



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۸۹ تا ۱۰۲  
Vol. 48, No. 1, Spring 2016, pp. 89-102



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی مکانیک  
AmirKabir Journal of Science & Research  
Mechanical Engineering  
(ASJR-ME)

# ارزیابی نحوه ی انتخاب ظرفیت موتورگازسوز در بهینه سازی سیستم CCHP با استفاده از الگوریتم ژنتیک مطالعه موردی: مجتمع ورزشی آبی

فاطمه توکلی دستجرد<sup>۱</sup>، محمد مصطفی غفوریان<sup>۲</sup>، محمد حسین شفیعی میم<sup>۳\*</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان
- ۲- استاد مدعو دانشگاه فنی حرفه ای، مهندسی مکانیک، آموزشکده فنی حرفه ای قاین (امام خمینی (ره))
- ۳- استادیار، دانشکده فنی مهندسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه بزرگمهر قانات

(دریافت: ۱۳۹۴/۴/۱۵، پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۱۵)

## چکیده

در این مقاله با استفاده از سه تحلیل انرژی، اقتصادی و زیست محیطی به بهینه سازی ظرفیت نامی تجهیزات سیستم تولید همزمان برق، حرارت و برودت با محرک اولیه موتورگازسوز، برای یک مجتمع ورزشی آبی پرداخته شده است. آنالیزها برای دو سناریوی متفاوت تداخل سیستم با شبکه (امکان فروش الکتریسیته SS و عدم امکان فروش SNS) و نیز تعیین بهینه پارامترهای طراحی که شامل تعداد موتورگازسوز و ظرفیت نامی و بارجویی آنها، ظرفیت گرمایشی بویلر، ظرفیت سرمایه گذاری چیلرهای الکتریکی و جذبی می باشند، انجام شده است. پارامترهای طراحی با استفاده از یک تابع هدف چند معیاره که سودسالیانه نسبی (RAB) نامیده می شود و همچنین استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه شده اند. در گام بعدی نحوه ی انتخاب ظرفیت نامی موتورگازسوز از نظر اقتصادی (RAB و PB) و صرفه جویی در مصرف سوخت (FESR) و زیست محیطی (CO<sub>2</sub>، CO، NO<sub>x</sub>) مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بهینه سازی نشان می دهند که در سناریوی امکان فروش الکتریسیته، دو موتورگازسوز (با ظرفیت های E<sub>1</sub>=130 kW و E<sub>2</sub>=150 kW) و در سناریوی نبود امکان فروش الکتریسیته، یک موتورگازسوز (با ظرفیت E=120 kW) بیشترین مقدار تابع هدف را به همراه دارند. بعلاوه نتایج ارزیابی نحوه ی انتخاب موتورگازسوز نشان داد که اگر در سناریوهای امکان و نبود امکان فروش الکتریسیته دو ظرفیت مشابه به جای ظرفیت های بهینه انتخاب شوند، دوره بازگشت سرمایه و سود سالیانه نسبی به ترتیب افزایش و کاهش می یابند و پارامترهای نسبت صرفه جویی در مصرف سوخت و نسبت کاهش انتشار آلاینده CO<sub>2</sub> در سناریوی امکان (نبود امکان) فروش الکتریسیته، روند کاهشی (افزایشی) خواهند داشت.

## کلمات کلیدی:

سیستم تولید همزمان حرارت برق و سرما، بیشینه سود سالیانه، امکان فروش برق

## ۱- مقدمه

مدیریت کارایی انرژی علاوه بر شرط وجود تعادل میان عرضه و تقاضای انرژی، نیازمند سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری صحیح دولت‌ها در استفاده از راهکارهای مناسب برای رسیدن به اهداف تعیین شده است. از جمله راهکارهای در حال استفاده در کشورهایی که پیشرفت‌های بسیاری در این زمینه داشته‌اند، تولید همزمان برق حرارت و سرمایش در محل مصرف است. این سیستم‌ها با تولید غیر متمرکز و مستقل برق، گرما و سرمایش و با بهره‌وری دقیق از انرژی‌های اتلافی، باعث جلوگیری از تلفات توزیع و انتقال در شبکه سراسری، کاهش مصرف سوخت، افزایش رقابت در تولید برق به همراه کاهش انتشار آلاینده‌های زیست محیطی می‌شوند [۴-۱]. از زمان ظهور و گسترش سیستم‌های تولید همزمان، مطالعات بسیاری بر روی این سیستم‌ها انجام شده است که بخش عمده این تحقیقات بر روی تعیین ظرفیت و بهینه‌سازی این سیستم‌ها با توجه به تقاضای انرژی، در محل مصرف است [۷-۵].

گیسون و همکاران به بهینه‌سازی یک توربین بخار سیستم تولید همزمان برق و حرارت CHP با شرایط اقتصادی مختلف و با معرفی سه حالت قیمت کربن در استرالیا پرداختند. آن‌ها نشان دادند که با معرفی قیمت کربن، نصب و راه اندازی این نوع از سیستم‌ها، از لحاظ اقتصادی موثرتر می‌شود [۸].

وانگ و همکاران [۹] و هونگبو و همکاران [۱۰] با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) ترکیبی از فناوری‌های تولید پراکنده که به شکل سیستم‌های مختلف انرژی برای بخش مسکونی استفاده می‌شود را مورد ارزیابی قرار داده و مناسب‌ترین سیستم را با توجه به معیارهای موردنظر معرفی کردند. معیارهای مورد استفاده در تحقیق آن‌ها شامل معیارهای اقتصادی، زیست‌محیطی و صرفه‌جویی انرژی بود. معیارهای اقتصادی شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و هزینه‌های عملیاتی سیستم است. در بخش زیست‌محیطی میزان انتشار CO<sub>2</sub> برای هر یک از سیستم‌ها به‌عنوان معیار انتخاب شده است و برای صرفه‌جویی انرژی، مصرف انرژی ورودی به‌عنوان ملاکی برای ارزیابی لحاظ شده‌اند.

ابراهیمی و کشاورز [۱۱] یک روش تصمیم‌گیری را برای انتخاب استراتژی عملیاتی و اندازه سیستم CCHP در مناطق مختلف آب و هوایی ارائه کردند. همچنین آن‌ها به منظور انتخاب محرک اولیه برای سیستم‌های میکرو CCHP (MCCHP) از دو روش تصمیم‌گیری چند معیاره فازی (FMCMDM) و تحلیل خاکستری<sup>۴</sup> در یک منزل مسکونی در پنج منطقه آب‌وهوایی ایران استفاده کردند [۱۲].

کیونگ وو و همکاران [۱۳] به بررسی تأثیر نوع ساختمان (هتل، بیمارستان، مغازه و اداره) در پیاده‌سازی سیستم CCHP در شش منطقه آب و هوایی ژاپن با استفاده از روش تصمیم‌گیری با معیارهای اقتصادی و

زیست‌محیطی پرداختند و نتیجه گرفتند که سیستم‌های CCHP در هتل و بیمارستان عملکرد مطلوب‌تری دارند.

معرفت و شفیی [۱۴] به ارزیابی چند معیاره سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما تحت دو استراتژی تأمین بار الکتریکی و تأمین بار حرارتی نسبت به سیستم تولید جداگانه، برای یک ساختمان اداری در تهران پرداختند. ارزیابی چند معیاره از نظر انرژی، زیست‌محیطی و اقتصادی انجام شده است. برای انتخاب مناسب‌ترین حالت عملکرد سیستم CCHP بر مبنای تمام معیارهای ارزیابی، از روش AHP استفاده شده است. احمدی و همکاران، بهینه‌سازی چند هدفه یک سیستم تولید همزمان برق و حرارت را انجام دادند. این سیستم متشکل از یک توربین گازی به همراه بویلر بازیافت حرارت بود که برق تولیدی و حرارت نام برده، در کارخانه‌ی چوب‌سازی مورد استفاده قرار می‌گرفت. در این کار هزینه‌ی سیستم به همراه بازدهی اکسرژی به عنوان دو تابع هدف در نظر گرفته شده بودند [۱۵].

همانطور که مشاهده می‌شود تاکنون نحوه‌ی انتخاب ظرفیت محرک اولیه (موتورگازسوز) در بهینه‌سازی سیستم CCHP به خصوص برای مجتمع ورزشی آبی که یکی از عمده‌ترین مکان‌های عمومی مصرف انرژی هستند، انجام نشده است. این امکان برای تأمین انرژی گرمایی و سرمایی آب استخرها، جکوزی، تهویه و تصفیه، نیازمند سیستم‌های عظیمی هستند که با اتلافات بالای انرژی همراه است. از طرفی به علت استفاده از الکتریسیته شبکه به منظور تأمین نیازهای الکتریکی مجتمع، اتلافات زیادی ناشی از انتقال الکتریسیته رخ می‌دهد. به این منظور، در این مقاله، با بهینه‌سازی بخش گرمایش، سرمایش و الکتریسیته این مجتمع به ارزیابی سیستم CCHP پرداخته شده است. بهینه‌سازی در دو حالت امکان فروش الکتریسیته به شبکه و نبود امکان آن انجام شده و تأثیر تعداد و نحوه‌ی انتخاب ظرفیت موتور گازسوز (مشابه یا غیر مشابه بودن) به عنوان محرک اولیه در پارامترهای دوره بازگشت سرمایه، نسبت صرفه‌جویی در مصرف سوخت و نسبت کاهش انتشار آلاینده کربن دی‌اکسید مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- توصیف سیستم

استخرهای شنا برای کاربردهای مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند و دارای بخش‌هایی از جمله سالن استخر، استخر شنا، جکوزی، سونای خشک، سونای بخار، حوضچه‌های آب سرد، ورودی، رخت‌کن، دوش‌ها و دستشویی‌ها هستند. ایجاد یک محیط مناسب برای شناگران نیازمند عملکرد بهینه‌ی یک سیستم تاسیساتی یکپارچه است که در فضایی به نام موتورخانه استخر تعبیه می‌شود. موتورخانه‌ی استخر دارای واحد گرمایش، سرمایش، تصفیه آب و پمپاژ می‌باشد که شامل تجهیزات دیگ آب گرم، دیگ بخار، سختی‌گیر، سیستم سرمایش، فیلتر شنی، میدل حرارتی، منبع کوئل‌دار، پمپ، موگیر، شیر و اتصالات است. در شکل ۱ نمایی از یک موتورخانه‌ی معمولی نشان داده شده است [۱۶].

