

## تعیین سائز و استخراج الگوی بهره‌برداری بهینه یک سیستم CCHP از منظر اقتصادی برای یک پردیس مسکونی واقع در شهر اهواز

در سال‌های اخیر به دلایل متعددی از جمله افزایش قیمت حامل‌های انرژی، کاهش منابع سوخت‌های فسیلی، افزایش نگرانی‌ها بابت گرمایش جهانی کره زمین، و ... سیستم‌های تولید انرژی سه‌گانه به یک گزینه جذاب برای تامین تقاضای انرژی مصرف‌کنندگان تبدیل شده است. از این رو در این مقاله پس از معرفی این سیستم‌ها یک رویه مناسب جهت طراحی سیستم‌های تولید انرژی سه‌گانه به منظور بکارگیری در مناطق گرمسیری و استخراج الگوی بهره‌برداری بهینه از آن‌ها ارائه شده است. در بخش مطالعات عددی رویه ارائه شده جهت تعیین اندازه بهینه ادوات یک سیستم تولید انرژی سه‌گانه در یک پردیس مسکونی واقع در کلان شهر اهواز با شرایط آب و هوایی غالباً گرم بکار گرفته شده است و الگوی بهره‌برداری بهینه آن با در نظر گرفتن امکان فروش انرژی الکتریکی به شبکه سراسری برق استخراج شده است. مطالعه صورت گرفته در برنامه *MATLAB* کدنویسی شده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده است و نتایج مربوط به آن در قالب یک آنالیز اقتصادی محور بدست آمده است.

سیدمحمدجواد آل محمد<sup>۱</sup>

دانشجوی کارشناسی ارشد

سمیه یعقوبی<sup>۲</sup>

استادیار

سیدحمیدرضا آل محمد<sup>۳</sup>

مربی

واژه‌های راهنما: سیستم تولید انرژی سه‌گانه، تولید ترکیبی برق، گرمایش و سرمایش، واحد تولیدکننده توان الکتریکی، بازیابی حرارت

### ۱- مقدمه

امروزه استفاده از سیستم‌های تولید انرژی سه‌گانه<sup>۳</sup> یا ترکیب سرمایش گرمایش و برق (CCHP)<sup>۴</sup> یک راه حل عملی جهت افزایش راندمان سیستم‌های تولید انرژی است که توسط مهندسين در حوزه انرژی معرفی شده است. در سیستم تولید انرژی سه‌گانه هر سه تقاضای سرمایشی، گرمایشی و الکتریکی توسط یک واحد تولید کننده توان (PGU)<sup>۵</sup> و از طریق یک منبع سوخت منفرد تأمین می‌گردد.

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

smj.alemohammad@yahoo.com

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مکانیک واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد s.yaghoubi@pmc.iaun.ac.ir

<sup>۳</sup> مربی، گروه برق دانشکده مهندسی موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی shm.alemohammad@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۶/۰۱، تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۲/۱۹

<sup>۳</sup> Trigeneration

<sup>۴</sup> Combined Cooling, Heating and Power

<sup>۵</sup> Power Generation Unit

واحد تولیدکننده توان در واقع مجموعه محرک اولیه<sup>۱</sup> و ژنراتور است که در انواع متداولی همچون توربین‌های گازی، موتورهای احتراق داخلی و غیره موجود می‌باشند. در سیستم‌های CCHP واحد PGU با مصرف سوخت به تولید انرژی الکتریکی می‌پردازد، که این رویه با تولید حرارت همراه است. در سیستم‌های سنتی این حرارت تولید شده اتلاف می‌گردد و عموماً وارد محیط زیست می‌شود. حال آنکه در سیستم‌های CCHP در کنار تولید انرژی الکتریکی، حرارت اتلافی بازیابی و احیا شده و نیرویی تازه می‌یابد که می‌تواند تقاضاهای گرمایشی و سرمایشی را برآورده کند. حرارت ایجاد شده در فرایند تولید انرژی الکتریکی، پس از بازیابی توسط تجهیزات مناسب، کیفیت لازم برای به کارگیری در ادوات گرماساز مانند کویل حرارتی جهت تأمین تقاضای گرمایشی و یا تجهیزات گرماساز مانند چیلر جذبی جهت مرتفع نمودن تقاضای سرمایشی (و یا هردو) مورد استفاده قرار می‌گیرد. نکته حائز اهمیت در این روش، بکارگیری یک منبع سوخت مشترک برای تأمین سه نوع از تقاضا و در نتیجه صرفه جویی قابل ملاحظه در مصرف سوخت و کاهش میزان آلاینده‌گی‌ها در کنار کاهش چشمگیر هزینه‌های بهره‌برداری می‌باشد. واحد تولیدکننده توان در سیستم‌های CCHP از یک محرک اولیه و یک ژنراتور تشکیل شده است. انواع متداول محرک‌های اولیه شامل توربین‌های گازی، میکروتوربین‌ها، توربین‌های بخار، واحدهای سیکل ترکیبی، و موتورهای احتراق داخلی می‌باشند.

