



## بهینه‌سازی فنی اقتصادی سیستم تولید همزمان CCHP با تکیه بر نقش ارزش زمانی پول در دوره بازگشت سرمایه

فاطمه توکلی دستجرد<sup>1</sup>، محمدمصطفی غفوریان<sup>2</sup>، سیداحسان شکیب<sup>3\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان  
2- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران  
3- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بزرگمهر قاینات، قاین  
\* قاین، صندوق پستی 146، shshakib@buqaen.a.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 12 دی 1393  
پذیرش: 21 اسفند 1393  
ارائه در سایت: 15 فروردین 1394  
کلید واژگان:  
دوره بازگشت سرمایه  
سیستم تولید همزمان برودت حرارت و توان  
ارزش فعلی خالص  
موتور گازی

### چکیده

در مقاله حاضر به بهینه‌سازی و ارزیابی فنی اقتصادی سیستم تولید همزمان برق، حرارت و برودت برای یک هتل در شهر کرمان پرداخته شده است. پارامترهای طراحی، ظرفیت نامی موتورگازسوز (به عنوان محرک اولیه)، بارجویی و تعداد آن‌ها، ظرفیت گرمایشی بویلر، ظرفیت سرمایشی چیلر جذبی و نیز ظرفیت سرمایشی چیلر الکتریکی بوده که با استفاده از تحلیل اقتصادی، انرژی و زیست محیطی و روش سود سالیانه نسبی (AP) بهینه گردیده‌اند. در گام بعدی، پارامتر دوره بازگشت سرمایه (PB) برای نتایج بهینه این روش، با در نظر گرفتن ارزش زمانی پول و عدم در نظر گرفتن آن ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش تعداد محرک اولیه میزان سود سالیانه نسبی را کاهش داده و این روند با پارامتر دوره بازگشت سرمایه کلاسیک نسبت عکس دارد، به طوری که با انتخاب یک ظرفیت 2550 کیلو واتی برای موتور گاز سوز، بیشترین سود سالیانه نسبی (AP) با مقدار (سال/دلار)  $45/5 \times 10^5$  و کمترین مدت زمان بازگشت سرمایه اولیه (PB) با مدت زمان 6 سال بدست می‌آید. آنالیز افزایش قیمت حامل‌های انرژی در دو روش کلاسیک و سنتی دوره بازگشت سرمایه، برای حالت انتخاب یک ظرفیت محرک اولیه نشان می‌دهد که نتایج این دو روش یکسان نبوده و با افزایش قیمت حامل‌های انرژی، مدت زمان بازگشت سرمایه برای روش کلاسیک، افزایش و برای روش سنتی، کاهش می‌یابد.

## Tech economic optimization of CCHP system with rely the time value of money, in payback period

Fateme Tavakoli Dastjerd<sup>1</sup>, Mohammad Mustafa Ghafuoryan<sup>2</sup>, Seyyed Ehsan Shakib<sup>3\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran  
2- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran  
3- Department of Mechanical Engineering, Bozorgmehr University of Qaenat, Qaen, Iran  
\* P.O.B. 146, Qaen, Iran, shshakib@buqaen.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 02 January 2015  
Accepted 10 February 2015  
Available Online 04 April 2015

**Keywords:**  
Payback period  
Combined Cooling  
Heating and Power System (CCHP)  
Net Present Worth (NPW)  
Gas Engine

### ABSTRACT

In this paper, optimization and techno-economic evaluation of a Combined Cooling, Heating and Power (CCHP) system for a hotel in Kerman has been investigated. The design parameters of system include capacity of gas engine (as prime mover), partial load (PL), thermal capacity of boiler, the cooling capacities of electric and absorption chillers that, by using energy, economic, and environment analysis and relative annual benefit (AP), as objective function, have been optimized. Then, for optimum results the payback period (PB) has been investigated by considering the time value of money and without it. Results show an increase in the number of prime movers, reduced annual benefit. Moreover, this process has reverse relation with classic payback period since choosing a 2550 kW gas engine, maximum relative annual benefit (AP) with value of  $45.5 \times 10^5$  (\$/year) and minimum payback period (PB) of 6 years will be obtained. Also, when the costs of energy increase and one prime mover (PM) is selected, the results of traditional and classical payback method are different as the time of payback period increases in classic method and decreases for traditional method.

### 1- مقدمه

می‌گیرد که در صورت اضافه بودن هر یک از این دو صورت انرژی می‌توانند با استفاده از تجهیزات سرمایشی برای تولید سرمایش مورد استفاده قرار گیرند. تاکنون محققان کارهای زیادی در زمینه سیستم‌های تولید همزمان انجام داده‌اند [1-3]. قاسم‌زاده و همکاران به طراحی سیستم تولید همزمان برق، حرارت و برودت برای یک مجتمع مسکونی در اقلیم آب و هوایی تهران پرداختند. معیار ارزیابی آن‌ها در انتخاب ظرفیت بهینه روش ماکزیمم

سیستم‌های تولید همزمان به سیستم‌هایی گفته می‌شود که توانایی تولید متوالی دو یا سه صورت مفید انرژی، یعنی حرارت، سرما و توان را از یک منبع سوخت دارند. معمولاً در این سیستم‌ها، انرژی شیمیایی سوخت، به انرژی مکانیکی و گرمایی تبدیل می‌شود. انرژی مکانیکی برای تولید برق و انرژی گرمایی برای تولید بخار، آب گرم و یا هوای گرم مورد استفاده قرار

Please cite this article using:

F. Tavakoli Dastjerd, M. M. Ghafuoryan, S. E. Shakib, Tech economic optimization of CCHP system with rely the time value of money, in payback period, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 245-254, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

سرمایش مورد نیاز نیز توسط چیلر جذبی و یا الکتریکی تأمین خواهد شد.

