



## طراحی سیستم CCHP برای ساختمان‌های اداری در تهران و ارزیابی ترمودینامیکی، زیست‌محیطی و اقتصادی آن نسبت به سیستم مرسوم

مهدی معرفت<sup>۱\*</sup>، پیام شافیعی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
 ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
 \* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، maerefat@modares.ac.ir

### چکیده

در این مقاله، سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما تحت استراتژی تامین بار حرارتی، برای ساختمان‌های اداری در تهران طراحی شده و نسبت به سیستم تولید جداگانه، مورد ارزیابی قرار گرفته است. معیارهای صرفه‌جویی در مصرف انرژی اولیه، کاهش انتشار آلاینده‌های اکسید کربن، کاهش هزینه عملکرد و نرخ بازگشت سرمایه، به منظور ارزیابی جامع سیستم تولید همزمان، برای یک ساختمان اداری فرضی دارای ویژگی‌های عموم ساختمان‌های اداری کشور، به کار گرفته شده‌اند. همچنین آنالیز حساسیت نرخ بازگشت سرمایه بر مبنای تغییرات قیمت برق و گاز انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که سیستم تولید همزمان در حالت فروش برق به شبکه، بر مبنای تمامی معیارها، دارای مزایای قابل توجهی نسبت به سیستم تولید جداگانه می‌باشد. در حالت عدم فروش برق به شبکه نیز، سیستم تولید همزمان دارای مزایای نسبت به سیستم تولید جداگانه می‌باشد، اما این مزایا، در مقایسه با حالت فروش برق به شبکه، بسیار کمتر می‌باشند. در حالت فروش برق به شبکه، با افزایش تعرفه‌های برق و گاز، توجیه‌پذیری اقتصادی سیستم حفظ می‌گردد، اما در حالت عدم فروش برق به شبکه، افزایش بیش از ۴۰ درصد قیمت گاز منجر به عدم توجیه‌پذیری اقتصادی سیستم می‌گردد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: ۱۵ آبان ۱۳۹۲  
 پذیرش: ۰۲ دی ۱۳۹۲  
 ارائه در سایت: ۲۲ تیر ۱۳۹۳  
 کلید واژگان:  
 تولید همزمان  
 ساختمان اداری  
 ارزیابی جامع  
 استراتژی تامین بار حرارتی  
 آنالیز حساسیت

## Design of CCHP system for office buildings in Tehran and thermodynamical, environmental and economical evaluation in comparison to conventional system

Mehdi Maerefat<sup>1\*</sup>, Payam Shafie<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran  
 2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran  
 \* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, maerefat@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
 Received 06 November 2013  
 Accepted 23 December 2013  
 Available Online 13 July 2014

### Keywords:

CCHP  
 Office Building  
 Multi-Criteria Analysis  
 Thermal Demand Management  
 Sensitivity Analysis

### ABSTRACT

In this article, after the design of a CCHP system for office buildings in Tehran, a mathematical analysis of the CCHP system following thermal demand management in comparison to separate system is presented. In order to have a comprehensive evaluation of the performance of the CCHP system, four criteria including primary energy saving, CO<sub>2</sub> emission reduction, operational cost reduction and rate of return are employed for a typical office building in Iran. Also a sensitivity analysis of rate of return based on increasing natural gas and electric price is performed. Results show that the CCHP system with selling electricity to grid has much better performance than separate system when all of the criteria are involved. Also without selling electricity to grid the CCHP system achieves more benefits than separate system but these benefits are less than the benefits of the situation with selling electricity to grid. The sensitivity analysis shows that in the situation with selling electricity to grid, with increasing natural gas and electric price the ROR will be increased but in the situation without selling electricity to grid, with 40% increase in natural gas price the ROR will become less than Interest Rate.

### ۱- مقدمه

انرژی، استفاده از سیستم‌های تولید همزمان برق، حرارت و سرما<sup>۱</sup> می‌باشد. سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما، سیستم تامین‌کننده انرژی است که در آن انرژی الکتریکی مورد نیاز در محل، به وسیله یک محرک اولیه<sup>۲</sup> تولید می‌گردد و حرارت اتلافی از محرک اولیه به منظور تامین

یکی از نگرانی‌های قرن ۲۱ میزان محدود منابع سوخت فسیلی است. به علاوه مشکلاتی که این سوخت‌ها از لحاظ آلودگی محیط زیست ایجاد می‌کنند نیاز به یافتن راه‌حلهایی جهت مدیریت مصرف این گونه منابع را دوچندان می‌کند. یکی از مهم‌ترین راه‌کارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی، با هدف افزایش بازده تولید

1- Combined Cooling Heating and Power (CCHP)  
 2- Prime mover

### Please cite this article using:

M. Maerefat, P. Shafie, Design of CCHP system for office buildings in Tehran and thermodynamical, environmental and economical evaluation in comparison to conventional system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 124-134, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

$Q_c$ ، از طریق چیلر تراکمی تامین می‌گردد.

$$E_{grid}^{shp} = E_{req} + E_c \quad (1)$$

که در رابطه (۱)، انرژی الکتریکی مورد نیاز برای روشنایی و تجهیزات الکتریکی است.  $E_c$  انرژی الکتریکی مورد نیاز برای چیلر تراکمی است که از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$E_c = \frac{Q_c}{COP_e} \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $COP_e$  ضریب عملکرد چیلر تراکمی می‌باشد. حرارت مورد نیاز برای کویل حرارتی،  $Q_{hc}$ ، به منظور تامین بار حرارتی ساختمان از رابطه (۳) قابل محاسبه است.

$$Q_{hc} = \frac{Q_h}{\eta_{hc}} \quad (3)$$

که در رابطه (۳)،  $\eta_{hc}$  راندمان کویل حرارتی می‌باشد. بنابراین سوخت مصرفی در بویلر،  $F_b^{shp}$ ، که حرارت مورد نیاز کویل حرارتی را تامین می‌کند از رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$F_b^{shp} = \frac{Q_{hc}}{\eta_b} \quad (4)$$

که در رابطه (۴)،  $\eta_b$  راندمان بویلر است.

## ۲-۲- سیستم تولید همزمان

در سیستم تولید همزمان، سوخت در محرک اولیه مصرف شده تا تقاضای انرژی الکتریکی ساختمان را برآورده کند. حرارت بازیاب شده از محرک اولیه نیز برای تامین گرمایش توسط کویل حرارتی و یا تامین سرمایش توسط چیلر جذبی، استفاده می‌گردد. با توجه به اینکه پرکاربردترین محرک اولیه مورد استفاده در کاربردهای بخش ساختمان، موتورهای گازسوز<sup>۷</sup> هستند [۹]، در این مطالعه، موتور گازسوز به عنوان محرک اولیه در نظر گرفته شده است.

برای سیستم‌های تولید همزمان، استراتژی‌های عملکرد مختلفی به منظور تامین تقاضای انرژی در ساختمان وجود دارد. دو استراتژی اصلی سیستم‌های تولید همزمان عبارت‌اند از استراتژی تامین بار حرارتی<sup>۸</sup> و استراتژی تامین بار الکتریکی<sup>۹</sup> [۱۰]. با توجه به اینکه، فقط در استراتژی تامین بار حرارتی امکان فروش برق به شبکه وجود دارد، در مقاله حاضر به مقایسه دو حالت عدم فروش برق به شبکه و فروش برق به شبکه در این استراتژی عملکرد پرداخته شده است.

در استراتژی تامین بار حرارتی، حرارت بازیابی از محرک اولیه با بار حرارتی مورد نیاز ساختمان تطبیق داده می‌شود و ممکن است انرژی الکتریکی تامین شده توسط محرک اولیه برابر با انرژی الکتریکی مورد نیاز ساختمان نباشد. در واقع انرژی الکتریکی تولیدی توسط سیستم تولید همزمان براساس تغییرات حرارت تولیدی تغییر می‌کند. لذا در این استراتژی، امکان خرید برق از شبکه و یا فروش برق به شبکه وجود دارد. در این مقاله ارزیابی عملکرد سیستم تولید همزمان، بر مبنای طراحی و عملکرد تحت استراتژی تامین بار حرارتی انجام شده است.

در این استراتژی عملکرد، حرارتی که باید توسط سیستم تولید همزمان و در صورت نیاز توسط بویلر کمکی تامین گردد،  $Q_{req}$ ، عبارت است از:

$$Q_{req} = Q_{hc} + Q_{ch} \quad (5)$$

که در رابطه (۵)،  $Q_{ch}$  حرارت مورد نیاز برای چیلر جذبی به منظور تامین سرمایش ساختمان می‌باشد و از رابطه (۶) به دست می‌آید:

گرمایش، آب گرم مصرفی و سرمایش بازیاب می‌گردد. یکی از بخش‌های کاربرد سیستم تولید همزمان بخش ساختمان است، که این بخش در کشور ایران بیشترین سهم مصرف انرژی اولیه را به خود اختصاص داده است [۱].

استفاده از سیستم تولید همزمان برای بخش ساختمان در مطالعات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. دسته‌ای از محققین به طراحی سیستم تولید همزمان برای یک کاربرد خاص پرداختند. کاردونا و همکارانش [۲] به ارائه یک روش ابداعی برای محاسبه ظرفیت محرک اولیه بر مبنای تامین بار حرارتی ساختمان، برای هتل‌های اروپا پرداختند.

دسته‌ای دیگر از محققین به ارزیابی سیستم تولید همزمان بر مبنای یک معیار ارزیابی خاص پرداختند. مانسرا و همکارانش [۳] به مقایسه سیستم تولید همزمان بر پایه موتور گازسوز و توربین گاز بر مبنای معیار انتشار آلاینده دی اکسید کربن پرداختند.

ارزیابی سیستم تولید همزمان بر مبنای چند معیار مختلف بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. وانگ و همکارانش [۴] به ارزیابی فنی و زیست‌محیطی سیستم تولید همزمان بر پایه محرک اولیه میکروتوربین گازی برای یک هتل در شهر پکن پرداختند. گو و همکارانش [۵] به ارزیابی جامع سیستم تولید همزمان بر پایه محرک‌های اولیه مختلف برای ساختمان‌های مسکونی در شانگهای چین پرداختند. براساس تحقیقات نگارنده، در کشور ایران مطالعه‌ای در زمینه ارزیابی چندمعیاره سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما برای ساختمان‌های اداری گزارش نشده و اکثر مطالعات انجام شده در کشور بر روی ساختمان‌های مسکونی صورت گرفته است [۶-۸].

