نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۲، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۸، صفحه ۱۱۹ – ۹۱

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

تاریخ دریافت:
۱۳۹۸ / ۵ / ۱۶

تاریخ پذیرش:
۱۳۹۸ / ۸ / ۸

کلمات کلیدی:
الگوریتم بهینه‌سازی،
بار اکتریکی،
بار حرارتی و برودتی،
سیستم تولید همزمان
و تولید جداگانه،
ساختمان

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 مبنا است. در این سیستم بهینه، درآمد فروش برق سالیانه ۹۳۸۱۴ دلار، هزینه خرید برق سالیانه ۷۰۵۲ دلار، هزینه خرید سوخت مصرفی سالیانه ۱۵۸۵۲دلار و تولید سالیانه آلایندگی دی‌اکسید کربن در ساختمان مبنا ۲۳۰/۴۲ تن است. دوره بازگشت سرمایه اولیه در این پروژه، ۵/۱۶۷ سال برآورد شده است.

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
(نویسنده مسئول) f.keynia@kgut.ac.ir
۳. استاد بخش مهندسی مکانیک دانشگاه شهید باهنر کرمان ameri_mm@uk.ac.ir

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

۱. مقدمه

ساختمان‌ها به عنوان یکی از بخش‌های مهم در زندگی امروزی، ۴۰ درصد از مصرف انـرژی در جهـان را دارا هستند و بخش قابل توجهی از آلودگی‌های زیستی را تولید و منتشر می‌کنند. نیاز روزافزون جهان به انررژی و رشد قیمت حامل‌های انرژی و محدود شدن و فناپذیری آنهـا در آینـده نزدیـک، ضـرورت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و روش‌های کاهش مصرف انرژی از قبیل سیسـتم‌هـای خورشـیدی و سیستم‌های تولید همزمان را بیش از پیش نمایان می‌کند.

موقعیت جغرافیایی کشور ایران موجب شده است که منبع بسیار بزرگی از خورشـید در آن موجـود باشد و از نظر دریافت انرژی خورشیدی در شمار بهترین کشورهای جهـان محسـوب گـردد. ایـن منبـع انرژی تجدیدپذیر، با محیط زیست سازگار است و می‌تواند جایگزین مناسبی برای سـوخت‌های فسـیلی باشد. سیستم تولید همزمان برق، حرارت و برودت که گاهی تحت عنـوان تولیـد مشـترک نیـز نامیـده می‌شود، سیستم تأمین‌کننده انرژی با راندمان ۹۰–۷۰ درصد است که در آن انرژی الکتریکی مورد نیـاز در محل، به وسیله یک محرک اولیه تولید می‌گردد و حرارت اتلافی از محرک اولیه بـه منظـور تـأمین 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، حـرارت و برودت) با محرک اولیه موتور استرلینگ با یک سیستم تولید جداگانه مقایسه کردند کـه سیسـتم تولیـد همزمان با محرک اولیه موتور استرلینگ ۳۳ درصد در مصـرف انـرژی اولیـه صـرفه جـویی می‌نمایـد. همچنین نتایج نشان داد که عمکرد چیلر جذبی تأثیر زیادی بر راندمان سیستم تولید همزمان سه گانـه دارد [۱۶]. هنگ فو و همکاران یک سستم میکروCCHP خانگی مورد بررسی تجربی قرار دادنـد. آنهـا عمکرد چیلر جذبی را تحت شرایط مختلف گرمایشی مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که تقریبـاً یـک رابطه خطی بین خروجی چیلر جذبی و تغییر دمای آب گرم ورودی وجود دارد [۱۳].

دادس و همکاران یک سیستم تولید همزمان بر پایه پیل سوختی اسید فسفریک را بررسی کردنـد. نتایج نشان داد که راندمان الکتریکی پیل‌های سوختی اسید فسفریک بـین ۴۲–۳۷ درصـد اسـت، امـا وقتی در سیستم تولید همزمان به‌کار می‌رود، راندمان آنها می‌تواند به ۸۵ درصد نیز برسد [۶]. لاینگـا و

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

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 مبنا دارای کمترین دوره بازگشت سرمایه با ۵/۰۸ سال است [۹].

چو و همکاران بر روی سیستم ترکیبیPVT/Water در اواخر تابستان در شهر هنگ کنگ مطالعه تجری انجام دادند عملکرد سیستم را توسط جریان طبیعی آب و جریان اجباری آب توسط پمپ را بررسی کردند و دریافتند 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 دریافتند 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 دریافتند هزینه سیستم PVT/Air و PVT/Water با سلول پلی‌کریستال به ترتیب حدود ۵ درصد و ۸ درصد بالاتر از سیستم PV است وPVT/Water عملکرد بهتری دارد [۲۰].

