

## مقایسه عملکرد محرک‌های اولیه مختلف در سیستم‌های تولید سه‌گانه توان، حرارت و برودت در مقیاس میکرو برای دو حالت بار پایه و حرارت پایه

کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران  
 کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران  
 استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

متین کرباسیون  
 مانده داناییان  
 مهدی محسنی\*

### چکیده

در این پژوهش، چهار نوع تکنولوژی که به عنوان محرک اولیه در سیستم‌های تولید همزمان استفاده می‌شوند، به صورت تئوری مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند. این محرک‌ها عبارتند از: پیل سوختی، میکروتوربین، موتور رفت و برگشتی و موتور استرلینگ که در شرایط یکسان تقاضای بار، بر اساس پارامترهای موجود و شاخص‌های معتبر طراحی سیستم مانند ذخیره انرژی اولیه، بازدهی خالص، بازدهی الکتریکی خالص، نسبت انرژی تجدیدپذیر و زمان کارکرد با یکدیگر مقایسه شده‌اند. علاوه بر محرک‌های اولیه مختلف، شاخص‌های مذکور برای هر دو نوع چیلر جذبی و تراکمی به همراه یک بویلر پشتیبان مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. بر همین اساس بهینه‌ترین حالت‌ها بر اساس تقاضای مصرف‌کننده مشخص و پیشنهاد شده‌اند. **واژه‌های کلیدی:** تولید سه گانه، مقیاس میکرو، محرک‌های اولیه، بار پایه، حرارت پایه.

## Comparison of Performance of Prime Movers in Micro-Trigeneration of Heat, Power and Refrigeration Systems for Two Conditions of Power Driven and Heat Driven

M. Karbasioun

Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

M. Danaeian

Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

M. Mohseni

Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

### Abstract

In this study, classification of various prime movers which usually used in the mCCHP systems has been investigated. Then, different parameters affecting the performance of the mCCHP systems such as primary energy saving, net efficiency, renewable energy ratio, and working time, are compared to each other. The mentioned parameters are evaluated for both compression and absorption chillers with the presence of a backup boilers. Finally, based on the consumer demands, the optimized configurations of the systems have been suggested.

**Keywords:** trigeneration, micro scale, prime mover, power driven, heat driven.

سیستم‌های تولید همزمان از نظر توان تولیدی و ابعاد سیستمی به چندین دسته تقسیم می‌شوند که در جدول ۱ ذکر شده است. بهترین گزینه برای استفاده در ساختمان‌ها، ادارات، شرکت‌ها و بیمارستان‌ها استفاده از سیستم‌های تولید همزمان و سه گانه در مقیاس میکرو می‌باشد. لازم به ذکر است حداکثر توان در سیستم‌های میکرو، بین ۱۰ تا ۵۰ کیلو وات می‌باشد [۱-۳].

جدول ۱ - انواع سیستم‌های تولید همزمان بر اساس توان تولید شده

[۲،۳]

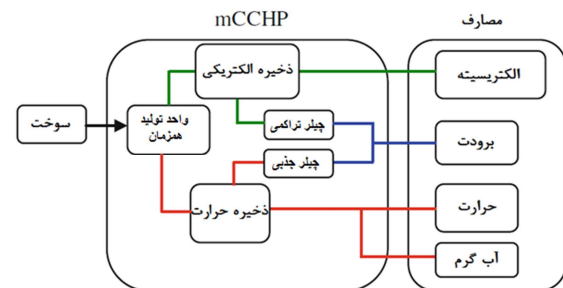
| میزان تولید توان الکتریکی | مقیاس سیستم تولید همزمان |
|---------------------------|--------------------------|
| بزرگ‌تر از 2 MW           | بزرگ                     |
| بزرگ‌تر از 35 kW          | کوچک                     |
| کوچک‌تر از 35 kW          | میکرو                    |

### ۱- مقدمه

با توجه به کاهش منابع انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی، هزینه‌های بهره‌وری از انرژی‌های موجود و گرمایش زمین، سیستم‌های تولید همزمان در دهه‌های اخیر، سبب ایجاد انقلابی در نحوه تولید توان و حرارت و تغییرات در شیوه‌های مصرف شده‌اند. روند تحقیقاتی و اجرایی در زمینه سیستم‌های تولید همزمان در حال شتاب گرفتن می‌باشد به طوری که امروزه ۷ درصد برق در انگلستان توسط سیستم‌های تولید همزمان تأمین می‌شود و قرار هست این مقدار تا سال ۲۰۲۰ به ۱۴ درصد کل برق انگلستان برسد [۱،۲]. در کنار سیستم‌های تولید همزمان، سیستم‌های تولید سه‌گانه می‌باشد که توانایی تولید برودت بوسیله توان الکتریکی تولید شده و یا حرارت اتلافی را دارا هستند. یک مزیت سیستم‌های تولید سه گانه استفاده از حرارت اضافی سیستم‌های تولید همزمان در فصول گرم سال می‌باشد که سبب افزایش بهره‌وری آنها می‌شود.

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mohseni@qut.ac.ir

بازدهی سیستم‌های تولید همزمان در مقیاس میکرو نسبت به سیستم‌های تولید توان در مقیاس بزرگ کمتر است اما آلودگی جرمی و صوتی کمتر، هزینه‌های راه‌اندازی و نگهداری پایین‌تر، بازدهی مطلوب‌تر نسبت به سیستم‌های تولید جداگانه مقیاس کوچک و ابعاد مناسب آنها سبب شده تا برای استفاده در مصارف شهری و خانگی بسیار مناسب‌تر باشند [۳-۱]. نمونه‌ای از دی‌گرام عملکردی سیستم‌های تولید سه گانه در مقیاس میکرو در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- سیستم تولید سه گانه در مقیاس میکرو [۳]

تکنولوژی‌های متعددی برای واحدهای تولید همزمان در مقیاس میکرو ارائه شده است. تفاوت‌های طراحی در سیستم‌های تولید همزمان در موارد گوناگونی می‌تواند باشد که از مهم‌ترین آنها می‌توان به تفاوت در نوع محرک اولیه، استراتژی مصرف به شکل بار پایه و حرارت پایه، استراتژی نوع چیدمان اجزای سیستم، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر یا تجدیدنپذیر اشاره کرد.

در سال‌های اخیر بررسی‌های بسیاری برای طراحی سیستم‌های تولید همزمان توسط انجمن مهندسان تأسیسات آمریکا و محققین مختلف صورت گرفته است [۴-۱۳]. سه روش مرسوم طراحی و انتخاب اجزاء سیستم‌های تولید سه گانه، توسط بادیا [۳] و کشاورز و ابراهیمی [۶] ارائه شده که در دو روش ارائه شده توسط ابراهیمی و کشاورز از اصول منطق فازی و روش تئوری سیستم‌های گری برای انتخاب بهینه محرک اصلی و اجزای سیستم تولید همزمان استفاده شده است. بادیا [۳] در روش خود از اصول محاسبات استاتیکی بار بهره می‌برد تا بتواند با داشتن تقاضای انرژی مصرف‌کننده، به شکل بازگشتی، نیاز مصرفی مصرف‌کننده را با انواع مختلف سیستم تولید همزمان و انواع سیستم برودتی و پشتیبان تأمین کند. بیانچی و همکارانش [۷] با استفاده از روشی مشابه روش بادیا، چند نوع موتور را از بازار انتخاب و سپس از نظر اقتصادی و برخی شاخص‌های مهم، سیستم‌های تولید همزمان را بررسی کرده است. آلزینو و همکارانش [۸] با استفاده از روش بادیا، استفاده از یک سیستم تولید همزمان در مقیاس میکرو را در منطقه سردی در اسپانیا از نظر اقتصادی و اثرات انرژی تجدیدپذیر در آن بررسی کرده‌اند. آروز و همکارانش [۹] نیز واحد تولید همزمان با تکنولوژی موتور استرلینگ را به شکل عددی