در این مقاله، به طراحی و سپس ارزیابی سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما تحت استراتژی تامین بار حرارتی نسبت به سیستم تولید جداگانه<sup>۱</sup>، برای ساختمان‌های اداری به عنوان ساختمان‌هایی با استفاده منقطع، براساس معیارهای صرفه جویی در مصرف انرژی اولیه<sup>۲</sup>، درصد کاهش انتشار آلاینده دی اکسید کربن<sup>۳</sup>، درصد کاهش هزینه عملکرد<sup>۴</sup> و نرخ بازگشت سرمایه<sup>۵</sup> پرداخته شده است. به منظور محاسبات تقاضای انرژی در ساختمان، شرایط آب و هوایی شهر تهران مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین، به منظور درک بهتر از تاثیر تغییر پارامترهای اساسی بر کارایی سیستم تولید همزمان، آنالیز حساسیت اقتصادی سیستم تولید همزمان بر مبنای تغییرات قیمت برق و گاز انجام شده است.

## ۲-۲- مدل سیستم تولید همزمان و سیستم تولید جداگانه

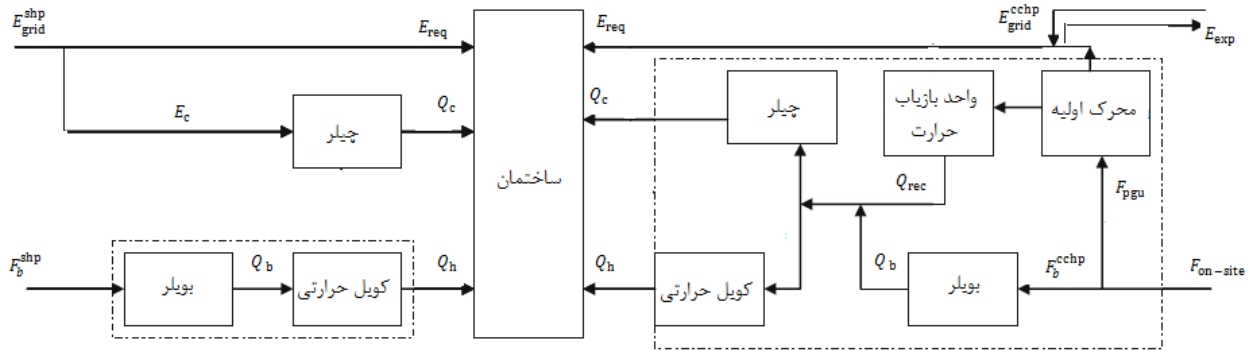
در این بخش روابط حاکم به منظور مدل‌سازی سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما و سیستم تولید جداگانه ارائه شده است. شکل ۱ دیاگرام جریان انرژی را در دو سیستم نشان می‌دهد، به نحوی که بخش سمت چپ شکل مربوط به سیستم تولید جداگانه و بخش سمت راست مربوط به سیستم تولید همزمان می‌گردد.

### ۱-۲- سیستم تولید جداگانه

در سیستم تولید جداگانه، انرژی الکتریکی مورد نیاز ساختمان،  $E_{grid}^{shp}$ ، از طریق برق شبکه تامین می‌گردد و از رابطه (۱) قابل محاسبه است. بار حرارتی ساختمان،  $Q_h$ ، از طریق بویلر گازسوز تامین شده و به وسیله کویل حرارتی<sup>۶</sup> به مصرف‌کنندگان انتقال می‌یابد. فرض شده است که بار سرمایشی،

- 1- Separate Heat and Power (SHP)
- 2- Primary Energy Saving (PES)
- 3- Carbon Dioxide Emission Reduction (CDER)
- 4- Operational Cost Reduction (CR)
- 5- Rate Of Return (ROR)
- 6- Heating coil

7- Gas engine  
8- Thermal Demand Management (TDM)  
9- Electrical Demand Management (EDM)



شکل ۱ دیاگرام جریان انرژی در دو سیستم تولید همزمان و تولید جداگانه

### ۳- ساختمان مینا و محاسبات تقاضای انرژی

طراحی و عملکرد سیستم‌های تولید همزمان برق، حرارت و سرما بسیار تحت تاثیر شرایط آب و هوایی و تقاضای انرژی در ساختمان است. همان‌طور که در بخش ۱ اشاره شد، در این مقاله، به‌منظور محاسبات تقاضای انرژی در ساختمان، شرایط آب و هوایی شهر تهران مورد استفاده قرار گرفته است.

به‌منظور انتخاب یک ساختمان اداری مینا با ویژگی‌های عموم ساختمان‌های اداری کشور، از اطلاعات مندرج در مرجع [۱۱] استفاده شده است که در آن، جامعه نمونه مناسبی از ساختمان‌های اداری کشور (۳۵۰ عدد) انتخاب و به‌میزی انرژی آن‌ها پرداخته شده است. بر این اساس در این مقاله، محاسبات برای یک ساختمان اداری ۴ طبقه با زیربنای ۴۰۰۰ متر مربع انجام شده است. براساس اطلاعات مرجع [۱۱]، متوسط سرانه خالص زیربنا برای ساختمان‌های اداری کشور، ۳۸ متر مربع به‌ازاء هر نفر می‌باشد. لذا تعداد افراد حاضر در ساختمان اداری مینا ۱۰۵ نفر در نظر گرفته شده است. ساعات اداری از ۸ تا ۱۷ در نظر گرفته شده است. دیوارهای خارجی ساختمان به ضخامت ۲۲cm از آجر و گچ، بام ساختمان به ضخامت ۴۰cm با پوشش آسفالت و نسبت مساحت سطوح نورگذر به سطح دیوارهای خارجی برابر ۳۰٪ در نظر گرفته شده است.

تقاضای انرژی در یک ساختمان اداری شامل بار حرارتی گرمایش، بار حرارتی آب گرم مصرفی، بار سرمایش و بار الکتریکی می‌گردد. به‌منظور محاسبه بار حرارتی آب گرم مصرفی در ساختمان، از رابطه (۱۵) استفاده شده است.

$$Q_{hw} = \rho_w C_w \dot{V} (T_2 - T_1) \quad (15)$$

که در رابطه (۱۵)،  $\dot{V}$  میزان مصرف آب گرم بوده و برابر مقدار متوسط روزانه ۵ لیتر به‌ازاء هر نفر برای ساختمان‌های اداری در نظر گرفته شده است [۱۲]. دمای آب گرم مورد نیاز،  $T_2$ ، برابر  $52^\circ\text{C}$  و دمای آب سرد،  $T_1$ ، برابر با متوسط دمای هوای روزانه فرض شده و مصرف آب گرم به‌طور یکنواخت در ساعات اداری در نظر گرفته شده است.  $Q_{hw}$  بار حرارتی آب گرم مصرفی  $\text{kJ/day}$ ،  $C_w$  حرارت مخصوص آب  $\text{kJ/kgC}$  و  $\rho_w$  جرم مخصوص آب  $\text{kg/l}$  می‌باشد.

به‌منظور محاسبه بار حرارتی و سرمایشی ساختمان اداری مینا، از نرم-افزار HAP4.5 استفاده شده است که بر این اساس، بارهای گرمایش و سرمایش در پانزدهمین روز از هر ماه در طی ۲۴ ساعت محاسبه و پانزدهمین روز هر ماه بیانگر مقادیر بار در دیگر روزهای ماه نیز می‌باشد.

اصلی‌ترین تجهیزات الکتریکی در یک ساختمان اداری عبارتند از: روشنایی، کامپیوتر، پرینتر، فتوکپی، فاکس، اسکنر، یخچال و آب سردکن. توان مصرفی، ضریب همزمانی و تعداد هر یک از تجهیزات فوق، براساس

$$Q_{ch} = \frac{Q_c}{COP_{ch}} \quad (6)$$

که در رابطه (۶)،  $COP_{ch}$  ضریب عملکرد چیلر جذبی است. مقدار حرارتی که باید از محرک اولیه بازیاب گردد،  $Q_{rec}$ ، با بار حرارتی تطبیق داده می‌شود:

$$Q_{rec} = Q_{req} \quad (7)$$

بنابراین انرژی سوخت مصرفی در محرک اولیه،  $F_{pgu}$ ، از رابطه (۸) قابل محاسبه می‌باشد:

$$F_{pgu} = \frac{Q_{rec}}{\eta_{rec}(1-\eta_{pgu})} \quad (8)$$

در رابطه (۸)،  $\eta_{rec}$  راندمان واحد بازیاب حرارت و  $\eta_{pgu}$  راندمان الکتریکی محرک اولیه می‌باشد. بنابراین انرژی الکتریکی تامین شده توسط موتور گازسوز،  $E_{pgu}$ ، از رابطه (۹) به‌دست می‌آید:

$$E_{pgu} = F_{pgu} \eta_{pgu} \quad (9)$$

با توجه به اینکه سیستم براساس تامین بار حرارتی عمل می‌کند، مقدار حرارت بازیابی از محرک اولیه نمی‌تواند از مقدار حداکثر حرارت قابل بازیاب از محرک اولیه، بیشتر باشد (نحوه محاسبه حداکثر حرارت قابل بازیاب از محرک اولیه در بخش ۴ ارائه شده است). بنابراین حرارت اضافی مورد نیاز،  $Q_b$ ، می‌بایست توسط بویلر کمکی تامین گردد.

$$Q_b = \begin{cases} Q_{req} - Q_{rec} & Q_{req} > Q_{rec} \\ 0 & Q_{req} = Q_{rec} \end{cases} \quad (10)$$