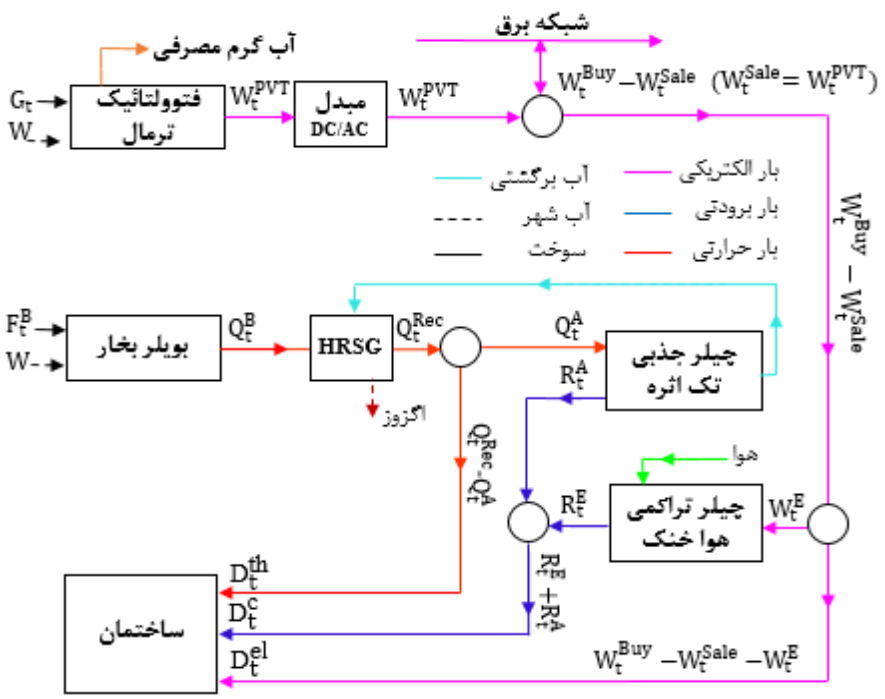
در نتیجه در این مقاله، با بررسی کردن سناریوهای مختلف از بین سیستم تولید جداگانه برق، حرارت و برودت[1] (SCHP) سیستم تولید همزمان برق، حرارت و برودت[2] (CCHP) بهینه‌ترین سیستم جهت تأمین بارهای الکتریکی، حرارتی و برودتی ساختمان انتخاب می‌شود. سیستم طراحی انتخابی، در انواع ساختمان‌های مسکونی، اداری، تجاری و... کاربرد خواهد داشت.

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

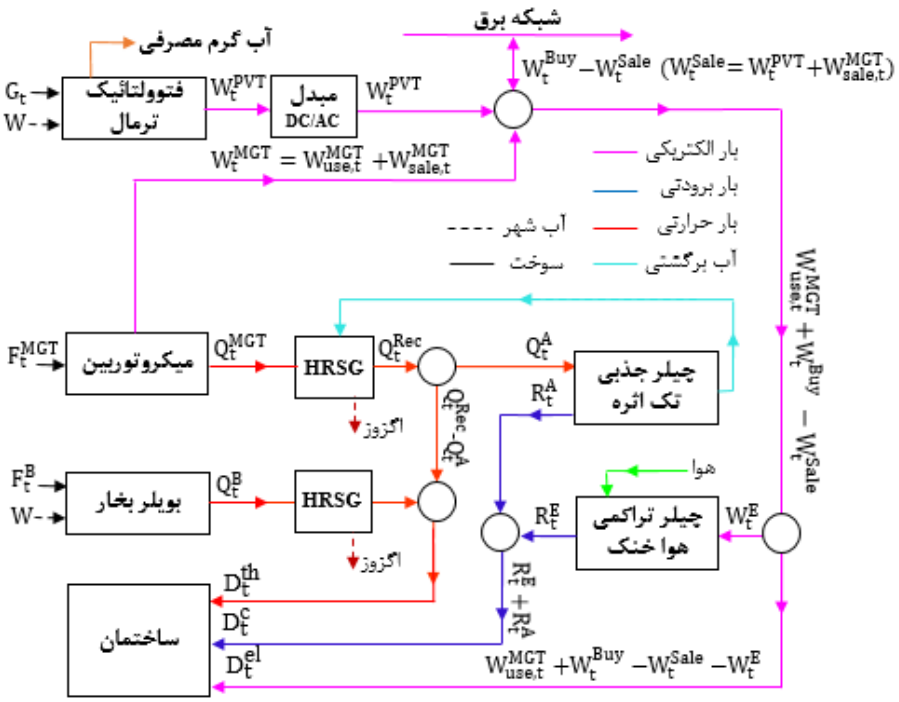
۲. شرح مسأله

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]



شکل ۲. شماتیک سیستم تولید همزمان

جدول ۱. سناریوهای مورد بررسی

سناریو	۵	۴	۳	۲	۱
میکروتوربین گازی	✓	✓	✓	۰	۰
بویلر	✓	✓	✓	✓	✓
چیلر جذبی تک اثره	✓	✓	۰	✓	۰
چیلر تراکمی هوا خنک	✓	✓	✓	✓	✓
فتوولتائیک/ترمال	✓	۰	✓	۰	✓

مأخذ: نتایج تحقیق

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

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 $X=\{x_1, x_2, ...x_n\}$ است که تابع هدف را کمینه می‌کند (n تعداد متغیری است که بهینه شده است) و براساس فضای جست‌وجو، بین حد بالا X^u و پایین X^l، مقدار بهینه X پیدا می‌شود: $X^l \le X \le X^u$

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: $X_1, X_2, ..., X_{np}$ ؛ اگر n تعداد متغیرها باشد، تعداد ذرات برابر با ۲n است [۸].