مورد بررسی قرار داده‌اند. آرسالیس و همکارانش [۱۰] بدنبال طراحی و بهینه‌سازی واحد تولید همزمان در مقیاس میکرو از نوع سلول سوختی با توان ۱ کیلووات بوده‌اند. تیموری، کلایی و ستاری [۱۱] استفاده از واحدهای تولید همزمان در مقیاس میکرو را در شرایط آب و هوایی مختلف ایران بررسی و آن را با حالت جداگانه مقایسه کرده‌اند. لیو و همکارانش [۱۲] در راستای بررسی شبکه‌های حرارتی و الکتریکی بوسیله سیستم‌های تولید همزمان، نشان داده‌اند که چگونه می‌توان از این سیستم‌ها در راستای تولید حرارت و برق شبکه‌ها استفاده شود. اراسپیسوچیاگا و همکارانش [۱۳] به مطالعه انواع سیستم‌های پیل سوختی تولید همزمان در تصفیه خانه‌های فاضلاب با استفاده از بیوگاز تولیدی و مقایسه آنها با تکنولوژی میکروتوربین و موتورهای احتراق داخلی پرداخته‌اند.

در این پژوهش که به صورت تئوری انجام شده است، چهار تکنولوژی به عنوان محرک اولیه در سیستم تولید همزمان در مقیاس میکرو برای تأمین نیازهای خانگی از جنبه‌های متفاوت و به شکل تحلیلی برای دو حالت بار پایه و حرارت پایه، مقایسه شده است. همچنین هر دو نوع چیلر تراکمی و جذبی برای ایجاد برودت در نظر گرفته شده‌اند. علاوه بر این، یک دیگ بخار به عنوان پشتیبان حرارتی سیستم‌ها در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در سیستم‌های تولید همزمان می‌توان از دیگ‌های بخار و یا شبکه‌های حرارتی و برق‌رسانی، جهت تأمین و پشتیبانی توان و حرارت مورد نیاز بهره برد و یا حرارت و توان مازاد می‌تواند به شبکه‌های محلی و سراسری فروخته شود.

## ۲- محرک اولیه

مهم‌ترین جزء تشکیل دهنده یک واحد تولید همزمان، محرک اولیه است. محرک‌های اولیه از چند نظر قابل دسته‌بندی می‌باشند که عبارتند از: سیکل انتخابی، ابعاد قابل بهره‌برداری، بازدهی، توان و حرارت تولیدی. نوع سوخت مصرفی، در دسترس بودن، عمر مفید کارکرد، هزینه راه‌اندازی و تعمیر و نگهداری نیز از جمله پارامترهای مؤثر در انتخاب محرک اولیه می‌باشد. در جدول ۲، اطلاعات کلی از انواع محرک‌های اولیه استفاده شده در سیستم‌های تولید همزمان در مقیاس میکرو ارائه شده است. مهم‌ترین عامل انتخاب نوع محرک اولیه، توان و حرارت تولیدی آنها می‌باشد، سپس عواملی نظیر سر و صدای تولیدی، نوع و میزان سوخت مصرفی، میزان در دسترس بودن، تعمیر و نگهداری و ... را می‌توان در نظر گرفت.

بعد از توان تولیدی، بیشترین حرارت تولیدی نیز یکی دیگر از پارامترهای کاربردی در واحدهای تولید همزمان می‌باشد که می‌تواند در طراحی یک سیستم تولید همزمان برای مصرف‌کننده ایفای نقش کند. بنابراین نسبت توان به حرارت در واحدهای تولید همزمان یکی از متغیرهای اصلی است به طوری که محرک‌ها دارای نسبت توان

جدول ۲ - مشخصات انواع محرک اولیه واحدهای تولید همزمان برق و حرارت در مقیاس میکرو (مقادیر میانگین) [۳]

| متغیر                                   | موتورهای استرلینگ | میکروتوربین | موتورهای رفت و برگشتی | پیل سوختی      |
|---|-------------------|-------------|-----------------------|----------------|
| توان الکتریکی $P_e$ (kW)                | ۲۶                | ۱۳۷/۵       | ۱۰۵                   | ۱۰۱            |
| توان حرارتی $P_t$ (kW)                  | ۸۱/۲۵             | ۲۵۰         | ۱۵۲/۱۷                | ۱۰۱            |
| بهره‌وری الکتریکی، در حالت تمام بار (%) | ۲۰                | ۲۷/۵        | ۳۴/۵                  | ۴۰             |
| بهره‌وری الکتریکی در حالت نیمه بار (%)  | ۲۵                | ۲۲/۵        | ۳۱/۵                  | ۴۰             |
| بازدهی خالص (%)                         | ۸۰                | ۸۰          | ۸۰                    | ۸۰             |
| نسبت توان الکتریکی به حرارت             | ۰/۳۲              | ۰/۵۵        | ۰/۶۹                  | ۱              |
| دمای حرارت خروجی ( $^{\circ}\text{C}$ ) | ۷۰                | ۹۲/۵        | ۹۲/۵                  | ۷۰             |
| سوخت مصرفی                              | زیست سوخت         | زیست سوخت   | زیست سوخت             | زیست سوخت      |
| عمر مفید بدون تعمیر (ساعت)              | ۵۰۰۰              | ۲۵۰۰۰       | ۱۲۵۰۰                 | موجود نمی باشد |
| هزینه سرمایه گذاری (\$/kW)              | ۱۳۰۰-۲۰۰۰         | ۹۰۰-۱۵۰۰    | ۸۰۰-۱۵۰۰              | ۲۵۰۰-۳۵۰۰      |
| هزینه تعمیر و نگهداری (\$/kW)           | ۱/۵-۲/۵           | ۰/۵-۱/۵     | ۱/۲-۲                 | ۱-۳            |

$$E_{\text{monthly}} = \frac{E_{\text{annually}}}{N_{\text{month}}} \quad (۳)$$

$$Q_{\text{DHW,monthly}} = \frac{Q_{\text{DHW,annually}}}{N_{\text{month}}} \quad (۴)$$

$$Q_{\text{monthly}} = \frac{Q_{\text{annualHDDmonthly}}}{\text{HDD}_{\text{annually}}} \quad (۵)$$

$$Q_{\text{c,monthly}} = \frac{Q_{\text{c,annualCDDmonthly}}}{\text{CDD}_{\text{annually}}} \quad (۶)$$

بعد از بدست آوردن اطلاعات مصرفی هر ماه، باید در سیستم تقسیم بار صورت پذیرد که این تقسیم بار می‌تواند به دو روش انجام گردد. روش اول بر اساس استراتژی بار پایه می‌باشد و مناسب استفاده در ساختمان‌هایی است که از سیستم تولید همزمان برای اولویت تأمین بار الکتریکی بهره می‌برند تا به نوعی از شبکه سراسری برق مستقل شوند. روش دوم استراتژی‌های حرارت پایه است که در مراکز صنعتی کاربردی‌تر می‌باشد و یا در زمان‌هایی که از سیستم تولید همزمان داخل ساختمان‌ها در راستای اولویت تأمین حرارت بهره گرفته می‌شود. تقسیم بار با استفاده از تعادل انرژی در مخازن ذخیره انرژی حرارتی و الکتریکی و بوسیله روابط (۷) و (۸) صورت می‌پذیرد. (۷)

$$e_{\text{sys}} = e_{\text{PV}} + e_{\text{CHP}} + e_{\text{grid}} \quad (۷)$$

$$q_{\text{sys}} = q_{\text{ST}} + q_{\text{CHP}} + q_{\text{boiler}} + q_{\text{grid}} \quad (۸)$$