### 3- روش تعیین ظرفیت

نقطه شروع در طراحی منطقی سیستم‌های CCHP، مستلزم شناخت کافی از این سیستم، محیط و بررسی نارسایی‌ها و جوانب موجود است تا بتوان با ارزیابی وقایعی که در آینده اتفاق می‌افتد این نارسایی‌ها و جوانب را پوشش داد. روش سود سالیانه نسبی با در نظر گرفتن کلیه نارسایی‌ها با تحلیل‌های سه‌گانه انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی و نیز نقش ارزش زمانی پول ظرفیت بهینه تجهیزات را تعیین می‌کند. در این روش که برگرفته از تکنیک اقتصادی یکنواخت سالیانه<sup>2</sup> (EUA) بوده، امکان مقایسه اقتصادی پروژه‌هایی با عمر نابرابر فراهم می‌شود. رابطه (1) تابع هدف مربوط به این روش را نشان می‌دهد.

$$AP = TAC_{tra} - TAC_{CCHP} \quad (1)$$

$TAC_{tra}$  و  $TAC_{CCHP}$  به ترتیب کل هزینه‌های سیستم تولید سنتی و کل هزینه‌های سیستم تولید همزمان می‌باشند که با در نظر گرفتن، عواملی مانند شرایط محیطی، کارکرد سیستم در بار جزئی، هزینه اولیه و تعمیر و نگهداری تجهیزات و عواملی از قبیل قیمت خرید برق از شبکه و فروش آن، خرید سوخت، نرخ بهره سالانه و عمر مفید دستگاه‌ها به دست می‌آیند. رابطه مربوط به سیستم سنتی برابر است با:

$$TAC_{tra} = \sum_{j=1}^2 \left[ \left( C_M + P \times \left[ \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \right) \times NC - SV \times \left[ \frac{i}{(1+i)^n - 1} \right] \right]_j + \sum_{t=1}^{8760} [E_b \times \mu_{e,b} + m_f \times \mu_f + m_k \times \varphi_k] \times \tau \quad (2)$$

و رابطه مربوط به سیستم CCHP برابر است با:

$$TAC_{CCHP} = \sum_{j=1}^4 \left[ \left( C_M + P \times \left[ \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \right) \times NC - SV \times \left[ \frac{i}{(1+i)^n - 1} \right] \right]_j + \sum_{t=1}^{8760} [E_b \times \mu_{e,b} - E_s \times \mu_{e,s} + m_f \times \mu_f + m_k \times \varphi_k] \times \tau \quad (3)$$

مقدار این تابع، با توجه به سه آنالیز انرژی، اقتصادی و زیست محیطی، با در نظر گرفتن تجهیزات سیستم سنتی و سیستم تولید همزمان برق، حرارت و برودت و نیز با در نظر گرفتن نقش ارزش زمانی پول با پارامترهای نرخ بهره و عمر تجهیزات، به منظور تأمین بارهای سالانه الکتریکی، گرمایی و سرمایی یک هتل فرضی بدست می‌آید و ماکزیمم مقدار این تابع، تعیین کننده توان نامی و استراتژی عملکردی محرک‌های اولیه خواهد بود [8-10].

### 3-1 آنالیز انرژی

آنالیز انرژی سیستم‌های ترمودینامیکی از جمله مباحث نظری‌اند که با استفاده از قوانین ترمودینامیک، کارکرد دقیق و بهینه یک سیستم را با تحلیل عوامل عملکردی، بیان می‌کند. در این مقاله این آنالیز با در نظر گرفتن، کلیه مشخصات تجهیزات، نظیر بازده و گرمای دریافتی از محرک اولیه، سوخت مصرفی، بازده بویلر و ضریب عملکرد چیلرها در شرایط بار جزئی انجام گردیده و از اطلاعات و روابط (4.5) استفاده شده است [8-10].

مستطیل، صرفه‌جویی مصرف انرژی و کاهش انتشار آلاینده‌ها بود که پس از تعیین ظرفیت، به محاسبه دوره بازگشت سرمایه، با استفاده از رابطه نسبت درآمدهای حاصل از صرفه‌جویی مصرف برق و سوخت، به هزینه اولیه تجهیزات، بدون در نظر گرفتن نقش ارزش زمانی پول پرداخته شد [4]. گو و همکاران به ارزیابی سیستم تولید همزمان برق حرارت و برودت برای کاربرد مسکونی با استفاده از مدیریت‌های مختلف و طرح پرداختند. آن‌ها از روش ماکزیمم مستطیل در دو حالت عملکرد گرمایی و الکتریکی، برای تعیین ظرفیت سیستم خود استفاده نمودند [5]. وانگ و همکاران به تحلیل جریان انرژی، سیستم معمولی و سیستم تولید همزمان پرداختند. چهار متغیر تصمیم شامل ظرفیت واحد تولید برق، ظرفیت مخزن ذخیره سازی گرما، ضریب خاموشی و نسبت خنک کننده الکتریکی به بار سرمایی انتخاب و بهینه شدند [6]. صنایع و همکاران با تعریف تابع هدف سود سالیانه واقعی، در دو حالت بارنامی و جزئی، به تعیین ظرفیت سیستم تولید همزمان برق و حرارت با محرک اولیه میکروتوربین پرداختند و در نهایت پارامتر دوره بازگشت سرمایه را برای هر حالت ارزیابی کردند [7]. کشاورز و همکاران یک تابع چند معیاره برای طراحی اندازه و استراتژی بهینه محرک اصلی یک خنک کننده ترکیبی در تولید سه گانه ارائه دادند [8]. آنها نسبت صرفه‌جویی در انرژی سوخت و راندمان اکسرژی را به عنوان پارامترهای ترمودینامیکی و کاهش  $CO_2$ ،  $NO_x$ ،  $CO$  و دوره بازگشت سرمایه را به ترتیب برای ارزیابی‌های زیست محیطی و اقتصادی در نظر گرفتند. رابطه‌ای که آن‌ها برای دوره بازگشت سرمایه استفاده کردند، رابطه نسبت هزینه‌ها به درآمدها بود.