۲. مقدار دهی اولیه گروه: یک مکان تصادفی برای هر ذره‌ی $X_j(0) \to j=1,2,...np$ در فضای جست‌وجو تولید می‌شود. در ابتدا (تکرار۱) 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 ذره‌ی $X_j(i)$ از رابطه (۱) بروز رسانی می‌شود.

$$V_j(i) = w.V_j(i-1) + c_1 r_1.\left[P_{best,j} - X_j(i-1)\right] + c_2 r_2.\left[G_{best,j} - X_j(i-1)\right] \quad i=1,2,...np \qquad (۱)$$

که در آن w وزن اینرسی است و طبق مرجع [۱۲]، $w = 0.5 + \left(r/2\right)$ لحاظ شده است. 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 صفرو یک تولید می‌شوند.

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

$$X_j(i) = X_j(i-1) + \Delta t.V_j(i) \quad j = 1,2,...np \tag{۲}$$

۵. بررسی همگرایی: همگرایی زمانی حاصل می‌شود که موقعیت همه ذرات بـه مجموعـه‌ای مشـابه از جواب‌ها همگرا شود.

۳-۱. تابع هدف

به طور کلی تابع هدف سیستم همزمان و تولید جداگانه به صـورت رابطـه (۱) تعریـف می‌شـود و هـر جزئی که در هر سناریو نباشد، مقدار آن صفر است.

$$O.F = Min.Cost$$
$$Cost = \left(C^{MGT} + C^B + C^A + C^E + C^{PVT} + C_F^B + C_F^{MGT} + C^M + C^G - B^G - B_Q^{PVT}\right) \tag{۳}$$

C^{MGT} کل هزینه اولیه برای خرید میکروتوربین گازی برحسـب دلار بـر سـال اسـت و از رابطـه (۴) به‌دست می‌آید.

$$C^{MGT} = CRF^{MGT}\left(C_C^{MGT} \times Cap^{MGT}\right) \tag{۴}$$

که در آن CRF^{MGT}, C_C^{MGT} و Cap^{MGT} به ترتیب ضریب بازگشت سرمایه میکروتوربین گازی، هزینـه 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) به‌دست می‌آید.

$$C^B = CRF^B\left(C_C^B \times Cap^B\right) \tag{۵}$$

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) به‌دست می‌آید.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

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

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

C^E کل هزینه اولیه برای خرید چیلر تراکمی برحسب دلار بر سال است و از رابطه (۷) به‌دست می‌آید.

$$C^E = CRF^E\left(C_C^E \times Cap^E\right) \quad (۷)$$

که در آن C_C^E, CRF^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) به‌دست می‌آید.

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

که در آن C_C^{PVT}, CRF^{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) به‌دست می‌آید که در این رابطه ir حداقل نرخ جذب کننده و nطول عمر هر تجهیز است [۱].

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

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) به‌دست می‌آید.

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

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

$$C_{F2}^{B} = \Delta t \sum_{t=1}^{24} \left(C_{f}^{B} \times F_{t}^{B} \right) \rightarrow (May\ \ to\ \ October \rightarrow \Delta t = 184) \quad (۱۲)$$

$$C_{F}^{MGT} = C_{F1}^{MGT} + C_{F2}^{MGT} \quad (۱۳)$$

$$C_{F1}^{MGT} = \Delta t \sum_{t=1}^{24} \left(C_{f}^{MGT} \times F_{t}^{MGT} \right) \rightarrow \ (November\ \ to\ April \rightarrow \Delta t = 180) \quad (۱۴)$$

$$C_{F2}^{MGT} + C_{F2}^{B} = \Delta t \sum_{t=1}^{24} \left(C_{f}^{MGT} \times F_{t}^{MGT} \right) \rightarrow (May\ \ to\ \ October \rightarrow \Delta t = 182) \quad (۱۵)$$

که در آن C_{F1}^{MGT} و C_{F2}^{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_{F1}^{B} و C_{F2}^{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.