هنگامی که سیستم در حالت بار پایه باشد، حرارت تولیدی توسط سیستم تولید همزمان را می‌توان از رابطه (۹) بدست آورد. همچنین اگر سیستم تولید همزمان بر اساس حرارت پایه باشد آنگاه از رابطه (۱۰) برای بدست آوردن توان الکتریکی تولیدی استفاده می‌شود.

$$q_{\text{CHP}} = \frac{e_{\text{CHP}}}{\gamma} \quad (۹)$$

$$e_{\text{CHP}} = \gamma \cdot q_{\text{CHP}} \quad (۱۰)$$

الکتریکی به حرارتی ثابتی می‌باشد. بازدهی یک پارامتر با اهمیت در انتخاب محرک و تعیین میزان مصرف سوخت واحد تولید همزمان می‌باشد و به سه دسته بازدهی الکتریکی، بازدهی حرارتی و بازدهی خالص که به نوعی از جمع بازدهی حرارتی و الکتریکی بدست آمده است، تقسیم می‌گردد.

### روابط حاکم

مهم‌ترین قدم در طراحی سیستم‌های تولید سه‌گانه بدست آوردن مقدار انرژی مصرف‌کننده‌ها برای هر ماه می‌باشد. بدین منظور می‌توان با داشتن آمار مصارف سالانه مصرف‌کننده و تغییرات دمای روزانه در طول روزهای سال به شکل میانگین، مقدار مصرف سرمایه‌ش و گرمایش مورد نیاز در هر ماه را بدست آورد. برای این منظور نیاز به درجه-روز گرمایش و درجه-روز سرمایه‌ش است که به ترتیب بیانگر نیازمندی به سرما و گرما در طول روزهای هر ماه می‌باشد. برای بدست آوردن درجه-روز گرمایش و سرمایه‌ش در ابتدا باید یک دمای پایه را برای نیازمندی به گرمایش و یک دمای پایه را برای نیازمندی به سرمایه‌ش در نظر گرفت. سپس با استفاده از روابط (۱) و (۲) می‌توان مقدار درجه-روز گرمایش و سرمایه‌ش را بدست آورد [۳،۱۴].

$$\text{HDD} = \sum_{\text{day}} (T_b - T_{e,i}) \quad \text{for } T_b \geq T_{e,i} \quad (۱)$$

$$\text{CDD} = \sum_{\text{day}} (T_{e,i} - T_b) \quad \text{for } T_b < T_{e,i} \quad (۲)$$

بوسیله مقدار درجه-روز گرمایش و سرمایه‌ش و مقدار مصارف در طول یک سال، حرارت، آب گرم مصرفی و گرمایش و سرمایه‌ش برای هر ماه با استفاده از روابط (۳) تا (۶) بدست می‌آیند [۳،۶].

واحد شرکت کننده در ساختار سیستم تولید همزمان از رابطه (۱۷) محاسبه گردد [۳،۱۷].

$$E_p = \sum E_{del,i} f_{p,del,i} - \sum E_{exp,i} f_{p,exp,i} \quad (17)$$

بعد از تعیین مقدار انرژی‌های مصرفی از نوع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر، نسبت انرژی تجدیدپذیر از رابطه (۱۸) به دست می‌آید.

$$RER = \frac{E_{p,ren}}{E_{p,tot}} \times 100 \quad (18)$$

### ۳- روش حل

فلوچارت برنامه و محاسبات در شکل ۲ آمده است. اطلاعات استفاده شده در رابطه با تکنولوژی محرک‌های مختلف در جدول ۲ ارائه شده است. برای مقادیر توان و حرارت در حالت کلی مقادیر میانگین این جدول مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای بررسی محرک‌های اولیه از نظر پاک بودن محرک‌ها، تحلیل‌ها با استفاده از انرژی تجدیدپذیر انجام می‌شود. سوخت مصرفی در محرک‌های انتخابی از نوع زیست سوخت می‌باشد تا بتوان قیاس مناسبی برای پاک بودن سیستم ارائه داد. برای تأمین برودت، یک بار چیلر جذبی و بار دیگر چیلر تراکمی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین از باتری به عنوان منبع ذخیره الکتریکی و از منبع آب برای مخزن ذخیره گرمایی استفاده شده است. اطلاعات اجزای به کار رفته برای دیگ بخار پشتیبان و چیلر جذبی و تراکمی در جدول ۳ و ۴ آمده است.

#### دریافت اطلاعات اولیه شامل:

- ۱- اطلاعات پایه: اطلاعات ساختمانی، آب و هوا، تابش خورشید، دمای هوا در طول سال
- ۲- اطلاعات مصرفی: برآورد مقدار مصارف اصلی انرژی برای یک سال: گرمایش مورد نیاز، تبرید مورد نیاز، آب گرم مصرفی، روشنایی و برق مصرفی
- ۳- اطلاعات اجزای سیستم: معرفی دستگاه‌های اتصالی به سیستم تولید همزمان و مشخصات آنها شامل: انواع چیلر، انواع پنل خورشیدی حرارتی و فتوولتائیک، اتصال به شبکه برق سراسری، سیستم‌های ذخیره کننده انرژی حرارتی و الکتریکی، محرک اولیه، بویلر

محاسبه مقدار انرژی حرارتی مورد نیاز گرمایش و تبرید مصرفی در طول هر ماه بوسیله درجه-روز گرمایش و محاسبه برق، آب گرم و حرارت مصرفی در طول یک ماه

محاسبه توان و حرارت تولیدی توسط سیستم‌های خورشیدی در هر ماه به طور مجزا و کسر مقدار تولیدی از مقدار کل انرژی حرارتی و الکتریکی مصرفی

در صورت داشتن خروجی به شبکه،  $e_{grid}$  در روابط (۷) و (۸) منفی خواهد بود. به دلیل اینکه سیستم‌های خورشیدی دارای تولید بدون توقف هستند در ابتدا برای تقسیم بار مقدار توان و حرارت خورشیدی تولیدی از تقسیم بار کسر می‌گردد. بعد از بدست آوردن تقسیم بار در طول هر ماه، شاخص‌های مهم سیستم تولید همزمان مورد بررسی قرار می‌گیرند. اولین شاخص با اهمیت در سیستم‌های تولید همزمان مقایسه آنها با سیستم‌های تولید جداگانه از نظر زیست محیطی و انرژی تولیدی می‌باشد که بوسیله شاخص ذخیره سوخت در حالت تولید همزمان نسبت به حالت تولید جداگانه معرفی می‌شود و رابطه (۱۱) نشان دهنده آن در حالتی است که چیلر استفاده شده از نوع جذبی می‌باشد. این پارامتر مقدار انرژی ذخیره شده و انتشار گاز  $CO_2$  را نسبت به حالت تولید جداگانه نشان می‌دهد [۳،۷].

$$PES = 1 - \frac{q_F}{\frac{C}{\eta_{Href}} + \frac{e}{\eta_{Eref}}} \quad (11)$$

