵۳
۲۵	۱۳۷۷	- ۲۴/۳	۰/۸۸۶۱	۰/۳۳۳۳	۰/۶۰۹۷
۲۶	۱۴۳۵	- ۲۴/۵	۰/۹۲۳۴	۰/۳۲۰۶	۰/۶۲۷
۲۷	۱۴۶۴	- ۲۴/۶	۰/۹۴۲۱	۰/۳۲۹۳	۰/۶۳۵۷
۲۸	۱۵۰۹	- ۲۴/۷	۰/۹۷۱	۰/۳۲۷۹	۰/۶۴۹۵
۲۹	۱۵۲۵	- ۲۴/۸	۰/۹۸۱۳	۰/۳۲۶۶	۰/۶۵۴
۳۰	۱۵۵۴	- ۲۴/۹	۱	۰/۳۲۵۳	۰/۶۶۲۷

۴- پیاده‌سازی عملی مدل پیشنهادی

در بحث پیاده‌سازی عملی سیستم مذکور، در ابتدا تجهیزات لازم تهیه گردیده است. موارد زیر تجهیزات اصلی سخت‌افزاری ساختار مورد مطالعه می‌باشند.

- دو عدد پنل خورشیدی ۲۵۰ واتی
- دو عدد میکرواینورتر ۲۵۰ واتی
- یک عدد پی ال سی ۱۲ ورودی و ۶ خروجی
- ۶ عدد رله ۲۴ ولتی
- یک عدد تابلو برق
- سازه فلزی

با توجه به نتایج جدول (۷) مشاهده می‌شود که بهترین جواب بر اساس به کارگیری روش تصمیم‌گیری WSM، جواب (۹) می‌باشد. جواب (۱) جوابی است که کمترین هزینه را برای سیستم در پی دارد اما در عوض یک دمای میانگین حداقلی در محیط یخچال فراهم می‌گردد. جواب (۳۰) هم پر هزینه‌ترین انتخاب می‌باشد ولی دمای میانگین محیط یخچال را در بیشترین میزان ممکن سرمایشی قرار می‌دهد. در صورتی که به کارگیرنده سیستم به دنبال شرایط حد وسطی باشد جواب (۹) بهترین گزینه می‌باشد.

در ادامه پروژه ساخت سیستم مورد مطالعه برای تست عملی بر اساس یافته‌های بخش شبیه‌سازی راه‌اندازی گردیده و اندازه‌گیری مقادیر مورد نظر با کمک تجهیزات لازم انجام گرفته است. جدول (۸) نتایج تست عملی را نشان می‌دهد. در جدول مذکور زمان بر اساس دقیقه و بر طبق پریودهای ۱۵ دقیقه‌ای در نظر گرفته شده است و طول زمان تست یک شبانه‌روز بوده است. دما بر حسب درجه سانتیگراد اندازه‌گیری شده و اندازه‌گیری توان ورودی و خروجی از کنتور به سیستم مورد مطالعه بر حسب وات تنظیم شده است. علامت مثبت در توان به معنی دریافت توان از شبکه و علامت منفی بیانگر تزریق توان به شبکه برق می‌باشد.

• کابلهای قدرت و فرمان برای اتصالات سیستم در ادامه به سوار کردن تجهیزات و اتصال آنها به هم پرداختیم. در ابتدا پنلهای خورشیدی بر روی سازه فلزی نصب گردیده و سپس کابلهای اتصال آنها به داخل تابلو برق که آن هم در پشت سازه فلزی مربوط به نصب پنلها نصب شده است، هدایت شده‌اند. پس از این مرحله به نصب تجهیزات داخل تابلو برق پرداخته شده است. در این راستا دو عدد میکرو اینورتر تهیه شده برای پروژه ساخت به همراه پی ال سی شرکت دلتا و ۶ عدد رله و کلید مینیاتوری در داخل تابلو برق نصب گردیده‌اند. شکل (۸) نمای ظاهری سیستم تکمیل شده را پس از نصب یخچال به آن نشان می‌دهد.

