

طراحی یک سیستم بهینه تولید همزمان برق و حرارت و برودت جهت تأمین بارهای یک ساختمان

۱ احمد غریبی،^۲ فرشید کی‌نیا*،^۳ مهران عامری

چکیده

تأمین بارهای الکتریکی، حرارتی و برودتی ساختمان، توسط سیستم تولید جداگانه و سیستم تولید همزمان، در ۵ سناریو متفاوت توسط الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است (به عنوان نمونه، داده‌ها و اطلاعات یک ساختمان مسکونی بلند مرتبه ۷۲ واحدی، در شهر کرمان استفاده شده است). نتایج نشان می‌دهد، سیستم تولید همزمان برق، حرارت و برودت که از میکروتوربین گازی با ظرفیت ۱۹۵ کیلووات به عنوان محرک اولیه، از چیلر جذبی و تراکمی به ترتیب با ظرفیت ۲۸۱ و ۴۳۹ کیلووات جهت تأمین بار برودتی، از بویلر کمکی با ظرفیت ۱۸۷ کیلووات جهت جبران کمبود بار حرارتی و از سیستم فتوولتائیک/ترمال با ظرفیت ۵۲/۸ کیلووات جهت تولید بار الکتریکی و آب گرم مصرفی استفاده شده، بهینه‌ترین سیستم جهت تأمین بارهای ساختمان مینا است. در این سیستم بهینه، درآمد فروش برق سالیانه ۹۳۸۱۴ دلار، هزینه خرید برق سالیانه ۷۰۵۲ دلار، هزینه خرید سوخت مصرفی سالیانه ۱۵۸۵۲ دلار و تولید سالیانه آلایندگی دی‌اکسید کربن در ساختمان مینا ۲۳۰/۴۲ تن است. دوره بازگشت سرمایه اولیه در این پروژه، ۵/۱۶۷ سال برآورد شده است.

تاریخ دریافت:

۱۳۹۸ / ۵ / ۱۶

تاریخ پذیرش:

۱۳۹۸ / ۸ / ۸

کلمات کلیدی:

الگوریتم بهینه‌سازی،
بار الکتریکی،
بار حرارتی و برودتی،
سیستم تولید همزمان
و تولید جداگانه،
ساختمان

۱. کارشناس ارشد مهندسی مدیریت و بهینه‌سازی انرژی دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

a.gharibi69@gmail.com

۲. استادیار بخش مهندسی مدیریت و بهینه‌سازی انرژی دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

f.keynia@kgut.ac.ir

(نویسنده مسئول)

ameri_mm@uk.ac.ir

۳. استاد بخش مهندسی مکانیک دانشگاه شهید باهنر کرمان

۱. مقدمه

ساختمان‌ها به عنوان یکی از بخش‌های مهم در زندگی امروزی، ۴۰ درصد از مصرف انرژی در جهان را دارا هستند و بخش قابل توجهی از آلودگی‌های زیستی را تولید و منتشر می‌کنند. نیاز روزافزون جهان به انرژی و رشد قیمت حامل‌های انرژی و محدود شدن و فناپذیری آنها در آینده نزدیک، ضرورت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و روش‌های کاهش مصرف انرژی از قبیل سیستم‌های خورشیدی و سیستم‌های تولید همزمان را بیش از پیش نمایان می‌کند.

موقعیت جغرافیایی کشور ایران موجب شده است که منبع بسیار بزرگی از خورشید در آن موجود باشد و از نظر دریافت انرژی خورشیدی در شمار بهترین کشورهای جهان محسوب گردد. این منبع انرژی تجدیدپذیر، با محیط زیست سازگار است و می‌تواند جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی باشد. سیستم تولید همزمان برق، حرارت و پروت که گاهی تحت عنوان تولید مشترک نیز نامیده می‌شود، سیستم تأمین‌کننده انرژی با راندمان ۷۰-۹۰ درصد است که در آن انرژی الکتریکی مورد نیاز در محل، به وسیله یک محرک اولیه تولید می‌گردد و حرارت اتلافی از محرک اولیه به منظور تأمین گرمایش، آبگرم مصرفی و سرمایش بازیاب می‌گردد. استفاده از سیستم تولید همزمان و خورشیدی برای بخش ساختمان در مطالعات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. به طوری که:

کونگ و همکاران راندمان انرژی و اقتصادی یک سیستم تولید همزمان سه گانه (برق، حرارت و پروت) با محرک اولیه موتور استرلینگ با یک سیستم تولید جداگانه مقایسه کردند که سیستم تولید همزمان با محرک اولیه موتور استرلینگ ۳۳ درصد در مصرف انرژی اولیه صرفه جویی می‌نماید. همچنین نتایج نشان داد که عملکرد چیلر جذبی تأثیر زیادی بر راندمان سیستم تولید همزمان سه گانه دارد [۱۶]. هنگ فو و همکاران یک سیستم میکرو CCHP خانگی مورد بررسی تجربی قرار دادند. آنها عملکرد چیلر جذبی را تحت شرایط مختلف گرمایشی مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که تقریباً یک رابطه خطی بین خروجی چیلر جذبی و تغییر دمای آب گرم ورودی وجود دارد [۱۳].

داس و همکاران یک سیستم تولید همزمان بر پایه پیل سوختی اسید فسفریک را بررسی کردند. نتایج نشان داد که راندمان الکتریکی پیل‌های سوختی اسید فسفریک بین ۴۲-۳۷ درصد است، اما وقتی در سیستم تولید همزمان به کار می‌رود، راندمان آنها می‌تواند به ۸۵ درصد نیز برسد [۶]. لاینگا و

همکاران استفاده از سیستم فتوولتائیک/ترمال (PV/T) در یک ساختمان مسکونی در چین را مورد بررسی قرار دادند که نتایج نشان داد، ۳۱/۷ درصد از کل انرژی حرارتی مورد نیاز ساختمان توسط ۱۳۲ متر مربع کلکتور PV/T استفاده شده، تأمین می‌شود [۱۷]. فرانک و همکاران یک سیستم CCHP جهت تأمین برق، حرارت و برودت یک مجتمع مسکونی در مشهد بررسی کردند. نتایج نشان داد، سیستم CCHP با ظرفیت واحد تولید ۱۲۰ کیلو وات در ۳۰ واحد ساختمان مینا دارای کمترین دوره بازگشت سرمایه با ۵/۰۸ سال است [۹].

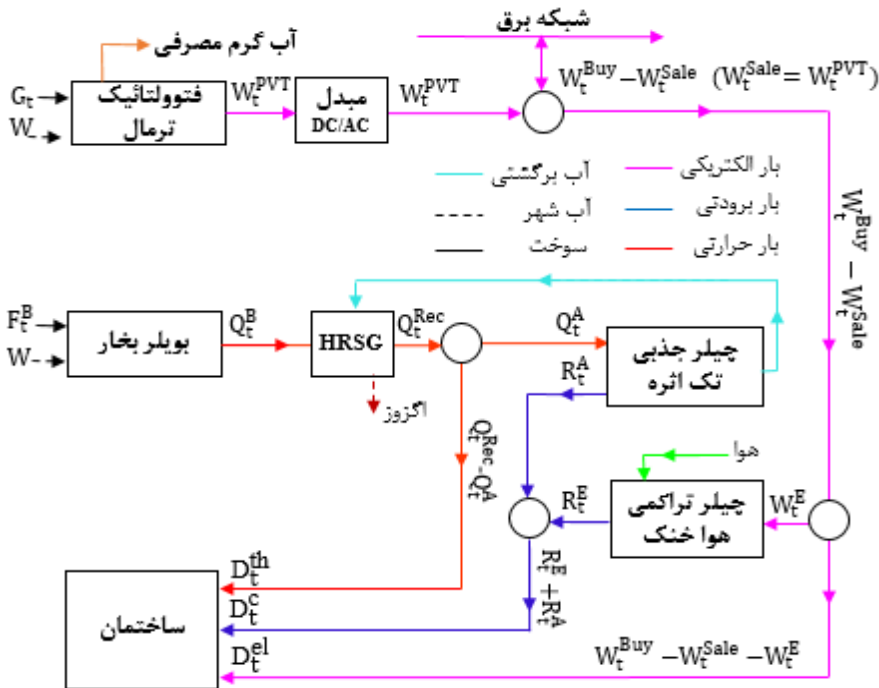
چو و همکاران بر روی سیستم ترکیبی PVT/Water در اواخر تابستان در شهر هنگ کنگ مطالعه تجربی انجام دادند عملکرد سیستم را توسط جریان طبیعی آب و جریان اجباری آب توسط پمپ را بررسی کردند و دریافته‌اند که جریان طبیعی آب عملکرد بهتری دارد [۵]. کالوگیرو و تری پانگوستوپولوس کلکتور PVT/Water را برای تولید آب گرم خانگی و برق توسعه دادند. آنها دریافته‌اند وقتی که طراحی درستی انجام می‌پذیرد، کلکتور PVT/Water قادر خواهد بود گرما را از ماژول گرفته و برای گرم کردن آب یا هوا مورد استفاده قرار دهد تا دمای سطح سلول‌ها کاهش یابد و راندمان الکتریکی در سطح مطلوب‌تری باقی بماند [۱۴]. تری پانگوستوپولوس و همکاران تست‌هایی بر روی PV/T/Air و PVT/Water در پیکربندی‌ها و ساختارهای مختلف انجام دادند و دریافته‌اند هزینه سیستم PVT/Air و PVT/Water با سلول پلی کریستال به ترتیب حدود ۵ درصد و ۸ درصد بالاتر از سیستم PV است و PVT/Water عملکرد بهتری دارد [۲۰].