از طرفی پیل‌های سوختی و موتورهای استرلینگ ادوات نوظهوری هستند که می‌توانند به عنوان واحد تولیدکننده توان در سیستم‌های CCHP بکار گرفته شوند [۱]. از این رو در مطالعات مختلف صورت گرفته شده در زمینه بکارگیری این سیستم‌های تولید انرژی، تنوع گسترده‌ای در نوع واحد تولیدکننده توان بکار گرفته شده وجود دارد. به طور نمونه در مرجع [۲] یک سیستم انرژی CCHP مبتنی بر توربین گازی جهت تأمین تقاضاهای انرژی یک مجتمع مسکونی در شهر تهران مورد بررسی قرار گرفته است و دو راهبرد دستیابی به حداکثر میزان تولید انرژی الکتریکی در حالت دنبال‌کننده بار حرارتی و کمینه‌سازی مصرف سوخت را مورد ارزیابی قرار داده است. همچنین در مرجع [۳] مدل‌سازی ترمودینامیکی یک سیستم تولید انرژی CCHP بر پایه توربین گازی همراه با ارزیابی زیست محیطی صورت گرفته است که نمونه‌ای از مطالعاتی است که واحد تولیدکننده توان از نوع توربین گازی بوده است. از طرفی در مرجع [۴] بهینه‌سازی یک سیستم سگانه مبتنی بر توربین گازی از منظر اکسرژی و اقتصادی صورت گرفته است که نتیجه آن دستیابی به یک راهکار مناسب جهت انتخاب مناسب‌ترین تجهیزات برای سیستم مفروض بوده است. قابل ذکر است که مطالعات صورت گرفته در حوزه سیستم‌های تولید انرژی در دو بخش برنامه‌ریزی<sup>۲</sup> و بهره‌برداری<sup>۳</sup> قابل دسته‌بندی هستند. در بخش برنامه‌ریزی تمرکز مطالعات بر تعیین نوع و اندازه بهینه تجهیزات مختلفی است که در سیستم مربوطه بکار می‌روند. از طرفی مطالعات صورت گرفته در حوزه بهره‌برداری از سیستم‌های تولید انرژی، به تعیین شیوه و استراتژی بهره‌برداری هر یک از تجهیزات موجود در مجموعه و یا به عبارتی دیگر تعیین نقطه کار بهینه آن‌ها در افق زمانی مورد نظر می‌پردازد [۵، ۶].

<sup>1</sup> Prime Mover

<sup>2</sup> Planning

<sup>3</sup> Operation

همچنین مطالعات صورت گرفته بر روی سیستم‌های CCHP در حوزه بهره‌برداری، شیوه‌های مختلف بهره‌برداری شامل بهره‌برداری به صورت دنبال‌کننده بار الکتریکی (ELF<sup>۱</sup>)، بهره‌برداری به صورت دنبال‌کننده بار حرارتی (TLF<sup>۲</sup>)، و بهره‌برداری مبتنی بر بهینه‌سازی را ارزیابی کرده‌اند [۷، ۸]