- 1 Analytic hierarchy process
- 2 Micro Combined Cooling Heating and Power
- 3 Fuzzy Multi Criteria Decision Making
- 4 Grey Analysis

رابطه‌ی ۲ استراتژی نامبرده را به صورت فرمول، نشان می‌دهد. به طوری که  $H_{dem,t}$ ،  $E_{dem,t}$  و  $C_{dem}$  کل الکتریسیته، گرما و سرمای مورد نیاز مجتمع و ساختمان،  $E_b$  و  $E_s$  به ترتیب الکتریسیته خریداری شده و فروخته شده به شبکه،  $E_{PM}$  و  $H_{PM}$  الکتریسیته و گرمای دریافتی از محرک اولیه،  $E_b$  گرمای بویلر،  $C_{ab}$  و  $C_{ele}$  سرمایه‌ش مربوط به دو چیلر جذبی و الکتریکی می‌باشند [۱۷].

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{for } H_{PM} \geq H_{dem,t} \\ H_b = 0, C_{ab} = \frac{H_{PM} - H_{dem,t}}{COP_{ab}}, C_{ele} = C_{dem} - C_{ab} \\ \\ \text{for } H_{PM} < H_{dem,t} \\ H_b = H_{dem,t} - H_{PM}, C_{ab} = 0, C_{ele} = C_{dem} \end{array} \right. \quad (2)$$

### ۳- تحلیل انرژی

#### ۳-۱- محاسبات مربوط به بار حرارتی و سرمای مورد نیاز

همانطور که قبلا بیان شد مجتمع‌های ورزشی آبی، یکی از اماکن پر مصرف انرژی به حساب می‌آیند. از این رو برای تامین نیازهای خود مستلزم انتخاب بهینه تجهیزات هستند. این انتخاب بهینه نیازمند محاسبه دقیق بارهای گرمایشی، سرمایشی و الکتریسته در محل مصرف است [۱۸].

بار گرمایش مورد نیاز استخر، شامل گرمای مورد نیاز برای آب و گرمای مورد نیاز برای محیط است. به طور کلی بار گرمایشی روزانه مورد نیاز برای آب استخر از ۵ قسمت زیر تشکیل شده است:

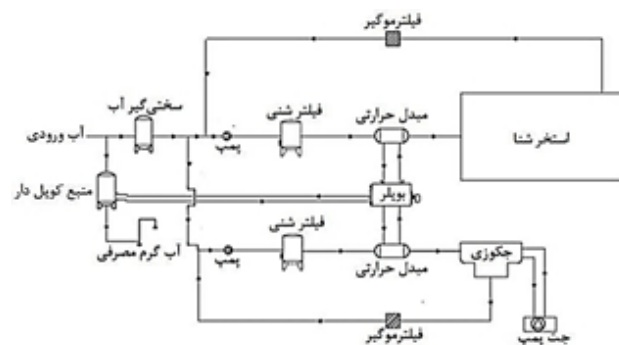
$$H_{dem,t} \text{ (or } C_{dem}) = H_{surface} + H_{vapor} + H_{feed} + H_{conv} + H_{rad}^{(3)} + H_{vapor} + H_{feed} + H_{conv} + H_{rad}$$

استخرها نیازمند بار گرمایشی بالایی هستند که می‌تواند به همراه الکتریسیته‌ی بخشی از تجهیزات، توسط سیستم تولید هم-زمان برق حرارت و برودت فراهم شوند. شکل ۲ نمایی از عملکرد سیستم CCHP را بر اساس چیدمان تجهیزات و تداخل با شبکه نشان می‌دهد. استراتژی عملکرد این سیستم بدین صورت بوده که الکتریسیته مورد نیاز ساختمان ( $E_{dem,t}$ ) که مجموع الکتریسیته مورد نیاز استخر و ساختمان متصل به آن (سرایداری) است، توسط موتورگازسوز ( $E_{PM}$ ) تامین شده و اگر الکتریسیته اضافی مورد نیاز باشد توسط شبکه تامین ( $E_b$ ) خواهد شد. علاوه بر این، الکتریسیته اضافی در صورت امکان فروش، به شبکه فروخته ( $E_s$ ) خواهد شد.

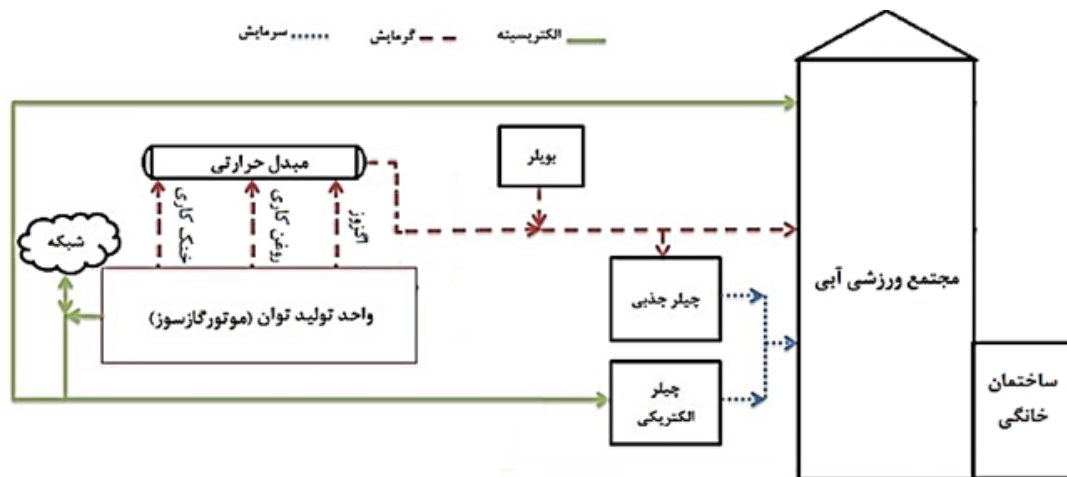
بنابراین:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_s = E_{dem,t} - E_{PM}, E_b = 0 \text{ if } E_{PM} < E_s \\ E_s = 0, E_b = E_{PM} - E_{dem,t} \text{ if } E_{PM} \geq E_s \end{array} \right. \quad (1)$$

گرمای مورد نیاز ( $H_{dem}$ ) ساختمان از حرارت حاصله از سیستم خنک‌کاری، گازخروجی و روغن‌کاری موتور تامین ( $H_{PM}$ ) و در صورت کمبود از طریق بویلر پشتیبان ( $H_b$ ) تامین خواهد شد. همچنین سرمایه‌ش مورد نیاز ( $C_{dem}$ )، در صورت اضافه بودن گرمای تولیدی محرک از طریق چیلر جذبی ( $C_{ab}$ ) و در صورت کمبود، از طریق الکتریسیته اضافی یا خریداری از شبکه، توسط چیلر الکتریکی ( $C_{ele}$ ) تامین خواهد شد.



شکل ۱: نمایی از تجهیزات یک موتورخانه‌ی معمولی استخر



شکل ۲: نمایی از تجهیزات سیستم تولید هم‌زمان برق، حرارت و برودت

$E_{cool}$  که الکتريسيته مورد نیاز جهت تامین سرمايش مجتمع می‌باشد، حذف خواهد شد [۱۸-۱۶].

### ۳-۳- محاسبات مربوط به سیستم CCHP

از آنجایی که تجهیزات در نظر گرفته شده برای سیستم تولید همزمان موتورگازسوز، بویلر کمکی و چیلرهای جذبی و الکتریکی می‌باشند، اعمال تحلیل انرژی، نیازمند اطلاعات فنی این تجهیزات است. اطلاعات مربوط به این تحلیل شامل کارکرد تجهیزات در بار جزئی به همراه شاخص‌های فنی تجهیزات همچون بازده، مصرف سوخت، حرارت‌های اتلافی و ضریب عملکرد می‌باشد که در زیر آورده شده است [۱۸، ۱۱]:

#### موتور گاز سوز

$$\eta_{nom} = 1.22 \times \frac{0.0007973 \times E_{nom} + 30.75}{100} \quad (11)$$

$$\frac{\eta_{th,PL}}{\eta_{th,nom}} = -0.0001591(PL)^2 + 0.024(PL) + 0.1 \quad (12)$$

$$\frac{m_{f,PL}}{m_{f,nom}} = 0.2408 \exp(0.01403PL) + 0.03553 \exp(-0.02494PL) \quad (13)$$

#### بویلر

$$\frac{\eta_{PL}}{\eta_{nom}} = -0.6249PL^2 + 1.525PL + 0.0951 \quad (14)$$

#### چیلر الکتریکی

$$\frac{COP_{PL}}{COP_{nom}} = -0.819PL^2 + 1.819PL \quad (15)$$

#### چیلر جذبی

$$\frac{COP_{PL}}{COP_{nom}} = \frac{PL}{0.75PL^2 + 0.0195PL - 0.008} \quad (16)$$

به طوری که  $P_L$  بار جزئی،  $\eta$  بازده،  $COP$  ضریب عملکرد و  $m_f$  سوخت مصرفی می‌باشد. مقادیر نامی مربوط به بازده و ضریب عملکرد تجهیزات در جدول ۱ آورده شده است.