$$C^{M} = C_{1}^{M} + C_{2}^{M} \quad (۱۶)$$

$$C_{1}^{M} = \Delta t_{11} \sum_{t=1}^{24} \left[\left(C_{M}^{MGT} \times W_{t}^{MGT} \right) \right] + \Delta t_{12} \sum_{t=1}^{24} \left[\left(C_{M}^{PVT} \times W_{t}^{PVT} \right) + \left(C_{M}^{B} \times Q_{t}^{B} \right) \right] \rightarrow \begin{cases} \Delta t_{11} = 180 \\ \Delta t_{12} = 182 \end{cases} \quad (۱۷)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

$$C_2^M = \Delta t_{21}\sum_{t=1}^{24}\left[\left(C_M^{MGT}\times W_t^{MGT}\right)+\left(C_M^A\times R_t^A\right)\right]+\Delta t_{22}\sum_{t=1}^{24}\left[\left(C_M^{PVT}\times W_t^{PVT}\right)+\left(C_M^B\times Q_t^B\right)+\left(C_M^E\times R_t^E\right)\right]\rightarrow\begin{cases}\Delta_{21}=182\\ \Delta t_{22}=184\end{cases} \quad (۱۸)$$

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

$$C^G = C_1^G + C_2^G \quad (۱۹)$$

$$C_1^G = \Delta t_1\sum_{t=1}^{24}\left(C_{el}^{Buy}\times W_t^{Buy}\right)\rightarrow(November\ \ to\ April\rightarrow\Delta t_1=182) \quad (۲۰)$$

$$C_2^G = \Delta t_2\sum_{t=1}^{24}\left(C_{el}^{Buy}\times W_t^{Buy}\right)\rightarrow(May\ \ to\ October\rightarrow\Delta t_2=184) \quad (۲۱)$$

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) به‌دست می‌آید.

$$B^G = B_1^G + B_2^G \quad (۲۲)$$

$$B_1^G = \Delta t_{11}\sum_{t=1}^{24}\left(C_{t,Sale}^{PVT}\times W_t^{PVT}\right)+\Delta t_{12}\sum_{t=1}^{24}\left(C_{t,Sale}^{MGT}\times W_{t,Sale}^{MGT}\right)\rightarrow\begin{cases}\Delta_{11}=175\\ \Delta t_{12}=180\end{cases} \quad (۲۳)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

$$B_2^G = \Delta t_{21}\sum_{t=1}^{24}\left(C_{t,Sale}^{PVT}\times W_t^{PVT}\right)+\Delta t_{22}\sum_{t=1}^{24}\left(C_{t,Sale}^{MGT}\times W_{t,Sale}^{MGT}\right)\rightarrow\begin{cases}\Delta_{21}=184\\ \Delta t_{22}=182\end{cases} \quad (۲۴)$$

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

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

$$B_Q^{PVT} = B_{Q1}^{PVT} + B_{Q2}^{PVT} \quad (۲۵)$$

$$B_{Q1}^{PVT} = \Delta t_1\sum_{t=1}^{24}\left(C_F^B\times Q_t^{PVT}\right)\rightarrow\{\Delta t_1 = 175 \quad (۲۶)$$

$$B_{Q2}^{PVT} = \Delta t_2\sum_{t=1}^{24}\left(C_F^B\times Q_t^{PVT}\right)\rightarrow\{\Delta t_2 = 184 \quad (۲۷)$$

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

۳-۲. محدودیت‌ها

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

$$D_t^{el} = W_{use,t}^{MGT} + W_{use,t}^{PV} + W_{use,t}^{PVT} - W_t^{Buy} - W_t^{Sale} - W_t^E \quad (۲۸)$$

$$D_t^{th} = Q_t^{MGT} + Q_t^B - Q_t^A \quad (۲۹)$$

$$D_t^c = R_t^A + R_t^E \quad (۳۰)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

که در آن D_t^{th}, D_t^{el} و D_t^c 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.

$$0 \le Cap^{MGT} \le 260kw \rightarrow Cap^{MGT} = [0\ \ 30\ \ 65\ \ 95\ \ 130\ \ 160\ \ 195\ \ 260] \quad (۳۱)$$

$$0 \le Cap^{B} \le 675kw \rightarrow Cap^{B} = [0\ \ 187\ \ 300\ \ 375\ \ 450\ \ 525\ \ 600\ \ 675] \quad (۳۲)$$

$$0 \le Cap^{A} \le 475kw \rightarrow Cap^{A} = [0\ \ 105\ \ 141\ \ 211\ \ 246\ \ 281\ \ 387\ \ 475] \quad (۳۳)$$

$$0 \le Cap^{E} \le 710kw \rightarrow Cap^{E} = [0\ \ 309\ \ 439\ \ 487\ \ 520\ \ 585\ \ 617\ \ 710] \quad (۳۴)$$

$$0 \le Cap^{PVT} \le 52.8kw \rightarrow Cap^{PVT} = [0\ \ 8.8\ \ 17.6\ \ 26.4\ \ 35.2\ \ 44\ \ 52.8] \quad (۳۵)$$

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

$$F_t^{MGT} = \frac{W_t^{MGT}}{\eta_{el}^{MGT}} \rightarrow (W_t^{MGT} = Cap^{MGT}) \quad (۳۶)$$

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

$$Q_t^{MGT} = \left(F_t^{MGT} - W_t^{MGT}\right) \times \eta_{\mathrm{Re}c} = F_t^{MGT} \times \left(1 - \eta^{MGT}\right) \times \eta_{\mathrm{Re}c} \quad (۳۷)$$

که در آن Q_t^{MGT} و $\eta_{\mathrm{Re}c}$ 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).