سوخت مصرفی بویلر کمکی،  $F_b^{cchp}$ ، نیز از رابطه (۱۱) قابل محاسبه است و کل سوخت مصرفی سیستم تولید همزمان،  $F_{on-site}$ ، از رابطه (۱۲) به‌دست می‌آید:

$$F_b^{cchp} = \frac{Q_b}{\eta_b} \quad (11)$$

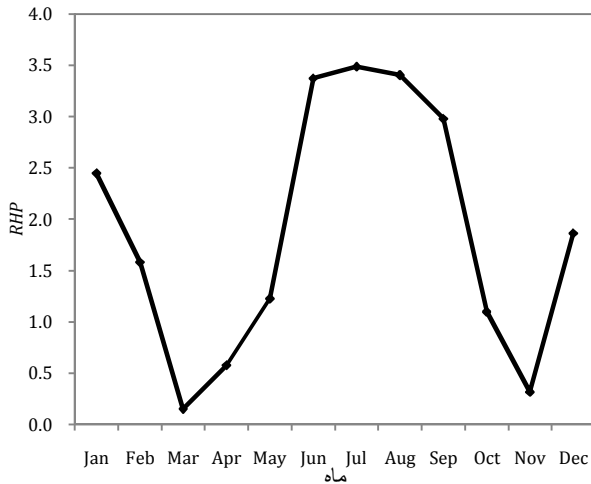
$$F_{on-site} = F_b^{cchp} + F_{pgu} \quad (12)$$

همچنین در استراتژی تامین بار حرارتی، انرژی الکتریکی تامین‌شده توسط محرک اولیه ممکن است برای تامین تقاضای انرژی الکتریکی ساختمان اداری مینا کافی نباشد و یا بیش از بار الکتریکی ساختمان باشد. لذا انرژی الکتریکی اضافی مورد نیاز،  $E_{grid}^{cchp}$ ، باید از طریق برق شبکه تامین گردد و می‌توان انرژی الکتریکی اضافی تولید شده،  $E_{exp}$ ، را به شبکه فروخت.

$$E_{grid}^{cchp} = \begin{cases} E_{req} - E_{pgu} & E_{req} > E_{pgu} \\ 0 & E_{req} \leq E_{pgu} \end{cases} \quad (13)$$

$$E_{exp} = \begin{cases} E_{req} - E_{pgu} & E_{req} > E_{pgu} \\ 0 & E_{req} \leq E_{pgu} \end{cases} \quad (14)$$

1- Heat recovery unit



شکل ۳ نسبت حرارت به توان ساختمان به موتور گازسوز

#### ۴- روش محاسبه ظرفیت محرک اولیه براساس تامین بار حرارتی

به منظور محاسبه ظرفیت تولید توان محرک اولیه<sup>۲</sup> در سیستم تولید همزمان، از یک روش بهینه براساس منحنی تجمعی<sup>۳</sup> بار حرارتی ساختمان، استفاده شده است. این روش تحت عنوان روش بزرگترین مستطیل<sup>۴</sup> شناخته شده و در سال ۲۰۰۳ توسط کاردونا ارائه شده است [۲].

در این روش به منظور طراحی ظرفیت محرک اولیه در سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما، منحنی تجمعی بار حرارتی مجموع<sup>۵</sup>، که مجموعی است از بار حرارتی ساختمان و بار حرارتی مورد نیاز چیلر جذبی، برحسب تعداد ساعات سالانه طوری که مقادیر بار از حداکثر به حداقل مرتب شده باشد، رسم می‌گردد. با مشخص کردن حداکثر مساحت تشکیل شده زیر منحنی (بزرگترین مستطیل)، حداکثر بار حرارتی که می‌بایست توسط محرک اولیه تامین گردد، مشخص می‌شود. مساحت بزرگترین مستطیل، حداکثر انرژی حرارتی است که سیستم می‌تواند سالانه در بار کامل تامین کند. عرض و طول بزرگترین مستطیل، به ترتیب مشخص کننده سائز محرک اولیه و مدت زمان عملکرد سیستم تولید همزمان در بار کامل می‌باشد.

این روش از بزرگ یا کوچک بودن بیش از حد ظرفیت محرک اولیه جلوگیری می‌کند [۲]. شکل ۴ منحنی تجمعی بار حرارتی مجموع را برای ساختمان اداری مینا نشان می‌دهد. مشخصات محرک اولیه بر مبنای روش بزرگترین مستطیل، در بخش ۶ ارائه شده است.

#### ۵- معیارهای ارزیابی

به منظور ارزیابی جامع سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما نسبت به سیستم تولید جداگانه از نقطه نظر انرژی، زیست‌محیطی و اقتصادی، معیارهای ارزیابی به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

##### ۵-۱- معیار ارزیابی از لحاظ انرژی

در این مطالعه، به منظور ارزیابی سیستم تولید همزمان از لحاظ مصرف انرژی، از معیار صرفه‌جویی در مصرف انرژی اولیه استفاده شده است که از رابطه (۱۷) قابل محاسبه می‌باشد.

$$PES = \frac{PEC^{shp} - PEC^{cchp}}{PEC^{shp}} \quad (17)$$

2- Prime mover sizing  
3- Cumulative curve  
4- Maximum Rectangular Method (MRM)  
5- Aggregated Thermal Load (ATL)

شاخص‌های به دست آمده از مرجع [۱۳] در نظر گرفته شده‌اند. همچنین به منظور محاسبه توان پمپ سیرکولاسیون از رابطه (۱۶) استفاده شده است [۷]. در این رابطه  $H_{dem}$  و  $C_{dem}$  به ترتیب حداکثر بار حرارتی و سرمایشی را نشان می‌دهند.

$$w = 0.005 \max(H_{dem}, C_{dem}) \quad (16)$$

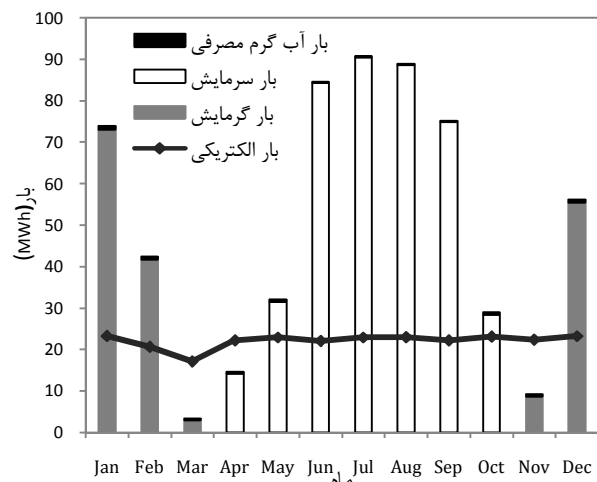
جدول ۱ توان مصرفی، تعداد و ضرایب همزمانی در نظر گرفته شده برای هر کدام از تجهیزات الکتریکی را نشان می‌دهد.

پروفایل روزانه استفاده از تجهیزات الکتریکی برای ساختمان اداری طبق مرجع [۱۴] در نظر گرفته شده و همچنین به منظور محاسبه بار الکتریکی سالانه، میزان روشنایی براساس ساعات طلوع و غروب خورشید در پانزدهمین روز از هر ماه برای شهر تهران تطبیق داده شده است [۱۵،۶]. بدین ترتیب، شاخص مصرف انرژی الکتریکی سالانه ساختمان اداری مینا برابر  $66 \text{ kWh/m}^2$  محاسبه شد. از آنجایی که طبق مرجع [۱۶] متوسط شاخص مصرف انرژی الکتریکی سالانه ساختمان‌های اداری در شهرهایی با نیاز انرژی متوسط مانند تهران برابر با  $63 \text{ kWh/m}^2$  می‌باشد، لذا محاسبات بار الکتریکی ساختمان از دقت مناسبی برخوردار است. شکل ۲ مقادیر بار حرارتی گرمایش، آب گرم مصرفی، بار سرمایش و بار الکتریکی ساختمان را نشان می‌دهد.

یکی از مهم‌ترین عوامل که مزایای سیستم تولید همزمان را تحت تاثیر قرار می‌دهد، نسبت حرارت به توان<sup>۱</sup> می‌باشد. نسبت حرارت به توان موتور گازسوز برابر  $1/625$  می‌باشد. شکل ۳ نسبت حرارت به توان ساختمان به موتور گازسوز را،  $RHP$ ، در ماه‌های مختلف سال نشان می‌دهد که این مقادیر در بازه  $0/15$  تا  $3/5$  می‌باشند.

جدول ۱ مشخصات تجهیزات الکتریکی ساختمان اداری مینا

نوع تجهیزات	توان مصرفی (W)	تعداد	ضریب همزمانی
روشنایی	۴۵	۱۰۰۰	۰/۹
کامپیوتر	۱۲۰	۸۲	۰/۷۵
پرینتر	۱۷۰	۴۰	۰/۵
اسکنر	۶۰	۸	۰/۵
فاکس	۲۰	۱۰	۱
فتوکپی	۴۱۰	۱۲	۰/۸
یخچال	۲۰۵	۲۰	۱
آب سردکن	۶۱۰	۱۰	۱



شکل ۲ بارهای الکتریکی، گرمایش، سرمایش و آب گرم مصرفی ساختمان در ماه‌های مختلف

1- Heat to power ratio

مفید سیستم و نرخ بهره<sup>۴</sup> نمی‌باشند. ارزیابی دینامیکی، بر پایه معیارهایی است که دربرگیرنده این دو عامل می‌باشند.

در این مطالعه، به منظور ارزیابی اقتصادی سیستم تولید همزمان، از هر دو روش استفاده شده است. دو معیار درصد کاهش هزینه عملکرد و نرخ بازگشت سرمایه به ترتیب برای ارزیابی استاتیکی و دینامیکی به کار گرفته شده‌اند.