شرایط فرض شده برای موتورگازی (و دیگر تجهیزات) واقعی بوده به گونه‌ای که در بار جزئی کمتر از ۲۰ درصد به علت پایین بودن بازده حرارتی و دمای گاز خروجی، موتور خاموش فرض می‌شود. از طرفی به ازای هر ۳۰۳ متر (۱۰۰۰ فوت) افزایش ارتفاع، حدود ۰/۰۳ کاهش برای بازده و به ازای هر ۵،۵ درجه سانتی‌گراد (۱۰ درجه فارنهایت) افزایش در دمای محیط ۱٪ کاهش در قدرت خروجی در نظر گرفته شده است [۱۹، ۱۸].

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است گرمای دریافتی از محرک اولیه (موتور گازسوز) شامل حرارت خروجی از آگروز ( $H_{ex,PL}$ )، حرارت ناشی از روغن کاری ( $H_{oil,PL}$ ) و حرارت دریافتی از خنک‌کاری ( $H_{j,PL}$ ) می‌باشد که توسط روابط زیر ارزیابی می‌شوند [۱۹، ۱۱]:

$$\frac{H_{j,PL}}{m_{f,PL}LHV} = \frac{(0.0012PL^2 - 0.2669PL + 46.2)}{100} \quad (17)$$

$H_{surface}$  گرمای اتلافی توسط انتقال حرارت هدایتی از دیوارها و کف استخر،  $H_{vapor}$  گرمای اتلافی ناشی از تبخیر آب،  $H_{feed}$  گرمای مورد نیاز برای آماده‌سازی آب گرم روزانه،  $H_{conv}$  گرمای اتلافی ناشی از انتقال حرارت جابجایی در سطح استخر و  $H_{rad}$  حرارت اتلافی توسط انتقال حرارت تشعشعی می‌باشد که روابط مربوط به هر کدام عبارتند از:

$$H_{surface} = (U_{wall} \times A_{wall} + U_{roof} \times A_{roof})_{wall} \times (T_{wall} - T_{Ground}) \quad (4)$$

$$H_{vapor} = W \times Y \quad (5)$$

$$W = (0.089 + 0.0782 \times v_{air}) \times (P_{water} - P_{air}) \times \frac{A_{roof}}{Y} \quad (6)$$

$$H_{feed} = \frac{C_{water} \times q_{feed} \times \rho \times (T_{water} - T_{feed})}{24} \quad (7)$$

$$H_{conv} = h_{conv} \times A_{roof} \times (T_{water} - T_{air}) \quad (8)$$

$$H_{rad} = \varepsilon_{water} \times A_{roof} \times \sigma \times (T_{water}^4 - T_{wall}^4) \quad (9)$$

که  $U_{roof}$  و  $U_{wall}$  ضریب انتقال حرارت کلی دیواره و کف استخر،  $A_{roof}$  و  $A_{wall}$  مساحت کف و سرتاسر دیوارهای استخر،  $T_{water}$  دمای آب استخر،  $T_{ground}$  دمای زمین،  $W$  نرخ تبخیر از سطح استخر (با فرض استخر آرام و فعال)،  $Y$  گرمای نهان تبخیر آب در دمای سطح آب استخر،  $v_{air}$  سرعت باد در سطح آب،  $P_{water}$  فشار اشباع در دمای آب،  $P_{air}$  فشار بخار اشباع در نقطه‌ی شبنم، گرمای ویژه آب،  $q_{feed}$  نرخ جریان آب تغذیه روزانه (اغلب ۵٪ تا ۱۰٪ حجم کل استخر می‌باشد)،  $T_{feed}$  دمای آب تغذیه تکمیلی،  $\varepsilon_{water}$  قابلیت انتشار از سطح آب،  $\sigma$  ثابت استفان بولتزمن ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \left(\frac{W}{m^2 K^4}\right)$ ) و  $T_{wall}$  دمای دیوارهای سالن می‌باشند [۱۶].  
بار سرمايش مورد نیاز استخر، مشابه بار گرمایی شامل سرمای مورد نیاز برای آب و سرمای مورد نیاز برای محیط و ساختمان خانگی متصل به استخر در فصل‌های گرم سال است که برای محاسبه این بخش از انرژی، روابط ارائه شده در بالا صادق خواهند بود.

### ۳-۲- محاسبات مربوط به بار الکتریکی

الکتريسيته مورد نیاز استخر شامل چهار بخش روشنایی ( $E_{light}$ )، الکتريسيته تجهیزات مصرف‌کننده الکتریکی به منظور تامین سرمايش ( $E_{cool}$ )، گرمایش ( $E_{heat}$ ) و تصفیه آب ( $E_{clean}$ ) می‌باشد که الکتريسيته تجهیزاتی مانند پمپ‌ها، چیلر الکتریکی، سختی‌گیرها و غیره را شامل شده و توسط رابطه زیر ارزیابی می‌شود.

$$\begin{cases} E_{dem,t} = E_{dem} + E_{heat} + E_{cool} \\ E_{dem} = E_{clean} + E_{light} \end{cases} \quad (10)$$

در صورت استفاده از چیلر جذبی (یا عدم استفاده از چیلر الکتریکی)، مقدار

هزینه‌های عملکردی که شامل هزینه‌ی مصرف سوخت  $C_f$ ، هزینه تولید آلاینده  $C_{env}$  (که نیازمند آنالیز محیط زیست است)، هزینه‌های خرید  $C_{buy}$  و فروش  $C_{sell}$  الکتریسیته می‌باشد، از دیگر هزینه‌هایی است که باید در تحلیل اقتصادی این سیستم در نظر گرفته شود. در ادامه روابط مربوط به این هزینه‌ها آورده شده است و پارامترهای اقتصادی و زیست محیطی مورد نیاز در این روابط در جدول ۱ ارایه شده است [۲۶،۲۷].

$$C_f = \sum_{i=1}^T (m_f \times LHV \times \tau) \quad (24)$$

$$C_{env} = \sum_{i=1}^T \left( \sum_{k=1}^3 (m_k \times \xi_k) \right) \quad (25)$$

$$C_{buy} = \sum_{i=1}^T (E_b \times \tau) \quad (26)$$

$$C_{sell} = \sum_{i=1}^T (E_s \times \tau) \quad (27)$$

### ۵- تحلیل محیط زیست

معیار تحلیل زیست محیطی بر اساس مقادیر تولید شده‌ی گازهای  $CO$ ،  $CO_2$  و  $NO_x$  ناشی از احتراق سوخت‌گازی در محفظه‌های احتراق می‌باشد. به منظور پیاده‌سازی این تحلیل از اطلاعات زیست محیطی مندرج در منبع [۱۱] استفاده شده است.

از دیگر فرضیات سیستم، دمای گاز خروجی موتور گازسوز و بویلر به محیط می‌باشد که به ترتیب نباید از ۱۴۹ و ۱۲۱/۲ درجه سلسیوس کمتر شوند زیرا در صورت کمتر شدن دما، فرایند تقطیر بخار آب رخ داده و محصولات مضر فرایند احتراق تولید می‌شوند [۲۷،۱۱۶،۲].

### ۶- تابع هدف

در این مقاله به منظور هم‌سنگ‌سازی کلیه هزینه‌های اولیه، اسقاطی و عملکرد، از تابع سود سالانه نسبی<sup>۵</sup> استفاده شده است. در حقیقت، این تابع با در نظر گرفتن میزان تقاضای انرژی و سه تحلیل انرژی، اقتصادی و زیست محیطی و نیز با معرفی شاخصی مبتنی بر سود سالانه سیستم تولید همزمان برق، گرما و سرما نسبت به سیستم‌های سنتی، ظرفیت بهینه سیستم را تعیین می‌کند. به طوری که قیمت ماهانه حامل‌های انرژی نظیر فروش و خرید برق و خرید سوخت، نرخ بهره سالانه  $(i=0/۲)$  و عمر مفید دستگاه‌ها ( $k=۲۰$ ) به عنوان پارامترهای وابسته به ارزش زمانی پول در محاسبات این تابع، اثرگذار می‌باشند [۲۷-۲۹].

سود سالیانه نسبی که از اختلاف هزینه‌های کل سیستم تولید سنتی  $AC_{trad}$  و هزینه‌های کل سیستم تولید همزمان  $AC_{CCHP}$  بدست می‌آید به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$RAB = AC_{trad} - AC_{CCHP} \quad (28)$$

هزینه‌های سالانه سیستم سنتی برای تولید گرمایش، سرمایش و الکتریسیته به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$\frac{H_{ex,PL}}{m_{f,PL} LHV} = -5 \times 10^{-8} (PL^3 + 0.0016 PL^2 - 0.1591 PL + 27.3) \quad (18)$$

$$\frac{H_{oil,PL}}{m_{f,PL} LHV} = -7 \times 10^{-8} (PL^3 + 0.0018 PL^2 - 0.1862 PL + 20) \quad (19)$$

### ۴- تحلیل اقتصادی

تحلیل اقتصادی انجام شده در این مقاله به منظور پیاده‌سازی روش یکنواخت سالیانه است که یکی از روش‌های با ارزش تحلیل‌های اقتصادی می‌باشد. در این روش درآمدها و هزینه‌های سیستم به دریافت و پرداخت سالیانه تبدیل می‌شوند. از مزایای این روش نسبت به دیگر روش‌های اقتصادی که برای مقایسه و تحلیل پژوهش‌ها به کار می‌رود نتیجه یکسان محاسبات پروژه‌ها، با عمر متفاوت است. این تکنیک با توجه به اطلاعات طرح تحت نام هزینه یکنواخت سالیانه EUAC و یا تحت نام درآمد یکنواخت سالیانه EUAB شناخته می‌شود که در بخش تابع هدف مدل‌سازی خواهد شد [۲۵].