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

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

$$W_1^{MGT} = W_2^{MGT} = Min W_3^{MGT} = ... = Min W_{24}^{MGT} \quad (۳۸)$$

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].

$$F_t^B = \frac{Q_t^B}{\eta_B} \rightarrow (Q_t^B = D_t^{th} - Q_t^{MGT}) \ \& \ if \ D_t^{th} \le Q_t^{MGT} \rightarrow Q_t^B = 0 \quad (۳۹)$$

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.

$$W_t^E = \frac{R_t^E}{COP_E} \rightarrow R_t^E = D_t^c - R_t^A \ \& \ R_t^E \le Cap^E \ \& \ IF \ R_t^A \ge D_t^c \rightarrow R_t^E = 0 \quad (۴۰)$$

که در آن R_t^E, W_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.

$$Q_t^A = \frac{R_t^A}{COP_A} \rightarrow (R_t^A \le Cap^A \ \& \ R_t^A \rightarrow 24 Variables) \quad (۴۱)$$

که در آن R_t^A, Q_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.

$$Q_t^{MGT} \ge \frac{R_t^A}{COP_A} = Q_t^A \quad (۴۲)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

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].

$$P_{PVT,t} = P_{el,t} + P_{th,t} \quad (۴۳)$$

$$P_{el,t} = \eta_{el} \times A_{PVT} \times G_t \quad (۴۴)$$

$$P_{th,t} = \eta_{th} \times A_{PVT} \times G_t \quad (۴۵)$$

که در آن $P_{PVT,t}$ کل توان کلکتور PVT/Water در زمان t برحسب کیلووات، $P_{el,t}$ و $P_{th,t}$ 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 (جدول۶)).

$$A_{PVT} = A_1^{PVT} \times Cap^{PVT} \quad (۴۶)$$

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].

$$\eta_{th} = \eta_o - a_1\left(\frac{(T_m - T_a)}{G_{STC}}\right) \quad (۴۷)$$

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).

$$\eta_{el} = \frac{P_{\max} = V_m \times I_m}{A_{PVT} \times G_{STC}} \quad (۴۸)$$

که در آن $P_{\max}$ ماکزیمم راندمان کلکتورPVT/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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

$$A_{\max}^{PVT} \times Cos\theta \le Area\ Building \rightarrow \begin{cases} Area\ Building = 305m^2 \\ \theta = 30^o \end{cases} \quad (۴۹)$$

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 به‌اندازه عرض جغرافیایی محل نصب، روش مناسبی برای تنظیم مؤثر آنهاست (زاویه نصب کلکتور PVT/Water برای شهر کرمان۳۰ درجه و ماکزیمم مساحت مجاز مورد استفاده جهت نصب کلکتورPVT/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 مبنا ($W_{use.t}^{MGT}$) 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 مبنا ($Max.D^{el}$)، حد بالا و پایین توان تولیدی میکروتوربین جهت مصرف در ساختمان مبنا در رابطه (۵۱) مشخص شده است. رابطه (۵۲) نشان می‌دهد که حداکثر توان تولیدی میکروتوربین که در ساختمان مبنا مصرف می‌شود، از ظرفیت نصب شده میکروتوربین تجاوز نمی‌کند (توان تولیدی میکروتوربین گازی در یک روز معولی تابستانی و زمستانی که در ساختمان مصرف می‌شود، توسط الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات، بین حد بالا و پاین به گونه‌ای مشخص می‌شود که تابع هدف کمینه گردد).

$$W_t^{MGT} = W_{sale,t}^{MGT} + W_{use.t}^{MGT} \rightarrow W_{sale.t}^{MGT} = W_t^{MGT} - W_{use.t}^{MGT} \quad (۵۰)$$

$$0 \le W_{use,t}^{MGT} \le Max.D^{el} + Max.W^E \quad (۵۱)$$

$$Max.W_{use.t}^{MGT} \le Cap^{MGT} \quad (۵۲)$$

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

$$W_t^{PVT} = W_{sale,t}^{PVT} + W_{use,t}^{PVT} \rightarrow W_{use,t}^{PVT} = 0 \quad (۵۳)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

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

$$W_t^{PVT} \leq G_t \times \eta_{el}^{PVT} \times A_{\mathrm{PVT}} \tag{۵۴}$$

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

$$Max.W_{sale,t}^{PVT} \leq Cap^{PVT} \rightarrow (MaxCap^{PVT} = 55.8KW) \tag{۵۵}$$

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

$$W_t^{Buy} = D_t^{el} + W_t^{Sale} + W_t^{E} - W_{use,t}^{MGT} - W_{use,t}^{PVT} \rightarrow \begin{cases} W_{use,t}^{PVT} = 0 \\ W_t^{Sale} = W_{sale,t}^{MGT} + W_{sale,t}^{PVT} \end{cases} \tag{۵۶}$$

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

متغیرهای وابسته به متغیرهای مستقل مسأله عبارت‌اند از:

- توان حرارتی تولیدی توسط میکروتوربین گازی و کلکتور فتوولتائیک/ترمال در یک روز معمولی تابستانی و زمستانی (Q_t^{MGT} و Q_t^{PVT}).
- توان حرارتی تولیدی توسط بویلر کمکی در یک روز معمولی زمستانی (Q_t^B).