در نتیجه در این مقاله، با بررسی کردن سناریوهای مختلف از بین سیستم تولید جداگانه برق، حرارت و برودت^۱ (SCHP) سیستم تولید همزمان برق، حرارت و برودت^۲ (CCHP) بهینه‌ترین سیستم جهت تأمین بارهای الکتریکی، حرارتی و برودتی ساختمان انتخاب می‌شود. سیستم طراحی انتخابی، در انواع ساختمان‌های مسکونی، اداری، تجاری و... کاربرد خواهد داشت.

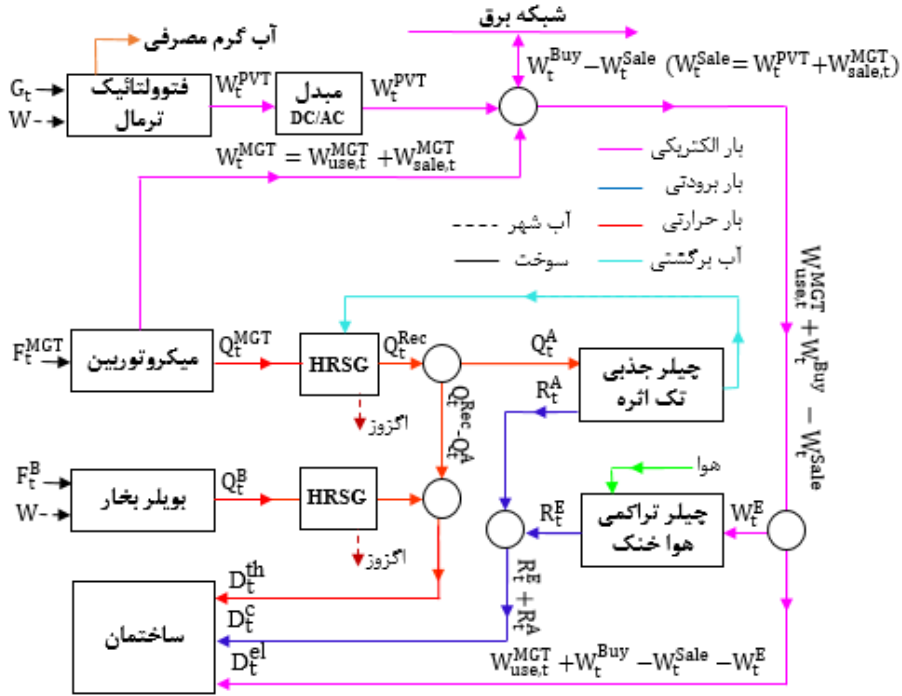
1. Separation Cooling Heating and Power
2. Combined Cooling Heating and Power

۲. شرح مسأله

یک سیستم تولید جداگانه و یک سیستم تولید همزمان که شماتیک آنها در شکل (۱) و (۲) مشخص شده، بر مبنای تأمین بار حرارتی طراحی شده است. توسط الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات از بین ۵ سناریو متفاوت که در جدول (۱) مشخص شده، با کمینه کردن هزینه‌ها، بهینه‌ترین سیستم انتخاب خواهد شد. در سیستم تولید همزمان، چیلر جذبی فقط توسط توان حرارتی بازیافتی از محرک اولیه (میکروتوربین گازی) تغذیه می‌شود و اولویت تأمین بار حرارتی، حرارت بازیافتی از میکروتوربین است و کمبود آن توسط بویلر کمکی تأمین خواهد شد. همچنین ممکن است انرژی الکتریکی تأمین شده توسط محرک اولیه و سیستم خورشیدی برابر با انرژی الکتریکی مورد نیاز ساختمان نباشد. لذا، امکان خرید برق از شبکه و یا فروش برق به شبکه نیز وجود دارد.



شکل ۱. شماتیک سیستم تولید جداگانه



شکل ۲. شماتیک سیستم تولید همزمان

جدول ۱. سناریوهای مورد بررسی

سناریو	۱	۲	۳	۴	۵
میکروتوربین گازی		•	•	✓	✓
بویلر	✓	✓	✓	✓	✓
چیلر جذبی تک اثره	•	✓	•	✓	✓
چیلر تراکمی هوا خنک	✓	✓	✓	✓	✓
فتوولتائیک/ترمال	✓	•	✓	•	✓

مأخذ: نتایج تحقیق

۳. روش بهینه سازی

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) یک تکنیک بهینه‌سازی تصادفی مبتنی بر جمعیت است که در سال ۱۹۹۵ توسط دکتر ابرهارت و دکتر کندی کشف شد و برگرفته از حرکت گروهی پرندگان و ماهی‌هایی است که به صورت دسته جمعی به دنبال غذا می‌گردند. الگوریتم PSO یک مسأله ریاضی، برای یافتن بردار n بعدی $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ است که تابع هدف را کمینه می‌کند (n تعداد متغیری است که بهینه شده است) و براساس فضای جست‌وجو، بین حد بالا X'' و پایین X' ، مقدار بهینه X پیدا می‌شود: $X' \leq X \leq X''$

می‌توان الگوریتم PSO نسخه اصلی را در مراحل زیر خلاصه کرد [۱۹]:

۱. تعریف اندازه ذرات گروه: تعداد ذراتی (np) است که باید برای گروه در نظر گرفته شود: X_1, X_2, \dots, X_{np} ; اگر n تعداد متغیرها باشد، تعداد ذرات برابر با $2n$ است [۸].
۲. مقدار دهی اولیه گروه: یک مکان تصادفی برای هر ذره $j = 1, 2, \dots, np \rightarrow X_j(0)$ در فضای جست‌وجو تولید می‌شود. در ابتدا (تکرار ۱) سرعت همه ذرات صفر فرض می‌شود.
۳. بروز رسانی سرعت: در هر تکرار i ، موقعیت ($X_j(i)$) و سرعت ($V_j(i)$) هر ذره‌ای که در فضای جست‌وجوی سراسری سرگردان است، براساس تجربه گذشته خود بروز رسانی می‌شود (در هر پرواز بهترین موقعیت ذره $X_j(i)$ با $P_{best,j}$ و در گروه، بهترین موقعیت هر ذره با G_{best} مشخص می‌شود).
سرعت ذره $X_j(i)$ از رابطه (۱) بروز رسانی می‌شود.

$$V_j(i) = w \cdot V_j(i-1) + c_1 r_1 \cdot [P_{best,j} - X_j(i-1)] + c_2 r_2 \cdot [G_{best,j} - X_j(i-1)] \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, np$$

که در آن w وزن اینرسی است و طبق مرجع [۱۲]، $w = 0.5 + (r/2)$ ، c_1 و c_2 ثابت‌های مثبت هستند که به ترتیب برابر با نرخ یادگیری فردی و گروهی است و طبق مرجع [۷]، $c_1 = c_2 = 2$ لحاظ شده است، r_1 و r_2 دو رشته مستقل هستند که به صورت تصادفی در بازه بین صفر و یک تولید می‌شوند.

۴. بروز رسانی موقعیت: موقعیت ذرات در تکرار j از رابطه (۲) بروز رسانی می‌شود.

$$X_j(i) = X_j(i-1) + \Delta t.V_j(i) \quad (2)$$

$$j = 1, 2, \dots, np$$

۵. بررسی همگرایی: همگرایی زمانی حاصل می‌شود که موقعیت همه ذرات به مجموعه‌ای مشابه از جواب‌ها همگرا شود.

۳-۱. تابع هدف

به طور کلی تابع هدف سیستم همزمان و تولید جداگانه به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود و هر جزئی که در هر سناریو نباشد، مقدار آن صفر است.

$$O.F = Min.Cost$$

$$Cost = (C^{MGT} + C^B + C^A + C^E + C^{PVT} + C_F^B + C_F^{MGT} + C^M + C^G - B^G - B_Q^{PVT}) \quad (3)$$

C^{MGT} کل هزینه اولیه برای خرید میکروتوربین گازی برحسب دلار بر سال است و از رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$C^{MGT} = CRF^{MGT} (C_C^{MGT} \times Cap^{MGT}) \quad (4)$$

که در آن CRF^{MGT} , C_C^{MGT} و Cap^{MGT} به ترتیب ضریب بازگشت سرمایه میکروتوربین گازی، هزینه اولیه خرید میکروتوربین گازی برحسب دلار بر کیلووات و ظرفیت میکروتوربین گازی برحسب کیلووات است.

C^B کل هزینه اولیه برای خرید بویلر برحسب دلار بر سال است و از رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$C^B = CRF^B (C_C^B \times Cap^B) \quad (5)$$

که در آن CRF^B , C_C^B و Cap^B به ترتیب ضریب بازگشت سرمایه بویلر، هزینه اولیه خرید بویلر برحسب دلار بر کیلووات و ظرفیت بویلر برحسب کیلووات است.