## ۲- رویه پیشنهادی طراحی سیستم CCHP مورد مطالعه

### ۲-۱- طراحی سیستم‌های تولید انرژی بر مبنای مجموع هزینه‌های سالانه

یکی از معیارهای اقتصادی که در سیستم‌های تولید انرژی بکار گرفته می‌شود، ارزیابی مجموع هزینه‌های سالانه (ATC) می‌باشد. در یک سیستم انرژی، مجموع هزینه‌های سالانه از سه بخش هزینه‌های سرمایه‌گذاری ( $C_{INV}$ )، هزینه‌های بهره‌برداری ( $C_{OP}$ ) و هزینه‌های تعمیر و نگهداری ( $C_{MAN}$ ) تشکیل می‌گردد [۹]:

$$C_{ATC} = C_{INV} + C_{OP} + C_{MAN} \quad (۱)$$

منظور از هزینه بهره‌برداری در این سیستم‌ها، هزینه پرداختی بابت حامل‌های انرژی یعنی خرید گاز طبیعی از شبکه گاز و انرژی الکتریکی از شبکه سراسری برق می‌باشد:

$$C_{OP} = \sum_m \sum_d \sum_h (C_F \cdot F_{Pur,m,d,h} + C_E \cdot E_{Pur,m,d,h}) \quad (۲)$$

در این رابطه  $F_{Pur}$  و  $E_{Pur}$  به ترتیب میزان گاز طبیعی و انرژی الکتریکی خریداری شده، و  $C_F$  و  $C_E$  نیز هزینه خرید یک کیلووات ساعت گاز طبیعی و یک کیلووات ساعت الکتریسیته می‌باشد. لازم به ذکر است که مطابق با مرجع [۱۰] انرژی حرارتی هر یک متر مکعب گاز طبیعی تقریباً معادل ۱۰ کیلو وات ساعت می‌باشد. همچنین اندیس‌های  $h$ ،  $d$  و  $m$  به ترتیب نشان‌دهنده ساعت، روز و ماه می‌باشند. از طرفی هزینه سرمایه‌گذاری سیستم ( $C_{INV}$ )، برابر مجموع هزینه خرید ادوات مختلف سیستم با در نظر گرفتن نرخ تورم در طول عمر پروژه می‌باشد که از رابطه (۳) بدست می‌آید:

$$C_{INV} = R \times \sum_i C_{cap,i} \cdot P_{Max,i} \quad (۳)$$

در این رابطه  $P_{Max,i}$  بیانگر ظرفیت نامی تجهیز  $i$ ،  $C_{cap,i}$  هزینه سرمایه‌گذاری یک واحد از تجهیز  $i$ ، و  $R$  ضریب بازبازی است که یک معیار اقتصادی برای در نظر گرفتن نرخ تورم در طول عمر پروژه می‌باشد و برابر است با [۹]:

$$R = \frac{r \cdot (1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (۴)$$

که در این رابطه  $r$  نرخ بهره و  $n$  طول عمر پروژه می‌باشد.

همچنین هزینه تعمیر و نگهداری ( $C_{MAN}$ ) یک سیستم انرژی مطابق با رابطه (۵) در نظر گرفته می‌شود:

$$C_{MAN} = C_i \cdot \sum_i \sum_m \sum_d \sum_h O_{Gen,m,d,h}^i \quad (۵)$$

در رابطه فوق  $O_{Gen,m,d,h}^i$  بیانگر میزان تولید انرژی تجهیز  $i$  و  $C_i$  هزینه تعمیر و نگهداری آن به ازاء تولید یک واحد انرژی است.

<sup>۱</sup> Electrical Load Following

<sup>۲</sup> Thermal Load Following

در این پژوهش طراحی سیستم CCHP مورد نظر از طریق تعریف یک مسأله بهینه‌سازی صورت می‌گیرد. در مسأله بهینه‌سازی مربوطه تابع هدف کاهش حداکثری مجموع هزینه سالانه سیستم CCHP مورد مطالعه نسبت به یک سیستم مستقل HVAC می‌باشد. این تابع هدف به صورت رابطه (۶) تعریف می‌گردد:

$$O.F = \min\left\{\frac{C\_ATC_{CCHP} - C\_ATC_{HVAC}}{C\_ATC_{HVAC}}\right\} \quad (6)$$

جهت محاسبه تابع هدف فوق می‌بایست مجموع هزینه سالیانه یعنی رابطه (۱) در هر دو سیستم HVAC و CCHP محاسبه گردند. در ادامه رویه محاسبه این هزینه‌ها بیان شده است.