از جمله اطلاعات مورد نیاز این تحلیل، هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه‌ی تجهیزات (In)، هزینه‌های اسقاطی (SV) و تعمیرات سیستم (M) می‌باشد که در ادامه به صورت تابعی از ظرفیت نامی تجهیزات ارایه شده است. گفتنی است که کلیه اطلاعات مربوط به این هزینه‌ها بر اساس داده‌های تجاری و قیمت تجهیزات در بازار بین المللی بدست آمده است [۲۶،۲۷].

### موتور گاز سوز

$$In = \frac{11}{12260} (1.881 \times 10^{21} \times E_{nom}^{-10.33} + 1.062 \times 10^7) \quad (20)$$

$$M = \frac{0.40458 + 324890 \times E_{nom}}{12260}$$

$$SV = 0.2 \times C$$

### بویلر

$$\begin{cases} In = 482 (H_{nom,b})^{-0.13} \\ M = 0.027 \$ / kWh \\ SV = 0.2 \times C \end{cases} \quad (21)$$

### چیلر الکتریکی

$$\begin{cases} In = 540 (C_{nom,el})^{-0.128} \\ M = 0.003 \$ / kWh \\ SV = 0.2 \times C \end{cases} \quad (22)$$

### چیلر جذبی

$$\begin{cases} In = 482 (C_{nom,ab})^{-0.07273} - 159.7 \\ M = 0.003 \$ / kWh \\ SV = 0.2 \times C \end{cases} \quad (23)$$

در روابط فوق زیرنویس اولی (nom)، نشان‌دهنده ظرفیت نامی و زیرنویس (ele) نشان‌دهنده چیلر الکتریکی، (ab) نشان‌دهنده چیلر جذبی و (b) نشان‌دهنده بویلر می‌باشند.



جدول ۱: پارامترهای اقتصادی و زیست محیطی مورد نیاز تابع هدف [۱۹-۲۴]

مقدار	علامت	پارامتر
۶/۸۵۳	$\xi_{NOx}$	فاکتور انتشار آلاینده $NO_x$ (\$/kg)
۰/۰۲۰۸۶	$\xi_{CO}$	فاکتور انتشار آلاینده CO (\$/kg)
۰/۰۸۴	$\Omega_b$	میانگین قیمت خرید الکتریسیته (\$/kWh)
۰/۱۵۴	$\Omega_f$	میانگین قیمت سوخت (\$/kWh)
۰/۰۲۴	$\xi_{CO_2}$	فاکتور انتشار آلاینده $CO_2$ (kg/\$)
۰/۰۸۸	$\Omega_s$	میانگین قیمت فروش الکتریسیته (\$/kWh)
۰/۸۹	$\eta_{nom,b}$	بازده نامی بویلر (%)
۳	$COP_{nom,ele}$	ضریب عملکرد نامی چیلر الکتریکی (%)
۰/۷	$COP_{nom,ab}$	ضریب عملکرد نامی چیلر جذبی (%)

است، به گونه‌ای که طراحی سیستمی منطقی از لحاظ اقتصادی، دارای کمترین مدت بازگشت سرمایه است. در ادامه دوره بازگشت سرمایه با در نظر گرفتن ارزش زمانی پول، ارزش اسقاطی تجهیزات و انتخاب فرآیند مالی همسنگ ارزش فعلی به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۰]:

$$\begin{cases} NPWB(y) - NPWC(y) = 0 \\ PB = y \end{cases} \quad (۳۲)$$

به طوری که، مدت زمان دوره بازگشت سرمایه زمانی خواهد بود که ارزش فعلی هزینه‌های اولیه<sup>۶</sup> و ارزش فعلی خالص درآمدها<sup>۷</sup> در پایان آن سال با هم برابر شوند.

ارزش فعلی خالص هزینه‌ها شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه بوده و ارزش فعلی درآمدها شامل، درآمد ناشی از هزینه‌های اسقاطی تجهیزات و درآمد سالانه سیستم است. ارزش فعلی درآمدها نیز شامل، درآمد ناشی از هزینه‌های اسقاطی تجهیزات و درآمد سالانه سیستم است که رابطه دقیق آن در مرجع [۳۰] بیان شده است.

#### ۷-۲- نسبت صرفه‌جویی مصرف سوخت (FESR)<sup>۸</sup>

از دیگر معیارهای مهم در ارزیابی سیستم‌های تولید همزمان، معیار نسبت صرفه‌جویی مصرف سوخت می‌باشد که توسط رابطه (۳۳) ارزیابی می‌شود:

$$FESR = \frac{fuel_{trad} - fuel_{CCHP}}{fuel_{trad}} \quad (۳۳)$$

در این رابطه درصد صرفه‌جویی مصرف سوخت مصرفی سیستم CCHP نسبت به سیستم سنتی با توجه به عملکرد بیان شده در قسمت‌های قبل ارزیابی می‌شود [۳۱].

#### ۷-۳- نسبت کاهش انتشار آلاینده کربن دی‌اکسید (CDER)<sup>۹</sup>

معیار نسبت کاهش انتشار آلاینده کربن دی‌اکسید که میزان انتشار آلاینده کربن دی‌اکسید را در سیستم CCHP نسبت به سیستم سنتی می‌سنجد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$AC_{trad} = C_{buy} + C_{sell} + C_f + C_{env} \quad (۲۹)$$

$$+ \sum_{j=1}^N M + C \times \frac{i(1+i)^k}{(1+i)^k - 1} - SV \times \frac{i}{(1+i)^k - 1} \times Nc_j \times n_j$$

این هزینه‌ها شامل کلیه هزینه‌های تعمیرات، اسقاطی، سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های مربوط به جریمه‌ی انتشار آلاینده، مصرف سوخت و خرید الکتریسیته است.

همچنین هزینه‌ی سالانه سیستم تولید همزمان به صورت زیر تعریف شده که مانند رابطه سیستم سنتی می‌باشد، اما تفاوت آن در فروش الکتریسیته و تجهیزات سیستم است.

$$AC_{CCHP} = C_{buy} - C_{sell} + C_{env} + C_f$$

$$+ \sum_{j=1}^N M + C \times \frac{i(1+i)^k}{(1+i)^k - 1} - SV \times \frac{i}{(1+i)^k - 1} \times Nc_j \times n_j \quad (۳۰)$$

$$- SV \times \frac{i}{(1+i)^k - 1} \times Nc_j \times n_j$$

در این روش تابع RAB براساس حداکثر سود سالیانه و بار مورد نیاز ساختمان در طول سال، ظرفیت محرک، تعداد، بار جزئی، ظرفیت بویلر پشتیبان و چیلرها تعیین می‌شود.

$$Max \{RAB\} = (n_j \times E_{nom})^{optimum} \quad (۳۱)$$

#### ۷- معیارهای ارزیابی

##### ۷-۱- دوره بازگشت سرمایه (PB)

معیار دوره بازگشت سرمایه یکی از مهمترین معیارها در طراحی و آینده‌نگری سیستم‌های تولید همزمان برق حرارت و برودت (CCHP)

6 Net Present Worth of Cost investment (NPWC)

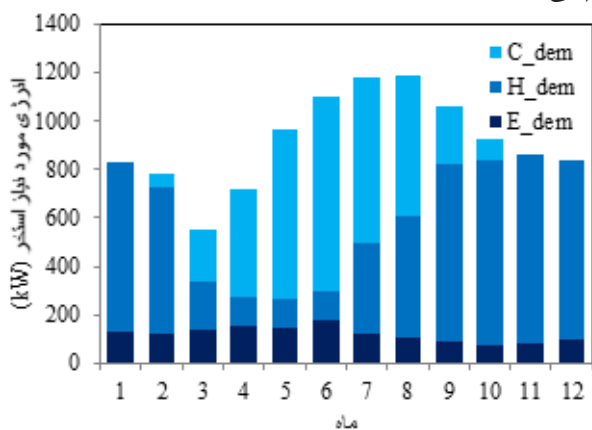
7 Net Present Worth Benefit (NPWB)

8 Fuel Energy Saving Ratio

9 Carbon Dioxide Emission Reduction

### ۹- مسئله مورد بررسی

مطالعه موردی در این مقاله یک مجتمع آبی ورزشی به مساحت حدودی  $2500 \text{ m}^2$  است که شرایط منطقه‌ای مجتمع به همراه مشخصات فنی ساختمان در جدول ۳ آورده شده است. بارهای الکتریکی، حرارتی و سرمایشی مجتمع در شکل ۳ نشان داده شده است. الکتریسیته مورد نیاز مجتمع، شامل روشنایی و برق مصرفی تجهیزات الکتریکی در محل مصرف، گرمای مورد نیاز شامل گرمایش آب استخرها گرم، آب بهداشتی و تهویه مطبوع و سرمایش شامل آب استخرهای سرد و تهویه در فصول گرم می‌باشند.



شکل ۳: منحنی بار الکتریکی، حرارتی و سرمایش ساختمان

در این سیستم با فرض تامین الکتریسیته، گرمایش و سرمایش مورد نیاز مجتمع به ترتیب توسط موتورگازسوز، گرمای دریافتی از محرک اولیه و چیلرها، بنا به استراتژی بیان شده در بخش ۲ تامین خواهد شد. گفتمنی است در صورت کمبود الکتریسیته، گرمایش و سرمایش با خرید الکتریسیته از شبکه، با استفاده از بویلر کمکی (برای گرمایش) و چیلر تراکمی (برای سرمایش) این کمبودها رفع می‌شوند.