C^A کل هزینه اولیه برای خرید چیلر جذبی برحسب دلار بر سال است و از رابطه (۶) به دست می‌آید.

$$C^A = CRF^A (C_C^A \times Cap^A) \quad (۶)$$

که در آن CRF^A, C_C^A و Cap^A به ترتیب ضریب بازگشت سرمایه چیلر جذبی (تک اثره)، هزینه اولیه خرید چیلر جذبی برحسب دلار بر کیلووات و ظرفیت چیلر جذبی برحسب کیلووات است.

$$C^E \text{ کل هزینه اولیه برای خرید چیلر تراکمی برحسب دلار بر سال است و از رابطه (۷) به دست می‌آید.} \\ C^E = CRF^E (C_C^E \times Cap^E) \quad (۷)$$

که در آن CRF^E, C_C^E و Cap^E به ترتیب ضریب بازگشت سرمایه چیلر تراکمی (هواخنک)، هزینه اولیه خرید چیلر تراکمی برحسب دلار بر کیلووات و ظرفیت چیلر تراکمی برحسب کیلووات است.

C^{PVT} کل هزینه اولیه برای خرید فتوولتائیک/ترمال برحسب دلار بر سال است و از رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$C^{PVT} = CRF^{PVT} (C_C^{PVT} \times Cap^{PVT}) \quad (۸)$$

که در آن CRF^{PVT}, C_C^{PVT} و Cap^{PVT} به ترتیب ضریب بازگشت سرمایه فتوولتائیک/ترمال، هزینه اولیه خرید فتوولتائیک/ترمال برحسب دلار بر کیلووات و ظرفیت کلکتور فتوولتائیک/ترمال برحسب کیلووات است.

ضریب بازگشت سرمایه از رابطه (۹) به دست می‌آید که در این رابطه ir حداقل نرخ جذب کننده و

n طول عمر هر تجهیز است [۱].

$$CRF = \frac{ir \times (1+ir)^n}{(1+ir)^n - 1} \quad (ir = 10\%) \quad (۹)$$

C_F^B و C_F^{MGT} ، کل هزینه سوخت مصرفی بویلر و میکروتوربین گازی برحسب دلار بر سال است و از رابطه (۱۰) الی (۱۵) به دست می‌آید.

$$C_F^B = C_{F1}^B + C_{F2}^B \quad (۱۰)$$

$$C_{F1}^B = \Delta t \sum_{t=1}^{24} (C_f^B \times F_t^B) \rightarrow (\text{November to April} \rightarrow \Delta t = 182) \quad (۱۱)$$

$$C_{F2}^B = \Delta t \sum_{t=1}^{24} (C_f^B \times F_t^B) \rightarrow (\text{May to October} \rightarrow \Delta t = 184) \quad (12)$$

$$C_F^{MGT} = C_{F1}^{MGT} + C_{F2}^{MGT} \quad (13)$$

$$C_{F1}^{MGT} = \Delta t \sum_{t=1}^{24} (C_f^{MGT} \times F_t^{MGT}) \rightarrow (\text{November to April} \rightarrow \Delta t = 180) \quad (14)$$

$$C_{F2}^{MGT} + C_{F2}^B = \Delta t \sum_{t=1}^{24} (C_f^{MGT} \times F_t^{MGT}) \rightarrow (\text{May to October} \rightarrow \Delta t = 182) \quad (15)$$

که در آن C_{F2}^{MGT} و C_{F1}^{MGT} به ترتیب هزینه سوخت مصرفی میکروتوربین گازی در ماه‌های نوامبر تا آوریل (ماه‌های گرم سال) و ماه‌های مه تا اکتبر (ماه‌های سرد سال) است. C_{F2}^B و C_{F1}^B به ترتیب هزینه سوخت مصرفی بویلر در ماه‌های نوامبر تا آوریل (ماه‌های گرم سال) و ماه‌های مه تا اکتبر (ماه‌های سرد سال) است (در سیستم تولید همزمان از ماه مه تا اکتبر بویلر خاموش است). C_f^B و C_f^{MGT} ، به ترتیب هزینه سوخت مصرفی بویلر و میکروتوربین گازی برحسب دلار بر کیلووات است. Δt طول بازه زمانی برحسب روز است (میکروتوربین گازی هر ۶ ماه یکبار ۴۸ ساعت تعمیرات دوره‌ای می‌شود).

C^M کل هزینه تعمیر و نگهداری تجهیزات برحسب دلار بر سال است و از رابطه (۱۶) الی (۱۸) به‌دست می‌آید.

$$C^M = C_1^M + C_2^M \quad (16)$$

$$C_1^M = \Delta t_{11} \sum_{t=1}^{24} [(C_M^{MGT} \times W_t^{MGT})] + \Delta t_{12} \sum_{t=1}^{24} [(C_M^{PVT} \times W_t^{PVT}) + (C_M^B \times Q_t^B)] \rightarrow \begin{cases} \Delta t_{11} = 180 \\ \Delta t_{12} = 182 \end{cases} \quad (17)$$

$$C_2^M = \Delta t_{21} \sum_{t=1}^{24} \left[(C_M^{MGT} \times W_t^{MGT}) + (C_M^A \times R_t^A) \right] + \Delta t_{22} \sum_{t=1}^{24} \left[(C_M^{PVT} \times W_t^{PVT}) + (C_M^B \times Q_t^B) \right. \\ \left. + (C_M^E \times R_t^E) \right] \rightarrow \begin{cases} \Delta t_{21} = 182 \\ \Delta t_{22} = 184 \end{cases} \quad (18)$$

که در آن C_1^M و C_2^M به ترتیب هزینه تعمیر و نگهداری در ماه‌های سرد و گرم سال است. $C_M^E, C_M^A, C_M^{PVT}, C_M^B, C_M^{MGT}$ به ترتیب هزینه تعمیر و نگهداری میکروتوربین گازی، بویلر، فتوولتائیک/ترمال، چیلر جذبی و تراکمی برحسب دلار بر کیلووات ساعت است. W_t^{PVT} و W_t^{MGT} به ترتیب توان تولیدی میکروتوربین گازی و سیستم فتوولتائیک/ترمال برحسب کیلووات ساعت است. Q_t^B, R_t^A, R_t^E به ترتیب توان حرارت تولیدی توسط بویلر، توان برودت تولیدی توسط چیلر جذبی و تراکمی در زمان t برحسب کیلووات ساعت است.

C^G هزینه خرید برق از شبکه برحسب دلار بر کیلووات ساعت است و از رابطه (۱۹) و (۲۱) به دست می‌آید.

$$C^G = C_1^G + C_2^G \quad (19)$$

$$C_1^G = \Delta t_1 \sum_{t=1}^{24} (C_{el}^{Buy} \times W_t^{Buy}) \rightarrow (November \text{ to } April \rightarrow \Delta t_1 = 182) \quad (20)$$

$$C_2^G = \Delta t_2 \sum_{t=1}^{24} (C_{el}^{Buy} \times W_t^{Buy}) \rightarrow (May \text{ to } October \rightarrow \Delta t_2 = 184) \quad (21)$$

که در آن C_1^G و C_2^G به ترتیب هزینه خرید برق در ماه‌های سرد و گرم سال برحسب دلار است. C_{el}^{Buy} و W_t^{Buy} به ترتیب قیمت خرید برق از شبکه برق به ازای هر کیلووات ساعت و میزان فروش برق به شبکه برق برحسب کیلووات ساعت است.

B^G درآمد فروش برق به شبکه برحسب دلار بر سال است و از رابطه (۲۲) الی (۲۴) به دست می‌آید.

$$B^G = B_1^G + B_2^G \quad (22)$$

$$B_1^G = \Delta t_{11} \sum_{t=1}^{24} (C_{t,Sale}^{PVT} \times W_t^{PVT}) + \Delta t_{12} \sum_{t=1}^{24} (C_{t,Sale}^{MGT} \times W_t^{MGT}) \rightarrow \begin{cases} \Delta t_{11} = 175 \\ \Delta t_{12} = 180 \end{cases} \quad (23)$$

$$B_2^G = \Delta t_{21} \sum_{t=1}^{24} (C_{t,Sale}^{PVT} \times W_t^{PVT}) + \Delta t_{22} \sum_{t=1}^{24} (C_{t,Sale}^{MGT} \times W_t^{MGT}) \rightarrow \begin{cases} \Delta t_{21} = 184 \\ \Delta t_{22} = 182 \end{cases} \quad (24)$$

که در آن B_1^G و B_2^G به ترتیب درآمد فروش برق در ماه‌های سرد و گرم سال برحسب دلار است. $C_{t,Sale}^{PVT}$ و $C_{t,Sale}^{MGT}$ به ترتیب قیمت فروش برق میکروتوربین گازی، فتولتائیک/ترمال به ازای هر کیلووات ساعت است (۴ درصد از ماه‌های سرد سال ابری و بارانی فرض شده است).