## ۲-۱-۱-۲- مجموع هزینه‌های سالیانه در سیستم HVAC

### الف. هزینه بهره‌برداری

در سیستم مجزای تولید انرژی، تمامی انرژی الکتریکی مورد نیاز از شبکه سراسری برق فراهم می‌شود. میزان انرژی الکتریکی خریداری شده در این سیستم مطابق با رابطه (۷) تعیین می‌گردد:

$$E_{grid,t}^{HVAC} = E_{demand,t} + E_{ec,t} \quad \forall t \in T \quad (7)$$

در این رابطه  $E_{grid,t}^{HVAC}$  مجموع انرژی الکتریکی خریداری شده از شبکه،  $E_{demand,t}$  تقاضای انرژی الکتریکی مورد نیاز ساختمان در لحظه  $t$ ،  $E_{ec,t}$  انرژی الکتریکی مصرفی چیلر الکتریکی در لحظه  $t$  و  $T$  بازه زمانی مورد مطالعه می‌باشد. از طرفی در سیستم مجزای تولید انرژی فرض می‌شود که تمام تقاضای سرمایشی ساختمان توسط چیلر الکتریکی برآورده می‌شود. انرژی الکتریکی مصرفی چیلر الکتریکی مطابق با رابطه (۸) تعیین می‌گردد:

$$E_{ec,t} = \frac{C_{demand,t}}{cop_{ec}} \quad \forall t \in T \quad (8)$$

در رابطه فوق  $C_{demand,t}$  انرژی حرارتی مورد نیاز برای ایجاد برودت در فضای ساختمان و  $cop_{ec}$  ضریب عملکرد چیلر الکتریکی مورد استفاده در این سیستم است.

همچنین در سیستم مجزای تولید انرژی، سوخت مصرفی متناظر با نقطه کار بویلر است. بویلر در این سیستم وظیفه فراهم‌سازی انرژی حرارتی مورد نیاز کویل حرارتی جهت برآورده کردن تقاضای گرمایشی را بر عهده دارد. بنابراین سوخت مصرفی سیستم برابر با نسبت انرژی حرارتی تولیدی بویلر ( $Q_{boiler,t}$ ) به راندمان آن ( $\eta_b$ ) خواهد بود که در رابطه (۹) نشان داده شده است. از طرفی انرژی حرارتی تولیدی بویلر خود برابر با نسبت تقاضای گرمایشی مشترک (شامل گرمایش فضا و آب گرم) به راندمان کویل حرارتی ( $\eta_{hx}$ ) است. بنابراین سوخت مصرفی در سیستم HVAC برابر است با:

$$F_{grid,t}^{HVAC} = \frac{Q_{boiler,t}}{\eta_b} = \frac{H_{demand,t}}{\eta_b \times \eta_{hx}} \quad \forall t \in T \quad (9)$$

از این رو با جایگذاری رابطه (۷) و (۹) در رابطه (۲) هزینه بهره‌برداری این سیستم قابل محاسبه خواهد بود.

### ب. هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه تعمیر و نگهداری

نقطه کار چیلر الکتریکی، کویل حرارتی و بویلر در زمان‌های مختلف با استفاده از روابط (۸) و (۹)، تعیین می‌گردند. با توجه به نقطه کار هر یک از این ادوات، هزینه تعمیر و نگهداری آن‌ها مطابق با رابطه (۵) بدست

می‌آید. از طرفی در این مقاله ظرفیت مناسب برای هریک از تجهیزات مذکور، بزرگترین نقطه کار آن‌ها در طول بازه زمانی مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. از این رو کافی است بیشینه نقطه کار هر تجهیز در طول بازه زمانی مورد مطالعه تعیین شود.