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

- سوخت مصرفی بویلر و میکروتوربین گازی در یک روز معمولی تابستانی و زمستانی (F_t^{MGT} و F_t^B).
- 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 ($W_{Sale,t}^{MGT}$ و $W_{Sale,t}^{PVT}$).
- میزان توان الکتریکی که در یک روز معمولی تابستانی و زمستانی از شبکه خریداری می‌شود (W_t^{Buy}).

٤. اطلاعات مورد نیاز برای حل مسأله

٤-١. 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].

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

جدول ۲. اطلاعات فنی و اقتصادی میکروتوربین گازی

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

مأخذ: نتایج تحقیق

٤-۲. 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

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

مأخذ: نتایج تحقیق

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

٤-۳. 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

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

مأخذ: نتایج تحقیق

٤-٤. 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

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

مأخذ: نتایج تحقیق

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

۴-۵. اطلاعات فنی و اقتصادی کلکتورPVT/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 کلکتورPVT/Water

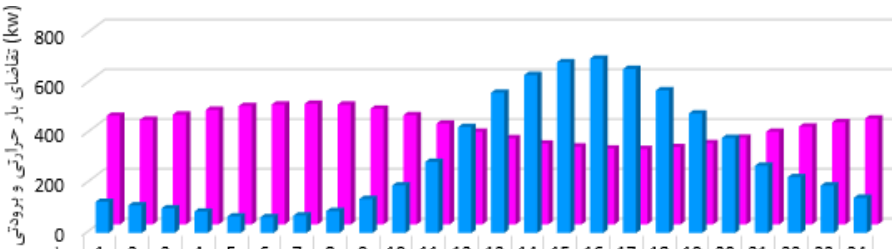
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
ابعاد پنل (mm)	۹۰*۸۲۸*۱۶۰۱	راندمان الکتریکی ماژول (%)	۱۵.۱
تعداد سلول (n)	۷۲	راندمان کلکتور با تلفات صفر (%)	۴۷/۵
ولتاژ مدار باز (V)	۴۵/۲۶	ضریب تلفات حرارتی ($w/m^2.k$)	۸/۳۷
ولتاژ در نقطه ماکزیمم توان (V)	۳۷/۸۹	دبی جرمی (L/H)	۶۵
جریان اتصال کوتاه (A)	۵/۶۶	هزینه اولیه ($/KWh)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

مأخذ: نتایج تحقیق

٤-٦. اطلاعات بار الکتریکی، حرارتی، برودتی و آب گرم مصرفی ساختمان مبنا

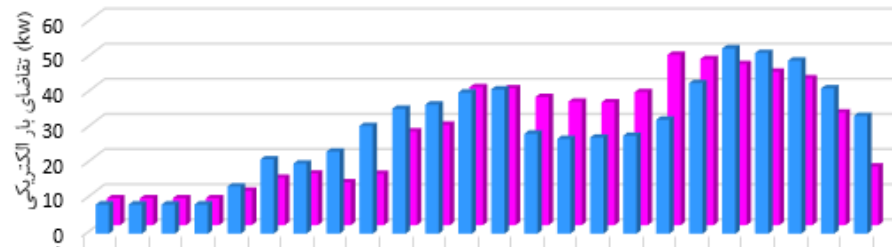
برای نمونه، سیستم بهینه مورد نظر برای یک ساختمان مسکونی در شهر کرمان اجرا خواهیم کرد. بدین منظور با توجه به شرایط آب و هوایی شهر کرمان، بار حرارتی و برودتی ساختمان مسکونی مبنا، به ترتیب یک روز معمولی زمستانی و یک روز معمولی تابستانی توسط نرم افزار کریر شبیه سازی شده است (شکل۳)، بار الکتریکی ساختمان مسکونی 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]



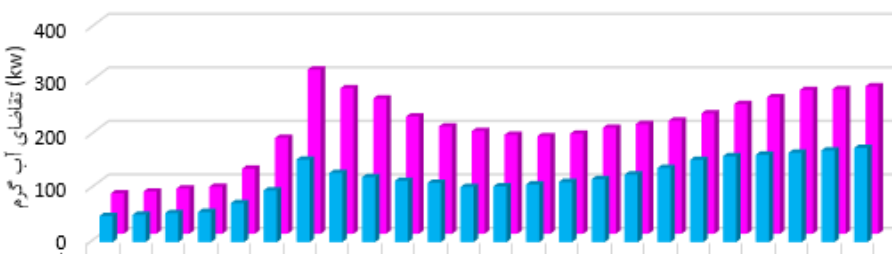
ساعت	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
برودت	125	111	100	86	67	63	70	88	137	191	286	426	564	635	687	701	660	574	481	382	270	225	191	142
حرارت	437	421	442	461	476	482	485	482	465	440	405	373	347	325	313	305	303	311	327	349	373	394	411	426