B_Q^{PVT} درآمد حاصل از تأمین آب گرم کلکتور PV/T برحسب دلار بر سال است و از رابطه (۲۵) الی (۲۷) به دست می‌آید.

$$B_Q^{PVT} = B_{Q1}^{PVT} + B_{Q2}^{PVT} \quad (25)$$

$$B_{Q1}^{PVT} = \Delta t_1 \sum_{t=1}^{24} (C_F^B \times Q_t^{PVT}) \rightarrow \{\Delta t_1 = 175\} \quad (26)$$

$$B_{Q2}^{PVT} = \Delta t_2 \sum_{t=1}^{24} (C_F^B \times Q_t^{PVT}) \rightarrow \{\Delta t_2 = 184\} \quad (27)$$

که در آن B_{Q1}^{PVT} و B_{Q2}^{PVT} به ترتیب درآمد حاصل از تأمین آب گرم توسط کلکتور PV/T در ماه‌های سرد و گرم سال است (در این حالت فرض شده، در صورتی که میزان آب گرم تولیدی توسط کلکتور PV/T در طول یک سال توسط بویلر تأمین شود، چقدر هزینه در پی خواهد داشت که این هزینه درآمد حاصل از تأمین آب گرم کلکتور PV/T لحاظ می‌گردد).

۲-۳. محدودیت‌ها

۱. محدودیت تعادل انرژی: محدودیت تعادل انرژی برای اعمال توازن توان الکتریکی، حرارتی و برودتی برای ساختمان مبنا در زمان t است.

$$D_t^{el} = W_{use,t}^{MGT} + W_{use,t}^{PV} + W_{use,t}^{PVT} - W_t^{Buy} - W_t^{Sale} - W_t^E \quad (28)$$

$$D_t^{th} = Q_t^{MGT} + Q_t^B - Q_t^A \quad (29)$$

$$D_t^c = R_t^A + R_t^E \quad (30)$$

که در آن D_t^c و D_t^{th} ، D_t^{el} به ترتیب تقاضای بار الکتریکی، حرارتی و برودتی برحسب کیلووات ساعت در زمان t است. Q_t^A توان حرارتی مورد نیاز چیلر جذبی برحسب کیلووات است (چیلر جذبی فقط توسط حرارت خروجی میکروتوربین گازی تغذیه می‌شود). تقاضای بار الکتریکی ساختمان مبنا شامل سیستم روشنایی و تجهیزات الکتریکی است.

۲. محدودیت ظرفیت تجهیزات: با توجه به سایز تجهیزات موجود در بازار، برای هر تجهیز ۸-۷ سایز انتخاب شده (روابط ۳۱ الی ۳۵) که از بین ظرفیت‌های موجود، در هر سناریو انتخاب ظرفیت بهینه توسط الگوریتم PSO خواهد بود.

$$0 \leq Cap^{MGT} \leq 260kw \rightarrow Cap^{MGT} = [0 \ 30 \ 65 \ 95 \ 130 \ 160 \ 195 \ 260] \quad (31)$$

$$0 \leq Cap^B \leq 675kw \rightarrow Cap^B = [0 \ 187 \ 300 \ 375 \ 450 \ 525 \ 600 \ 675] \quad (32)$$

$$0 \leq Cap^A \leq 475kw \rightarrow Cap^A = [0 \ 105 \ 141 \ 211 \ 246 \ 281 \ 387 \ 475] \quad (33)$$

$$0 \leq Cap^E \leq 710kw \rightarrow Cap^E = [0 \ 309 \ 439 \ 487 \ 520 \ 585 \ 617 \ 710] \quad (34)$$

$$0 \leq Cap^{PVT} \leq 52.8kw \rightarrow Cap^{PVT} = [0 \ 8.8 \ 17.6 \ 26.4 \ 35.2 \ 44 \ 52.8] \quad (35)$$

۳. محدودیت سوخت مصرفی و حرارت تولیدی میکروتوربین: رابطه بین توان خروجی میکروتوربین Capstone و دمای محیط تا ۷۰ درجه فارانهایت به صورت خطی است (Capstone Turbine Corporation) و در اینجا نیز فرض براین است که دمای محل قرارگیری میکروتوربین گازی از ۷۰ درجه فارانهایت تجاوز نمی‌کند. بنابراین رابطه بین توان خروجی و دمای محیط به صورت خطی لحاظ می‌شود و محدودیت (۳۶) و (۳۷) اعمال می‌گردد [۱۸].

$$F_t^{MGT} = \frac{W_t^{MGT}}{\eta_{el}^{MGT}} \rightarrow (W_t^{MGT} = Cap^{MGT}) \quad (36)$$

که در آن F_t^{MGT} ، W_t^{MGT} و η_{el}^{MGT} به ترتیب سوخت مصرفی، برق تولیدی و راندمان میکروتوربین گازی است.

$$Q_t^{MGT} = (F_t^{MGT} - W_t^{MGT}) \times \eta_{Rec} = F_t^{MGT} \times (1 - \eta_{el}^{MGT}) \times \eta_{Rec} \quad (37)$$

که در آن Q_t^{MGT} و η_{Rec} به ترتیب توان حرارت تولیدی میکروتوربین گازی و راندمان مبدل حرارتی (HRSG) است که مقدار آن براساس نوع چیلر جذبی و نوع میکروتوربین، متفاوت است (برای چیلرهای جذبی تک اثره ۰/۶۲ الی ۰/۷ محاسبه شده است).

توان تولیدی میکروتوربین‌های گازی شرکت Capstone در زمان t و $t+1$ ثابت است. بنابراین:

$$W_1^{MGT} = W_2^{MGT} = \text{Min}W_3^{MGT} = \dots = \text{Min}W_{24}^{MGT} \quad (38)$$

۴. محدودیت سوخت مصرفی و حرارت تولیدی بویلر: رابطه (۳۹) ارتباط بین انرژی اولیه سوخت و توان حرارتی بویلر در زمان t است که به عنوان محدودیت انرژی اولیه سوخت مصرفی و توان حرارتی بویلر لحاظ می‌شود [۲۱].

$$F_t^B = \frac{Q_t^B}{\eta_B} \rightarrow (Q_t^B = D_t^{th} - Q_t^{MGT}) \ \& \ \text{if } D_t^{th} \leq Q_t^{MGT} \rightarrow Q_t^B = 0 \quad (39)$$

که در آن Q_t^B, F_t^B و η_B به ترتیب سوخت مصرفی، توان حرارت تولیدی و راندمان بویلر است (در سیستم تولید همزمان اولویت تأمین بار حرارتی با میکروتوربین گازی است و کمبود آن توسط بویلر جبران می‌شود).

۵. محدودیت توان مصرفی و برودت تولیدی چیلرها: برای چیلرهای تراکمی و جذبی به ترتیب رابطه (۴۰) و (۴۱) برقرار است که به عنوان محدودیت تولید و مصرف چیلرها لحاظ می‌شود.

$$W_t^E = \frac{R_t^E}{COP_E} \rightarrow R_t^E = D_t^c - R_t^A \ \& \ R_t^E \leq Cap^E \ \& \ \text{IF } R_t^A \geq D_t^c \rightarrow R_t^E = 0 \quad (40)$$

که در آن W_t^E, R_t^E و COP_E به ترتیب توان الکتریکی مصرفی، توان برودت تولیدی و ضریب عملکرد چیلر تراکمی است. در سیستم تولید همزمان اولویت تأمین بار برودتی با چیلر جذبی است و کمبود آن توسط چیلر تراکمی جبران می‌شود.

$$Q_t^A = \frac{R_t^A}{COP_A} \rightarrow (R_t^A \leq Cap^A \ \& \ R_t^A \rightarrow 24Variables) \quad (41)$$

که در آن Q_t^A, R_t^A و COP_A به ترتیب توان حرارتی مصرفی، توان برودت تولیدی و ضریب عملکرد چیلر جذبی است.

محدودیت (۴۲) اعمال می‌شود تا اطمینان حاصل شود که چیلر جذبی تنها با میکروتوربین گازی تغذیه می‌شود.

$$Q_t^{MGT} \geq \frac{R_t^A}{COP_A} = Q_t^A \quad (42)$$

۶ محدودیت توان تولیدی فتوولتائیک/ترمال: توان تولیدی کلکتور PV/T (PVT/Water) متشکل از توان الکتریکی و حرارتی است که از رابطه (۴۳) الی (۴۵) قابل محاسبه است [۱۵].

$$P_{PVT,t} = P_{el,t} + P_{th,t} \quad (43)$$

$$P_{el,t} = \eta_{el} \times A_{PVT} \times G_t \quad (44)$$

$$P_{th,t} = \eta_{th} \times A_{PVT} \times G_t \quad (45)$$

که در آن $P_{PVT,t}$ کل توان کلکتور PVT/Water در زمان t برحسب کیلووات، $P_{th,t}$ و $P_{el,t}$ توان الکتریکی و حرارتی تولید شده توسط کلکتور PVT/Water در زمان t برحسب کیلووات است. A_{PVT} کل مساحت کلکتور PVT/Water برحسب متر مربع است که از رابطه (۴۶) محاسبه می‌شود (A_1^{PVT} مساحت یک ماژول فتوولتائیک/ترمال (جدول ۶)).

$$A_{PVT} = A_1^{PVT} \times Cap^{PVT} \quad (46)$$

G_t شدت تابش خورشید در زمان t برحسب کیلووات بر متر مربع، η_{th} و η_{el} به ترتیب راندمان حرارتی و الکتریکی کلکتور PVT/Water است که از رابطه (۴۷) و (۴۸) محاسبه می‌شود [۱۷].

$$\eta_{th} = \eta_o - a_1 \left(\frac{T_m - T_a}{G_{STC}} \right) \quad (47)$$

که در آن η_o راندمان کلکتور PVT/Water با تلفات حرارتی صفر ($\Delta t = T_m - T_a = 0$)، a_1 ضریب تلفات حرارتی برحسب $w/m^2.k$ ، T_m دمای ماژول PVT/Water و T_a دمای محیط و G_{STC} شدت تابش خورشید برحسب w/m^2 در شرایط STC است (شرایط STC: شدت تابش خورشید ۱۰۰۰ وات بر متر مربع و دمای محیط ۲۵ درجه سانتیگراد).