#### ۲-۱-۲- مجموع هزینه‌های سالیانه در سیستم CCHP

همانطور که پیش‌تر اشاره شد، سائز ادوات سیستم CCHP در قالب یک مسأله بهینه‌سازی به گونه‌ای تعیین می‌شود که مجموع هزینه‌های سالانه آن نسبت به مجموع هزینه‌های سالانه یک سیستم HVAC کمینه گردد. از طرفی دیده می‌شود که مجموع هزینه‌های سالیانه، سه هزینه مختلف را در بر دارد که در سیستم CCHP این سه هزینه به شیوه و استراتژی بهره‌برداری سیستم وابسته هستند. لذا قبل از محاسبه مجموع هزینه‌های سالیانه در یک سیستم CCHP، ابتدا می‌بایست استراتژی بهره‌برداری آن سیستم تعیین شود. در این مقاله دو استراتژی متفاوت جهت بهره‌برداری از سیستم CCHP مورد مطالعه معرفی می‌گردد. استراتژی بهره‌برداری اول جهت تعیین سائز ادوات سیستم از طریق معیار مجموع هزینه‌های کل سیستم در مرحله طراحی، و استراتژی بهره‌برداری دوم جهت تعیین نقطه کار بهینه ادوات مختلف سیستم در مرحله بهره‌برداری بکار گرفته می‌شوند. در ادامه این دو استراتژی تشریح شده‌اند.

#### ۲-۱-۲-۱- استراتژی بهره‌برداری در مرحله طراحی سیستم

در طراحی سیستم CCHP در منطقه مورد مطالعه، کاهش حداکثری هزینه‌های بهره‌برداری سیستم مد نظر می‌باشد و درآمد ناشی از فروش انرژی الکتریکی به شبکه سراسری برق، در اولویت نیست. از این رو هدف اول بهره‌برداران سیستم در تعیین سائز واحد تولیدکننده توان (PGU)، برآورده‌سازی تمام تقاضای انرژی الکتریکی توسط این واحد می‌باشد. علت این امر هزینه بالاتر خرید انرژی الکتریکی از شبکه سراسری برق نسبت به خرید گاز طبیعی از شبکه گاز می‌باشد و همین مسأله موجب کاهش هزینه‌های بهره‌برداری سیستم می‌گردد. شایان ذکر است، در صورتی که امکان فروش انرژی الکتریکی در بخش طراحی سیستم در نظر گرفته شود، پاسخ مسأله بهینه‌سازی به سمت انتخاب واحد PGU با سائز بزرگتر خواهد رفت که این مسأله منجر به تحمیل هزینه‌های سرمایه‌گذاری بیشتر می‌گردد و این موضوع مد نظر این پژوهش نمی‌باشد. لذا در مرحله طراحی امکان فروش انرژی الکتریکی به شبکه برق در نظر گرفته نشده است. از طرفی با توجه به اهمیت بار سرمایشی در منطقه مورد مطالعه، تأمین تقاضای برودتی از طریق حرارت بازیابی شده توسط واحد PGU، اولویت بالاتری نسبت به تأمین تقاضای گرمایشی از طریق این حرارت دارد. گفتنی است، در این پژوهش با توجه به ویژگی‌های توربین گازی که و انطباق آن با شرایط اقلیمی استان خوزستان از آن به عنوان محرک اولیه برای سیستم تولید انرژی CCHP مورد نظر استفاده شده است. شکل (۱) استراتژی بهره‌برداری پیشنهادی در مرحله طراحی سیستم را نشان می‌دهد. این استراتژی در هر تکرار از فرایند جست و جوی پاسخ مسأله بهینه‌سازی بکار گرفته می‌شود. همان طور که در شکل دیده می‌شود، در تکرار I ام مسأله بهینه‌سازی، ابتدا ظرفیت واحد PGU که برای این مرحله در نظر گرفته شده است (C<sub>PGU,I</sub>)، به عنوان تنها متغیر مستقل مسأله قرائت می‌گردد. سپس الگوریتم ارائه شده برای تمامی لحظات در طول زمانی مورد مطالعه ارزیابی می‌شود.