### ۵-۳-۱- درصد کاهش هزینه عملکرد

درصد کاهش هزینه عملکرد از رابطه (۲۳) قابل محاسبه است.

$$CR = \frac{Cost^{shp} - Cost^{cchp}}{Cost^{shp}} \quad (23)$$

در رابطه (۲۳)،  $Cost^{shp}$  و  $Cost^{cchp}$  به ترتیب نشان‌دهنده هزینه عملکرد سیستم تولید جداگانه و سیستم تولید همزمان می‌باشند. هزینه عملکرد شامل خرید گاز طبیعی و برق از شبکه برای دو سیستم تولید همزمان و سیستم تولید جداگانه می‌گردد. همچنین در حالت فروش برق به شبکه برای سیستم تولید همزمان، درآمد حاصل از فروش برق به شبکه نیز لحاظ شده است. هزینه عملکرد سیستم تولید جداگانه از رابطه (۲۴) به دست می‌آید.

$$Cost^{shp} = Cost_e E_{grid}^{shp} + Cost_f F_b^{shp} \quad (24)$$

که در رابطه (۲۴)،  $Cost_e$ ،  $Cost_f^{shp}$  به ترتیب نشان‌دهنده تعرفه خرید برق از شبکه و خرید گاز طبیعی برای ساختمان‌های اداری در ایران می‌باشند. هزینه عملکرد سیستم تولید همزمان در حالت عدم فروش برق به شبکه و حالت فروش برق به شبکه به ترتیب از روابط (۲۵) و (۲۶) قابل محاسبه است.

$$Cost^{cchp} = Cost_e E_{grid}^{cchp} + Cost_f F_{on-site}^{cchp} \quad (25)$$

$$Cost^{cchp} = Cost_e E_{grid}^{cchp} + Cost_f F_{on-site}^{cchp} - Cost_{exp} E_{exp}^{cchp} \quad (26)$$

در روابط (۲۵) و (۲۶)،  $Cost_{exp}$  و  $Cost_f^{cchp}$  به ترتیب نشان‌دهنده تعرفه خرید گاز طبیعی برای سیستم تولید همزمان و فروش برق به شبکه می‌باشند.

بر اساس قوانین سال ۱۳۹۱ وزارت نیرو، نرخ پرداختی به‌ازای هر کیلووات ساعت انرژی الکتریکی تولیدی توسط سیستم تولید همزمان که به شبکه فروخته می‌شود، برابر حداقل ۳۷۳ Rials/kWh می‌باشد [۱۷]. به‌علاوه، در محاسبه هزینه‌های مربوط به گاز طبیعی برای سیستم تولید همزمان، ۸۰٪ مصرف گاز با نرخ گاز طبیعی برای نیروگاه‌های دولتی کشور در نظر گرفته می‌شود [۱۷، ۷].

### ۵-۳-۲- نرخ بازگشت سرمایه

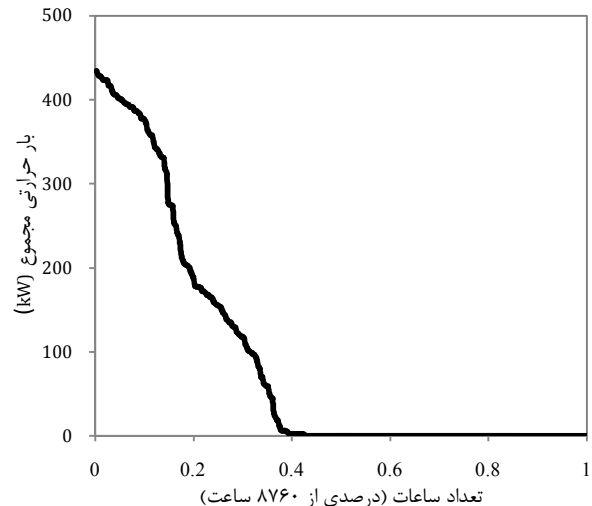
نرخ بازگشت سرمایه،  $ROR$ ، نرخ سودی است که از طریق سرمایه‌گذاری در یک پروژه به دست می‌آید. با استفاده از این معیار، می‌توان توجیه‌پذیری اقتصادی یک طرح را در مقایسه با شرایط معمول سرمایه‌گذاری در کشور به دست آورد و در واقع، ریسک سرمایه‌گذاری را نشان می‌دهد. به منظور توجیه‌پذیری اقتصادی یک طرح، می‌بایست نرخ بازگشت سرمایه بیش از نرخ بهره گردد.

نرخ بازگشت سرمایه، نرخ سودی است که به‌ازاء آن، شاخص ارزش فعلی خالص<sup>۵</sup> برابر صفر می‌گردد و لذا از رابطه (۲۷) قابل محاسبه است.

$$\sum_{t=1}^n \frac{cf_t(1+j)^{t-1}}{(1+ROR)^t} - I_0 = 0 \quad (27)$$

4- Interest rate

5- Net present value



شکل ۴ منحنی تجمعی بار حرارتی مجموع برحسب تعداد ساعات

که در رابطه (۱۷)،  $PEC^{shp}$  و  $PEC^{cchp}$  به ترتیب بیانگر مصرف انرژی اولیه<sup>۱</sup> در سیستم تولید جداگانه و سیستم تولید همزمان می‌باشند. مصرف انرژی اولیه نشان‌دهنده مصرف انرژی در محل به‌اضافه افت‌ها در تولید و انتقال انرژی است. لذا مصرف انرژی اولیه برای سیستم تولید جداگانه و سیستم تولید همزمان عبارت‌اند از:

$$PEC^{shp} = \frac{E_{grid}^{shp}}{\eta_e^{shp} \eta_{grid}^{shp}} + F_b \quad (18)$$

$$PEC^{cchp} = \frac{E_{grid}^{cchp}}{\eta_e^{shp} \eta_{grid}^{shp}} + F_{on-site} \quad (19)$$

در روابط (۱۸) و (۱۹)،  $\eta_e^{shp}$  راندمان تولید برق در نیروگاه‌های گازی کشور و  $\eta_{grid}$  راندمان شبکه انتقال و توزیع برق می‌باشد.

### ۵-۲- معیار ارزیابی زیست محیطی

ارزیابی زیست محیطی سیستم تولید همزمان با استفاده از معیار درصد کاهش انتشار آلاینده دی‌اکسید کربن انجام شده است که این معیار از رابطه (۲۰) قابل محاسبه می‌باشد.

$$CDER = \frac{CDE^{shp} - CDE^{cchp}}{CDE^{shp}} \quad (20)$$

در رابطه (۲۰)،  $CDE^{shp}$  و  $CDE^{cchp}$  به ترتیب عبارت‌اند از میزان انتشار آلاینده دی‌اکسید کربن از سیستم تولید جداگانه و سیستم تولید همزمان:

$$CDE^{shp} = \mu_e E_{grid}^{shp} + \mu_f F_b \quad (21)$$

$$CDE^{cchp} = \mu_e E_{grid}^{cchp} + \mu_f F_{on-site} \quad (22)$$

که در روابط (۲۱) و (۲۲)،  $\mu_e$  و  $\mu_f$  به ترتیب ضرایب تبدیل انتشار آلاینده برای برق شبکه و گاز طبیعی می‌باشند.

### ۵-۳- معیارهای ارزیابی اقتصادی

عموماً به منظور ارزیابی اقتصادی سیستم‌های تولید همزمان، دو روش به کار گرفته می‌شود. این دو روش عبارت‌اند از: ارزیابی استاتیکی<sup>۲</sup> و ارزیابی دینامیکی<sup>۳</sup> [۵]. ارزیابی استاتیکی، بر پایه معیارهایی است که دربرگیرنده عمر

1- Primary energy consumption

2- Static analysis

3- Dynamic analysis

۱۷۵\$/kW در نظر گرفته شده است [۱۸]. هزینه‌های تعمیر و نگهداری محرک اولیه در سیستم‌های تولید همزمان، شامل مواردی همچون تعمیرات اساسی، تعویض قطعاتی مانند فیلتر هوا، بازرسی‌های متداول و نیروی کار انسانی می‌گردد، براساس مرجع [۹] برای موتورهای گازسوز، هزینه تعمیر و نگهداری ۰/۰۱ \$/kWh در نظر گرفته شده است. براساس مراجع [۱۹،۲۰] هزینه تعمیر و نگهداری برای بویلر ۰/۰۲۷ \$/kWh و برای چیلر تراکمی و چیلر جذبی ۱/۲ \$/kW و ۱/۷ \$/kW در ماه در نظر گرفته شده است (به‌منظور انجام محاسبات اقتصادی قیمت دلار برابر ۱۳۰۰۰ ریال فرض شده است).

### ۶- نتایج

در این بخش نتایج حاصل از طراحی و ارزیابی سیستم تولید همزمان نسبت به سیستم تولید جداگانه ارائه شده است. مقادیر متغیرهای مورد استفاده به-منظور مدل‌سازی سیستم‌ها و محاسبات معیارهای ارزیابی در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

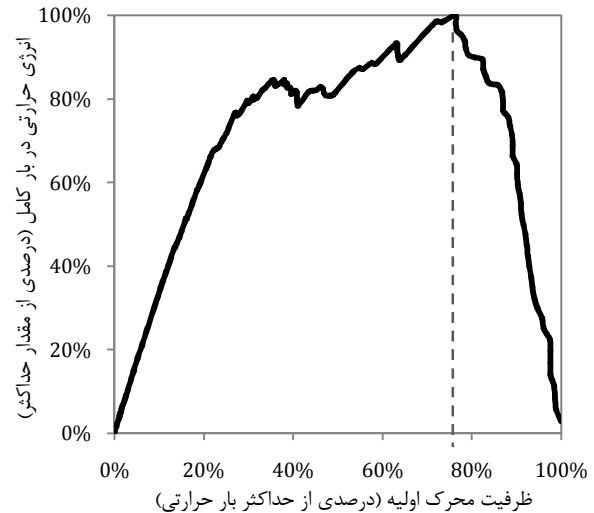
### ۶-۱- نتایج طراحی

همان‌طور که در بخش ۴ اشاره شد، در این مقاله، طراحی و تعیین ظرفیت محرک اولیه بر مبنای استراتژی تامین بار حرارتی و به روش بزرگ‌ترین مستطیل انجام شده است. براساس شکل ۴ که منحنی تجمعی بار حرارتی ساختمان می‌باشد، شکل ۵ مقادیر انرژی حرارتی تامین شده در بار کامل توسط محرک اولیه را برحسب ظرفیت محرک اولیه نشان می‌دهد، که هر دو مقدار براساس مقادیر ماکزیمم خود بی‌بعد شده‌اند. در این شکل، محور عمودی مساحت مستطیل‌های تشکیل شده زیر منحنی تجمعی بار حرارتی است. این مقادیر نسبت به مساحت بزرگترین مستطیل بی‌بعد شده‌اند. لذا جایی که این مقدار برابر ۱ گردد، سایز محرک اولیه مورد نظر مشخص می‌گردد. این سایز نسبت به حداکثر بار حرارتی ساختمان بی‌بعد شده است.