$$\eta_{el} = \frac{P_{max} = V_m \times I_m}{A_{PVT} \times G_{STC}} \quad (48)$$

که در آن P_{max} ماکزیمم راندمان کلکتور PVT/Water برحسب کیلووات است و از حاصل ضرب ولتاژ ماکزیمم (V_m) در جریان ماکزیمم (I_m) حاصل می‌شود. برای اینکه اطمینان حاصل شود مساحت کلکتور فتوولتائیک/ترمال بیشتر از مساحت سقف ساختمان مبنا نشود، محدودیت (۴۹) اعمال می‌شود.

$$A_{\max}^{PVT} \times \cos\theta \leq \text{Area Building} \rightarrow \begin{cases} \text{Area Building} = 305m^2 \\ \theta = 30^\circ \end{cases} \quad (49)$$

که در آن $\cos\theta$ زاویه شیب پنل‌های فتوولتائیک/ترمال برحسب درجه است. (کسانی که در نیمکره شمالی زندگی می‌کنند، قرار دادن کلکتورهای خورشیدی، رو به استوا (به سمت جنوب) و انتخاب زاویه نصب به اندازه عرض جغرافیایی محل نصب، روش مناسبی برای تنظیم مؤثر آنهاست (زاویه نصب کلکتور PVT/Water برای شهر کرمان ۳۰ درجه و ماکزیمم مساحت مجاز مورد استفاده جهت نصب کلکتور PVT/Water ۳۰۵ متر مربع است [۱۰].

۷. محدودیت خرید و فروش برق: رابطه (۵۰) نشان می‌دهد که توان تولیدی میکروتوربین گازی (W_t^{MGT}) متشکل از توان مصرفی در ساختمان مینا ($W_{use,t}^{MGT}$) و فروش توان ($W_{sale,t}^{MGT}$) است. با توجه به حداکثر توان الکتریکی مورد نیاز چیلر تراکمی ($Max.W^E$) و حداکثر تقاضای توان الکتریکی در ساختمان مینا ($Max.D^{el}$)، حد بالا و پایین توان تولیدی میکروتوربین جهت مصرف در ساختمان مینا در رابطه (۵۱) مشخص شده است. رابطه (۵۲) نشان می‌دهد که حداکثر توان تولیدی میکروتوربین که در ساختمان مینا مصرف می‌شود، از ظرفیت نصب شده میکروتوربین تجاوز نمی‌کند (توان تولیدی میکروتوربین گازی در یک روز معمولی تابستانی و زمستانی که در ساختمان مصرف می‌شود، توسط الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات، بین حد بالا و پایین به گونه‌ای مشخص می‌شود که تابع هدف کمینه گردد).

$$W_t^{MGT} = W_{sale,t}^{MGT} + W_{use,t}^{MGT} \rightarrow W_{sale,t}^{MGT} = W_t^{MGT} - W_{use,t}^{MGT} \quad (50)$$

$$0 \leq W_{use,t}^{MGT} \leq Max.D^{el} + Max.W^E \quad (51)$$

$$Max.W_{use,t}^{MGT} \leq Cap^{MGT} \quad (52)$$

محدودیت (۵۳) نشان می‌دهد که تمامی توان تولیدی سیستم فتوولتائیک/ترمال به شبکه برق فروخته می‌شود (به دلیل سیاست تشویقی دولت ایران در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر، قیمت برق فروخته شده سیستم فتوولتائیک/ترمال تقریباً ۱۸ برابر قیمت خرید برق است. بدین جهت بهترین حالت، فروش کل برق تولیدی این سیستم‌ها به شبکه است).

$$W_t^{PVT} = W_{sale,t}^{PVT} + W_{use,t}^{PVT} \rightarrow W_{use,t}^{PVT} = 0 \quad (53)$$

مطابق رابطه (۵۴)، برق تولیدی سیستم PV/T در زمان t نباید از حد محاز تجاوز کند.

$$W_t^{PVT} \leq G_t \times \eta_{el}^{PVT} \times A_{PVT} \quad (54)$$

رابطه (۵۵) محدودیت ماکزیمم فروش برق سیستم PV/T را نشان می‌دهد.

$$Max.W_{sale,t}^{PVT} \leq Cap^{PVT} \rightarrow (MaxCap^{PVT} = 55.8KW) \quad (55)$$

خرید برق در زمان t از رابطه (۵۶) مشخص می‌شود که به عنوان محدودیت خرید برق لحاظ می‌شود.

$$W_t^{Buy} = D_t^{el} + W_t^{Sale} + W_t^E - W_{use,t}^{MGT} - W_{use,t}^{PVT} \rightarrow \begin{cases} W_{use,t}^{PVT} = 0 \\ W_t^{Sale} = W_{sale,t}^{MGT} + W_{sale,t}^{PVT} \end{cases} \quad (56)$$

۳-۳. متغیرهای تصمیم

متغیرهای تصمیم در یک مسأله به دو دسته گسسته و پیوسته تقسیم می‌شوند. متغیرهای موجود

در این مسأله از نوع گسسته و پیوسته هستند و شامل متغیرهای مستقل و متغیرهای وابسته هستند. متغیرهای مستقل مسأله عبارت‌اند از:

○ ظرفیت میکروتوربین گاز (CAP^{MGT})، ظرفیت بویلر بخار (CAP^B)، ظرفیت چیلر جذبی

(CAP^A)، ظرفیت چیلر تراکمی (CAP^E) و ظرفیت کلکتور فتوولتائیک/ترمال (CAP^{PVT}).

○ توان برودتی تولیدی توسط چیلر جذبی در یک روز معمولی تابستانی

$$(R_t^A \rightarrow (24Variables))$$

○ توان الکتریکی تولیدی میکروتوربین جهت مصرف در ساختمان مبنا در یک روز معمولی

$$. (W_{use,t}^{MGT} \rightarrow (48 Variables))$$

متغیرهای وابسته به متغیرهای مستقل عبارت‌اند از:

○ توان حرارتی تولیدی توسط میکروتوربین گازی و کلکتور فتوولتائیک/ترمال در یک روز

$$. (Q_t^{PVT} \text{ و } Q_t^{MGT})$$

○ توان حرارتی تولیدی توسط بویلر کمکی در یک روز معمولی زمستانی (Q_t^B).

- سوخت مصرفی بویلر و میکروتوربین گازی در یک روز معمولی تابستانی و زمستانی
(F_t^B و F_t^{MGT})
- توان برودتی تولیدی توسط سیستم چیلر تراکمی در یک روز معمولی تابستانی (R_t^E)
- توان الکتریکی تولیدی میکروتوربین گازی در یک روز معمولی زمستانی و تابستانی
(W_t^{MGT})
- توان الکتریکی تولیدی سیستم فتوولتائیک/ترمال در یک روز معمولی تابستانی و زمستانی
(W_t^{PVT})
- مساحت قابل نصب سیستم فتوولتائیک/ترمال (A_{PVT})
- میزان توان تولیدی میکروتوربین و سیستم فتوولتائیک/ترمال در یک روز معمولی تابستانی و زمستانی که به شبکه فروخته می‌شود ($W_{Sale,t}^{PVT}$ و $W_{Sale,t}^{MGT}$)
- میزان توان الکتریکی که در یک روز معمولی تابستانی و زمستانی از شبکه خریداری می‌شود
(W_t^{Buy})

۴. اطلاعات مورد نیاز برای حل مسأله

۴-۱. اطلاعات فنی و اقتصادی میکروتوربین گازی

میکروتوربین‌های گازی از شرکت Capstone انتخاب شده که اطلاعات اطلاعات فنی و اقتصادی آن تحت شرایط در جدول (۲) مشخص شده است [۲]، [۳].

جدول ۲. اطلاعات فنی و اقتصادی میکروتوربین گازی

C30	C65	C95	C130	C160	C195	C260	مدل میکروتوربین
۳۰	۶۵	۹۵	۱۳۰	۱۶۰	۱۹۵	۲۶۰	توان خاص خروجی (KW)
۲۶	۲۸	۲۷.۵	۲۸	۲۷.۷	۲۸	۲۸	راندمان الکتریکی (%)
۴۸	۵۳	۵۱.۳	۵۳	۵۳	۵۳	۵۳	راندمان حرارتی (%)
۰.۳۱	۰.۴۹	۰.۸	۰.۹۸	۱.۲۹	۱.۴۷	۱.۹۶	دبی آگزوز (Kg/s)
۲۷۵	۳۰۹	۲۹۲	۳۰۹	۳۰۰	۳۰۹	۳۰۹	دمای آگزوز (°C)
۱۳۰۰	۱۳۰۰	۱۳۰۰	۱۳۰۰	۱۳۰۰	۱۳۰۰	۱۳۰۰	هزینه اولیه (\$/KW)
۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	تعمیر و نگهداری (\$/KWh)
۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	طول عمر (Y)

مأخذ: نتایج تحقیق

۴-۲. اطلاعات فنی و اقتصادی چیلر جذبی تک اثره

چیلرهای جذبی تک اثره از شرکت World Energy انتخاب شده که اطلاعات فنی و اقتصادی آن در جدول (۳) مشخص شده است [۲۵]، [۲۶].