برای بدست آوردن  $\eta_{Href}$  و  $\eta_{Eref}$  باید به استانداردهای مرتبط با منطقه و اقلیم مورد نظر مراجعه شود. در این پژوهش، استاندارد EU/877/2011 اتحادیه اروپا از نظر بازدهی‌های مرجع استفاده شده است. برای ژنراتورهای گازوئیلی، بنزینی و زیست سوخت، مقادیر بازده برابر  $\eta_{Eref}=0.44$  و  $\eta_{Href}=0.81$  می‌باشد [۳،۱۵]. مقدار شاخص ذخیره سوخت برای چیلر تراکمی شبیه چیلر جذبی می‌باشد با این تفاوت که مقدار انرژی مصرفی آن از نوع الکتریکی بوده و این انرژی با انرژی الکتریکی جمع می‌گردد. همچنین برای بدست آوردن سوخت مصرفی توسط سیستم‌های تولید همزمان باید بوسیله رابطه (۱۲) مقدار کل سوخت مصرفی برای تولید توان و حرارت توسط محرک اولیه به همراه حرارت به هدر رفته از آن محاسبه گردد. از طرف دیگر، برای سوخت مصرفی توسط بویلر نیز باید از معادله (۱۳) استفاده شود. در انتها برای بدست آوردن مجموع سوخت مصرفی، مقدار سوخت مصرفی بویلر با سوخت مصرفی محرک اولیه جمع می‌شود.

$$q_{F,CHP} = \frac{e_{CHP} + q_{CHP}}{\eta_{overall}} \quad (1)$$

$$q_{F,boiler} = \frac{q_{boiler}}{\eta_{boiler}} \quad (2)$$

بازدهی یک سیستم تولید همزمان شامل بازدهی خالص، بازدهی الکتریکی و بازدهی حرارتی می‌شود که می‌توان آنها را به ترتیب از روابط (۱۴) تا (۱۶) به دست آورد [۳،۶،۱۶].

$$EFF_{CHP} = \frac{e_{sys} + q_{sys} + e_{grid} + q_{grid}}{q_F + q_{TP} + e_{pv}} \quad (14)$$

$$EFF_{E,CHP} = \frac{e_{sys} + e_{grid}}{q_F + q_{TP} + e_{pv}} \quad (15)$$

$$EFF_{H,CHP} = \frac{q_{sys} + q_{grid}}{q_F + q_{TP} + e_{pv}} \quad (16)$$

بعد از برآورد مقادیر مصرف سوخت و شاخص‌های کارایی و عملکرد سیستم تولید همزمان، باید پاک بودن سیستم از نظر آلودگی‌های زیست محیطی بر اساس عامل نسبت انرژی تجدیدپذیر بررسی گردد. برای بدست آوردن این پارامتر در ابتدا باید مقدار کل تقاضای انرژی سیستم به تفکیک میزان تقاضا و صدور انرژی توسط هر

آب گرم مصرفی برای یک مصرف کننده در شهر تهران به مساحت ۵۰۰ متر مربع در نظر گرفته شده است [۱۱]. همچنین مقدار سرمایش مورد نیاز برای ۵۰۰ متر مربع را می توان از اطلاعات و استانداردهای ارائه شده بدست آورد که نتایج آن به شکل سالانه در جدول ۵ آمده است [۳،۱۱]. برای داشتن مصرف ماهانه مصرف کننده، باید اطلاعات دمایی کل طول سال را برای مصرف کننده مورد نظر به دست آورد تا بوسیله این اطلاعات مقدار درجه-روز گرمایش و درجه-روز سرمایش برای تمامی ماه های سال مورد نظر بدست آید [۲۱-۱۴،۱۵،۱۹]. برای بدست آوردن مقدار مصرف ویژه باید مصرف سالانه را به مساحت کل ساختمان تقسیم کرد. نتایج در جدول ۶ به تفکیک آمده است. در جدول ۷ درجه روز گرمایش و سرمایش در شهر تهران بر اساس اطلاعات ایستگاه مهرآباد بیان شده است [۲۰،۲۱]. لازم به ذکر است مقدار درجه-روز گرمایش در طول ماه های مختلف سال با دمای پایه ۱۸ درجه سانتیگراد و درجه-روز سرمایش با دمای پایه ۲۱ درجه سلسیوس، محاسبه شده است [۲۱].

جدول ۵ - اطلاعات مصرف سالانه مصرف کننده [3,11]

| برق مصرفی (kWh) | حرارت مصرفی (kWh) | آب گرم مصرفی (kWh) | سرمایش مصرفی (kWh) |
|-----------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| ۴۱۸۱۹           | ۸۳۲۳۰             | ۴۹۷۶۰              | ۴۳۵۰۰              |

جدول ۶ - اطلاعات مصرف ویژه سالانه مصرف کننده [3,11]

| برق مصرفی (kWh/m <sup>2</sup> ) | حرارت مصرفی (kWh/m <sup>2</sup> ) | آب گرم مصرفی (kWh/m <sup>2</sup> ) | سرمایش مصرفی (kWh/m <sup>2</sup> ) |
|---------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| ۸۴                              | ۱۶۷                               | ۱۰۰                                | ۸۷                                 |

جدول ۷ - درجه-روز گرمایش و سرمایش بدست آمده برای تهران (°C-day) [۲۰،۲۱]

| ماه        | تعداد روز | درجه-روز گرمایش | درجه-روز سرمایش |
|------------|-----------|-----------------|-----------------|
| ژانویه     | ۳۱        | ۲۸۳/۱           | ۰               |
| فوریه      | ۲۹        | ۲۵۶/۱           | ۰               |
| مارس       | ۳۱        | ۱۳۳/۸           | ۶/۸             |
| آوریل      | ۳۰        | ۲۹/۱            | ۰/۷             |
| مه         | ۳۱        | ۲/۶             | ۹۲/۸            |
| ژوئن       | ۳۰        | ۰               | ۲۶۸/۹           |
| ژوئیه      | ۳۱        | ۰               | ۳۴۱/۵           |
| اوت        | ۳۱        | ۰               | ۲۵۰/۸           |
| سپتامبر    | ۳۰        | ۰               | ۱۴۳/۵           |
| اکتبر      | ۳۱        | ۲/۵             | ۶/۸             |
| نوامبر     | ۳۰        | ۱۴۸/۹           | ۰               |
| دسامبر     | ۳۱        | ۲۵۵/۵           | ۰               |
| جمع سالانه | ۳۶۵       | ۱۱۱۱/۶          | ۱۱۶۶/۸          |

تقسیم حرارت و بار بر اساس تقاضای مصرف کننده به صورت بار پایه و یا حرارت پایه

ارائه تقسیم بار و حرارت برای هر جز سیستم در هر ماه به شکل استاتیکی، بدست آوردن تعداد و ابعاد تجهیزات مورد نیاز در سیستم تولید همزمان، بدست آوردن مقدار سوخت مصرفی، بدست آوردن مقدار انرژی تجدید پذیر به کار رفته در سیستم تولید همزمان و ارائه نتایج نهایی

شکل ۲ - فلوچارت تحلیل توان و حرارت تولیدی سیستم تولید همزمان به شکل استاتیکی

بوiler استفاده شده در این مقاله از نوع ساختمانی کوچک می باشد [۱۷] و بر اساس بیشترین مصرف حرارتی در حالت بار پایه انتخاب شده است، زیرا در این حالت بیشترین بار حرارتی بر بوiler وارد می شود. همچنین این کمیت برای پیل سوختی بیشترین مقدار را دارد، زیرا مقدار حرارت تولیدی آن به مراتب کمتر از باقی محرکها است. بنابراین بوiler پشتیبان باید ظرفیت جبران حرارت باقی مانده را داشته باشد. از طرفی ساعت عملکرد این بوiler به طور متوسط ۸ ساعت در شبانه روز در نظر گرفته شده است تا هم با نمونه انتخاب شده از بازار مطابقت داشته باشد و هم کمترین ظرفیت ممکن با هزینه کمتر لحاظ شده باشد.