براساس شکل ۵، سایز محرک اولیه که به بیشترین میزان انرژی حرارتی تامین شده در بار کامل می‌انجامد، برابر با ۷۵٪ حداکثر بار حرارتی ساختمان اداری مبنای می‌باشد. در واقع حداکثر حرارت بازیابی از محرک اولیه، برابر ۷۵٪ حداکثر بار حرارتی ساختمان به‌دست می‌آید. در حالی که این مقدار برای یک ساختمان مسکونی در تهران حدود ۴۰٪ به‌دست آمده است [۲۴]. علت این اختلاف را می‌توان تاثیر نوع کاربری ساختمان بر نمودار بار حرارتی در طول سال دانست جدول ۳ مشخصات محرک اولیه را براساس سایز محاسبه شده نشان می‌دهد.

### ۶-۲- نتایج ارزیابی در حالت عدم فروش برق به شبکه

به‌منظور ارزیابی سیستم تولید همزمان نسبت به سیستم تولید جداگانه از نقطه نظر انرژی، از معیار صرفه‌جویی در مصرف انرژی اولیه استفاده شده است. شکل ۶ مقادیر این معیار ارزیابی را در ماه‌های مختلف سال نشان می‌دهد. در شکل ۶ مقادیر مثبت نشان‌دهنده عملکرد مناسب‌تر سیستم تولید همزمان نسبت به سیستم تولید جداگانه می‌باشد. با توجه به نتایج، مشخص است که سیستم تولید همزمان در اکثر ماه‌های سال نسبت به سیستم تولید جداگانه منجر به صرفه‌جویی در مصرف انرژی اولیه می‌گردد. اما سیستم تولید همزمان در ماه‌های گرم سال که دارای بار سرمایشی بالایی می‌باشند، منجر به صرفه‌جویی در مصرف انرژی اولیه نسبت به سیستم تولید جداگانه نشده است، که اصلی‌ترین دلیل این امر را می‌توان پایین بودن ضریب عملکرد چیلر جذبی دانست.



شکل ۵ منحنی انرژی حرارتی تامین شده در بار کامل توسط محرک اولیه

جدول ۲ مقادیر متغیرهای ورودی برای مدل‌سازی سیستم‌ها و محاسبه معیارهای ارزیابی

مقدار	نشانه	متغیر
۰/۳۳	$\eta_{pgu}$	راندمان موتور گازسوز <sup>(۱)</sup>
۰/۸	$\eta_{rec}$	راندمان سیستم بازیاب حرارت
۰/۷	$COP_e$	ضریب عملکرد چیلر جذبی
۰/۸	$\eta_{hc}$	راندمان کویل حرارتی
۰/۸	$\eta_b$	راندمان بویلر
۰/۳	$\eta_{shp}^{(۲)}$	راندمان تولید برق نیروگاه <sup>(۲)</sup>
۰/۸۲	$\eta_{grid}^{(۲)}$	راندمان شبکه انتقال برق <sup>(۲)</sup>
۳	$COP_{ch}$	ضریب عملکرد چیلر الکتریکی
۸۳۶	$\mu_e^{(۳)}$	شاخص انتشار آلاینده CO <sub>2</sub> برای برق شبکه (gr/kWh) <sup>(۳)</sup>
۲۲۰	$\mu_f^{(۳)}$	شاخص انتشار آلاینده CO <sub>2</sub> برای گاز طبیعی (gr/kWh) <sup>(۳)</sup>
۱۱۰۰	$Cost_e^{(۴)}$	تعرفه خرید برق از شبکه (Rials/kWh) <sup>(۴)</sup>
۲۰۰۰	$Cost_f^{shp(۵)}$	تعرفه خرید گاز در سیستم تولید جداگانه (Rials/m <sup>۳</sup> ) <sup>(۵)</sup>
۸۰۰	$Cost_f^{chp(۵)}$	تعرفه خرید گاز در سیستم تولید همزمان (Rials/m <sup>۳</sup> ) <sup>(۵)</sup>
۳۷۳	$Cost_{exp}^{(۶)}$	تعرفه فروش برق به شبکه (Rials/kWh) <sup>(۶)</sup>
۰/۱	$j$	نرخ افزایش سالانه قیمت برق و گاز
۰/۱۲	$IR^{(۷)}$	نرخ بهره <sup>(۷)</sup>

(۱) مرجع [۹]، (۲) [۱]، (۳) [۱۸]، (۴) [۲۱]، (۵) [۲۲]، (۶) [۱۷]، (۷) [۲۳]

جدول ۳ مشخصات محرک اولیه براساس روش بزرگترین مستطیل

حداکثر حرارت بازیابی (kW)	ظرفیت الکتریکی (kW)	حداکثر سوخت مصرفی (kW)	زمان عملکرد در بار کامل (hr)
۳۳۰	۲۰۰	۶۱۵	۱۲۲۰

در رابطه (۲۷)،  $n$  عمر مفید سیستم تولید همزمان،  $cf_1$  جریان نقدینگی سال اول،  $z$  نرخ افزایش سالیانه قیمت‌ها و  $I_0$  هزینه سرمایه‌گذاری اولیه می‌باشد. جریان نقدینگی، طبق رابطه (۲۸) برابر با اختلاف درآمدها و هزینه‌های یک سال است.

$$cf_1 = er_1 - ex_1 \quad (28)$$

که در رابطه (۲۸)،  $er_1$  و  $ex_1$  به ترتیب نشان‌دهنده درآمد و هزینه مربوط به سال اول می‌باشند.

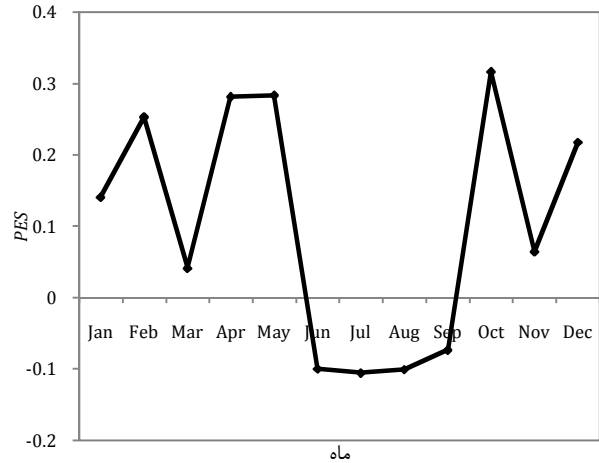
هزینه سرمایه‌گذاری موتور گازسوز، با در نظر گرفتن واحد بازیاب حرارت، برابر با ۹۵۰ \$/kW فرض شده است [۷]. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای بویلر، چیلر الکتریکی و چیلر جذبی به ترتیب برابر ۴۵\$/kW، ۴۵\$/kW و ۱۴۵

RHP برابر ۱/۰۹ می‌باشد. براساس شکل ۴، حداکثر درصد صرفه‌جویی در مصرف انرژی اولیه برابر ۳۰٪ می‌باشد. براساس نتایج، استفاده از سیستم تولید همزمان برای ساختمان اداری مینا، سالانه، منجر به ۷/۸٪ کاهش مصرف انرژی اولیه نسبت به سیستم تولید جداگانه می‌گردد.

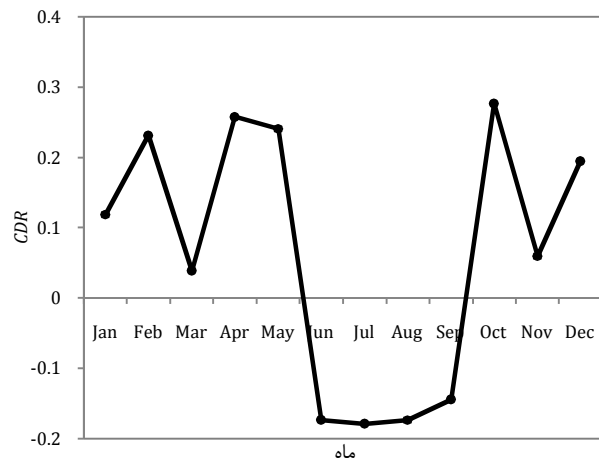
شکل ۷ مقادیر درصد کاهش انتشار آلاینده دی اکسید کربن را به صورت ماهانه نشان می‌دهد. در این شکل، مقادیر مثبت نشان‌دهنده عملکرد مناسبتر سیستم تولید همزمان نسبت به سیستم تولید جداگانه می‌باشند. همان‌طور که در شکل ۷ ملاحظه می‌گردد، نتایج انتشار آلاینده مشابه نتایج مصرف انرژی اولیه می‌باشد، به نحوی که در اکثر ماه‌های سال، سیستم تولید همزمان منجر به کاهش انتشار آلاینده دی اکسید کربن نسبت به سیستم تولید جداگانه می‌گردد. همچنین براساس شکل ۶، حداکثر درصد کاهش انتشار آلاینده برابر ۲۸٪ می‌باشد. براساس نتایج، استفاده از سیستم تولید همزمان برای ساختمان اداری مینا، سالانه منجر به ۳/۵٪ کاهش انتشار آلاینده نسبت به سیستم تولید جداگانه می‌گردد. در اکثر مطالعاتی که به ارزیابی اقتصادی سیستم تولید همزمان پرداخته شده است، تنها ارزیابی دینامیکی مورد توجه قرار گرفته است [۱۹، ۷، ۱۸، ۵]. در این مطالعه علاوه بر ارزیابی دینامیکی، به ارزیابی اقتصادی سیستم در ماه‌های مختلف سال نیز با در نظر گرفتن معیار درصد کاهش هزینه عملکرد پرداخته شده است.