جدول ۳. اطلاعات فنی و اقتصادی چیلر جذبی تک اثره

L30HH	L40HH	L60HH	L70HH	L80HH	L110HH	L135HH	مدل چیلر
۱۰۵	۱۴۱	۲۱۱	۲۴۶	۲۸۱	۳۸۷	۴۷۵	ظرفیت برودتی (KW)
۰.۸۲۷	۰.۸۲۷	۰.۸۲۷	۰.۸۲۷	۰.۸۲۷	۰.۸۲۷	۰.۸۲۷	ضریب عملکرد (COP)
۱۸۳	۱۸۳	۱۸۳	۱۸۳	۱۸۳	۱۸۳	۱۸۳	هزینه اولیه (\$/KW)
۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	تعمیر و نگهداری (\$/KWh)
۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	طول عمر (Y)

مأخذ: نتایج تحقیق

۴-۳. اطلاعات فنی و اقتصادی چیلر تراکمی هوا خنک

چیلرهای تراکمی هواخنک از شرکت RHOSS به عنوان سیستم کمکی برای چیلرهای جذبی تک اثره، انتخاب شده که اطلاعات فنی و اقتصادی آن در جدول (۴) مشخص شده است [۲۸].

جدول ۴. اطلاعات فنی و اقتصادی چیلر تراکمی هوا خنک

TCAVI	TCAVS	TCAVS	TCAVI	TCAVI	TCAVS	TCAVB	مدل چیلر
Z-1310	Z-2461	Z-2511	Z-1540	Z-2611	Z-2641	Z-2710	
۳۳۱	۴۳۹	۴۸۷	۵۲۰	۵۸۵	۶۱۷	۷۱۰	ظرفیت برودتی (KW)
۲/۹۴	۲/۸	۲/۷۶	۲/۶۳	۲/۷۷	۲/۷۵	۲/۹۶	ضریب عملکرد (COP)
۱۵۱	۱۵۱	۱۵۱	۱۵۱	۱۵۱	۱۵۱	۱۵۱	هزینه اولیه (\$/KW)
۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	تعمیر و نگهداری (\$/KWh)
۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	طول عمر (Y)

مأخذ: نتایج تحقیق

۴-۴. اطلاعات فنی و اقتصادی بویلر بخار

بویلرهای بخار انتخابی از نوع واترتیوپ است و از شرکت Packman انتخاب شده که اطلاعات فنی و اقتصادی آن در جدول (۵) مشخص شده است.

جدول ۵. اطلاعات فنی و اقتصادی بویلر بخار

PSBV	PSBV	PSBV	PSBV	PSBV	PSBV	PSBV	مدل بویلر
250	400	500	600	700	800	850	
۱۸۷	۳۰۰	۳۷۵	۴۵۰	۵۲۵	۶۰۰	۶۷۵	ظرفیت حرارتی (KW)
۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	راندمان (%)
۳۲۰	۳۲۰	۳۲۰	۳۲۰	۳۲۰	۳۲۰	۳۲۰	ماکزیمم دمای خروجی (°C)
۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	هزینه اولیه (\$/KW)
۰/۰۰۸	۰/۰۰۸	۰/۰۰۸	۰/۰۰۸	۰/۰۰۸	۰/۰۰۸	۰/۰۰۸	تعمیر و نگهداری (\$/KWh)
۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	طول عمر (Y)

مأخذ: نتایج تحقیق

۴-۵. اطلاعات فنی و اقتصادی کلکتور PVT/Water

کلکتور PVT/Water از نوع منوکریستال مدل POWERVOLT انتخاب شده و اطلاعات فنی و اقتصادی آن در جدول (۶) مشخص شده است.

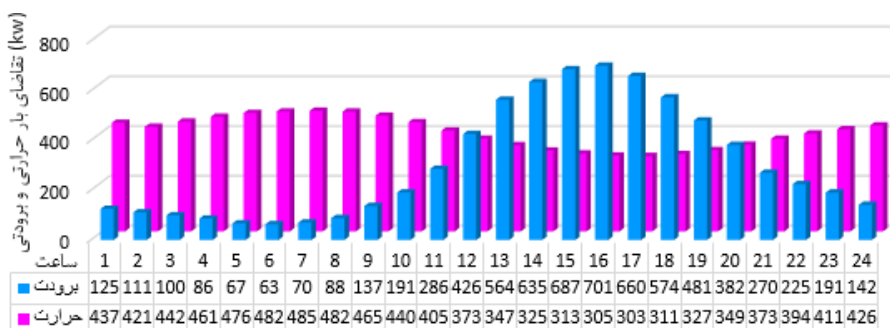
جدول ۶. اطلاعات فنی و اقتصادی کلکتور PVT/Water

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
ابعاد پنل (mm)	۱۶۰۱*۸۲۸*۹۰	راندمان الکتریکی ماژول (%)	۱۵.۱
تعداد سلول (n)	۷۲	راندمان کلکتور با تلفات صفر (%)	۴۷/۵
ولتاژ مدار باز (V)	۴۵/۲۶	ضریب تلفات حرارتی ($w/m^2.k$)	۸/۳۷
ولتاژ در نقطه ماکزیمم توان (V)	۳۷/۸۹	دبی جرمی (L/H)	۶۵
جریان اتصال کوتاه (A)	۵/۶۶	هزینه اولیه (\$/KWh)	۲۱۳۸
جریان در نقطه ماکزیمم توان (A)	۵/۲۸	تعمیرونهنگهداری (\$/KWh)	۰/۰۰۱
ماکزیمم توان (W)	۲۰۰	طول عمر (YT)	۲۵

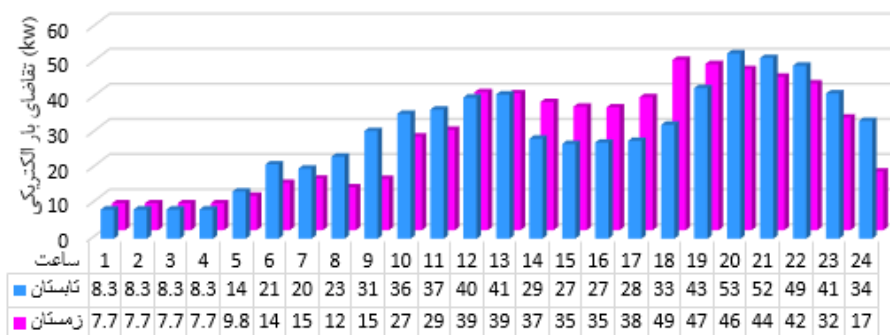
مأخذ: نتایج تحقیق

۴-۶. اطلاعات بار الکتریکی، حرارتی، برودتی و آب گرم مصرفی ساختمان مبنا

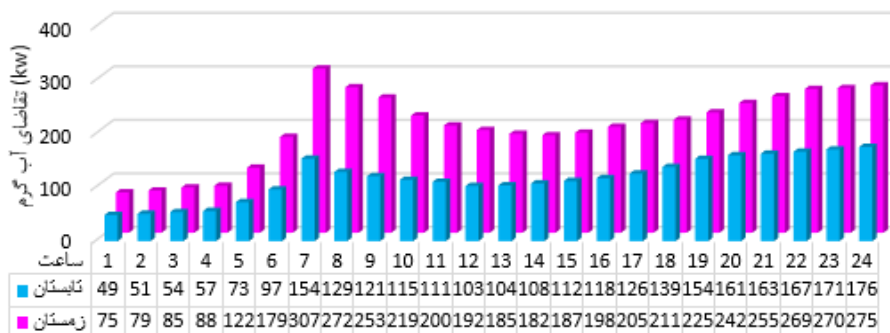
برای نمونه، سیستم بهینه مورد نظر برای یک ساختمان مسکونی در شهر کرمان اجرا خواهیم کرد. بدین منظور با توجه به شرایط آب و هوایی شهر کرمان، بار حرارتی و برودتی ساختمان مسکونی مبنا، به ترتیب یک روز معمولی زمستانی و یک روز معمولی تابستانی توسط نرم افزار کریر شبیه سازی شده است (شکل ۳)، بار الکتریکی ساختمان مسکونی مبنا متشکل از بار الکتریکی مورد نیاز سیستم روشنایی و بار الکتریکی مورد نیاز تجهیزات الکتریکی است که در یک روز معمولی تابستانی و زمستانی در شکل (۴) مشخص شده است. آب گرم مصرفی ساختمان مبنا در یک روز معمولی تابستانی و زمستانی محاسبه شده و در شکل (۵) مشخص شده است.