جدول (۸): نتایج حاصل از تست عملی پروژه ساخت سیستم مورد مطالعه

Table (8): Obtained results of the practical test of the system

زمان (دقیقه)	۰	۱۵	۳۰	۴۵	۶۰	۷۵	۹۰	۱۰۵	۱۲۰
دما (°C)	-۷/۹	-۱۳/۸	-۱۵/۹	-۱۸	-۱۹/۴	-۲۰	-۲۰/۳	-۲۰/۹	-۲۱/۳
توان (وات)	۳۶۹	۳۶۵	۳۶۴	۳۶۵	۳۶۵	۳۶۴	۳۶۵	۳۶۵	۳۶۴
زمان (دقیقه)	۱۳۵	۱۵۰	۱۶۵	۱۸۰	۱۹۵	۲۱۰	۲۲۵	۲۴۰	۲۵۵
دما (°C)	-۲۲	-۲۲/۴	-۲۲/۸	-۲۳	-۲۳/۴	-۲۳/۶	-۲۳/۹	-۲۴/۲	-۲۴/۴
توان (وات)	۳۶۳	۳۶۳	۳۶۴	۳۶۳	۳۶۳	۳۶۴	۳۶۳	۲۷۵	۱۱۰
زمان (دقیقه)	۲۷۰	۲۸۵	۳۰۰	۳۱۵	۳۳۰	۳۴۵	۳۶۰	۳۷۵	۳۹۰
دما (°C)	-۲۴/۶	-۲۴/۸	-۲۴/۹	-۲۴/۱	-۲۳/۴	-۲۲/۹	-۲۲/۱	-۲۰/۵	-۱۸/۲
توان (وات)	-۳۵	-۹۲	-۱۰۹	-۴۶۵	-۴۷۷	-۴۷۸	-۴۷۹	-۴۷۹	-۴۷۹
زمان (دقیقه)	۴۰۵	۴۲۰	۴۳۵	۴۵۰	۴۶۵	۴۸۰	۴۹۵	۵۱۰	۵۲۵
دما (°C)	-۱۶/۳	-۱۵/۶	-۱۵/۱	-۱۴/۵	-۱۴/۱	-۱۳/۶	-۱۳/۲	-۱۲/۶	-۱۲/۱
توان (وات)	-۴۸۰	-۴۸۰	-۴۸۰	-۴۸۱	-۴۸۱	-۴۸۱	-۴۸۲	-۴۸۲	-۴۸۲
زمان (دقیقه)	۵۴۰	۵۵۵	۵۷۰	۵۸۵	۶۰۰	۶۱۵	۶۳۰	۶۴۵	۶۶۰
دما (°C)	-۱۱/۵	-۱۱/۱	-۱۰/۵	-۱۰/۱	-۹/۹	-۹/۶	-۹/۳	-۹	-۸/۸
توان (وات)	-۴۸۲	-۴۸۳	-۴۸۳	-۴۸۳	-۴۸۳	-۴۸۳	-۴۸۳	-۴۸۲	-۴۸۲
زمان (دقیقه)	۶۷۵	۶۹۰	۷۰۵	۷۲۰	۷۳۵	۷۵۰	۷۶۵	۷۸۰	۷۹۵
دما (°C)	-۸/۶	-۸/۵	-۸/۳	-۸/۲	-۸	-۷/۹	-۱۳/۹	-۱۶	-۱۸/۱
توان (وات)	-۴۸۲	-۴۸۲	-۴۸۲	-۴۸۱	-۴۸۱	-۴۸۰	-۴۸۱	-۱۱۴	-۱۱۳
زمان (دقیقه)	۸۱۰	۸۲۵	۸۴۰	۸۵۵	۸۷۰	۸۸۵	۹۰۰	۹۱۵	۹۳۰
دما (°C)	-۱۹/۵	-۲۰/۱	-۲۰/۳	-۲۰/۹	-۲۱/۴	-۲۲	-۲۲/۵	-۲۲/۸	-۲۳/۱
توان (وات)	-۱۱۳	-۱۱۳	-۱۱۲	-۱۱۲	-۱۱۲	-۱۱۲	-۱۱۱	-۱۱۱	-۱۱۰
زمان (دقیقه)	۹۴۵	۹۶۰	۹۷۵	۹۹۰	۱۰۰۵	۱۰۲۰	۱۰۳۵	۱۰۵۰	۱۰۶۵
دما (°C)	-۲۳/۴	-۲۳/۷	-۲۳/۹	-۲۴/۱	-۲۴/۳	-۲۴/۴	-۲۴/۵	-۲۴/۳	-۲۴/۱
توان (وات)	-۱۱۰	-۱۰۳	-۹۰	-۳۳	۳۴۹	۳۶۴	۳۶۴	۰	۰
زمان (دقیقه)	۱۰۸۰	۱۰۹۵	۱۱۱۰	۱۱۲۵	۱۱۴۰	۱۱۵۵	۱۱۷۰	۱۱۸۵	۱۲۰۰
دما (°C)	-۲۳/۴	-۲۳/۲	-۲۲/۹	-۲۲/۷	-۲۲/۳	-۲۱/۸	-۲۱/۱	-۲۰/۷	-۲۰/۲
توان (وات)	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
زمان (دقیقه)	۱۲۱۵	۱۲۳۰	۱۲۴۵	۱۲۶۰	۱۲۷۵	۱۲۹۰	۱۳۰۵	۱۳۲۰	۱۳۳۵
دما (°C)	-۱۹/۹	-۱۹/۲	-۱۷/۹	-۱۵/۷	-۱۳/۶	-۱۳/۱	-۱۲/۵	-۱۲	-۱۱/۵
توان (وات)	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
زمان (دقیقه)	۱۳۵۰	۱۳۶۵	۱۳۸۰	۱۳۹۵	۱۴۱۰	۱۴۲۵	۱۴۰۰		
دما (°C)	-۱۰/۹	-۱۰/۳	-۹/۹	-۹/۳	-۸/۸	-۸/۴	-۸/۲		
توان (وات)	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰		