### ۱۰- بحث و نتایج

#### ۱۰-۱- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی پژوهش پیش رو از تحقیقات صنایع و همکاران [۶]، (که فرآیند بهینه‌سازی را با دو تحلیل اقتصادی و انرژی، با تابع هدف سود سالیانه واقعی (AAB) انجام داده‌اند) استفاده شده است. سه نوع محرک اولیه موتورگازسوز، موتور دیزل و توربین گاز به همراه بویلر کمکی تجهیزات سیستم فرضی آن‌ها بود که به منظور اعتبارسنجی کار حاضر، محرک اولیه موتور گازسوز و سیستم با فرض شرایط اقتصادی<sup>۱۴</sup> مدل‌سازی شده است و در نهایت فرآیند بهینه‌سازی، با تابع هدف سود سالیانه واقعی و برای مطالعه موردی آن‌ها انجام گردید. نتایج مربوط به مطالعه انجام شده و کار صنایع و همکاران با تابع هدف سود سالیانه واقعی در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تطابق بسیار خوبی بین نتایج مقدار تابع هدف در ظرفیت‌های بالای موتورگازسوز (که نشان‌دهنده ظرفیت بهینه است) وجود دارد.

$$CDER = \frac{CDE_{trad} - CDE_{CCHP}}{CDE_{trad}} \quad (34)$$

که  $CDE_{trad}$  و  $CDE_{CCHP}$  به ترتیب انتشار آلاینده کربن دی‌اکسید برای سیستم سنتی و سیستم تولید همزمان می‌باشند [۳۲].

### ۸- متغیرهای تصمیم‌گیری و بهینه‌سازی

در کار حاضر توان نامی و تعداد محرک‌های اولیه، ظرفیت گرمایشی بویلر، ظرفیت سرمایشی چیلرها و بار جزئی مربوط به عملکرد محرک اولیه در دوازده ماه سال به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده اند که با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه خواهند شد. الگوریتم ژنتیک روش بهینه‌سازی بر پایه تکامل بیولوژیک است. در این الگوریتم مجموعه‌ای از فرضیه‌ها که جمعیت<sup>۱۰</sup> نامیده می‌شود تولید و بطور متناوب با فرضیه‌های جدیدی جایگزین می‌گردند. در هر بار تکرار، تمامی فرضیه‌ها با استفاده از یک تابع تناسب<sup>۱۱</sup> مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. آنگاه تعدادی از بهترین فرضیه‌ها با استفاده از یک تابع احتمال انتخاب شده و جمعیت جدید را تشکیل می‌دهند. تعدادی از این فرضیه‌های انتخاب شده به همان صورت مورد استفاده واقع شده و مابقی با استفاده از اپراتورهای ژنتیکی مانند همگذاری<sup>۱۲</sup> و جهش<sup>۱۳</sup> برای تولید فرزندان بکار می‌روند. در جدول ۲ قیود مورد نیاز به منظور بهینه‌سازی پارامترهای طراحی آورده شده است که با مشخص بودن تابع هدف و محدوده ظرفیت تجهیزات در تمام مراحل جستجو، استراتژی عملکرد برای دستیابی به مقدار بهینه متغیرهای طراحی، با هدف بیشینه تابع هدف، دنبال خواهد شد.

جدول ۲: متغیرهای تصمیم‌گیری الگوریتم ژنتیک و قیود

مقادیر	متغیرهای تصمیم‌گیری و قیود
۸۰	تعداد جمعیت
۱۰-۶	معیار توقف
یکنواخت	نحوه انتخاب
رندم	تناسب مقیاس
۰/۸۵	احتمال ترکیب ژنی
وابسته به محدودیت	نوع جهش
۱ تا ۳	تعداد محرک اولیه
۱۰۰۰ تا ۵۰	تغییرات ظرفیت نامی محرک اولیه (کیلووات)
۱۰۰۰ تا ۰	تغییرات ظرفیت گرمایشی بویلر (کیلووات)
۱۰۰۰ تا ۰	تغییرات ظرفیت سرمایشی چیلر تراکمی (کیلووات)
۱۰۰۰ تا ۰	تغییرات ظرفیت سرمایشی چیلر جذبی (کیلووات)
۱۰۰ تا ۲۰	میزان تغییرات بار جزئی محرک اولیه (درصد)

- 10 Population
- 11 Fitness
- 12 Crossover
- 13 Mutation

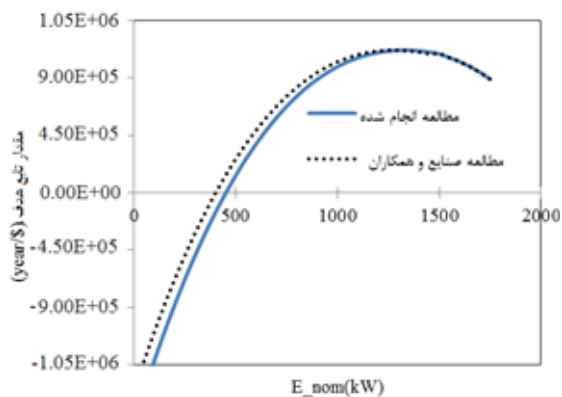
14 Economical mode

سیستم امکان خرید و فروش الکتریسیته با شبکه را داشته و این شرایط باعث ایجاد درآمد حاصل از فروش الکتریسیته می‌شود. اما زمانی که سناریوی تداخل یک طرفه سیستم با شبکه ( $S_{NS}$ ) فرض می‌شود، سیستم امکان خرید از شبکه را داشته اما امکان فروش الکتریسیته اضافی به شبکه را نخواهد داشت. یعنی درآمد حاصل از فروش الکتریسیته ( $E_s=0$ ) برای این حالت حذف می‌شود. نتایج بهینه ظرفیت تجهیزات مربوط به این دو سناریو برای مطالعه موردی، در جدول ۴ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد در سناریوی امکان فروش الکتریسیته دو موتورگازسوز (با ظرفیت‌های  $E_1=130\text{ kW}$  و  $E_2=150\text{ kW}$ ) و در سناریوی عدم امکان فروش الکتریسیته یک موتورگازسوز (با ظرفیت  $E=120\text{ kW}$ ) بیشترین مقدار تابع هدف به همراه خواهند داشت.

به طور کلی بدون استفاده از سیستم CCHP کل هزینه‌های خرید الکتریسیته از شبکه، تولید گرما و سرما برابر  $413/898 \times 10^3 \text{ \$/year}$  می‌باشد. این مقدار کل هزینه تولیدی یک سیستم سنتی است که در هر دو سناریو، مقداری ثابت است و با استفاده از رابطه (۲۹) بدست می‌آید. همانطور که مشاهده می‌شود در هر دو سناریو، مقدار تابع هدف که سود سالیانه نسبی است، مثبت بدست آمده که این نشان‌دهنده نقش موثر سیستم CCHP در کاهش هزینه‌های تامین گرمایش، سرمایش و الکتریسیته مجتمع مورد نظر می‌باشد. به عبارت دیگر هزینه‌های بدست آمده برای این سیستم از مقدار سیستم سنتی در سناریوی امکان و نبود امکان فروش الکتریسیته به شبکه، به ترتیب  $164/08$  و  $233/241$  هزار دلار بر سال کمتر می‌شود.

با مقایسه دو سناریو می‌توان دریافت که عملکرد سیستم در سناریوی امکان فروش از نظر سوددهی بهتر بوده است هرچند که هزینه‌ی اولیه بالایی را به علت انتخاب دو محرک اولیه متقبل شده است اما درآمد حاصل از فروش الکتریسیته، این هزینه‌ها را پوشش داده است.

شکل ۵ مقادیر بار جزئی در هر ماه را در سناریوهای  $S_S$  و  $S_{NS}$  نشان می‌دهد این مقادیر تعیین‌کننده مقدار الکتریسیته تولیدی و گرمای دریافتی از موتورهای گازسوز می‌باشند. همانطور که در سناریوی امکان فروش مشاهده می‌شود در ماه‌های اول (۱ تا ۲) و انتهای سال (۱۲ تا ۷)



شکل ۴: منحنی اعتبار سنجی تابع سودسالیانه واقعی

جدول ۳: مشخصات مجتمع ورزشی آبی

مشخصات	نوع و مقدار
طول و عرض جغرافیایی	$29/30^\circ$ شمالی $60/51^\circ$ شرقی
ارتفاع از سطح دریا	۱۱۸۹ m
مساحت کل مجتمع ورزشی آبی (بدون مساحت ساختمان مسکونی)	$2100\text{ m}^2$
مساحت ساختمان مسکونی	$200\text{ m}^2$
میانگین ارتفاع سقف ساختمان مسکونی	$2/9\text{ m}$
میانگین ارتفاع سقف استخر	۵ m
وزن ساختمان	$468/7\text{ kg/m}^2$
ضریب کلی هدایت حرارتی دیوارها	$1/53\text{ W/(m}^2\text{K)}$
ضریب کلی هدایت حرارتی سقف ( برای مکان های قابل تهویه و غیر قابل تهویه)	$2/839\text{ W/(m}^2\text{K)}$ $(-0/568\text{ W/(m}^2\text{K)})$
تعداد و مساحت هر پنجره استخر	۱۶ پنجره با مساحت $4\text{ m}^2$
تعداد و مساحت هر پنجره ساختمان مسکونی	۵ پنجره با مساحت $2\text{ m}^2$
نوع پنجره های استخر	با فاصله ۱۸ میلیمتری آرگون
نوع پنجره های ساختمان مسکونی	بدون فاصله (معمولی)
دمای طراحی	$29\text{ }^\circ\text{C}$
دمای نقطه شبنم	$25\text{ }^\circ\text{C}$
سرعت حرکت هوا	$0/3\text{ m/s}$
تعداد استخر (استخر جکوزی)	۲ استخر شامل استخر بزرگسالان و استخر کودکان (۲ استخر شامل استخر آب سرد و استخر آب گرم)