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



ساعت	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
تابستان	8.3	8.3	8.3	8.3	14	21	20	23	31	36	37	40	41	29	27	27	28	33	43	53	52	49	41	34
زمستان	7.7	7.7	7.7	7.7	9.8	14	15	12	15	27	29	39	39	37	35	35	38	49	47	46	44	42	32	17

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



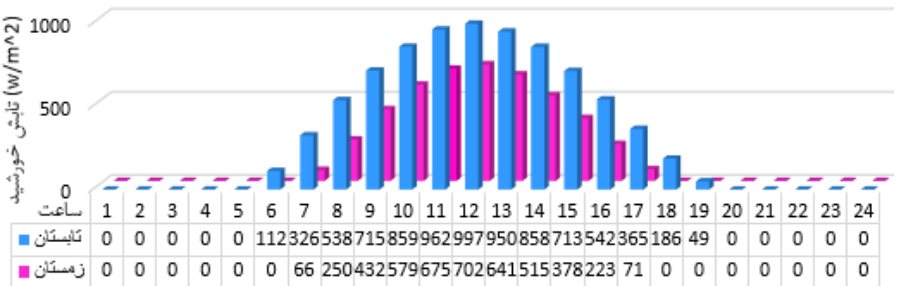
ساعت	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
تابستان	49	51	54	57	73	97	154	129	121	115	111	103	104	108	112	118	126	139	154	161	163	167	171	176
زمستان	75	79	85	88	122	179	307	272	253	219	200	192	185	182	187	198	205	211	225	242	255	269	270	275

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

٤-۷. اطلاعات شدت تابش خورشید در شهر کرمان

شدت تابش خورشید در شهر کرمان از سازمان هواشناسی (*weather.ir*) دریافت شده و برای یـک 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

٤-۸. اطلاعات خرید و فروش برق و خرید گاز طبیعی در کشور ایران

اطلاعات مربوط به خرید و فروش برق و خرید گازطبیعی در کشور ایران (سال۱۳۹۴) 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

(۱دلار معادل ۳۰۰۰۰ ریال لحاظ شده است)

مأخذ: نتایج تحقیق

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

جدول ۸. قیمت خرید برق

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

(متوسط پله مصرف ۱،۲ و۳ لحاظ شده است)

مأخذ: نتایج تحقیق

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

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

مأخذ: نتایج تحقیق

ضرایب مورد استفاده برای محاسبه میزان آلایندگی دی‌اکسید کربن

این ضرایب در جدول (۱۰) مشخص شده است.

جدول ۱۰. ضرایب آلایندگی دی‌اکسید کربن

فاکتور آلایندگی CO_2 نیروگاه گازی [۱]	۰/۴۶۵g_{CO_2}/KWh
فاکتور آلایندگی CO_2 گاز طبیعی [۴]	۰/۲۰۱۶Kg_{CO_2}/KWh

مأخذ: نتایج تحقیق

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

۵. نتایج شبیه سازی

نتایج به‌دست امده در جدول (۱۱) مشخص شده است.