جدول ۳ - مشخصات چیلرهای استفاده شده [۳،۱۶]

| نوع چیلر         | ضریب عملکرد | ساعت عملکرد |
|------------------|-------------|-------------|
| حرارتی (جذبی)    | ۰/۳         | ۱۰          |
| مکانیکی (تراکمی) | ۳           | ۱۰          |

جدول ۴ - مشخصات دیگ بخار [۱۸]

| توان حرارتی دیگ بخار مورد نیاز (kW) | ۱۷۵       |
|-------------------------------------|-----------|
| بازدهی دیگ بخار (%)                 | ۸۵        |
| ساعت عملکرد (ساعت)                  | ۸         |
| سوخت مصرفی                          | گاز طبیعی |

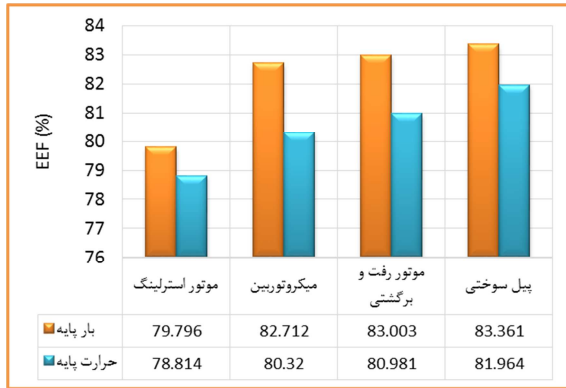
از آنجایی که رایج ترین سوخت خانگی گاز طبیعی است بوiler نیز از گاز طبیعی تغذیه می کند تا در بحث پاک بودن محرکها و بررسی آن اثر مستقیم نداشته باشد و فقط بر روی میزان حرارت تأمین شده توسط محرک تأثیر داشته باشد، زیرا کمترین زمان عملکرد برای سیستم تولید همزمان در نظر گرفته شده است که این زمان بر پایه حضور یک دیگ بخار جهت تأمین بار حرارتی اضافه می باشد. علاوه بر این، چیلرهای جذبی و تراکمی مورد استفاده، دارای ظرفیت و عملکردهای پایین تری نسبت به نمونه های بازار می باشند تا بتوان با دقت بیشتری بررسی های مورد نظر را بر روی انتخاب محرک بهینه تر به عمل آورد و بار بیشتری را بر روی آنها اعمال کرد [۳]. برای شروع بررسی، اطلاعات میانگین مصرف سالانه برق، حرارت و

## ۴- نتایج و بحث

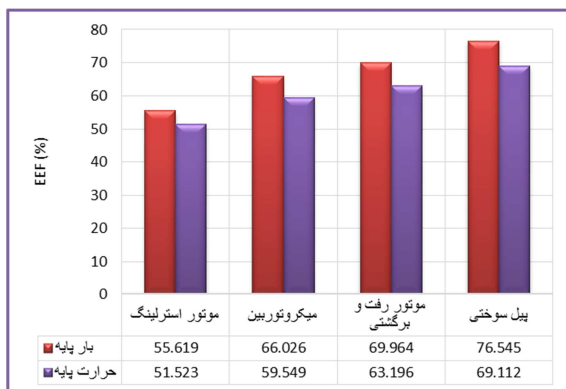
شکل‌های ۳ تا ۱۴ شاخص‌های مهم سیستم‌های تولید سه گانه را با حضور ۴ نوع محرک اولیه برای دو حالت بار پایه و حرارت پایه در حضور چیلر جذبی و چیلر تراکمی مورد مقایسه قرار داده است.

در شکل‌های ۳ و ۴ شاخص ذخیره انرژی اولیه برای حالت‌های ذکر شده بررسی شده است. همان‌طوری که از این شکل‌ها مشاهده می‌شود، بهترین انتخاب از منظر بیشترین ذخیره انرژی اولیه چه در حضور چیلر جذبی و چه در حضور چیلر تراکمی و برای هر دو حالت بار پایه و حرارت پایه توسط پیل سوختی صورت گرفته است.

در شکل‌های ۵ و ۶ بازده خالص انرژی برای حالت‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که بیشترین بازده همانند قبل به پیل سوختی مربوط می‌شود و هنگام استفاده از چیلر جذبی، موتورهای رفت و برگشتی جایگزین مناسبی برای پیل‌های سوختی از نظر هزینه هستند که در حالت بار پایه دارای نزدیک‌ترین بازده به آنها می‌باشند.

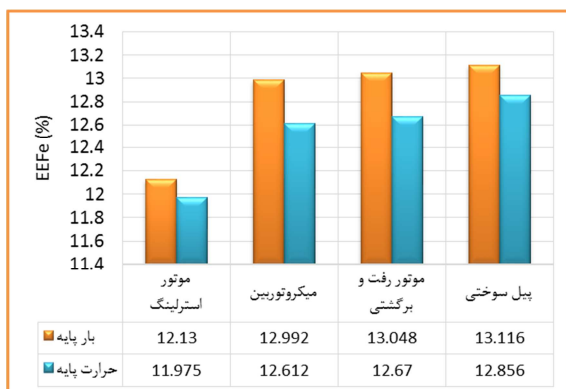


شکل ۵- بازده انرژی خالص (EEF) در سیستم تولید همزمان دارای چیلر جذبی برای محرک‌های مختلف برای دو حالت بار پایه و حرارت پایه

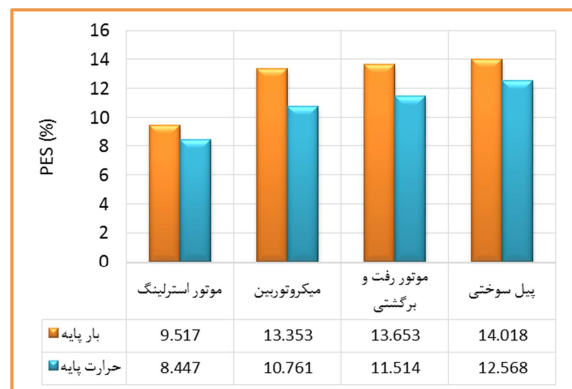


شکل ۶- بازده انرژی خالص (EEF) در سیستم تولید همزمان دارای چیلر تراکمی برای محرک‌های مختلف برای دو حالت بار پایه و حرارت پایه

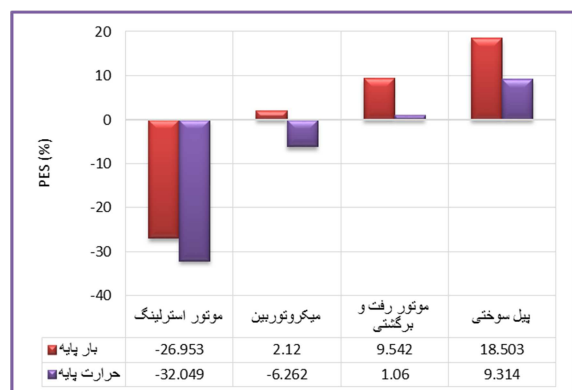
شکل‌های ۷ و ۸ بیانگر بازدهی الکتریکی خالص سیستم تولید همزمان می‌باشد. مشابه قبل، در حالت بار پایه نسبت به حالت حرارت پایه، بازدهی الکتریکی سیستم بالاتر می‌باشد که البته این نشان دهنده حضور بویلر پشتیبان با بازدهی بالاتر در جهت رفع مازاد حرارتی است.