مشخصات استخرها	استخر جکوزی گرم (سرد)	استخر بزرگسالان (استخر کودکان)
حجم آب استخر	$22\text{ (}22\text{) m}^3$	$2113\text{ (}55\text{) m}^3$
طول استخر (شعاع جکوزی)	$2\text{ (}2\text{) m}$	$64\text{ (}18/3\text{) m}$
مساحت سطح استخر $\text{m}^2$	$12/56\text{ (}12/56\text{)}$	$1363/2\text{ (}109/8\text{)}$
دمای طراحی برای استخر	$39\text{ (}33\text{) }^\circ\text{C}$	$27\text{ (}27\text{) }^\circ\text{C}$

۱۰-۲- نتایج بهینه‌سازی سیستم تولید همزمان در دوسناریوی

متفاوت  $S_S$  و  $S_{NS}$

زمانی که سناریوی تداخل دو طرفه سیستم با شبکه (SS)، فرض می‌شود،



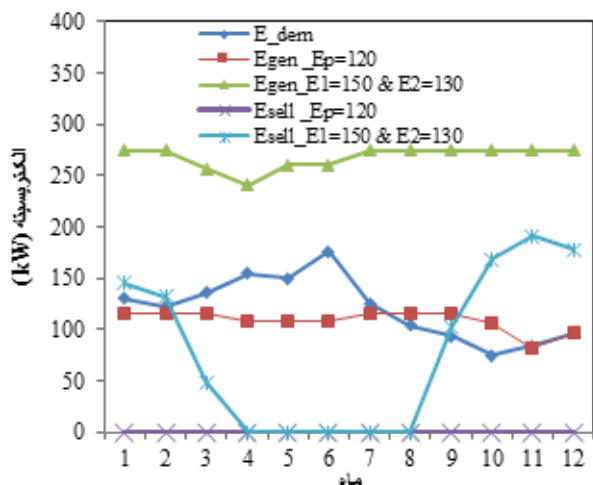
جدول ۴: نتایج بهینه سازی سیستم CCHP در دو سناریوی امکان و عدم فروش الکتریسیته

سناریوی امکان فروش الکتریسیته	سناریوی عدم امکان فروش الکتریسیته	پارامترهای طراحی به همراه تابع هدف
موتوگازسوز	موتوگازسوز	نوع محرک اولیه
۲	۱	تعداد محرک اولیه
۱۳۰	۱۲۰	ظرفیت نامی محرک اولیه ۱ (kW)
۱۵۰	عدم نیاز	ظرفیت نامی محرک اولیه ۲ (kW)
عدم نیاز	عدم نیاز	ظرفیت نامی محرک اولیه ۳ (kW)
شکل ۵	شکل ۵	تغییرات بار جزئی (%)
۴۳۵	۶۸۰	ظرفیت گرمایشی بویلر (kW)
۶۸۵	۸۰۰	ظرفیت سرمایشی چیلر تراکمی (kW)
۱۱۵	عدم نیاز	ظرفیت سرمایشی چیلر جذبی (kW)
۲۴۹/۸۱۸	۱۸۰/۶۵۷	سود سالیانه نسبی $\times 10^2$ (\$/year)

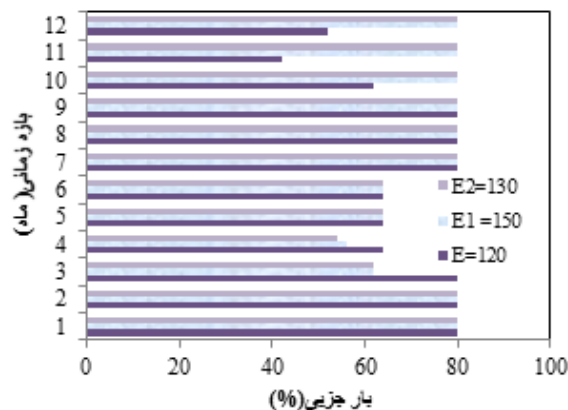
تولیدی بیشتر از منحنی تقاضا می باشد. نکته مورد توجه آن است که میزان الکتریسیته مورد نیاز ( $E_{dem}$ ) نشان داده شده در این شکل، الکتریسیته مورد نیاز برای روشنایی و دیگر تجهیزات الکتریکی به جز تجهیزات سرمایشی می باشد، اما در صورتی که الکتریسیته مورد نیاز محل مصرف که شامل الکتریسیته ی بخش سرمایش نیز می شود باید تامین گردد، در نتیجه الکتریسیته تولیدی اضافی به مصرف تجهیزات سرمایش الکتریکی می رسد.

شکل ۷ بار گرمایشی سالانه مورد نیاز، به همراه بار گرمایشی تولید شده در هر سناریو را نشان می دهد. بار گرمایشی تولیدی مجموع حرارت ژاکت آب، حرارت گاز خروجی و حرارت تولید شده توسط روغن کاری می باشد که با توجه به بار جزئی انتخاب شده برای محرک ها، بدست می آید. همانطور که از این شکل مشاهده می شود، در فصل های سرد سال (۷ تا ۱۲) میزان حرارت تولید شده توسط محرک اولیه سناریوی نبود امکان فروش الکتریسیته ( $E=120 \text{ kW}$ )  $S_{NS}$ ، کمتر از مقدار درخواست

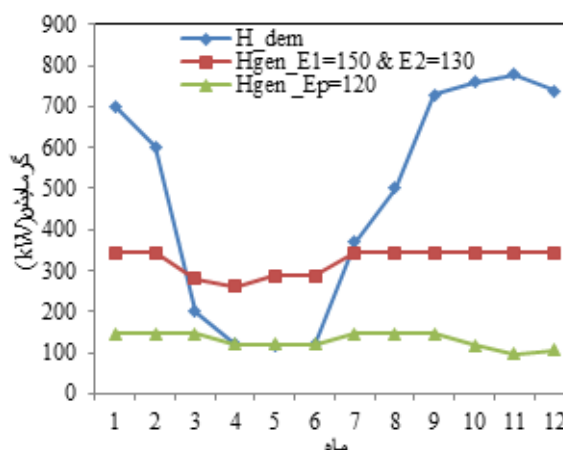
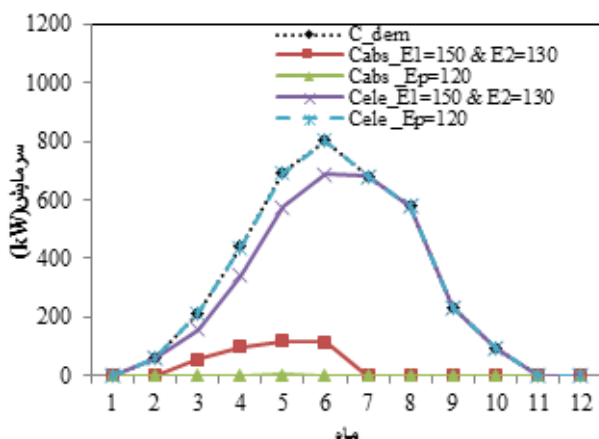
و در سناریوی نبود امکان فروش در ماه های ۱ تا ۳ و ۷ تا ۹ بار جزئی ۸۰ درصد انتخاب می شوند که علت این روند را می توان پوشش دهی بهتر منحنی های بار در راستای اهداف بهینه سازی دانست. زیرا بیشینه گرمای دریافتی از واحد تولید توان (موتورگازسوز) در این بار جزئی بدست می آید. شکل ۶ میزان الکتریسیته تولیدی به همراه الکتریسیته فروخته شده توسط محرک ها را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود در سناریوی امکان فروش (با ظرفیت های  $E_1=130 \text{ kW}$  و  $E_2=150 \text{ kW}$ ) در کل سال الکتریسیته تولید شده بیشتر از میزان مورد نیاز ساختمان (به جز الکتریسیته مورد نیاز برای سرمایش) می باشد اما فروش الکتریسیته در ماه های میانی دیده نمی شود. علت آن، وجود حداکثر سرمایش در این ماه ها نسبت به ماه های دیگر است که باعث شده سیستم برای تامین سرمایش مورد نیاز خود از الکتریسیته واحد تولید توان استفاده نماید و در نتیجه میزان فروش الکتریسیته کاهش می یابد. اما در سناریوی نبود امکان فروش الکتریسیته مشاهده می شود که میزان الکتریسیته تولیدی از میزان درخواست در ماه های ابتدای سال، کمتر بوده و این مقدار کمبود از شبکه تامین می شود. اما در ماه های ۸، ۹ و ۱۰ میزان الکتریسیته



شکل ۶: میزان الکتریسیته سالانه تولیدی و الکتریسیته فروخته شده توسط محرک های اولیه



شکل ۵: بار جزئی محرک های انتخابی در طول سال



شکل ۸: میزان بار سرمایی تامین شده توسط چیلر الکتریکی

می‌شود. الکتریسیته‌ی این مقادیر در صورت کمبود از مقدار تولیدی، از شبکه خریداری خواهد شد.