جدول ۱۱. نتایج بهینه‌سازی در سناریوهای مختلف

سناریو	۵	٤	۳	۲	۱
ظرفیت میکروتوربین گازی (kw)	۱۹۵	۱۹۵	۳۰	۰	۰
ظرفیت بویلر (kw)	۱۸۷	۱۸۷	٦۰۰	٦۷۵	٦۷۵
ظرفیت چیلر جذبی تک اثره (kw)	۲۸۱	۲۸۱	۰	۱۰۵	۰
ظرفیت چیلر تراکمی هوا خنک (kw)	٤۳۹	٤۳۹	۷۱۰	٦۱۷	۷۱۰
ظرفیت فتوولتائیک/ترمال (kw)	۵۲/۸	۰	۵۲/۸	۰	۵۲/۸
تابع هدف ($/year)	۶۹۰۳/۶	۲۹۰۵۵	۲٤۰۸۰	۵۱۵۳۹	۲۵۷۹۴
کل هزینه اولیه ($)	٤۸۸۰۲۵	۳۷۵۱۳۹	۲۷۱٦۹٦	۱۲٦۵۵۷	۲۳٤۲۷۱
هزینه اولیه ($/year)	۵۳۷۹۳	٤۱۳۵۷	۳۰۰۲۴	۱۴۰۴۶	۲۵۹۱۳
هزینه تعمیرونگهداری ($/year)	۲۱۵٤٤	۲۰۳۳۱	۱۷۲۱٤	۱۵۲۳۰	۱٦٤٤۳
هزینه خرید سوخت گازی ($/year)	۱۵۸۵۲	۱۵۸۵۲	۶۹۴۰	۹۸٤۵	۵۱۱٤
هزینه خرید توان الکتریکی ($/year)	۷۰۵۲	۷۰۵۲	۱۳۴۳۵	۱۲٤۱۸	۱٤۸٤۸
درآمد فروش توان الکتریکی ($/year)	۹۳۸۱٤	۵۷۹۱۷	٤۲۹۰۵	۰	۳۵۸۹۵
درآمد ناشی از تأمین آب گرم مصرفیPV/T ($/year)	۶۲۷/۷	۰	۶۲۷/۷	۰	۶۲۷/۷
توان مفید حرارتی تولیدی میکروتوربین (kwh/year)	۳۰٤۹٤۸۸	۳۰٤۹٤۸۸	٤۵۹۹۲۹	۰	۰
توان مفید حرارتی تولیدی بویلر (kwh/year)	۲٤٦۸۲۸	۲٤٦۸۲۸	۱۵۰۷۳۵٦	۲۲۰۹۹۱۸	۱۷۱۹٤۸٦
توان حرارتی تولیدی فتوولتائیک/ترمال (kwh/year)	۲۱۳٤۲٤	۰	۲۱۳٤۲٤	۰	۲۱۳٤۲٤

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

سناریو	۵	٤	۳	۲	۱
توان الکتریکی تولیدی میکروتوربین (kwh/year)	۱٦۹٤۱٦۰	۱٦۹٤۱٦۰	۲٦۰٦٤۰	۰	۰
توان الکتریکی تولیدی فتوولتائیک/ترمال (kwh/year)	۱۲۱۲٦۸	۰	۱۲۱۲٦۸	۰	۱۲۱۲٦۸
فروش توان الکتریکی میکروتوربین گازی (kwh/year)	۱٦۰۸۸٤٤	۱٦۰۸۸٤٤	۱۹٤۷۰۳	۰	۰
فروش توان الکتریکی فتوولتائیک/ترمال (kwh/year)	۱۲۱۲٦۸	۰	۱۲۱۲٦۸	۰	۱۲۱۲٦۸
توان برودتی تولیدی چیلر جذبی (kwh/year)	۸۵۱۰٦۸	۸۵۱۰٦۸	۰	٤۰۵۵۸۷	۰
توان برودتی تولیدی چیلر تراکمی (kwh/year)	٤۷۰۵٦۱	٤۷۰۵٦۱	۱۳۲۱٦۲۹	۹۱٦۰٤۲	۱۳۲۱٦۲۹
خرید توان الکتریکی (kwh/year)	۳۳۲٦٤۱	۳۳۲٦٤۱	٦۳۳۷۳۳	۵۸۵۷٦۳	۷۰۰۳۹۹
سوخت مصرفی میکروتوربین گازی (kwh/year)	٦۰۵۰۵۷۱	٦۰۵۰۵۷۱	۱۰۰۲٤٦۲	۰	۰
سوخت مصرفی بویلر (kwh/year)	۲۹۰۳۸٦	۲۹۰۳۸٦	۱۷۷۳۳٦۰	۲۵۹۹۹۰۳	۲۰۲۲۹۲۵
کل سوخت مصرفی (kwh/year)	٦۳٤۰۹۵۸	٦۳٤۰۹۵۸	۲۷۷۵۸۲۲	۲۵۹۹۹۰۳	۲۰۲۲۹۲۵
آلایندگی دی‌اکسید کربن در ساختمان (tons/year)	۲۳۰/۴۲	۲۳۰/۴۲	۶۶۵/۴۹	۷۹۶/۵۲	۷۳۳/۵
آلایندگی دی‌اکسید کربن (tons/year)	۱٤۳۳	۱٤۳۳	۸۵۴/۳	۷۹۶/۵۲	۷۳۳/۵
هزینه یکنواخت سالیانه ($/year)	۷۵۳۱	۲۹۰۵٤	۲۵۷۳۲	۵۲۲٤۸	۲۷۸۲۳
دوره بازگشت سرمایه (year)	۵/۱٦۷	٦/٤۷۷	۷/۲٤۱	–	۶/۴۱۴

مأخذ: نتایج تحقیق

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

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 مبنا 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 مبنا 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 مبنا 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 مبنا 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 مبنا 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 مبنا است.

٦. 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

در این مقاله پنج سناریو مختلف (جدول۱۱) 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، ۲۸۱کیلووات، 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 Networkswith 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, pp1014–1024.

[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. Grünewald (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 NeldereMead 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

[24] https://www.capstoneturbine.com
[25] http://worldenergyeurope.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.ashenatech.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.suna.org.ir "RENEWABLE ENERGY ORGANIZATION OF IRAN"
[33] http://www.tavanir.org.ir
[34] http://www.nigc.ir

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]