شکل ۷- بازده انرژی الکتریکی خالص (EEFe) در سیستم تولید همزمان دارای چیلر جذبی برای محرک‌های مختلف برای دو حالت بار پایه و حرارت پایه

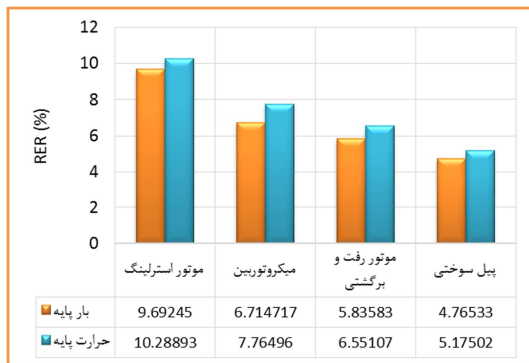


شکل ۳- میزان ذخیره انرژی اولیه (PES) در سیستم تولید همزمان دارای چیلر جذبی برای محرک‌های مختلف برای دو حالت بار پایه و حرارت پایه

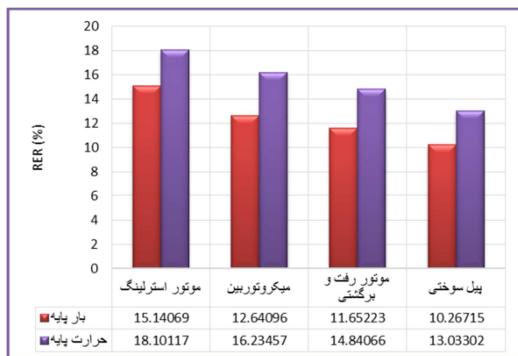


شکل ۴- میزان ذخیره انرژی اولیه (PES) در سیستم تولید همزمان دارای چیلر تراکمی برای محرک‌های مختلف برای دو حالت بار پایه و حرارت پایه

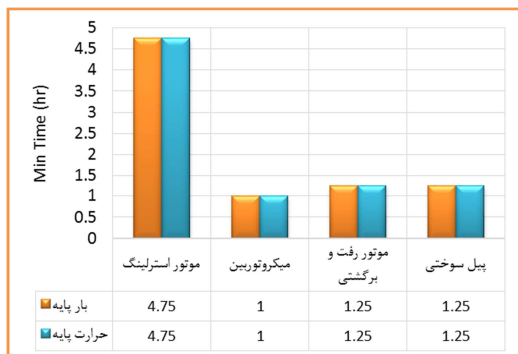
حالت حرارت پایه بیش از حالت بار پایه می‌باشد. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مقایسه حداقل زمان کارکرد نمایش داده شده است (کمترین واحد زمانی ربع ساعت می‌باشد). مشاهده می‌شود که بیشترین ساعت کارکرد متعلق به کم بازده‌ترین محرک سیستم یعنی موتور استرلینگ است اما برخلاف تصور کمترین زمان کارکرد به میکروتوربین به دلیل ظرفیت بالای تولید توانش تعلق می‌گیرد. این نسبت، هنگامی که از چیلر تراکمی نیز استفاده می‌کنیم حفظ می‌شود.



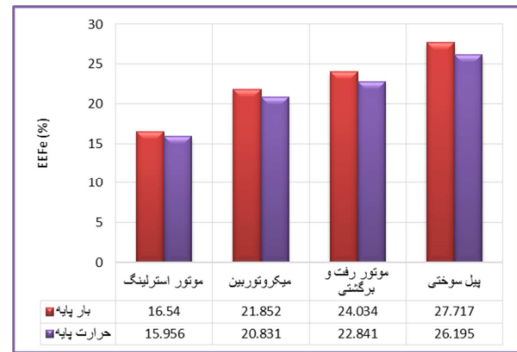
شکل ۱۱- میزان استفاده از انرژی تجدیدپذیر (RER) در سیستم تولید همزمان دارای چیلر جذبی برای محرک‌های مختلف برای دو حالت بار پایه و حرارت پایه



شکل ۱۲- میزان استفاده از انرژی تجدیدپذیر (RER) در سیستم تولید همزمان دارای چیلر تراکمی برای محرک‌های مختلف برای دو حالت بار پایه و حرارت پایه

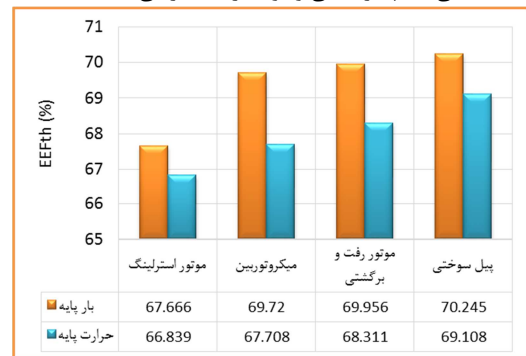


شکل ۱۳- زمان حداقل برای تولید توان (Min Time) در سیستم تولید همزمان دارای چیلر جذبی برای محرک‌های مختلف برای دو حالت بار پایه و حرارت پایه

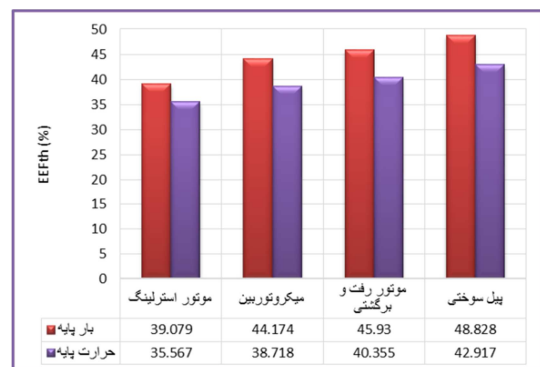


شکل ۸- بازده انرژی الکتریکی خالص (EEFe) در سیستم تولید همزمان دارای چیلر جذبی برای محرک‌های مختلف برای دو حالت بار پایه و حرارت پایه

بازده حرارتی خالص در شکل‌های ۹ و ۱۰ رسم شده است. چنانچه مشاهده می‌شود در حالت بار پایه بیشترین بازده حرارتی را دارا هستیم و همچنین در حالتی که چیلر تراکمی وجود دارد، بازدهی حرارتی نسبت به حالتی که چیلر جذبی وجود دارد، کمتر می‌باشد.