شکل ۸ مقادیر درصد کاهش هزینه عملکرد سیستم تولید همزمان نسبت به سیستم تولید جداگانه را در ماه‌های مختلف سال نشان می‌دهد. براساس شکل ۸، استفاده از سیستم تولید همزمان در تمامی ماه‌های سال منجر به صرفه‌جویی در هزینه‌های عملکرد نسبت به سیستم تولید جداگانه می‌گردد. براساس نتایج، استفاده از سیستم تولید همزمان برای ساختمان اداری مینا، سالانه منجر به ۶۰٪ کاهش هزینه‌های عملکرد نسبت به سیستم تولید جداگانه می‌گردد. با توجه به هزینه‌های برق و گاز برای ساختمان‌های اداری در ایران، می‌توان گفت اصلی‌ترین عامل در محاسبه هزینه‌های عملکرد، میزان خریداری برق از شبکه می‌باشد. شکل ۹ مقادیر برق تامین شده از طریق شبکه را در سیستم تولید همزمان و سیستم تولید جداگانه نشان می‌دهد.

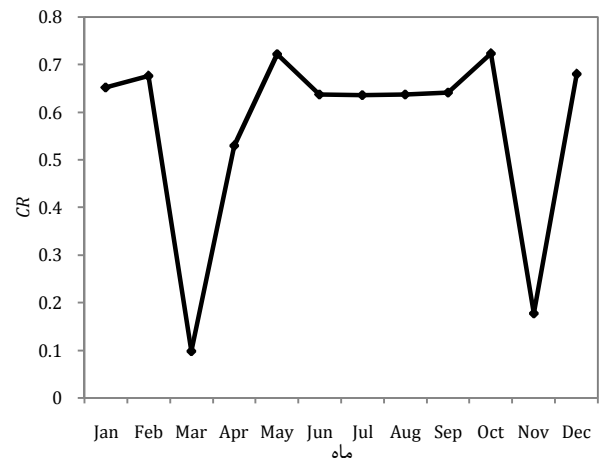
براساس نتایج، با استفاده از سیستم تولید همزمان تحت استراتژی تامین بار حرارتی، حدود ۸۲٪ در تامین برق از شبکه صرفه‌جویی می‌گردد. با مقایسه نتایج CR با نمودارهای مربوط به RHP و E<sub>grid</sub>، ملاحظه می‌گردد که در ماه‌هایی از سال که RHP نزدیک ۱ و E<sub>grid</sub><sup>CCHP</sup> کمتر می‌باشد، سیستم تولید همزمان منجر به صرفه‌جویی بیشتری در هزینه‌های عملکرد نسبت به سیستم تولید جداگانه می‌گردد. همان‌طور که در بخش ۵ اشاره شد، در این مطالعه به منظور ارزیابی اقتصادی سیستم تولید همزمان، علاوه بر معیار هزینه عملکرد از معیار نرخ بازگشت سرمایه نیز استفاده شده است. به منظور محاسبه نرخ بازگشت سرمایه، در حالت عدم فروش برق به شبکه، درآمدهای سالیانه سیستم تولید همزمان شامل درآمدهای ناشی از کاهش سوخت مصرفی توسط بویلر و کاهش خرید برق از شبکه و هزینه‌های سالیانه سیستم شامل هزینه سوخت مصرفی توسط محرک اولیه و هزینه تعمیر و نگهداری می‌باشند. براساس نتایج، سیستم تولید همزمان تحت استراتژی تامین بار حرارتی در حالت عدم فروش برق به شبکه، دارای نرخ بازگشت سرمایه‌ای برابر با ۱۴/۷۲٪ می‌باشد. با مقایسه این مقدار با نرخ بهره در نظر گرفته شده، می‌توان گفت استفاده از سیستم تولید همزمان از لحاظ اقتصادی، توجیه‌پذیر است.



شکل ۶ صرفه‌جویی در مصرف انرژی اولیه در ماه‌های مختلف در حالت عدم فروش برق به شبکه



شکل ۷ درصد کاهش انتشار آلاینده CO<sub>2</sub> در ماه‌های مختلف در حالت عدم فروش برق به شبکه



شکل ۸ درصد کاهش هزینه‌های عملکرد در ماه‌های مختلف در حالت عدم فروش برق به شبکه

با مقایسه نمودار PES با نمودار نسبت حرارت به توان، مشخص است که در ماه‌هایی از سال که نسبت حرارت به توان ساختمان به نسبت حرارت به توان محرک اولیه نزدیک‌تر است (RHP نزدیک ۱ است)، مقادیر PES نیز بالاتر می‌باشد. به نحوی که حداکثر مقدار PES مربوط به ماه اکتبر است که در آن

به شبکه ارائه شده است. شایان ذکر است که در محاسبه  $PEC$  و  $CDE$  نیز انرژی الکتریکی خالص تامین شده از شبکه لحاظ شده است، زیرا انرژی الکتریکی فروخته شده به شبکه جایگزین انرژی می‌شود که می‌بایست از طریق نیروگاه‌های کشور تولید شود [۱۰]. لذا به منظور محاسبه  $PEC$  و  $CDE$  برای سیستم تولید همزمان، در این حالت از روابط (۲۹) و (۳۰) استفاده شده است.

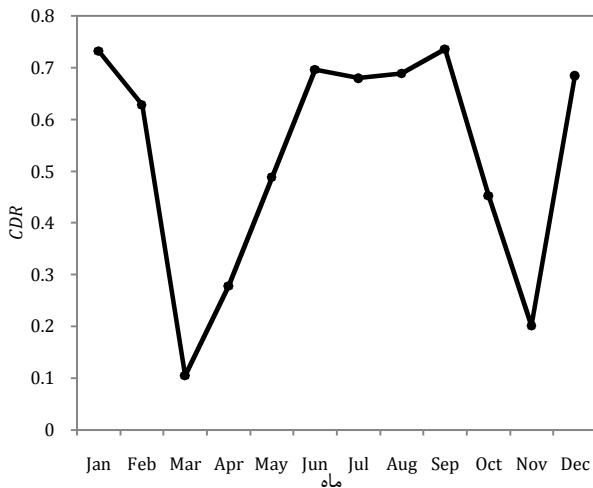
$$PEC^{cchp} = \frac{(E_{grid}^{cchp} - E_{exp})}{\eta_e^{shp} \eta_{grid}} + F_{on-site} \quad (29)$$

$$CDE^{cchp} = \mu_e (E_{grid}^{cchp} - E_{exp}) + \mu_f F_{on-site} \quad (30)$$

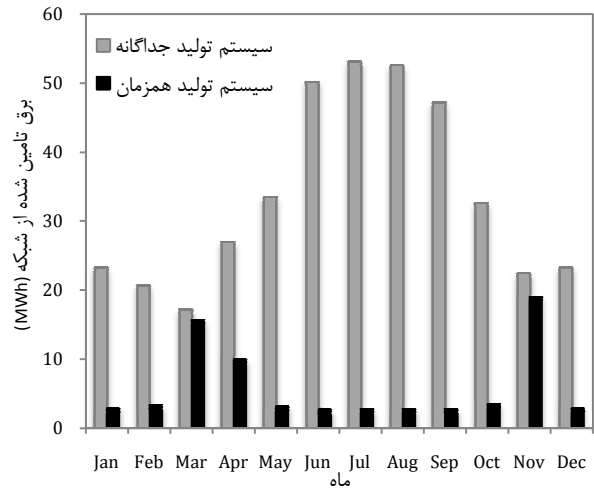
شکل ۱۰ مقادیر برق فروخته شده به شبکه در سیستم تولید همزمان را در ماه‌های مختلف سال نشان می‌دهد. با مقایسه شکل ۱۰ با نمودار نسبت حرارت به توان، مشخص می‌گردد در ماه‌هایی از سال که نسبت حرارت به توان ساختمان بالاتر می‌باشد، برق تولیدی توسط سیستم CCHP تحت استراتژی تامین بار حرارتی نیز بیشتر بوده و لذا برق فروخته شده به شبکه نیز بیشتر می‌باشد.

شکل ۱۱ مقادیر صرفه‌جویی در مصرف انرژی اولیه را در ماه‌های مختلف سال نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، در حالت فروش برق به شبکه،  $PES$  در تمامی ماه‌های سال دارای مقادیر مثبت می‌باشد. برخلاف حالت عدم فروش برق به شبکه، سیستم تولید همزمان حتی در ماه‌های گرم سال دارای عملکرد مناسب‌تری نسبت به سیستم تولید جداگانه می‌باشد، زیرا در ماه‌های گرم سال، به دلیل بالا بودن نسبت حرارت به توان، برق اضافی بیشتری توسط سیستم تولید همزمان تولید می‌گردد.

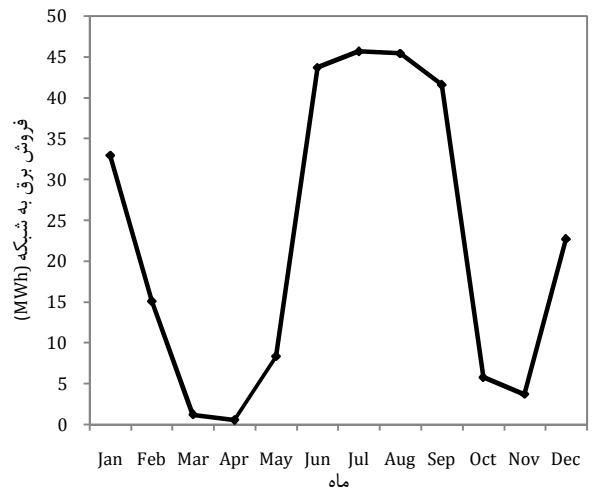
بر اساس نتایج، استفاده از سیستم تولید همزمان سالانه منجر به ۶۴٪ کاهش مصرف انرژی اولیه نسبت به سیستم تولید جداگانه می‌گردد. مقادیر  $CDR$  در ماه‌های مختلف سال در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مانند حالت عدم فروش برق به شبکه، در این حالت نیز، رفتار نمودار  $CDR$  مشابه رفتار  $PES$  می‌باشد. بر اساس شکل ۱۲، سیستم تولید همزمان با در نظر گرفتن فروش برق به شبکه، در تمامی ماه‌های سال منجر به کاهش انتشار آلاینده  $CO_2$  نسبت به سیستم تولید جداگانه می‌گردد. بر اساس نتایج، استفاده از سیستم تولید همزمان سالانه منجر به ۵۹٪ کاهش انتشار آلاینده نسبت به سیستم تولید جداگانه می‌گردد. شکل ۱۳ مقادیر درصد کاهش هزینه‌های عملکرد سیستم تولید همزمان نسبت به سیستم تولید جداگانه را در ماه‌های مختلف سال نشان می‌دهد.