همان‌طور که مشاهده شد بیشتر محققان از رابطه نسبت هزینه‌ها به درآمدها در محاسبه دوره بازگشت سرمایه بهره می‌برند و نقش ارزش زمانی پول را در فرایند مالی این روش اقتصادی در نظر نمی‌گیرند. در این مقاله پس از ارزیابی فنی اقتصادی سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما با تابع هدف سود سالیانه نسبی، به پارامتر دوره بازگشت سرمایه پرداخته می‌شود. این پارامتر در دو حالت، با در نظر گرفتن نقش ارزش زمانی پول، با استفاده از روش ارزش فعلی هزینه‌ها<sup>1</sup> و عدم آن با استفاده از نسبت هزینه‌ها به درآمدها، محاسبه و مقایسه می‌شود. در انتها آنالیز افزایش قیمت حامل‌های انرژی و تعداد ظرفیت محرک اولیه در پارامترهای طراحی و دوره بازگشت سرمایه ارزیابی خواهد شد.

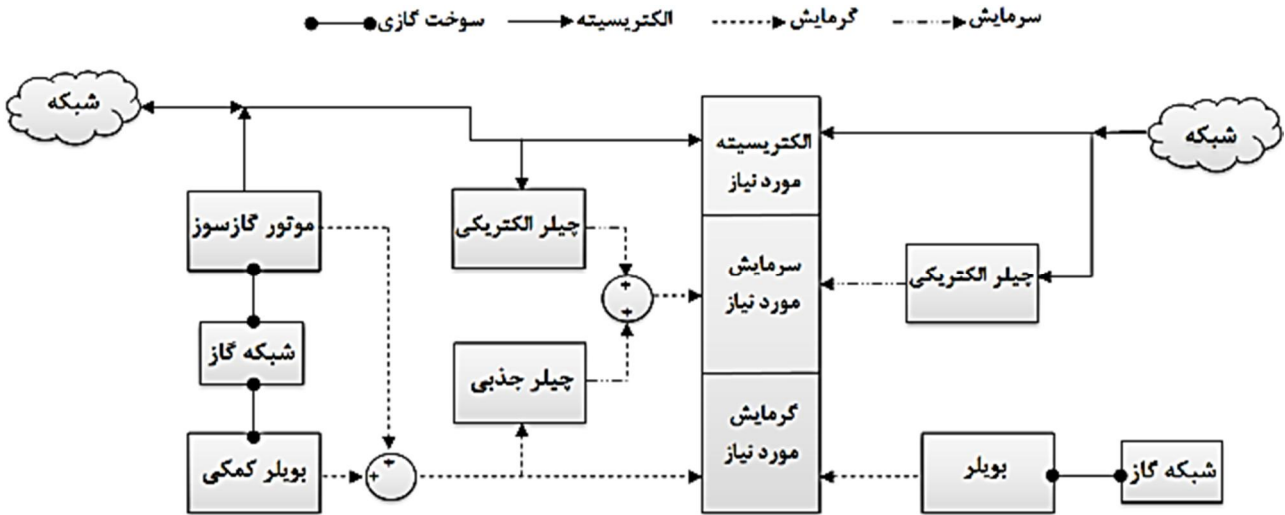
### 2- توصیف سیستم

شکل 1 شماتیکی از سیستم سه گانه در تداخل با شبکه را به همراه سیستم سنتی نشان می‌دهد. سیستم تولید همزمان شامل محرک اولیه، بویلر پشتیبان، چیلر جذبی و چیلر الکتریکی است که به منظور تأمین گرمایش، سرمایش و الکتریسیته یک هتل، واقع در شهر کرمان کنار هم چیده شده است. این هتل شامل 120 اتاق با مساحت متوسط  $30m^2$  برای هر اتاق بوده که ارتفاع متوسط سقف‌ها  $2/7m$ ، ضریب مقاومت حرارتی دیوارها  $1/53W/m^2K$  و ضریب مقاومت حرارتی کف، برای فضاهای قابل تهویه و غیر قابل تهویه به ترتیب  $2/839W/m^2K$  و  $0/568W/m^2K$  فرض شده است. شکل 2 بارهای مورد نیاز این هتل را در ماه‌ها مختلف سال نشان می‌دهد.

این سیستم کل الکتریسیته مورد نیاز هتل را که شامل الکتریسیته روشنایی و چیلر الکتریکی است، تأمین کرده و در صورت کمبود از شبکه خریداری خواهد کرد. حرارت مورد نیاز که شامل حرارت ساختمان و چیلر جذبی است از حرارت دریافتی از محرک اولیه و بویلر کمکی تأمین شده و

2- Equivalent Uniform Annual (EUA)

1- Present worth Cost (PWC)



شکل 1 شماتیکی از سیستم سه‌گانه به همراه سیستم سنتی در تداخل با شبکه

$$\frac{COP_{PL}}{COP_{nom}} = \frac{PL}{0.75(PL)^2 + 0.0195(PL)} \quad (8)$$

### 2-3-2- آنالیز اقتصادی

آنالیز اقتصادی پروژه، تکنیک‌های مقایسه و تصمیم‌گیری و انتخاب از میان راه حل‌ها، بر اساس شرایط مطلوب پولی یا اقتصادی را شامل می‌شود. به همان میزان که تکنولوژی سیستم‌های تولید همزمان افزایش می‌یابد، تصمیم‌گیری مشکل‌تر و حساس‌تر می‌شود. به‌طور کل استفاده از این تحلیل دارای اهمیت اساسی است، زیرا میزان سود یا ضرر حاصل از کیفیت روش انتخاب شده، بستگی به استفاده بجا از این تکنیک دارد. به این منظور در بخش آنالیز اقتصادی، کلیه هزینه‌های اولیه تجهیزات، هزینه تعمیر و نگهداری، هزینه‌های عملکرد و اسقاطی در نظر گرفته شده است که هزینه‌های عملکرد شامل هزینه‌های مصرف سوخت، خرید و فروش الکتریسیته می‌باشد. اطلاعات مربوط به این آنالیز در جدول 1 آورده شده است.