جدول (۹): مقایسه نتایج حاصل از تست عملی پروژه ساخت سیستم مورد مطالعه و نتایج حاصل از شبیه سازی

Table (9): Comparison of practical test results and simulation results for the system study

هزینه برق (تومان)	دمای میانگین (°C)	
۱۱۰۷	- ۱۹/۶	نتایج عملی
۱۰۰۱	-۲۰/۱	نتایج تئوری
۹/۶	۲/۵	میزان اختلاف (درصد)

راستا دو تابع هدف هزینه برق و دمای میانگین یخچال به عنوان توابع هدف اصلی مورد توجه قرار گرفت. در بخش شبیه سازی با استفاده از روابط و معادلات حاکم بر سیستم مورد مطالعه و به کمک الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی غیر مغلوب سی جواب بهینه به عنوان جوابهای جبهه پارتو از میان انبوهی از جوابهای ممکن در فضای جواب انتخاب گردید. سپس با کمک روش مدل جمع وزنی یکی از این جوابها به عنوان جواب نهایی انتخاب گردیده و مورد توجه قرار گرفت. پیاده سازی عملی سیستم مورد مطالعه به شکل پروژه ساخت انجام گردید و عملکرد سیستم بر اساس یافته های بخش شبیه سازی مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است.

نتایج بخش شبیه سازی و بخش ساخت از اختلاف کمی در تابع هدف دمای میانگین و اختلاف بیشتری در تابع هدف هزینه برق برخوردار است، به طوری که با توجه به شرایط محیطی و تلفات تجهیزات سیستم قابل توجه می باشد. در نهایت نتایج این تحقیق چه در بخش شبیه سازی و چه در بخش پروژه ساخت افزایش عملکرد و کارایی سیستم یخچال فتوولتائیک تحت عملکرد کنترل بهینه سیستم را نشان می دهد.