شکل ۷: بار گرمایشی سالانه مورد نیاز، به همراه بار گرمایشی تولیدشده

ساختمان بوده و نمی‌تواند حرارت موردنیاز ساختمان را فراهم کند. در این حالت بویلر پشتیبان مقدار کمبود حرارت را فراهم می‌کند که بیشینه این مقدار تعیین‌کننده ظرفیت بویلر می‌باشد. از طرفی مقدار حرارت تولیدی توسط محرک‌های اولیه در سناریوی امکان فروش الکتریسیته  $S_S$ ، در فصل‌های گرم بیش از میزان حرارت مورد نیاز است که از این حرارت اضافی در این ماه‌ها برای تولید سرمایش توسط چیلر جذبی استفاده می‌شود.

### ۱۰-۳- ارزیابی نحوه‌ی انتخاب ظرفیت محرک اولیه

یکی از مسائل مهم انتخاب بهینه سیستم‌های تولید همزمان، نحوه‌ی انتخاب ظرفیت نامی محرک‌های اولیه می‌باشد. به طوری که متقاضیان این سیستم‌ها بعد از محاسبه فنی بارهای مورد نیاز محل مصرف، به تعیین ظرفیت بهینه محرک اولیه ( $E_{opt}$ ) می‌پردازند. در اکثر مراکز صنعتی مشاهده می‌شود که به جای انتخاب این ظرفیت نامی (بهینه) به عنوان ظرفیت اصلی محرک اولیه از دو ظرفیت کوچکتر مشابه ( $E_2$  و  $E_1$ ) استفاده می‌شود به طوری که مجموع این دو برابر ظرفیت بهینه اول ( $E_{opt} = E_1 + E_2$ ) است. این مراکز دلیل این امر را نیاز دائم و بهره‌برداری بهتر از سیستم (در زمانی که یکی از محرک‌ها نیاز به تعمیر دارد) توجیح می‌کنند. در این بخش از مقاله به مقایسه این نحوه‌ی انتخاب با انتخاب بهینه ظرفیت‌های ارایه شده توسط روش RAB از نقطه نظر اقتصادی (سود سالیانه نسبی و دوره بازگشت سرمایه)، صرفه‌جویی در مصرف سوخت (FESR) و انتشار آلاینده کربن دی‌اکسید ( $CO_2$ ) پرداخته می‌شود.

شکل ۸ میزان بار سرمایی مهیا شده توسط گرمای اتلافی محرک اولیه در سیستم CCHP را نشان می‌دهد. منظور از گرمای اتلافی، اختلاف حرارت تولیدی و حرارت مورد تقاضای ساختمان می‌باشد که در ماه‌های گرم سال رخ می‌دهد. این حرارت با استفاده از چیلر جذبی برای تامین بار سرمایی مصرف می‌شود، به طوری که ماکزیمم این مقدار تعیین‌کننده ظرفیت چیلر جذبی می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود در سناریوی عدم امکان فروش الکتریسیته به علت ناچیز بودن گرمای اتلافی در این ماه‌ها (ماه‌های گرم سال) منحنی سرمایش مربوط به سرمای فراهم شده توسط چیلر جذبی صفر می‌شود به عبارت دیگر در این سناریو فرآیند بهینه‌سازی ترجیح می‌دهد که کل سرمایش مورد نیاز، توسط چیلرهای الکتریکی تامین گردد و استفاده از چیلر جذبی توجیه اقتصادی ندارد. از آنجایی که کمبود سرمایش تامین شده توسط چیلر جذبی با استفاده از چیلرهای الکتریکی تامین می‌شود و عملکرد آن روند معکوسی را نسبت به همدیگر دارند، مابقی سرما مورد نیاز نیز از طریق چیلر الکتریکی تامین

جدول ۵ نتایج حاصل از پارامترهای ارزیابی به همراه مقادیر سود سالیانه نسبی برای ظرفیت‌های بهینه روش RAB و انتخاب ظرفیت‌های مشابه موتورگازسوز در دو سناریوی امکان و عدم امکان فروش الکتریسیته را نشان می‌دهد.

جدول ۵: نتایج بدست آمده ناشی از ارزیابی اقتصادی، مصرف سوخت و زیست محیطی

سناریو	ظرفیت نامی موتورگازسوز (kW)	سود سالیانه نسبی $\times 10^3$ (سال/دلار)	دوره بازگشت سرمایه (سال)	صرفه جویی در مصرف سوخت FESR (%)	کاهش انتشار آلاینده $CO_2$ (%)
امکان فروش	$E_{opt1}=130$ & $E_{opt2}=150$	۲۴۹/۸۱۸	۸/۲	۲۲/۱	۳۵/۲
الکتریسیته به شبکه	$E_1=140$ & $E_2=140$	۲۴۳/۸۱۷	۸/۳	۱۹/۶	۲۹
عدم امکان فروش	$E_{opt1}=120$	۱۸۰/۶۵۷	۱۰/۶	۳۶/۸	۴۴/۱
الکتریسیته به شبکه	$E_1=60$ & $E_2=60$	۱۶۷/۳۱۲	۱۱/۹	۳۹/۷	۵۱

مشابه (برابر) عملکرد ضعیف‌تری از لحاظ اقتصادی نسبت به انتخاب دو ظرفیت نامشابه در هر دو سناریو دارد به طوری که با انتخاب دو ظرفیت مشابه به جای ظرفیت‌های بهینه، سود سالیانه نسبی و دوره بازگشت سرمایه در هر دو سناریو به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابند. هر چند در سناریوی عدم امکان فروش الکتریسیته پارامتر نسبت صرفه‌جویی در مصرف سوخت و نسبت کاهش انتشار آلاینده‌ها افزایش می‌یابند.

### فهرست علائم

$A$	مساحت ( $m^2$ )
$AC$	کل هزینه سالیانه (\$/year)
$C$	سرمایش (kW)
$CCHP$	سیستم تولید همزمان برق حرارت و برودت
$CDER$	نسبت کاهش انتشار آلاینده کربن دی اکسید (%)
$COP$	ضریب عملکرد (%)
$E$	الکتریسیته (kW)
$FESR$	نسبت صرفه‌جویی در مصرف سوخت (%)
$H$	حرارت (kW)
$i$	نرخ بهره (%)
$In$	هزینه اولیه (\$/kW)
$NC$	ظرفیت نامی (kW)
$NPWB$	ارزش فعلی درآمدها (\$)
$NPWC$	ارزش فعلی هزینه‌ها (\$)
$m$	نرخ جرمی (kg/s)
$M$	هزینه تعمیر و نگهداری (\$/kWh)
$N$	تعداد کل تجهیزات سیستم
$n_j$	تعداد کل از هر تجهیز
$P$	فشار
$PB$	دوره بازگشت سرمایه (سال)
$PL$	بار جزئی (%)
$PM$	محرك اولیه
$RAB$	سود سالیانه نسبی (\$/year)
$S$	سناریو
$SV$	هزینه اسقاطی (\$/kW)
$T$	۸۷۶۰ ساعت
$W$	نرخ تبخیر سطحی
$Y$	گرمای نهان تبخیر
$\Omega$	فاکتور خرید و فروش (\$/kWh)

### علائم یونانی

نتایج سناریو امکان فروش الکتریسیته نشان می‌دهد که با انتخاب دو ظرفیت مشابه ۱۴۰ کیلووات برای موتورگازسوز به جای  $E_{opt1}=150$  و  $E_{opt2}=130$  کیلووات، دوره بازگشت سرمایه افزایش، اما سود سالیانه نسبی، نسبت کاهش انتشار آلاینده کربن دی‌اکسید و نسبت صرفه‌جویی در مصرف سوخت کاهش می‌یابند که علت این تغییرات را می‌توان عدم پوشش‌دهی مناسب منحنی‌های بار و مصرف سوخت بیشتر دانست. نتایج سناریو نبود امکان فروش الکتریسیته نشان می‌دهد که با انتخاب دو ظرفیت مشابه ۶۰ کیلووات برای موتورگازسوز به جای  $E_{opt}=120$  کیلووات، سود سالیانه نسبی کاهش، دوره بازگشت سرمایه، نسبت کاهش انتشار آلاینده کربن دی‌اکسید و نسبت صرفه‌جویی در مصرف سوخت افزایش می‌یابند که علت این تغییرات را می‌توان میزان گرمای دریافتی از واحدهای تولید توان دانست زیرا با افزایش محرک اولیه میزان گرمای دریافتی افزایش می‌یابد که این باعث پوشش‌دهی بیشتر منحنی‌های بار گرمایی (و در صورت اضافه بودن، بار سرمایشی)، صرفه‌جویی در مصرف سوخت و در نتیجه کاهش انتشار آلاینده کربن دی‌اکسید خواهد شد.

### ۱۱- نتیجه‌گیری

ایجاد شرایط مناسب برای افراد مستقر در محوطه استخر، تصفیه آب استخر و نیز تهویه هوای مجتمع‌های ورزشی نیازی دائمی و ضروری است که باید بطور همزمان مورد بررسی قرار بگیرند و این صرفاً با مصرف بالای انرژی و در نتیجه اتلافات بالای موتورخانه همراه است. در این مقاله با استفاده از سه تحلیل انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی به بهینه‌سازی ظرفیت نامی تجهیزات سیستم تولید همزمان برق، حرارت و برودت برای یک مجتمع ورزشی آبی پرداخته شده است. تعداد موتور گازسوز و ظرفیت نامی آن‌ها، بار جزئی، ظرفیت گرمایشی بویلر، ظرفیت سرمایشی چیلرهای الکتریکی و جذب پارامترهای طراحی بودند که در دو سناریوی امکان فروش الکتریسیته و  $S_S$  نبود امکان فروش آن  $S_{NS}$  با استفاده از سودسالیانه نسبی (RAB) و الگوریتم ژنتیک بهینه گردیدند. در انتها نحوه‌ی انتخاب ظرفیت نامی موتور گازسوز از نظر اقتصادی (RAB, PB) و صرفه‌جویی در مصرف سوخت (FESR) و زیست‌محیطی ( $CO_2$ ) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با استفاده از سیستم‌های تولید همزمان برق، حرارت و برودت به جای سیستم سنتی علاوه بر پوشش‌دهی کامل انرژی مورد نیاز، سودآوری مناسبی را می‌توان برای این مجتمع ایجاد کرد. به طوری که در هر دو سناریو، سود سالیانه نسبی مثبت بدست می‌آید. در حقیقت با انتخاب دو موتورگازسوز (با ظرفیت‌های  $E_1=130$  kW و  $E_2=150$  kW) در سناریوی امکان فروش الکتریسیته و یک موتورگازسوز (با ظرفیت  $E=120$  kW) در سناریوی نبود امکان فروش الکتریسیته می‌توان هزینه‌ها را به ترتیب در مدت  $8/2$  و  $10/6$  سال بازگشت داد.