شکل ۳. تقاضای بار حرارتی و برودتی در یک روز معمولی تابستانی و زمستانی



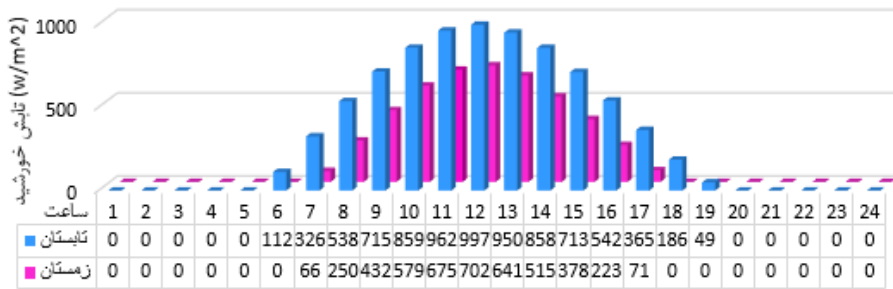
شکل ۴. تقاضای بار الکتریکی برای یک روز معمولی تابستانی و زمستانی



شکل ۵. تقاضای آب گرم مصرفی در یک روز معمولی تابستانی و زمستانی

۴-۷. اطلاعات شدت تابش خورشید در شهر کرمان

شدت تابش خورشید در شهر کرمان از سازمان هواشناسی (*weather.ir*) دریافت شده و برای یک روز معمولی تابستانی و زمستانی در شکل (۶) مشخص شده است.



شکل ۶. شدت تابش خورشید در یک روز معمولی تابستانی و زمستانی در شهر کرمان

۴-۸. اطلاعات خرید و فروش برق و خرید گاز طبیعی در کشور ایران

اطلاعات مربوط به خرید و فروش برق و خرید گاز طبیعی در کشور ایران (سال ۱۳۹۴) در جدول (۷) الی (۹) مشخص شده است [۳۲]، [۳۳]، [۳۴].

جدول ۷. قیمت فروش برق سیستم تولید همزمان و سیستم خورشیدی

نوع سیستم	قیمت فروش برق (\$/KWh)
تولید همزمان با راندمان مؤثر بالای ۵۰٪	۰/۰۳۶
سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه بالای ۲۰ کیلووات	۰/۲۹۶

(۱ دلار معادل ۳۰۰۰۰ ریال لحاظ شده است)

مأخذ: نتایج تحقیق

جدول ۸. قیمت خرید برق

قیمت خرید برق (\$/KWh)	مصرفی ماهانه (KWh)
۰/۰۲۱۲	۰-۳۰۰

(متوسط پله مصرف ۱،۲ و ۳ لحاظ شده است)

مأخذ: نتایج تحقیق

جدول ۹. قیمت گاز مصرفی سیستم تولید همزمان و تولید جداگانه

قیمت خرید گاز طبیعی (\$/KWh)	ماه مصرف
۰/۰۰۲۵	ماه‌های گرم سال (تولید جداگانه)
۰/۰۸۲	ماه‌های گرم سال (تولید همزمان)
۰/۰۰۲۵	ماه‌های سرد سال (تولید همزمان و جداگانه)

مأخذ: نتایج تحقیق

ضرایب مورد استفاده برای محاسبه میزان آلاینده‌گی دی‌اکسید کربن این ضرایب در جدول (۱۰) مشخص شده است.

جدول ۱۰. ضرایب آلاینده‌گی دی‌اکسید کربن

۰/۴۶۵g _{CO2} /KWh	فاکتور آلاینده‌گی CO2 نیروگاه گازی [۱]
۰/۲۰۱۶Kg _{CO2} /KWh	فاکتور آلاینده‌گی CO2 گاز طبیعی [۴]

مأخذ: نتایج تحقیق

۵. نتایج شبیه سازی

نتایج به دست آمده در جدول (۱۱) مشخص شده است.

جدول ۱۱. نتایج بهینه سازی در سناریوهای مختلف

سناریو	۱	۲	۳	۴	۵
ظرفیت میکروتوربین گازی (kw)	۰	۰	۳۰	۱۹۵	۱۹۵
ظرفیت بویلر (kw)	۶۷۵	۶۷۵	۶۰۰	۱۸۷	۱۸۷
ظرفیت چیلر جذبی تک اثره (kw)	۰	۱۰۵	۰	۲۸۱	۲۸۱
ظرفیت چیلر تراکمی هوا خنک (kw)	۷۱۰	۶۱۷	۷۱۰	۴۳۹	۴۳۹
ظرفیت فتوولتائیک اترمال (kw)	۵۲/۸	۰	۵۲/۸	۰	۵۲/۸
تابع هدف (\$/year)	۲۵۷۹۴	۵۱۵۳۹	۲۴۰۸۰	۲۹۰۵۵	۶۹۰۳/۶
کل هزینه اولیه (\$)	۲۳۴۲۷۱	۱۲۶۵۵۷	۲۷۱۶۹۶	۳۷۵۱۳۹	۴۸۸۰۲۵
هزینه اولیه (\$/year)	۲۵۹۱۳	۱۴۰۴۶	۳۰۰۲۴	۴۱۳۵۷	۵۳۷۹۳
هزینه تعمیر و نگهداری (\$/year)	۱۶۴۴۳	۱۵۲۳۰	۱۷۲۱۴	۲۰۳۳۱	۲۱۵۴۴
هزینه خرید سوخت گازی (\$/year)	۵۱۱۴	۹۸۴۵	۶۹۴۰	۱۵۸۵۲	۱۵۸۵۲
هزینه خرید توان الکتریکی (\$/year)	۱۴۸۴۸	۱۲۴۱۸	۱۳۴۳۵	۷۰۵۲	۷۰۵۲
درآمد فروش توان الکتریکی (\$/year)	۳۵۸۹۵	۰	۴۲۹۰۵	۵۷۹۱۷	۹۳۸۱۴
درآمد ناشی از تامین آب گرم مصرفی PV/T (\$/year)	۶۲۷/۷	۰	۶۲۷/۷	۰	۶۲۷/۷
توان مفید حرارتی تولیدی میکروتوربین (kwh/year)	۰	۰	۴۵۹۹۲۹	۳۰۴۹۴۸۸	۳۰۴۹۴۸۸
توان مفید حرارتی تولیدی بویلر (kwh/year)	۱۷۱۹۴۸۶	۲۲۰۹۹۱۸	۱۵۰۷۳۵۶	۲۴۶۸۲۸	۲۴۶۸۲۸
توان حرارتی تولیدی فتوولتائیک اترمال (kwh/year)	۲۱۳۴۲۴	۰	۲۱۳۴۲۴	۰	۲۱۳۴۲۴

سناریو	۵	۴	۳	۲	۱
توان الکتریکی تولیدی میکروتوربین (kwh/year)	۱۶۹۴۱۶۰	۱۶۹۴۱۶۰	۲۶۰۶۴۰	۰	۰
توان الکتریکی تولیدی فتوولتائیک/ترمال (kwh/year)	۱۲۱۲۶۸	۰	۱۲۱۲۶۸	۰	۱۲۱۲۶۸
فروش توان الکتریکی میکروتوربین گازی (kwh/year)	۱۶۰۸۸۴۴	۱۶۰۸۸۴۴	۱۹۴۷۰۳	۰	۰
فروش توان الکتریکی فتوولتائیک/ترمال (kwh/year)	۱۲۱۲۶۸	۰	۱۲۱۲۶۸	۰	۱۲۱۲۶۸
توان برودتی تولیدی چیلر جذبی (kwh/year)	۸۵۱۰۶۸	۸۵۱۰۶۸	۰	۴۰۵۵۸۷	۰
توان برودتی تولیدی چیلر تراکمی (kwh/year)	۴۷۰۵۶۱	۴۷۰۵۶۱	۱۳۲۱۶۲۹	۹۱۶۰۴۲	۱۳۲۱۶۲۹
خرید توان الکتریکی (kwh/year)	۳۳۲۶۴۱	۳۳۲۶۴۱	۶۳۳۷۳۳	۵۸۵۷۶۳	۷۰۰۳۹۹
سوخت مصرفی میکروتوربین گازی (kwh/year)	۶۰۵۰۵۷۱	۶۰۵۰۵۷۱	۱۰۰۲۴۶۲	۰	۰
سوخت مصرفی بویلر (kwh/year)	۲۹۰۳۸۶	۲۹۰۳۸۶	۱۷۷۳۳۶۰	۲۵۹۹۹۰۳	۲۰۲۲۹۲۵
کل سوخت مصرفی (kwh/year)	۶۳۴۰۹۵۸	۶۳۴۰۹۵۸	۲۷۷۵۸۲۲	۲۵۹۹۹۰۳	۲۰۲۲۹۲۵
آلاینده‌گی دی‌اکسید کربن در ساختمان (tons/year)	۲۳۰/۴۲	۲۳۰/۴۲	۶۶۵/۴۹	۷۹۶/۵۲	۷۳۳/۵
آلاینده‌گی دی‌اکسید کربن (tons/year)	۱۴۳۳	۱۴۳۳	۱۵۴/۳	۷۹۶/۵۲	۷۳۳/۵
هزینه یکنواخت سالیانه (\$/year)	۷۵۳۱	۲۹۰۵۴	۲۵۷۳۲	۵۲۲۴۸	۲۷۸۲۳
دوره بازگشت سرمایه (year)	۵/۱۶۷	۶/۴۷۷	۷/۲۴۱	-	۶/۴۱۴