#### پی نوشت:

1. Time of Use (TOU)
2. Non-dominate Sorting genetic Algorithm II (NSGA-II)
3. Pareto Front
4. Weighted Sum Model (WSM)

بر اساس نتایج به دست آمده، دمای میانگین ۱۹/۶- به دست آمده است. همچنین هزینه کل در یک شبانه روز ۱۱۰۷ تومان محاسبه شده است. جدول (۹) مقایسه نتایج شبیه سازی تئوری و پیاده سازی عملی را نشان می دهد. نتایج نشان می دهند که اختلاف در دمای میانگین بین شبیه سازی و سیستم ساخته شده حدود ۲/۵ درصد می باشد که مقدار قابل قبولی است و ناشی از اثرات شرایط محیطی بر شرایط کار سیستم می باشد. اما در مورد هزینه برق مقدار اختلاف در حدود ۹/۶ درصد بوده که اختلاف قابل توجهی است. در تحلیل دلایل این اختلاف می توان به تفاوت عملکرد پنلها نسبت به حالت ایده آل و همچنین تلفات سیستم میکرواینورترها و تلفات کابلی اشاره نمود. این مجموعه از اثرات باعث افزایش ده درصدی هزینه برق در تست عملی نسبت به شبیه سازی سیستم مورد مطالعه می گردند. به عبارت دیگر به عنوان مثال میزان راندمان میکرو اینورترها طبق کاتالوگ در حدود ۹۵ درصد بوده است که در شبیه سازی از ۵ درصد تلفات اینورتر صرف نظر شده است اما در پیاده سازی عملی این تلفات خود را در قالب افزایش هزینه برق و کاهش میانگین دمای محیط یخچال نشان می دهد. یا در مورد پنلها گرچه انتظار می رفت که در شرایط کاری ۵۰۰ وات توان تولید نمایند اما نتایج اندازه گیری نشان می دهد که میزان تولید عملی آنها در حدود دو تا سه درصد کمتر از مقدار نامی آنها است که می تواند ناشی از اختلاف دمای محیط با مقدار استاندارد ۲۵ درجه سانتی گراد باشد.

#### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله به شبیه سازی و پیاده سازی یک سیستم یخچال فتوولتائیک متصل به شبکه و بهینه سازی دو هدفه عملکرد آن پرداخته شد. در این

#### References

- [1] M.A. Aktacir, "Experimental study of a multi-purpose PV-refrigerator system", International Journal of Physical Sciences, Vol. 6, No. 4, pp. 746-757, 2011.
- [2] O. Ekren, A. Yilanci, E. Cetin, and H. K. Ozturk, "Experimental performance evaluation of a PV-powered refrigeration system", Electronics and Electrical Engineering, No. 8 (114), pp. 7-10, 2011.
- [3] C.D. Pero, F.M. Butera, L. Piegari, M. Faifer, M. Buffoli, P. Monzani, "Characterization and monitoring of a self-constructible photovoltaic-based refrigerator", Energies, Vol. 9 (749), pp. 1-14, 2016.
- [4] J. Waschull, R. Müller, W. Herschier, R. Künanz, "Cold storage devices for smart grid integration", Energy Procedia, Vol. 46, pp. 48 - 57, 2014.
- [5] R.A. Verzijlbergh, Z. Lukszo, "Conceptual model of a cold storage warehouse with PV generation in a smart grid setting", Proceeding of the IEEE/ICNSC, Evry, France, 2013.
- [6] A. Arteconi, N.J. Hewitt, F. Polonara, "State of the art of thermal storage for demand-side management", Applied Energy, Vol. 93, pp. 371-389, 2012.
- [7] A. Grein, M. Pehnt, "Load management for refrigeration systems: Potentials and barriers", Energy Policy, Vol. 39, pp. 5598-5608, 2011.

- [8] Y. Han, B. Shen, H. Hu, F. Fan, "Optimizing the performance of ice-storage systems in electricity load management through a credit mechanism: An analytical work for Jiangsu, China", *Energy Procedia*, Vol. 61, pp. 2876 – 2879, 2014.
- [9] A. Samimi, M. Nikzad, M. Mohammadi, "Real-time electricity pricing of a comprehensive demand response model in smart grids", *Electrical Energy Systems*, Vol. 27, No. 3, pp. 3-15, 2017.
- [10] P.H. Divshali, B.J. Choi, "Electrical market management considering power system constraints in smart distribution grids", *Energies*, Vol. 9 (405), pp. 1-30, 2016.
- [11] L. Jia, L. Tong, "Dynamic pricing and distributed energy management for demand response", *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 7, No. 2, pp. 1128-1136, 2016.
- [12] Q.P. Ha, V. Vakiloroya, "Modeling and optimal control of an energy-efficient hybrid solar air conditioning system", *Automation in Construction*, Vol. 49, Part B, pp. 262-270, 2015.
- [13] K. Bataineh, D. Dalalah, "Optimal configuration for design of stand-alone PV system", *Smart Grid and Renewable Energy*, Vol. 3, pp. 139-147, 2012.
- [14] A. Fatehmulla, A.S. Al-Shammari, A.M. Al-Dhafiri, A.A. Al-Bassam, "Design of energy efficient low power pv refrigeration system", *Proceeding of the IEEE/SIEPCPC*, Riyadh, Saudi Arabia, April 2011.