### 3-3- آنالیز زیست محیطی

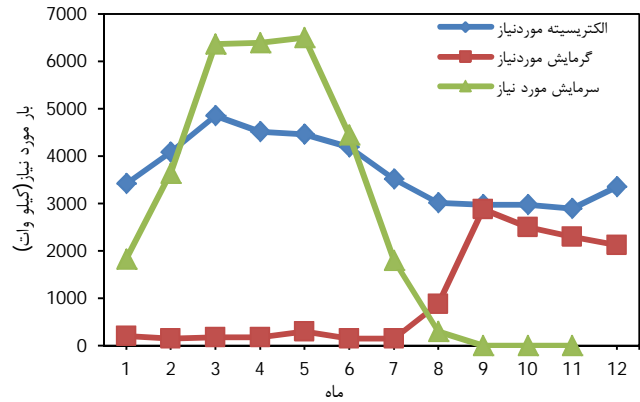
آنالیز زیست محیطی، با در نظر گرفتن جریمه برای انتشار آلاینده‌های CO، NOx و CO<sub>2</sub>، در تابع هدف اعمال می‌شود که اطلاعات مربوط به این آلاینده‌ها در جدول 2 ارائه شده است.

### 4- دوره بازگشت سرمایه

سرمایه‌گذاران سیستم‌های تولید همزمان همیشه مشتاقند از مدت زمان بازگشت سرمایه آگاه باشند و تمایل به سرمایه‌گذاری در پروژه‌هایی را دارند که کمترین دوره بازگشت را داشته باشد. بنابراین محاسبه دقیق آن نقش اساسی در اقتصاد این سیستم‌ها خواهد داشت. در این بخش به محاسبه این پارامتر با دو روش سنتی و کلاسیک پرداخته می‌شود.

#### 1-4- محاسبه دوره بازگشت به روش سنتی

محاسبه دوره بازگشت سرمایه به روش سنتی، یک روشی تقریبی و سریع برای مقایسه اقتصادی پروژه‌ها است که سرمایه‌گذاران در جستجوی مدت



شکل 2 منحنی بار ماهانه الکتریسیته، گرمایش و سرمايش هتل

• موتورگازسوز

$$\frac{\eta_{th,PL}}{\eta_{th,nom}} = -0.0001591(PL)^2 + 0.024(PL) + 0.1 \quad (4)$$

$$\frac{m_{f,PL}}{m_{f,nom}} = 0.2408 \exp(0.01403(PL)) + 0.03553 \exp(-0.02494(PL)) \quad (5)$$

حرارت دریافتی از موتور گازسوز شامل سه قسمت اصلی، حرارت دریافتی از سیستم خنک‌کاری یا ژاکت آب، حرارت حاصله از گاز خروجی و حرارت تولید شده توسط روغن است که این مقادیر تابعی از بار جزئی بوده و برای محاسبه آنها از روابط مندرج در مرجع [8] استفاده شده است (روابط 6-8).

• بویلر

$$\frac{\eta_{th,PL}}{\eta_{th,nom}} = 0.0951 + 1.525(PL) - 0.6249(PL)^2 \quad (6)$$

• چیلر الکتریکی

$$\frac{COP_{PL}}{COP_{nom}} = 1.1819(PL) - 0.819(PL)^2 \quad (7)$$

• چیلر جذبی

جدول 1 هزینه اولیه و تعمیر و نگهداری تجهیزات سیستم تولید همزمان [8-9]

هزینه سرمایه گذاری اولیه	هزینه تعمیر و نگهداری	تجهیزات
$C = -138.7 \ln(E_{nom}) + 1727.1$	$M = 0.1696 \times E_{nom}^{-0.2} (1 - 0.6875 \frac{E}{E_{nom}})$	موتور احتراق داخلی گازسوز
$C = 205 H_B^{0.13}$	$M = 0.0027 \$ / kWh$	بویلر
$C = 540 (C_{nom,ab})^{-0.128}$	$M = 0.003 \$ / kWh$	چیلر الکتریکی
$C = 482 (C_{nom,el})^{-0.07273} - 159.7$	$M = 0.003 \$ / kWh$	چیلر جذبی

ارزش فعلی خالص هزینه‌ها که شامل هزینه‌های سرمایه گذاری اولیه، می- باشد، مطابق با رابطه (12) تعریف می‌شود.

$$NPWC(y) = \sum_{j=1}^N (C \times NC)_j = 0 \quad (12)$$

ارزش فعلی درآمدها هم شامل، درآمد ناشی از هزینه‌های اسقاطی تجهیزات و درآمد سالانه سیستم هستند که به ترتیب با  $SV$  و  $A$  نشان داده شده‌اند و توسط روابط (13-15) ارزیابی می‌شوند:

$$NPWB(y) = A \times \left[ \frac{(1+i)^y - 1}{i(1+i)^y} \right] + SV \times \left[ \frac{1}{(1+i)^y} \right] \quad (13)$$

$$SV = 0.2 \times NPWC \quad (14)$$

$$A(\$) = \sum_{y=1}^{PB} \left[ \sum_{t=1}^{8760} (E_s \times \mu_{e,s}) \times \tau + R_{C \& O \text{ and } M} \right] \quad (15)$$

به طوری که  $\mu_{e,s}$  قیمت فروش الکتریسیته و  $R_{C \& O \text{ and } M}$  کاهش در هزینه‌های اولیه، هزینه‌های عملکرد و تعمیر و نگهداری سیستم CCHP نسبت به سیستم سنتی می‌باشد. نکته قابل توجه در این روابط در نظر گرفتن نرخ بهره و هزینه‌های اسقاطی است که با استفاده از روش ارزش فعلی هزینه‌ها همسنگ‌سازی شده است.