شکل ۹- بازده حرارتی خالص (EEF<sub>th</sub>) در سیستم تولید همزمان دارای چیلر جذبی برای محرک‌های مختلف برای دو حالت بار پایه و حرارت پایه



شکل ۱۰- بازده حرارتی خالص (EEF<sub>th</sub>) در سیستم تولید همزمان دارای چیلر جذبی برای محرک‌های مختلف برای دو حالت بار پایه و حرارت پایه

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان دهنده میزان پاک بودن سیستم‌های تولید همزمان از نظر مصرف سوخت تجدیدپذیر می‌باشد. همان‌گونه که نشان داده شده است پاک‌ترین سیستم تولید همزمان، هنگامی وجود دارد که از موتور استرلینگ که بالاترین درصد مصرف سوخت تجدیدپذیر را دارد به عنوان محرک اولیه استفاده شود و این مقدار در

می‌شود مانند مراکز صنعتی، اداری، تجاری و وسایل حمل و نقل به عنوان فرصتی جهت تأمین نیازهای حرارتی و برودتی بهره برد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، چهار نوع محرک اولیه و پارامترهای مختلف آنها در یک سیستم تولید سه گانه حرارت، برودت و توان در مقیاس میکرو به صورت تحلیلی با یکدیگر مقایسه شده است. به منظور مقایسه، برای تولید برودت از هر دو نوع چیلر جذبی و تراکمی استفاده شده است. همچنین نتایج برای دو حالت بار پایه و حرارت پایه محاسبه شده است. از نتایج به دست آمده می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

۱- صرفه‌جویی انرژی اولیه برای محرک اولیه پیل سوختی بیشترین مقدار و برای موتور استرلینگ کمترین مقدار را دارا می‌باشد. برای دو محرک دیگر شامل میکروتوربین و موتور رفت و برگشتی این مقدار نزدیک به هم می‌باشد. همچنین سیستم بار پایه عملکرد بهتری نسبت به سیستم حرارت پایه دارد. علاوه بر این، متغیر مذکور هنگام استفاده از چیلر جذبی نسبت به چیلر تراکمی دارای مقادیر بالاتری می‌باشد به طوری که هنگام استفاده از چیلر تراکمی برای دو محرک میکروتوربین و موتور استرلینگ، این شاخص منفی می‌شود.

۲- بجز مورد پیل سوختی، در حالت کلی، بازده خالص و بازده حرارتی خالص برای چیلر جذبی بیشتر از چیلر تراکمی است اما بازده الکتریکی خالص برای چیلر تراکمی بیشتر از چیلر جذبی می‌باشد. از طرف دیگر، در حالت استفاده از چیلر جذبی اختلاف قابل توجهی بین محرک‌های مختلف برای بازده کل، بازده الکتریکی خالص و بازده حرارتی خالص وجود ندارد اما هنگام استفاده از چیلر تراکمی، این اختلاف قابل توجه می‌باشد به طوری که برای پیل سوختی این شاخص‌ها بیشترین مقدار و برای موتور استرلینگ، کمترین مقدار را دارا هستند.

۳- شاخص انرژی تجدیدپذیر در محرک پیل سوختی کمترین مقدار و در محرک موتور استرلینگ بیشترین مقدار را داراست. بنابراین موتور استرلینگ دارای زیست آلاینده‌های کمتری است و از این جهت این محرک در مصارف سوخت بالا دارای برتری می‌باشد. از طرف دیگر، سیستم حرارت پایه در کل به نسبت سیستم بار پایه دارای شاخص انرژی تجدیدپذیر بالاتر و در نتیجه آلاینده‌های کمتری می‌باشد.

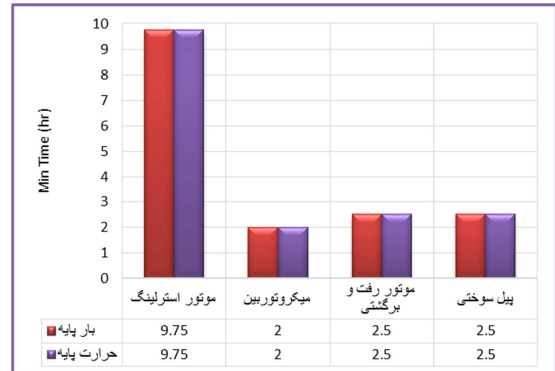
۴- حداقل زمان برای رسیدن به توان لازم، برای محرک اولیه میکروتوربین، کمترین مقدار و برای موتور استرلینگ بیشترین مقدار را داراست. این زمان برای هر دو سیستم بار پایه و حرارت پایه یکسان است. همچنین کمترین میزان زمان کارکرد سیستم که سبب افزایش عمر محرک سیستم می‌شود هنگام استفاده از چیلر جذبی می‌باشد.

۵- بهترین حالت برای سیستم‌های میکرو CHP دارای بویلر پشتیبان، استفاده از یک چیلر جذبی در حالت بار پایه می‌باشد.

## ۶- نمادها

|                           |  |
|---------------------------|--|
| C                         | سرمایش ویژه مورد نیاز ( $\text{kWh/m}^2$ )   |
| CDD                       | درجه حرارت-سرمایش ( $^{\circ}\text{C-day}$ ) |
| CHP                       | تولید همزمان برق و حرارت                     |
| $\text{COP}_{\text{ref}}$ | ضریب عملکرد سیستم برودت                      |
| DHW                       | آب گرم مصرفی ( $\text{m}^3/\text{s}$ )       |

در جدول ۸ مقادیر میانگین آمده است که به شکل تقریبی و کلی استراتژی‌های مختلف را با یکدیگر مقایسه کرده است. می‌توان به این نتیجه رسید که بالاترین ذخیره انرژی در هنگام استفاده از چیلر جذبی و در حالت بار پایه اتفاق می‌افتد. از طرف دیگر، در این حالت بیشترین بازدهی خالص را خواهیم داشت اما از نظر بازدهی الکتریکی کمترین بازدهی الکتریکی مربوط به این حالت می‌باشد. بازدهی حرارتی نیز بیشترین مقدار خود را در این حالت دارد. همچنین مزیت دیگر این سیستم‌ها این است که مقدار میانگین ساعت کارکرد حداقل می‌باشد اما مقدار شاخص مصرف انرژی تجدیدپذیر آنها نیز کمترین مقدار را دارد.



شکل ۱۴- زمان حداقل برای تولید توان (Min Time) در سیستم تولید همزمان دارای چیلر تراکمی برای محرک‌های مختلف برای دو حالت بار پایه و حرارت پایه

جدول ۸ - میانگین مقادیر بدست آمده از تحلیل سیستم‌های تولید همزمان

| متغیر                        | نوع چیلر |            |          |            |
|------------------------------|----------|------------|----------|------------|
|                              | تراکمی   |            | جذبی     |            |
|                              | بار پایه | حرارت پایه | بار پایه | حرارت پایه |
| PES (%)                      | ۰/۸      | -۷         | ۱۲/۶     | ۱۰/۸       |
| EFF (%)                      | ۶۷       | ۶۰/۸       | ۸۲/۲     | ۸۰/۵       |
| $\text{EFF}_e$ (%)           | ۲۲/۵     | ۲۱/۵       | ۱۲/۸     | ۱۲/۵       |
| $\text{EFF}_{\text{th}}$ (%) | ۴۴/۵     | ۳۹/۴       | ۶۹/۴     | ۶۸         |
| RER (%)                      | ۱۲/۴     | ۱۵/۶       | ۶/۸      | ۷/۴        |
| Min Time (hr)                | ۴/۲      | ۴/۲        | ۲/۱      | ۲/۱        |