مأخذ: نتایج تحقیق

- مطابق جدول (۱۱) پنج نوع سناریو مختلف مورد بررسی قرار گرفته و توسط الگوریتم PSO بهینه‌سازی شده است:
- سناریو اول: مربوط به سیستم تولید جداگانه با سیستم فتوولتائیک/ترمال است که در این حالت بار برودتی ساختمان مینا فقط با استفاده از چیلر تراکمی و بار حرارتی توسط بویلر بخار تأمین خواهد شد.
 - سناریو دوم: مربوط به سیستم تولید جداگانه با سیستم فتوولتائیک/ترمال است که در این حالت بار برودتی ساختمان مینا با استفاده از چیلر جذبی و چیلر تراکمی و بار حرارتی توسط بویلر بخار تأمین خواهد شد.
 - سناریو سوم: مربوط به سیستم تولید همزمان بدون سیستم فتوولتائیک/ترمال است که در این حالت بار برودتی ساختمان مینا فقط با چیلر تراکمی و بار حرارتی توسط میکروتوربین گازی و بویلر بخار تأمین خواهد شد.
 - سناریو چهارم: مربوط به سیستم تولید همزمان بدون سیستم فتوولتائیک/ترمال است که در این حالت بار برودتی ساختمان مینا با استفاده از چیلر جذبی و چیلر تراکمی و بار حرارتی توسط میکروتوربین گازی و بویلر بخار تأمین خواهد شد.
 - سناریو پنجم: مربوط به سیستم تولید همزمان با سیستم فتوولتائیک/ترمال است که در این حالت بار برودتی ساختمان مینا با استفاده از چیلر جذبی و چیلر تراکمی و بار حرارتی توسط میکروتوربین گازی و بویلر بخار تأمین خواهد شد.
- نتایج نشان می‌دهد که سناریو ۵ با هزینه یکنواخت سالیانه ۷۵۳۱ دلار بهینه‌ترین سیستم جهت تأمین بارهای الکتریکی، حرارتی و برودتی ساختمان مینا است.

۶. نتیجه‌گیری

در طی سال‌های اخیر در کشور ایران توجه ویژه‌ای به انرژی‌های تجدید پذیر و سیستم‌های تولید همزمان شده است. از جمله تشویقات وزارت نیرو و سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) در این زمینه، خرید تضمینی برق تولیدی سیستم‌های خورشیدی و سیستم‌های تولید همزمان با قیمت بسیار خوبی نسبت به قیمت فروش برق است. همچنین وزارت نیرو و سانا تأمین سوخت سیستم‌های تولید همزمان را با نرخ تأمین سوخت نیروگاه‌های برق، به مدت ۳۶۵ روز سال (در طول ۲۰ سال) تضمین می‌کند.

در این مقاله پنج سناریو مختلف (جدول ۱۱) جهت تأمین بارهای الکتریکی، حرارتی و برودتی یک ساختمان (به عنوان نمونه یک ساختمان مسکونی در شهر کرمان) مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت سناریو ۵ بهینه‌ترین سیستم معرفی شد. در این سناریو ظرفیت بهینه میکروتوربین گازی، بویلر کمکی، چیلر جذبی، چیلر تراکمی و فتوولتائیک/ترمال به ترتیب برابر با ۱۹۵ کیلووات، ۱۸۷ کیلووات، ۲۸۱ کیلووات، ۴۳۹ کیلووات و ۵۲/۸ کیلووات تعیین شد و هزینه سرمایه‌گذاری اولیه در ۵/۱۶۷ سال ابتدایی قابل بازگشت است.

منابع

- [1] Besharati Zahed, Ameir Mohammad (2016). "Optimal Design and Operation of District Heating and Cooling Networks with CCHP systems in a Residential Complex". *Energy and Buildings*, pp. 135–148.
- [2] Basrawi F., Ibrahim H. and T. Yamada (2015). "Optimal Unit Sizing of Biogas-Fuelled Micro Gas Turbine Cogeneration Systems in a Sewage Treatment Plant", *Energy Procedia*, pp. 1052–1058.
- [3] Basrawi F., Thamir K. Ibrahim, Khairul Habib and T. Yamada (2016). "Effect of Operation Strategies on the Economic and Environmental Performance of a Micro gas Turbine Trigeneration System in a Tropical Region". *Energy*, pp 262–272.
- [4] Bracco S., Gabriele D. and S. Silvia (2013). "Economic and Environmental Optimization model for the Design and the Operation of a Combined heat and Power Distributed Generation System in an Urban area", *Energy*, pp 1014–1024.
- [5] Chow TT., He W. and Ji J. (2007). "An Experimental Study of Facade-integrated Photovoltaic/ water-heating system". *Applied Thermal Engineering*, No.27, pp.37–45.
- [6] Dodds P. E., Hawkes A. D., McDowall W., Li F., Staffell I. and P. Grünwald (2014). "The Role of Hydrogen and Fuel Cells in Providing Affordable", *Secure Lowcarbon Heat, H2FC Supergen*, London, Imperial College London, pp. 15-25.
- [7] Eberhart RC, Shi Y. (2001). "Tracking and Optimizing Dynamic Systems with Particle Swarms. Proc. of the Congress on Evolutionary Computation", Seoul, Korea, pp. 94–97.
- [8] Fan S-KS, Liang Y-C., Zahara E. (2006). "A Genetic Algorithm and a Particle Swarm Optimizer Hybridized with Nelder-Mead simplex search", *Comput Industrial Eng*; pp., pp, 401-25.
- [9] Farahnak Mehdi, Farzaneh-Gord Mahmood, Deymi-Dashtebayaz Mahdi, Dashti Farshad (2015). "Optimal Sizing of Power Generation unit Capacity in

- ICE-driven CCHP systems for Various Residential Building Sizes”. *Applied Energy*, pp. 203–219.
- [10] Gilbert M. Masters (2004). “Renewable and Efficient Electric Power Systems”. Stanford University- To the memory of my father, Gilbert S. Masters, 1910–2004.
- [11] Herrando María, Markides Christos N. (2016). “Hybrid PV and solar-thermal systems for Domestic Heat and Power Provision in the UK: Techno-economic Considerations”, *Applied Energy*, pp 512–532.
- [12] Hu X., Eberhart RC. (2001). “Tracking dynamic Systems with PSO: where’s the Cheese. In: Proceedings of the workshop on Particle Swarm Optimization”, Indianapolis, IN, USA.
- [13] Huangfu Y., Wu J. Y., Wang R. Z., Xia Z. Z. (2007). “Experimental Investigation of Adsorption Chiller for Micro-scale BCHP system Application”, *Energy and Buildings*, Vol. 2, No. 39, pp. 120-127.
- [14] Kalogirou SA., Tripanagnostopoulos Y. (2006). “Hybrid PV/T Solar Systems for Domestic hot Water and Electricity Production”. *Energy Conversion and Management*, No. 47, pp. 3368–82.
- [15] Kim Jin-Hee, Park Se-Hyeon, Kang Jun-Gu, Kim Jun-Tae (2014). “Experimental performance of heating system with building integrated. PV/T (BIPV/T) collector”, *Energy Procedia*, pp 1374 – 1384.
- [16] Kong X. Q., Wang R. Z., Huang X. H. (2004). ”Energy efficiency and economic feasibility of CCHP driven by stirling engine”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, No. 9, pp 1433-1442.
- [17] Lianga Ruobing, Zhanga Jili, Zhoua Chao. (2015). “Dynamic Simulation of a Novel Solar Heating System Based on Hybrid Photovoltaic/Thermal Collectors (PV/T)”, *Procedia Engineering*. No. 121, pp. 675 – 683.
- [18] Longxi Li, Hailin Mu, Weijun Gao, Miao Li (2014). “Optimization and Analysis of CCHP System based on Energy Loads Coupling of Residential and Office Buildings”, *Applied Energy*, pp 206–216.
- [19] Stoppato Anna, Cavazzini Giovanna, Ardizzon Guido, Rossetti Antonio (2014). “A PSO (particle swarm optimization)-based model for the Optimal Management of a Small PV (Photovoltaic)-pump hydro Energy Storage in a Rural dry are”. *Energy*, pp.168-174.
- [20] Tripanagnostopoulos Y., Nousia Th., Souliotis M., Yianoulis P. (2002). “Hybrid Photovoltaic/thermal Solar Systems”, *Sol Energy*, No.11, pp. 217–34.
- [21] Zhang Jian, Cho Heejin, Knizley Alta (2016). “Evaluation of Financial Incentives for Combined Heat and Power (CHP) Systems in U.S. Regions (2016). “Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp 738–762.
- [22] <https://www.microturbine.com> Capstone Turbine Corporation, 21211 Nord h off Street, Chatsworth, CA 91311, USA. C-65 performance manual,
- [23] <https://www.solar-district-heating.eu> “Different types of collectors, their efficiencies and calculation of energy output is described along with the solar collector fluid properties”. August 2012.

-
- [24] <https://www.capstoneturbine.com>
[25] <http://worldenergyeuropa.eu> “WORLD ENERGY Absorption Chiller Absorption Chiller & Heater Absorption Heat Pump”
[26] <http://www.yorktehran.com>
[27] <http://www.rhoss.com> “TCAVBZ-TCAVIZ 1270÷21600 TCAVSZ 1270÷21600 Z-Power Range”
[28] <http://www.ashenattech.com>
[29] <http://www.Packmangroup.com> (Factory: Packman St. Basige St. Imam khomeini Ave. Isfahan. Iran)
[30] <http://www.minimisegroup.com/hybrid-solar-PV/T-panels.html>
[31] <http://weather.kr.ir>
[32] <http://www.sun.org.ir> “RENEWABLE ENERGY ORGANIZATION OF IRAN”
[33] <http://www.tavanir.org.ir>
[34] <http://www.nigc.ir>