### 5- فرایند بهینه‌سازی

فرایند بهینه‌سازی پارامترهای طراحی توسط محدوده تغییرات این پارامترها و روش نقطه‌یابی مستقیم با نرم‌افزار متلب انجام شده است که در جدول 3 محدوده تغییرات و شکل 3 روند بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. در واقع تابع سود سالیانه با توجه به پارامترهای طراحی برای ظرفیت‌ها و بارهای جزئی متفاوت محرک اولیه، بر اساس بار مورد نیاز ساختمان در طول سال بدست آمده و براساس ماکزیمم سود سالیانه نسبی، پارامترهای بهینه بدست می‌آید. برای موتور گازسوز، عملکرد در بار جزئی و قدرت خروجی با کاهش دبی سوخت ورودی قابل کنترل بوده و ظرفیت‌های متفاوت 0/005 تا 5 MW در شرایط بار جزئی 20 تا 100 درصد بررسی می‌شوند.

شرایط فرض شده برای موتورگازسوز واقعی بوده به گونه‌ای که در بار جزئی کمتر از 20 درصد به علت پایین بودن بازده حرارتی و دمای گاز خروجی، موتور خاموش فرض می‌شود. از طرفی به ازای هر 303 متر (1000 فوت) افزایش ارتفاع، حدود 0/03 کاهش برای بازده و به ازای هر

جدول 3 محدوده تغییرات پارامترهای طراحی

پارامتر طراحی	از	تا	مقدار تغییرات
ظرفیت محرک اولیه (kW)	50	5000	1
بارجزئی (%)	20	100	1
ظرفیت گرمایی بویلر (kW)	0	3000	1
ظرفیت گرمایی چیلر الکتریکی (kW)	0	4000	1

زمانی که سرمایه اولیه بتواند توسط درآمدهای سالیانه جبران شود، از رابطه (9) استفاده می‌کنند [17,11].

$$-p + \sum_{y=1}^{PB} CF_y = 0 \quad (9)$$

که  $CF_y$  و  $P$  به ترتیب هزینه اولیه و فرایند مالی سیستم در پایان سال  $y$  ام است. اگر درآمدها در پایان هر سال برابر باشند، دوره بازگشت به صورت رابطه (10) ساده می‌شود [2]:

$$PB = \frac{P}{CF} \quad (10)$$

### 4-2- محاسبه دوره بازگشت سرمایه کلاسیک

در روش سنتی دوره بازگشت سرمایه، ارزش زمانی پول و ارزش اسقاطی تجهیزات در نظر گرفته نمی‌شود و به همین دلیل نتایج حاصل از آنها دقیق نبوده و به عنوان روشی تقریبی معرفی می‌شود. در ادامه دوره بازگشت سرمایه با در نظر گرفتن موارد نام برده و انتخاب فرایند مالی همسنگ ارزش فعلی به صورت رابطه (11) تعریف می‌شود [7,18,11].

$$\begin{cases} NPWB(y) - NPWC(y) = 0 \\ PB = y \end{cases} \quad (11)$$

به گونه‌ای که، مدت زمان دوره بازگشت سرمایه زمانی خواهد بود که ارزش فعلی هزینه‌های اولیه<sup>1</sup> و ارزش فعلی خالص درآمدها<sup>2</sup> در پایان آن سال با هم برابر شوند.

جدول 2 پارامترهای ورودی جهت پیاده سازی روش سود سالیانه

پارامتر	مقدار	واحد	منبع
عمر تجهیزات $n$	20	سال	[8]
ارزش حرارتی پایین سوخت LHV	55496	kJ/kg	[8]
بازده ژنراتور $\eta_{gen}$	0/9	%	[8]
ضریب عملکرد چیلر جذبی $COP_{nom}$	0/7	%	[8]
ضریب عملکرد چیلر الکتریکی $COP_{nom}$	3	%	[8]
بازده بویلر $\eta_{nom}$	0/8	%	[8]
نرخ بهره $i$	0/2	%	[11]
متوسط قیمت سوخت $\mu_f$	0/154	\$/kWh	[13,12]
متوسط قیمت خرید الکتریسیته $\mu_{e,b}$	0/084	\$/kWh	[14,12]
متوسط قیمت فروش الکتریسیته $\mu_{e,s}$	0/088	\$/kWh	[14,12]
فاکتور جریمه انتشار آلاینده $\rho_{CO_2,CO_2}$	0/024	\$/kg <sub>K</sub>	[15]
فاکتور جریمه انتشار آلاینده $\rho_{NO_x,NO_x}$	6/853	\$/kg <sub>K</sub>	[15]
فاکتور جریمه انتشار آلاینده $\rho_{CO,CO}$	0/02086	\$/kg <sub>K</sub>	[15]
قیمت هر دلار $\$$	30000	ریال	[16]

1- Net Present Worth of Cost investment (NPWC)

2- Net Present Worth Benefit (NPWB)

3- Salvage Value (SV)

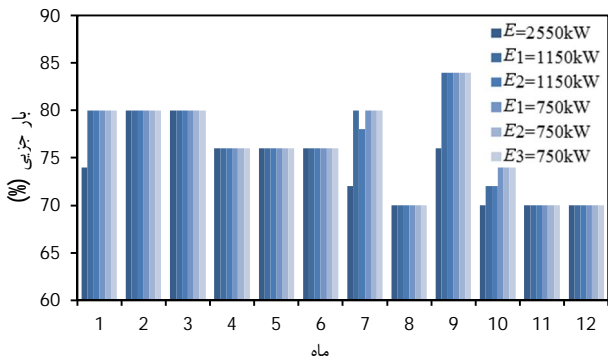
4 اتفاق می‌افتد.

این روند برای انتخاب‌های مشابه محرک اولیه درحالات دو انتخاب و سه انتخاب با ظرفیت‌های  $E=2 \times 1150 \text{ kW}$  و  $E=3 \times 750 \text{ kW}$ ، بر همین اساس است و بارجزیی همه ظرفیت‌های موتورگازسوز به منظور انتخاب بهینه‌ترین مقدار در هر ماه، با در نظر گرفتن قیمت الکتریسته و سوخت انتخاب شده است.