هنگام استفاده از چیلر تراکمی، حالت بار پایه مقرون به صرفه‌تر می‌باشد و دارای بازدهی الکتریکی بالاتری نسبت به سایر حالت‌ها است اما از نظر مصرف انرژی تجدیدپذیر نسبت به حالت حرارت پایه در مرتبه پایین‌تری قرار می‌گیرد. همچنین می‌توان پی برد ساعت عملکرد سیستم به دلیل جبران حداقل بار الکتریکی در چیلرهای یکسان ثابت می‌باشد، زیرا حداقل مصرف بار الکتریکی بسته به نوع چیلر تعیین می‌شود. در کنار این موارد، تحلیل اقتصادی بازگشت سرمایه و در نظر گرفتن استراتژی چیدمان، از پارامترهای اساسی در تحلیل سیستم‌های تولید همزمان می‌باشد. در مواردی که بازگشت سرمایه طولانی باشد می‌توان از حرارت به هدر رفته که سبب کاهش بازدهی سیستم



|  |   |                      |
|--|---|----------------------|
| [6] Ebrahimi M., and Keshavarz A., "Combined cooling, heating and power decision-making, design and optimization, Elsevier, 2015.  | انرژی الکتریکی (kWh)                                  | E                    |
| [7] Bianchi M., Pascale A.D., Spina P. R., Guidelines for residential micro-CHP systems design, Applied Energy, Vol. 97, pp. 673-685, 2012.  | بازده خالص (%)  | EFF                  |
| [8] Gonz alez-Pino I., erez-Iribarren E. P., Campos-Celador A., Las-Heras-Casas J., and Sala J.M., Influence of the regulation framework on the feasibility of a Stirling engine-based residential micro CHP installation, Energy, Vol. 84, pp. 575-588, 2015.                       | بازده حرارتی خالص (%)                                 | EFF <sub>th</sub>    |
| [9] Araoz J. A., Salomon M., Alejo L., and Fransson T.H., Numerical simulation for the design analysis of kinematic Stirling engines, Applied Energy, Vol. 159, pp. 633-650, 2015.   | بازده الکتریکی خالص (%)                               | EFF <sub>e</sub>     |
| [10] Arsalis A., Nielsen M.P., and Kær S.K., Modeling and optimization of a 1 kW HT-PEMFC-based micro-CHP residential system, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 37, No. 3, pp. 2470-2481, 2012.   | انرژی نهایی تقاضا شده توسط حامل (kWh)                 | E <sub>del</sub>     |
| [11] Teymouri F., kolaei H., Sattari S., Technical and economic feasibility study of using Micro CHP in the different climate zones of Iran, Applied Energy, Vol. 36, pp. 4790-4798, 2011.   | انرژی نهایی صادر شده توسط حامل (kWh)                  | E <sub>exp</sub>     |
| [12] Liu X., Wua J., Jenkins N., and Bagdanavicius A., Combined analysis of electricity and heat networks, Applied Energy, Vol. 162, pp. 1238-1250, 2016.  | مقدار انرژی اولیه تقاضا شده (kWh)                     | E <sub>p</sub>       |
| [13] Arespacochaga N., Valderrama C., Peregrina C., Horneroa A., Bouchya L., Cortina J.L., "On-site cogeneration with sewage biogas via high-temperature fuel cells: Benchmarking against other options based on industrial-scale data", Elsevier, Fuel Processing Technology, 2015. | انرژی تجدیدپذیر اولیه تقاضا شده (kWh)                 | E <sub>p,ren</sub>   |
| [14] مهرابی م., کعبی نژاد ع. و خلجی م., تهیه اطلس گرمایش مناطق مختلف ایران به روش درجه روز جهت تدوین معیار مصرف انرژی، دانشکده محیط زیست و انرژی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، سازمان انرژی های نو ایران، د. ۹، ش. ۳، ۱۳۹۰.   | انرژی تجدیدناپذیر اولیه تقاضا شده (kWh)               | E <sub>p,non</sub>   |
| [15] European commission standards <a href="http://eurlex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011D0877&amp;from=EN">http://eurlex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011D0877&amp;from=EN</a>   | انرژی الکتریکی ویژه (kWh/m <sup>2</sup> )             | e                    |
| [16] Cengel Y., and Boles M., Thermodynamics: An Engineering Approach, 8 ed, McGraw-Hill, 2015.  | انرژی الکتریکی ویژه مورد نیاز (kWh/m <sup>2</sup> )   | e <sub>sys</sub>     |
| [17] Musall E., and Voss K., Renewable Energy Ratio in Net Zero Energy Buildings, Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations, 2014.   | انرژی الکتریکی ویژه شبکه برق (kWh/m <sup>2</sup> )    | e <sub>grid</sub>    |
| [18] <a href="http://www.mboiler.com/component/content/article/468">http://www.mboiler.com/component/content/article/468</a>   | انرژی الکتریکی ویژه پنل خورشیدی (kWh/m <sup>2</sup> ) | e <sub>pV</sub>      |
| [19] سالنامه آماری تهران، استانداری تهران، معاونت برنامه‌ریزی و اشتغال، دفتر آمار و اطلاعات، ۱۳۹۲.   | ضریب انرژی اولیه تقاضا شده برای حامل i - ام           | f <sub>p,del,i</sub> |
| [20] <a href="http://www.chaharmahalmet.ir/stat/archive/iran/teh/TEHRAN/8.asp">http://www.chaharmahalmet.ir/stat/archive/iran/teh/TEHRAN/8.asp</a>   | ضریب انرژی اولیه صادر شده توسط حامل i - ام            | f <sub>p,exp,i</sub> |
| [21] <a href="http://www.chaharmahalmet.ir/stat/archive/iran/teh/TEHRAN/9.asp">http://www.chaharmahalmet.ir/stat/archive/iran/teh/TEHRAN/9.asp</a>   | دمای-گرمایش (°C-day)                                  | HDD                  |
|  | تولید سه گانه برق، حرارت و برودت در مقیاس کوچک        | mCCHP                |
|  | تعداد ماه‌های سال                                     | N <sub>month</sub>   |
|  | توان الکتریکی (kW)                                    | P                    |
|  | صرفه جویی در انرژی اولیه (%)                          | PES                  |
|  | انرژی گرمایی (kWh)                                    | Q                    |
|  | انرژی گرمایی ویژه (kWh/m <sup>2</sup> )               | q                    |
|  | انرژی گرمایی ویژه مورد نیاز (kWh/m <sup>2</sup> )     | q <sub>sys</sub>     |
|  | انرژی گرمایی ویژه شبکه حرارت (kWh/m <sup>2</sup> )    | q <sub>grid</sub>    |
|  | سوخت ویژه مصرفی (kWh/m <sup>2</sup> )                 | q <sub>F</sub>       |
|  | انرژی گرمایی ویژه پنل خورشیدی (kWh/m <sup>2</sup> )   | q <sub>TP</sub>      |
|  | نسبت انرژی تجدیدپذیر (%)                              | RER                  |
|  | دمای پایه (°C)  | T <sub>b</sub>       |
|  | دمای هوا (°C)   | T <sub>e</sub>       |
|  | <b>علائم یونانی</b>                                   |                      |
|  | بازده   | η                    |
|  | بازده حرارتی مرجع                                     | η <sub>Href</sub>    |
|  | بازده الکتریکی مرجع                                   | η <sub>Eref</sub>    |
|  | نسبت توان به حرارت                                    | γ                    |

## ۷- مراجع

- [1] Chamra L. M. and Mago P. J., Micro-CHP power generation for residential and small commercial buildings, Nova Science Publishers, Inc. New York, 2009.
- [2] Beith R., Small and micro combined heat and power (CHP) systems advanced design, performance, materials and applications, Woodhead Publishing Series in Energy, Number 18, New York, 2011.
- [3] Badaea N., Design for micro-combined cooling, heating and power systems stirling engines and renewable power systems, Springer-Verlag, London, 2015.
- [4] Meckler M., and Heyman L.B., Sustainable on-site CHP systems design, construction, and operations, McGraw-Hill, 2010.
- [5] Owen M. S., Combined heat and power design guide, ASHRAE, Atlanta, 2015.