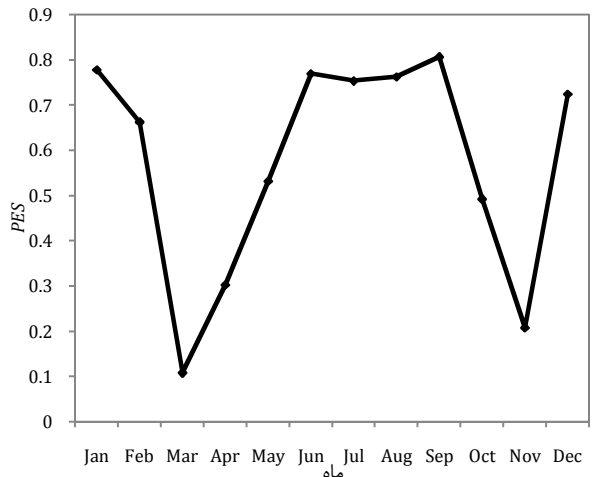
شکل ۱۲ درصد کاهش انتشار آلاینده  $CO_2$  در ماه‌های مختلف در حالت فروش برق به شبکه



شکل ۹ برق تامین شده از شبکه در ماه‌های مختلف در دو سیستم تولید همزمان و تولید جداگانه



شکل ۱۰ برق فروخته شده به شبکه توسط سیستم تولید همزمان در ماه‌های مختلف



شکل ۱۱ صرفه‌جویی در مصرف انرژی اولیه در ماه‌های مختلف در حالت فروش برق به شبکه

### ۳-۶- نتایج ارزیابی در حالت فروش برق به شبکه

در این بخش نتایج حاصل از ارزیابی سیستم تولید همزمان تحت استراتژی تامین بار حرارتی نسبت به سیستم تولید جداگانه، با در نظر گرفتن فروش برق



همانند معیارهای PES و CDR، سیستم تولید همزمان تحت استراتژی تامین بار حرارتی، در ماه‌هایی از سال با نسبت حرارت به توان بالا، منجر به صرفه‌جویی بیشتر در هزینه‌های عملکرد نسبت به سیستم تولید جداگانه می‌گردد، به نحوی که در ماه‌های گرم سال می‌توان حدود ۹۹٪ کاهش هزینه‌های عملکرد را انتظار داشت. براساس نتایج، سیستم تولید همزمان تحت استراتژی تامین بار حرارتی با در نظر گرفتن فروش برق به شبکه، سالانه منجر به ۸۵٪ صرفه‌جویی در هزینه‌های عملکرد نسبت به سیستم تولید جداگانه می‌گردد. به‌منظور محاسبه نرخ بازگشت سرمایه، در حالت فروش برق به شبکه، درآمدهای سالیانه سیستم تولید همزمان شامل درآمدهای ناشی از فروش برق به شبکه، کاهش سوخت مصرفی توسط بویلر و کاهش خرید برق از شبکه و هزینه‌های سالیانه سیستم شامل هزینه سوخت مصرفی توسط محرک اولیه و هزینه تعمیر و نگهداری می‌باشد. براساس نتایج، در حالت فروش برق به شبکه، سیستم تولید همزمان تحت استراتژی تامین بار حرارتی، دارای نرخ بازگشت سرمایه‌ای برابر با ۱۹/۹۰٪ می‌باشد. با مقایسه این مقدار با نرخ بهره در نظر گرفته شده، می‌توان گفت استفاده از سیستم تولید همزمان با در نظر گرفتن فروش برق به شبکه از توجیه اقتصادی برخوردار است.

#### ۴-۶- آنالیز حساسیت

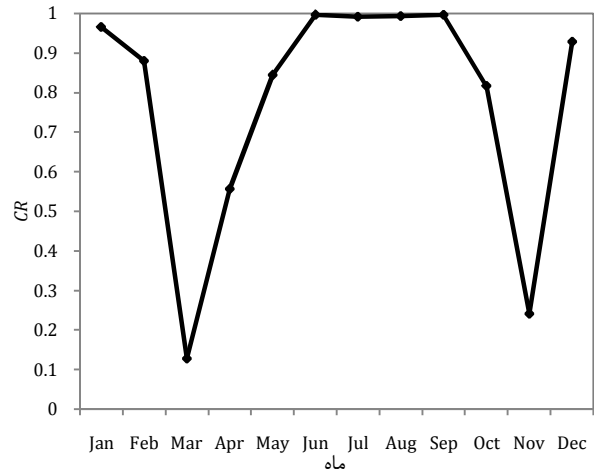
آنالیز حساسیت منجر به درک بهتر از تاثیر تغییر پارامترهای اساسی بر کارایی سیستم تولید همزمان می‌گردد. در این بخش، به بررسی عملکرد اقتصادی سیستم تولید همزمان براساس تغییر پارامترهای مهم اقتصادی شامل قیمت گاز، قیمت خرید برق از شبکه و قیمت فروش برق به شبکه پرداخته شده است. بدین منظور تاثیر تغییر پارامترهای فوق بر نرخ بازگشت سرمایه مورد توجه قرار گرفته است. شایان ذکر است که در این آنالیزها، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه تعمیر و نگهداری ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

#### ۴-۶-۱- آنالیز حساسیت در حالت عدم فروش برق به شبکه

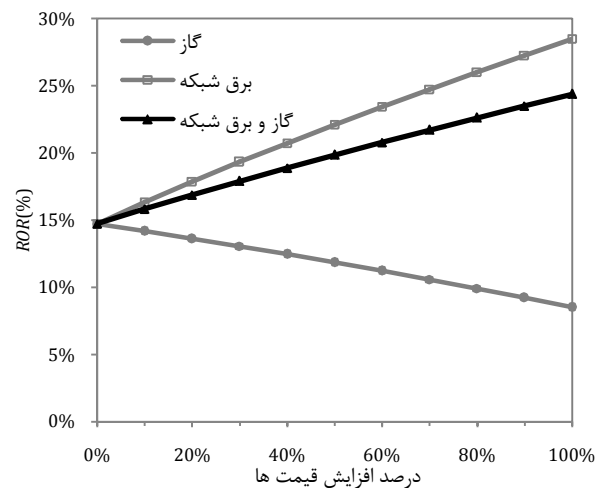
به منظور آنالیز حساسیت سیستم تولید همزمان در حالت عدم فروش برق به شبکه، افزایش قیمت گاز و خرید برق از شبکه لحاظ شده است. به نحوی که، در هر سناریو، قیمت‌ها برای سیستم تولید همزمان ۱۰٪ نسبت به قیمت‌های اشاره شده در جدول ۱ (قیمت پایه) افزایش می‌یابند. این افزایش در قیمت‌ها، تا ۲ برابر قیمت پایه لحاظ شده است. همچنین آنالیز حساسیت نسبت به افزایش همزمان هردو پارامتر نیز انجام گرفته است. شکل ۱۴ نتایج حاصل از آنالیزهای انجام شده را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۱۴ ملاحظه می‌گردد، در حالتی که قیمت برق شبکه ثابت است، با افزایش قیمت گاز برای سیستم تولید همزمان، نرخ بازگشت سرمایه کاهش می‌یابد. به نحوی که اگر قیمت گاز بیش از ۴۰٪ نسبت به قیمت پایه افزایش یابد، نرخ بازگشت سرمایه از نرخ بهره ۱۲٪ کمتر شده و لذا استفاده از سیستم تولید همزمان دیگر توجیه اقتصادی نخواهد داشت. اما در حالتی که قیمت گاز ثابت باشد، با افزایش قیمت برق شبکه، نرخ بازگشت سرمایه نیز افزایش می‌یابد. به نحوی که می‌توان گفت اگر تعرفه خرید برق از شبکه تا ۲ برابر تعرفه کنونی افزایش یابد، نرخ بازگشت سرمایه تا ۲۸٪ افزایش می‌یابد و لذا افزایش تعرفه برق، منجر به افزایش کارایی اقتصادی سیستم تولید همزمان می‌گردد.

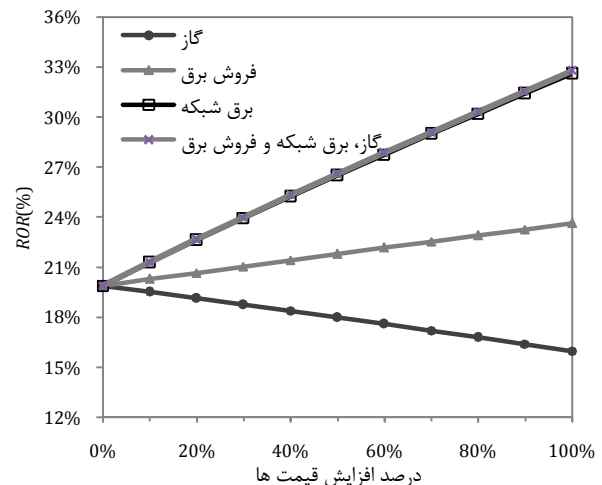
همچنین براساس شکل ۱۴، ملاحظه می‌گردد که افزایش همزمان قیمت برق و گاز، در نهایت به سود سیستم تولید همزمان بوده و منجر به افزایش نرخ بازگشت سرمایه می‌گردد. در واقع تاثیر افزایش تعرفه برق بیش از تاثیر



شکل ۱۳ درصد کاهش هزینه‌های عملکرد در ماه‌های مختلف در حالت فروش برق به شبکه



شکل ۱۴ تغییرات نرخ بازگشت سرمایه برحسب قیمت گاز و برق در حالت عدم فروش برق به شبکه



شکل ۱۵ تغییرات نرخ بازگشت سرمایه برحسب قیمت گاز، برق شبکه و برق فروخته شده در حالت فروش برق به شبکه

براساس شکل ۱۳، همانند حالت عدم فروش برق به شبکه، سیستم تولید همزمان با در نظر گرفتن فروش برق به شبکه نیز در تمامی ماه‌های سال منجر به کاهش هزینه‌های عملکرد نسبت به سیستم تولید جداگانه می‌گردد.