از طرفی نتایج ارزیابی نحوه‌ی انتخاب ظرفیت‌های موتور گازسوز به عنوان محرک اولیه نشان داد که انتخاب محرک‌های اولیه با ظرفیت

## ۱۲- منابع

- |   |  |                   |
|---|--|-------------------|
|   | بازه زمانی   | $\tau$            |
| [1] F. Tavakoli Dastjerd, M. Tavakoli Dastjerd, S. Farahat, Investigated of the performance of CCHP system in reducing pollutants emission NOx, CO <sub>2</sub> and CO, in the 23rd annual international mechanical engineering conferenc, Tehran, IRAN, 2015(In Persian) | فاکتور جریمه انتشار آلاینده (\$/kg)                    | $\xi$             |
|   | ضریب استفان بولتزمن (w/m <sup>2</sup> k <sup>4</sup> ) | $\sigma$          |
|   | قابلیت انتشار از سطح آب                                | $\varepsilon$     |
|   |  | <b>زیرنویس‌ها</b> |
| [2] H. Hajabdollahi, A. Ganjehkaviri, J. Mohammad Nazri Mohd, Assessment of new operational strategy in optimization of CCHP plant for different climates using evolutionary algorithms, Applied Thermal Engineering, Vol. 75, pp. 468–480, 2015.                         | هوا  | <i>A</i>          |
|   | جذبی   | <i>ab</i>         |
|   | بوئیلر / خرید  | <i>B/b</i>        |
| [3] 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)  | مربوط به انتقال حرارت جابه‌جایی                        | <i>conv</i>       |
|   | تصفیه  | <i>clean</i>      |
|   | مورد نیاز  | <i>dem</i>        |
|   | کل مورد نیاز   | <i>dem,t</i>      |
| [4] Ashrae Handbook, Chapter S7, Cogeneration systems and engine and turbine drives, pp. 7-46, 1999   | الکتریکی   | <i>ele</i>        |
|   | خروجی  | <i>ex</i>         |
| [5] 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)        | زیست‌محیطی   | <i>env</i>        |
|   | سوخت گازی  | <i>f</i>          |
|   | مربوط به تغذیه تکمیلی                                  | <i>feed</i>       |
|   | زمین   | <i>ground</i>     |
|   | تولید شده  | <i>Gen</i>        |
| [6] S. Sanaye , M. A. Meybodi, S. Shokrollahi, Selecting the prime movers and nominal powers in combined heat and power systems, Apply Thermal Energy, Vol. 28, pp. 1177-1188, 2008   | آب خنک‌کن / شماره‌نده نوع تجهیز                        | <i>J</i>          |
|   | نوع آلاینده / عمر مفید تجهیزات                         | <i>K</i>          |
|   | روشنایی  | <i>light</i>      |
| [7] M. Ghafooryan, F. TavakoliDastjerd, M. H. ShafieMayam, Comparison three methods in designing CCHP system for an Industrial of case study, in the second National Application Researches in Electrical, Mechanical and Mechatronic Conference, Tehran, IRAN, 2015      | نامی   | <i>Nom</i>        |
|   | عدم امکان فروش الکتریسیته                              | <i>NS</i>         |
|   | روغن کاری  | <i>oil</i>        |
|   | نرخ جریان آب   | <i>Q</i>          |
|   | مربوط به انتقال حرارت تشعشع                            | <i>rad</i>        |
| [8] C. A. Gibson, M. A. Meybodi, M. Behnia, Optimisation and selection of a steam turbine for a large scale industrial CHP (combined heat and power) system under Australia's carbon price, Energy, Vol. 34, pp. 1-17, 2013   | مربوط به سقف یا کف                                     | <i>roof</i>       |
|   | فروش (امکان فروش الکتریسیته)                           | <i>S</i>          |
|   | مربوط به سطح   | <i>surface</i>    |
|   | سیستم سنتی   | <i>trad</i>       |
| [9] J-J. Wang, C-F Zhang, Y-Y. Jing, Multi-criteria analysis of combined cooling, heating and power systems in different climate zones in China, Applied Energy, Vol. 87, pp. 1247-1259, 2010 .   | سرعت حرکت هوا  | <i>V</i>          |
|   | انتقال حرارت ناشی از تبخیر                             | <i>vapor</i>      |
|   | مربوط به دیواره‌ها                                     | <i>Wall</i>       |
| [10] R. Hongbo, G. Weijun, Zh. Weisheng, N. Ken'ichi, Multi-criteria evaluation for the optimal adoption of distributed residential energy systems in Japan, Energy Policy, Vol. 37, pp. 5484-5493, 2009.   | مربوط به آب  | <i>Water</i>      |
| [11] M. Ebrahimi, A. Keshavarz, Sizing the prime mover  |  |                   |

- January 2015.
- [22] Price of electricity, [http://bahaye\\_bargh.tavanir.org.ir/](http://bahaye_bargh.tavanir.org.ir/) visited in 10 January 2015.
- [23] Price of fuel and electricity in worth, <http://www.eia.gov/> visited in 10 January 2015.
- [24] Price of Carriers of Energy, <http://www.eranico.com/> access in 10 January 2015.
- [25] M .M. Oskoonejad. Engineering Economy. 4th ed. Amirkabir University, Tehran, Iran, Amirkabir Publishing, pp. 179–417, 2007. (In Persian)
- [26] S. Sanaye, N. Khakpaay, Simultaneous use of MRM (maximum rectangle method) and optimization methods in determining nominal capacity of gas engines in CCHP (combined cooling, heating and power) systems, *Energy*, pp. 145-158, 2014
- [27] M. Carvalho, M.A. Lozano, L.M. Serra, V. Wohlgemuth. Modeling simple trigeneration systems for the distribution of environmental loads. *Environmental Modelling & Software* 30, pp. 71-80, 2012
- [28] K.K. Humpherys, project and cost engineers' HandBook, Marcel Dekker, New York, pp. 1–60, 2005.
- [29] A. Mostafaeipour., B. Bardel., K. Mohammadi., A. Sedaghat., Y. Dinpashoh, Economic evaluation for cooling and ventilation of medicine storage warehouses utilizing wind catchers, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38, pp. 12-19, 2014.
- [30] 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. 99, No. 9, pp. 9-99, 2015 (In Persian)
- [31] 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, pp. 283-289, 2012
- [32] P. Ahmadi, I. Dincer, Exergoenvironmental analysis and optimization of a cogeneration plant system using Multimodal Genetic Algorithm (MGA), *Energy* , doi,10.1016/j.energy.2010.07.050, 2010
- of a residential microcombined cooling heating and power (CCHP) system by multi-criteria sizing method for different climates. *Energy*, Vol. 54, pp. 291–301, 2013.
- [12] M. Ebrahimi, A. Keshavarz, Prime mover selection for a residential micro-CCHP by using two multi-criteria decision-making methods. *Energy Build*, Vol. 55, pp. 322–31, 2012.
- [13] W. Qiong, R. a. Hongbo, G. b. Weijun, R. Jianxing, Multi-criteria assessment of combined cooling, heating and power systems located in different regions in Japan, *Applied Thermal Engineering*, doi,10.1016/j.applthermaleng.2014.08.020.
- [14] M. Maerefat, P. Shafie, Multi-criteria evaluation of CCHP system under different operating strategies for an office building in Tehran using AHP method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 8, pp. 37-48, 2014. (In Persian).
- [15] P. Ahmadi, A. Almasi, I. Dincer, Multi Objective exergoenvironmental Optimization of a Combined Heat and Power (CHP) System in a Paper Mill using Evolutionary Algorithm. *International Journal of Energy Research (IJER)*, Vol. 1, pp. 46-63, 2012.
- [16] T. T. Chow, et al. Analysis of a solar assisted heat pump system for indoor swimming pool water and space heating, *Applied Energy*, Vol. 100, pp. 309–317, 2012.
- [17] M Liu, Y. Shi, F. Fang, A new operation strategy for CCHP systems with hybrid chillers, *Applied Energy* Vol. 95, pp. 164–173, 2012.
- [18] J. Woolley, et al. Swimming pools as heat sinks for air conditioners, Model design and experimental validation for natural thermal behavior of the pool. *Building and Environment*, Vol. 46, pp. 187-195, 2011.
- [19] S. Sanaye, H. Hajabdollahi, 4E analysis and Multi-objective optimization of CCHP using MOPSOA, *Proceedings of the institution of Mechanical Engineers, Part E*, Vol. 228, No. 1, pp. 43–60, 2014.
- [20] Catalogue of CHP Technologies, US Environmental Protection Agency, February, pp. 1-33, 2014
- [21] Price of Fuel, <http://www.nigc-mpgc.ir/> visited in 10