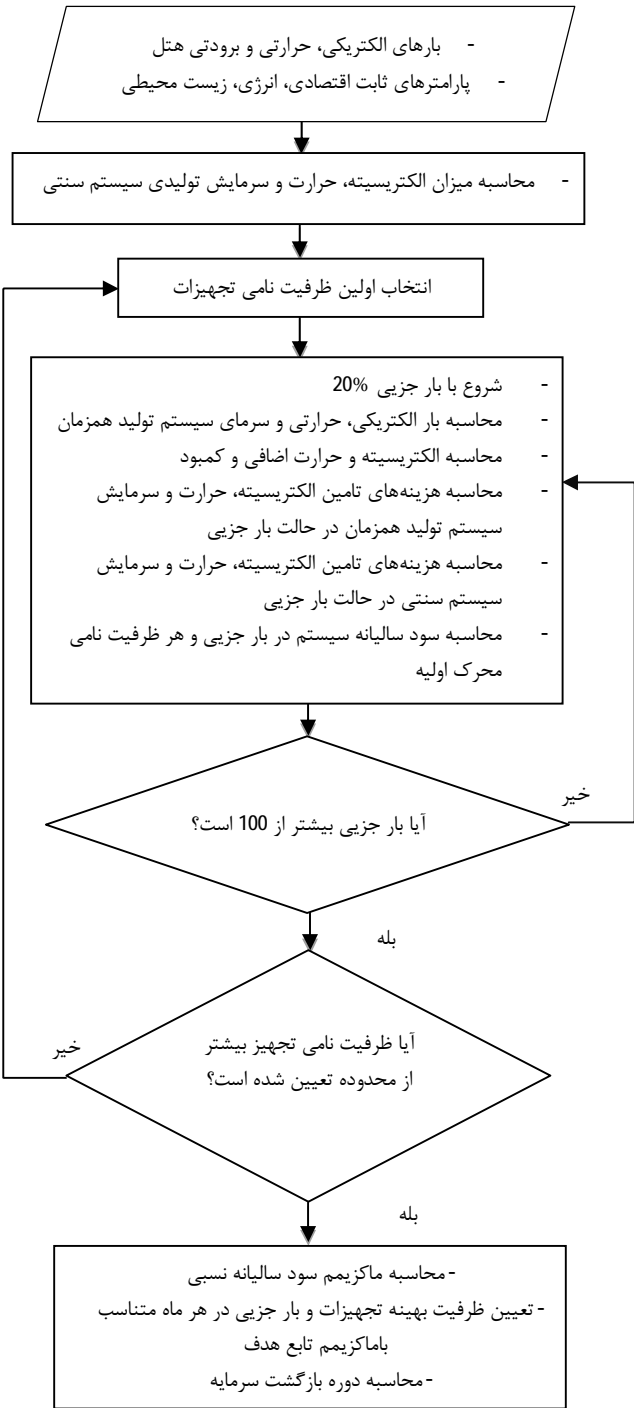
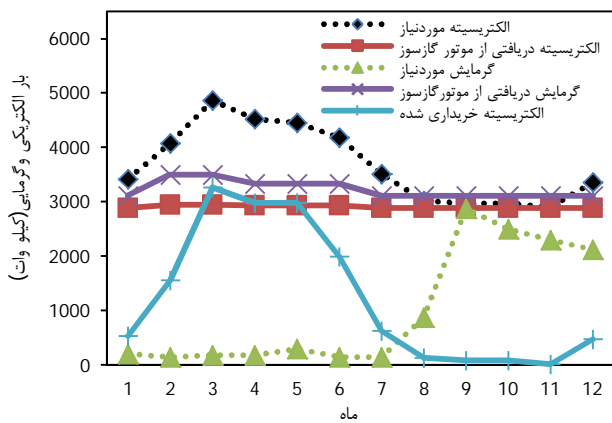
با مقایسه سه حالت انتخابی برای محرک اولیه مشاهده می‌شود افزایش تعداد محرک اولیه سود سالیانه را کاهش می‌دهد که علت آن مربوط به افزایش هزینه اولیه محرک اولیه است، زیرا هزینه کیلووات نصب شده افزایش خواهد یافت.

در ادامه به عنوان نمونه، پوشش‌دهی منحنی‌های بار مربوط به انتخاب یک ظرفیت برای محرک اولیه، با مقدار 2550 کیلو وات آورده شده است و به علت مشابه بودن مفاهیم، از تکرار این منحنی‌ها برای دیگر حالات انتخاب محرک‌ها صرف‌نظر شده است.

شکل 5 نتایج مربوط به پوشش‌دهی منحنی‌های بار گرمایی و الکتریسته به همراه الکتریسته خریداری شده از شبکه، و شکل 6 نتایج مربوط به بار گرمایی مهیا شده از گرمای اتلافی موتور، توسط چیلر جذبی و سرمای مهیا شده توسط چیلر الکتریکی، را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان الکتریسته دریافتی توسط محرک اولیه در بیشتر ماه‌های سال کمتر از الکتریسته مورد نیاز هتل است؛ به طوری که در این زمان‌ها، سیستم نیاز خود را با خرید الکتریسته از شبکه تأمین می‌کند، این نتیجه در نمودار الکتریسته خریداری شده مشاهده می‌شود. اما زمانی که الکتریسته دریافتی از محرک اولیه بیشتر باشد، در صورت عدم نیاز برای چیلر الکتریکی، به شبکه فروخته می‌شود.



شکل 4 بار جزیی موتورهای گاز سوز استفاده شده در سیستم تولید همزمان



شکل 3 فلوچارت فرایند بهینه‌سازی

5/5°C (10°F) افزایش در دمای محیط 1 درصد کاهش در قدرت خروجی در نظر گرفته شده است [6,7].