براساس آنالیزهای حساسیت اقتصادی انجام شده، نشان داده شد که، تاثیرگذارترین عامل بر نرخ بازگشت سرمایه، تعرفه برق خریداری شده از شبکه می‌باشد. درحالت فروش برق به شبکه، با افزایش تعرفه‌های برق و گاز، توجیه‌پذیری اقتصادی سیستم حفظ می‌گردد، اما در حالت عدم فروش برق به شبکه، افزایش بیش از ۴۰ درصد قیمت گاز منجر به عدم توجیه‌پذیری اقتصادی سیستم تولید همزمان می‌گردد.

#### ۸- منابع

- [1] Iran Energy Balance, 2011; <http://www.saba.org/energyinfo/tashilat/taraz>. Visited on March 25, 2013 (In Persian)
- [2] E. Cardona, A. Piacentino, A methodology for sizing a trigeneration plant in Mediterranean areas, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, No. 13, pp. 1665-1680, 2003.
- [3] P. Mancarella, G. Chicco, Assessment of the greenhouse gas emissions from cogeneration and trigeneration systems, Part II: Analysis techniques and application cases, *Energy*, Vol. 33, No. 3, pp. 418-430, 2008.
- [4] J. J. Wang, Y. Y. Jing, C. F. Zhang, Z. Zhai, performance comparison of combined cooling heating and power system in different operation modes, *Applied Energy*, Vol. 88, No. 12, pp. 4621-4631, 2011.
- [5] Q. Gu, H. Ren, W. Gao, J. Ren, Integrated assessment of combined cooling heating and power systems under different design and management options for residential buildings in shanghai, *Energy and Buildings*, Vol. 51, No. 18, pp. 143-152, 2012.
- [6] M. A. Ehyaei, M. N. Bahadori, Selection of micro turbines to meet electrical and thermal energy needs of residential buildings in Iran, *Energy and Buildings*, Vol. 39, No. 12, pp. 1227-1234, 2007.
- [7] M. Ebrahimi, A. Keshavarz, Sizing the prime mover of a residential micro-Combined Cooling Heating and Power (CCHP) by multi criteria sizing method for different climates, *Energy*, Vol. 54, No. 29, pp. 291-301, 2013.
- [8] H. Ghasemzadeh, M. Maerefat, A. Azimi, Design combined cooling, heating and power system for residential buildings in Tehran climate, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 109-122, 2007. (In Persian)
- [9] D. W. Wu, R. Z. Wang, Combined cooling, heating and power: A review, *progress in energy and combustion science*, Vol. 32, No. 5, pp. 459-495, 2006.
- [10] P. J. Mago, A. K. Hueffed, Evaluation of a turbine driven CCHP system for large office buildings under different operation strategies, *Energy and Buildings*, Vol. 42, No. 10, pp. 1628-1636, 2010.
- [11] Abstract of energy labeling for office buildings in Iran, 2009; <http://www.saba.org.ir/fa/masrafeenergy/sakhteman/shakhes/tadvi/nebarchasb>. Visited on Feb. 22, 2012. (In Persian)
- [12] V. Vakiloroya, The Handbook of Heating, Ventilation and Air conditioning for design and implementation, pp. 478-482, Tehran: Sanei, 2009. (In Persian)
- [13] Khuzestan Regional Electric Company, Energy audit and optimization for the office building of Khuzestan Regional Electric Company, In *the 1st National Conference on Optimizing Energy Consumption*, Mashhad, Iran, 2007. (In Persian)
- [14] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), *Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*, 2007, ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-2007, Atlanta, GA.
- [15] Calculation of sunset and sunrise, 2013; [http://www.chaharmahalmet.ir/sunrise\\_sunset.asp](http://www.chaharmahalmet.ir/sunrise_sunset.asp). Visited on March 25, 2013. (In Persian)
- [16] F. Bagheri, V. Mokarizadeh, S. Amani, M. Jabbar, Specification of electrical energy indexes for office buildings in Iran, In *the 26th International Conference on Power System*, Tehran, Iran, 2011. (In Persian)
- [17] Base price of guaranteed electricity purchase contract from small scale generators, 2012; <http://www2.tavanir.org.ir/privatization/generators/default.asp>. Visited on March 20, 2013. (In Persian)
- [18] J. J. Wang, C. F. Zhai, Y. Y. Jing, Multi-criteria analysis of combined cooling, heating and power systems in different climate zones in china, *Applied Energy*, Vol. 87, No. 4, pp. 1247-1259, 2010.
- [19] S. Sanaye, M. A. Maybodi, S. Shokrollahi, Selecting the prime mover and nominal power in combined heat and power systems, *Energy and Buildings*, Vol. 28, No. 10, pp. 1177-1188, 2008.
- [20] Abedi, P. Badaghi, SH. Keshtiarast, Technical and economical comparison of absorption and electric chillers, In *The 1st International Conference on Chiller and Cooling Tower*, Tehran, Iran, 2010. (In Persian)

افزایش تعرفه گاز بر نرخ بازگشت سرمایه می‌باشد، تا جایی که اگر تعرفه برق و گاز هر دو تا ۲ برابر قیمت‌های پایه افزایش یابند، نرخ بازگشت سرمایه به ۲۴٪ می‌رسد.

#### ۶-۴-۲- آنالیز حساسیت در حالت فروش برق به شبکه

در این بخش نتایج حاصل از آنالیز حساسیت سیستم تولید همزمان در حالت فروش برق به شبکه، با در نظر گرفتن افزایش قیمت گاز، خرید برق از شبکه و فروش برق به شبکه ارائه شده است. مانند بخش ۶-۴-۱، در این حالت نیز، در هر سناریو، قیمت‌ها ۱۰٪ نسبت به قیمت‌های پایه افزایش می‌یابند و این افزایش تا ۲ برابر قیمت‌های پایه لحاظ شده است. شکل ۱۵ نتایج حاصل از این آنالیزها را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۱۵، در حالتی که فقط قیمت گاز تغییر می‌کند، با افزایش قیمت گاز برای سیستم تولید همزمان، نرخ بازگشت سرمایه کاهش می‌یابد. اما حتی با ۲ برابر شدن قیمت گاز، نرخ بازگشت سرمایه بیش از ۱۲٪ باقی می‌ماند و لذا توجیه‌پذیری اقتصادی سیستم حفظ می‌گردد. مانند حالت عدم فروش برق به شبکه، در این حالت نیز، افزایش تعرفه خرید برق از شبکه برای ساختمان‌های اداری، باعث افزایش نرخ بازگشت سرمایه می‌گردد، به نحوی که اگر قیمت برق شبکه تا ۲ برابر قیمت پایه افزایش یابد، نرخ بازگشت سرمایه تا ۳۲/۶٪ افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش تعرفه فروش برق به شبکه، نرخ بازگشت سرمایه نیز افزایش می‌یابد. به طوری که با افزایش ۲ برابری تعرفه فروش برق به شبکه، نرخ بازگشت سرمایه برابر با ۲۳/۶٪ می‌توان انتظار داشت. براساس شکل ۱۵، ملاحظه می‌گردد که افزایش همزمان قیمت گاز، برق شبکه و برق فروخته شده به شبکه، در نهایت از لحاظ اقتصادی به سود سیستم تولید همزمان بوده و منجر به افزایش نرخ بازگشت سرمایه می‌گردد. به نحوی که، با ۲ برابر شدن تمامی پارامترها، نرخ بازگشت سرمایه به ۳۲/۷٪ می‌رسد. همچنین مانند حالت عدم فروش برق به شبکه، تاثیر گذارترین پارامتر بر نرخ بازگشت سرمایه، تعرفه خرید برق از شبکه می‌باشد.

#### ۷- نتیجه گیری

در این مطالعه، با انتخاب یک ساختمان اداری مینا، به ارزیابی سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما نسبت به سیستم تولید جداگانه، از لحاظ انرژی، زیست‌محیطی و اقتصادی برای ساختمان‌های اداری در تهران پرداخته شد. معیارهای صرفه‌جویی در مصرف انرژی اولیه، کاهش انتشار آلاینده دی اکسید کربن، کاهش هزینه عملکرد و نرخ بازگشت سرمایه به منظور ارزیابی چندمعیاره به کار گرفته شدند. نتایج نشان می‌داد که:

در حالت فروش برق به شبکه، سیستم تولید همزمان بر مبنای تمام معیارهای ارزیابی، دارای عملکرد مناسب‌تر قابل توجهی نسبت به سیستم تولید جداگانه می‌باشد.

در حالت عدم فروش برق به شبکه نیز، سیستم تولید همزمان دارای نتایج مناسب‌تر نسبت به سیستم تولید جداگانه می‌باشد، اما در مقایسه با حالت فروش برق به شبکه، این مزایا بسیار کمتر می‌باشند.

در حالت عدم فروش برق به شبکه، مهم‌ترین عامل تاثیرگذار بر عملکرد سیستم تولید همزمان در ماه‌های مختلف، نسبت حرارت به توان می‌باشد. در ماه‌هایی از سال که نسبت حرارت به توان ساختمان به نسبت حرارت به توان موتور گازسوز نزدیک‌تر است، مزایای سیستم تولید همزمان نیز بیشتر می‌باشد.

- [23] List of countries based on central bank interest rates, 2011; [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_countries\\_by\\_central\\_bank\\_interest\\_rates](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_central_bank_interest_rates). Visited on May2, 2013.
- [24] M. Ebrahimi, A. Keshavarz, Climate impact on the prime mover size and design of a CCHP system for the residential building, *Energy and Buildings*, Vol. 54, No. 35, pp. 283-289, 2012.
- [21] Electricity prices, 2012; <http://www.tbtc.co.ir/fa/moarefiymoavenatha/moarefimoavenatha/organization/nerkh90>. Visited on March 20, 2013. (In Persian)
- [22] Gas prices, 2011; <http://www.nigc.ir/site.aspx?partree=11101H1215151c>. (In Persian)