6- بحث و نتایج

جدول 4 نتایج بهینه‌سازی پارامترهای طراحی را، با روش سود سالیانه در سه حالت انتخاب ظرفیت برای محرک اولیه، به همراه سود سالیانه نسبی نشان می‌دهد. این نتایج به منظور ماکزیمم کردن سود سالیانه، ارائه شده‌اند. زمانی که یک محرک اولیه انتخاب می‌شود ماکزیمم سود در ظرفیت  $E=2550 \text{ kW}$  با مقدار (سال/دلار)  $AP=4/45 \times 10^5$  با شرایط بار جزیی انتخاب شده در شکل

کلاسیک به چشم می‌خورد، زیرا با افزایش تعداد محرک‌ها، ظرفیت محرک‌های انتخابی کاهش می‌یابد و در نتیجه هزینه نصب (دلار بر کیلووات) تجهیزات افزایش خواهد یافت. اما در این قسمت با در نظر گرفتن شرایط یکسان انتخاب یک ظرفیت برای محرک اولیه به بررسی دوره بازگشت سرمایه با افزایش قیمت درصدی حامل‌های انرژی پرداخته می‌شود. شکل 7 تغییرات دوره بازگشت سرمایه سنتی و کلاسیک را با درصد افزایش حامل‌های انرژی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش قیمت حامل‌های انرژی مدت زمان بازگشت سرمایه روش سنتی کاهش می‌یابد، اما برای فرمول کلاسیک، نتایج با افزایش پارامتر مذکور افزایش می‌یابد. علت این روند، ارزش زمانی پول و نسبت قیمت حامل‌های انرژی است.

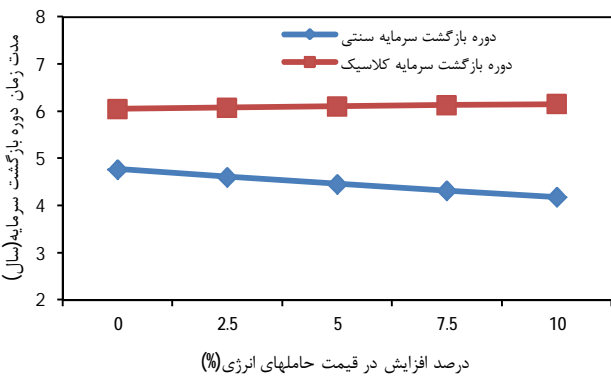
### 8- نتیجه‌گیری

در این مقاله به مطالعه و ارزیابی فنی اقتصادی سیستم تولید همزمان برق حرارت و سرما، پرداخته شد. نتایج در سه حالت انتخاب برای محرک اولیه موتور گازسوز در بار جزئی و تداخل سیستم با شبکه ارائه شد و نقش ارزش زمانی پول در پارامتر دوره بازگشت سرمایه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد افزایش تعداد محرک اولیه باعث کاهش سود در هر سال می‌شود. همچنین نتایج حاصل از ارزیابی‌های پارامتر دوره بازگشت سرمایه بیان می‌کند که ارزش زمانی پول در پارامتر نام برده نقش مؤثری دارد، به طوری که نتایج بدست آمده از مقایسه آن‌ها کاملاً متفاوت بدست می‌آید. دوره بازگشت سرمایه روش کلاسیک با افزایش تعداد محرک اولیه افزایش یافته، در حالی که در روش سنتی روند یکنسانی مشاهده نمی‌شود و با افزایش قیمت حامل‌های انرژی مدت زمان بدست آمده در روش سنتی و کلاسیک به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد.

از طرفی با مقایسه نتایج بهینه‌سازی سیستم‌های تولید همزمان برق، حرارت و سرما، با استفاده از روش‌های سود سالیانه و دوره بازگشت سرمایه کلاسیک مشاهده می‌شود، سیستمی با کمترین مدت زمان بازگشت سرمایه بیشتر سود سالیانه را به همراه دارد به عبارت دیگر با طراحی سیستم تولید

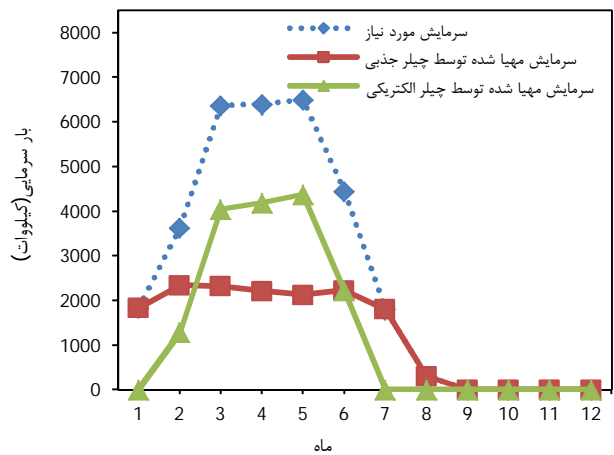
جدول 5 نتایج مربوط به دور بازگشت سرمایه با شرایط انتخاب تعداد متفاوت محرک اولیه

پارامتر	مقدار		
تعداد محرک اولیه	1	2	3
دوره بازگشت سرمایه سنتی (سال)	4/7	10/5	8/3
دوره بازگشت سرمایه کلاسیک (سال)	6	13	14



شکل 7 مدت زمان دوره بازگشت سرمایه با درصد تغییرات قیمت حامل‌های انرژی

شکل 5 الکتریسیته و گرمایش مهیا شده توسط واحد تولید توان



شکل 6 بار سرمایی مهیا شده توسط چیلر جذبی و الکتریکی

در مورد گرمای دریافتی از محرک اولیه هم می‌توان مشاهده کرد که در ماه‌هایی که گرمای دریافتی بیشتر از نیاز گرمایی ساختمان است، در صورت نیاز سرمایشی در آن ماه‌ها، این گرمای اضافی با استفاده از چیلر جذبی سرمایش هتل را فراهم خواهد کرد و در صورت کمبود گرما و سرمای محل مصرف، مابه‌التفاوت را به ترتیب بویلر کمکی و چیلر الکتریکی فراهم می‌کنند. در ادامه نتایج مربوط به دوره بازگشت سرمایه برای سه حالت انتخابی با دو روش سنتی و کلاسیک در جدول 5 آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ارزش زمانی پول در محاسبه دوره بازگشت سرمایه نقش چشم‌گیری داشته است به طوری که نتایج روش کلاسیک با وجود در نظر گرفتن ارزش اسقاطی تجهیزات، 1/3 سال در حالت انتخاب یک محرک اولیه، 2/5 سال در حالت انتخاب دو محرک اولیه و 5/7 سال در حالت انتخاب سه محرک اولیه افزایش می‌یابد.

با مقایسه نتایج جداول 4 و 5 مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد محرک اولیه، سود سالیانه کاهش یافته و به دنبال آن دوره بازگشت سرمایه برای روش کلاسیک افزایش می‌یابد. اما در نتایج روش سنتی مشاهده می‌شود که در حالت انتخاب دو محرک اولیه با وجود سود بیشتر نسبت به حالت انتخاب سه محرک اولیه، دوره بازگشت سرمایه آن بیشتر شده است. این درحالیست که دوره بازگشت سرمایه باید رابطه مستقیمی با سود سالیانه داشته باشد.

### 7- آنالیز حساسیت

همان‌طور که مشاهده شد افزایش تعداد محرک اولیه رابطه مستقیمی با مدت زمان بازگشت سرمایه دارد که این هم در روش سنتی و هم در روش

جدول 4 نتایج حاصل از روش سود سالیانه

پارامتر	شرایط و مقدار		
تعداد محرک اولیه	1	2	3
ظرفیت محرک اولیه (kW)	2550	1150	750
ظرفیت گرمایی بویلر (kW)	عدم نیاز	7/4	58/2
ظرفیت سرمایی چیلر الکتریکی (kW)	4691	5598	4915
ظرفیت سرمایی چیلر جذبی (kW)	2011	1811	1777
بار جزئی (%)	شکل 4	شکل 4	شکل 4
ماکزیمم سود سالیانه $10^5$ (دلار / سال)	45/4	44/7	40/6

همزمان برق حرارت و برودت برای یک هتل با روش سود سالیانه نسبی، می‌توان به کمترین دوره های بازگشت سرمایه دست یافت.

### 9- فهرست علائم

A	درآمد سالیانه (\$)
AP	سود سالیانه (\$/year)
C	هزینه (\$/kW)
CCHP	سیستم تولید همزمان برق حرارت و برودت
Ch	چیلر
CF	فرآیند مالی (\$)
CL	بار سرمایی (kW)
COP	ضریب عملکرد (%)
EL	بار الکتریکی (kW)
HL	بار حرارتی (kW)
i	نرخ بهره (%)
NC	ظرفیت نامی (kW)
NPW	ارزش فعلی خالص (\$)
NPWB	ارزش فعلی درآمدها (\$)
NPWC	ارزش فعلی هزینه ها (\$)
M	نرخ جرمی (kg/s)
TAC	کل هزینه سالیانه (\$/year)
P	هزینه اولیه (\$)
PB	دوره بازگشت سرمایه (سال)
PL	بار جزئی (%)
R	کاهش
SV	هزینه اسقاطی (\$/kW)
T	مدت زمان
<b>علائم یونانی</b>	
$\mu$	فاکتور خرید و فروش (\$/kWh)
$\tau$	بازه زمانی
$\varphi$	فاکتور جرم انتشار آلاینده (\$/kg <sub>k</sub> )
<b>زیرنویس‌ها</b>	
ab	جذبی
B	بوئیلر / خرید
el	الکتریکی
f	سوخت گازی
G	تولید شده
Gen	ژنراتور
j	تعداد تجهیزات سیستم

### 10- مراجع

- [1] Wu, DW, Wang RZ. Combined cooling, heating and power: a review. *Prog Energy Combust*32: pp. 95– 459, 2006.
- [2] S. Li, J. Sui, H. Jin, J. Zheng, Full chain energy performance for a combined cooling, heating and power system running with methanol and solar energy, *Applied Energy*112, pp. 673–681, 2013.
- [3] V. Basshuysen, F. Schaefer. *Internal combustion engine handbook-basics, components, systems and perspectives*. Vol. 345, pp. 10–448. 2004.
- [4] 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, 2013. (In Persian)
- [5] Q. Gu, Renc H, Gaob W, Rend J. Integrated assessment of combined cooling heating and power systems under different design and management s for residential buildings in Shanghai. *Energy Build*; pp. 51–143, 2012.
- [6] 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*88, pp. 4621–4631, 2011.
- [7] S.Sanaye, and M. R. Ardali, Estimating the power and number of microturbines in small-scale combined heat and power systems, *Applied Energy*86(6): pp. 895-903, 2009.
- [8] S. Sanaye, H. Hajabdollahi, "Comparison of different scenarios in optimal design of a CCHP plant", *IMEchE, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, pp. 12-30, doi: 10.1177/0954408914547070, 2014
- [9] S. Sanaye, H. Hajabdollahi, 4E analysis and Multi-objective optimization of CCHP using MOPSOA, *Proceedings of the institution of Mechanical Engineers, Part E*, 228,1, pp. 43–60, 2014.
- [10] K.K. Humpherys, *project and cost engineers' Handbook*, Marcel Dekker, New York, pp. 1–60, 2005.
- [11] M.M. Oskooonejad. *Engineering Economy*. 4th ed. Amirkabir University, Tehran, Iran, Amirkabir Publishing, pp. 179–417, 2007. (in Persian)
- [12] Economic data in iran, Accessed 1 march 2014; <http://www.eranico.com/> (In Persian)
- [13] *Price of Fuel*, visited 2 march 2014, <http://www.nigc-mpgc.ir/> (In Persian)
- [14] *Price of Electricity*, Accessed 1 march 2014, [http://bahaye\\_bargh.tavanir.org.ir/](http://bahaye_bargh.tavanir.org.ir/) (In Persian)
- [15] *Economic data in worth*, Accessed march 2014, <http://www.eia.gov/>
- [16] <http://www.eranico.com/> Accessed 1 march 2014.
- [17] M. Ebrahimi, A. Keshavarz, Sizing the prime mover of a residential micro-combined cooling heating and power (CCHP) system by multi-criteria sizing method for different climates, *Energy*, Vol. 54, pp. 291–301, 2013.
- [18] M. Maerefat, P. Shafie, Design of CCHP system for office buildings in Tehran and thermodynamical, environmental and economic evaluation in comparison to conventional system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 124-134, 2014 (In Persian)