شایان ذکر است که در این شکل،  $E_{demand,t}$  تقاضای انرژی الکتریکی سیستم،  $E_{PGU,t}$  نقطه کار الکتریکی واحد PGU،  $F_{PGU,t}$  سوخت مصرفی واحد PGU،  $Q_{rec,t}$  حرارت بازیابی شده،  $Q_{C,t}$  حرارت مورد نیاز جهت تأمین تقاضای برودتی توسط چیلر جذبی،  $Q_{ac,t}$  حرارت مصرفی توسط چیلر جذبی،  $E_{ec,t}$  انرژی الکتریکی مصرفی توسط چیلر الکتریکی،  $Q_{H,t}$  حرارت مورد نیاز جهت تأمین تقاضای گرمایشی توسط کویل حرارتی،  $Q_{boiler,t}$  حرارت تولیدی توسط بویلر،  $\dot{C}_{demand,t}$  میزان تقاضای سرمایشی که توسط چیلر الکتریکی تأمین می‌شود و  $cop_{ec}$  ضریب عملکرد چیلر الکتریکی در لحظه  $t$  می‌باشند. همچنین با استفاده از روابط (۱۰) تا (۱۳)، مقادیر  $Q_{C,t}$ ،  $Q_{H,t}$ ،  $\dot{C}_{demand,t}$  و پارامتر کنترلی  $\tau$  بدست می‌آید. پارامتر  $\tau$  جهت جلوگیری از عملکرد واحد محرک اولیه، با راندمان پایین در وضعیت بارگیری کم در نظر گرفته می‌شود. در واقع این پارامتر، وضعیت روشن و یا خاموش بودن واحد PGU را تعیین می‌کند [۹].  
در این پژوهش ضریب  $\tau$  برابر ۰/۲۵ در نظر گرفته می‌شود [۱۱].

$$\dot{C}_{demand,t} = C_{demand,t} - Q_{rec,t} \times cop_{ac} \quad (10)$$

$$Q_{C,t} = \frac{C_{demand,t}}{cop_{ac}} \quad (11)$$

$$Q_{H,t} = \frac{H_{demand,t}}{\eta_{hx}} \quad (12)$$

$$\tau = \frac{E_{demand,t}}{C_{PGU,I}} \quad (13)$$

قابل ذکر است که،  $cop_{ac}$  در رابطه (۱۱) ضریب عملکرد چیلر جذبی می‌باشد. از طرفی سوخت مصرفی توسط واحد PGU مطابق با رابطه (۱۴) محاسبه می‌گردد:

$$F_{PGU,t} = \frac{E_{PGU,t}}{\eta_{e,t}} \quad (14)$$

در این رابطه  $\eta_{e,t}$  راندمان تبدیل سوخت به انرژی الکتریکی در واحد PGU است و از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۲]:

$$\eta_{e,t} = (a_0 + a_1 L_{load,t} + a_2 L_{load,t}^2 + a_3 L_{load,t}^3) \cdot \eta_{nome} \quad (15)$$

که  $\eta_{nome}$  راندمان واحد PGU در بار کامل است و  $L_{load,t}$  میزان بارگیری از واحد PGU در لحظه  $t$  است و از رابطه (۱۶) محاسبه می‌گردد:

$$L_{load,t} = \frac{E_{PGU,t}}{C_{PGU,I}} \quad (16)$$

همچنین ضرایب  $a_0$  تا  $a_3$  در معادله (۱۵)، بسته به نوع محرک اولیه اعداد ثابتی هستند که از کاتالوگ شرکت سازنده محرک اولیه قابل استخراج می‌باشند. همان طور که ذکر گردید، در این مقاله محرک اولیه از نوع توربین گازی در نظر گرفته شده است. راندمان الکتریکی این نوع از محرک اولیه در بار کامل مطابق رابطه (۱۷) است [۱۲]:

$$\eta_{nome} = 0.04049 \cdot \ln(C_{PGU,I}) - 0.0687 \quad (17)$$

حرارت بازیابی شده از محرک اولیه ( $Q_{rec,t}$ ) نیز از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود:

$$Q_{rec,t} = \frac{E_{PGU,t}}{\eta_{e,t}} \cdot \eta_{th} \quad \forall t \in T \quad (18)$$

که  $\eta_{th}$  راندمان حرارتی است و در محرک اولیه با توربین گازی برابر است با [۱۲]:

$$\eta_{th} = -0.025 \cdot \ln(C_{PGU,t}) + 0.64 \quad (19)$$

ذکر این نکته اساسی است که روابط (۱۷) و (۱۹) برای محرک اولیه از نوع توربین گازی در محدوده ۱۰۰۰۰-۱۰۰۰ کیلووات برقرار است و با استفاده از مطالعات صورت گرفته شده در مرجع [۱۲] بدست آمده است.

$$E_{grid,t}^{CCHP} = (E_{demand,t} + E_{ec,t}) - E_{PGU,t} \quad \forall t \in T \quad (20)$$

حال با توجه به مشخص شدن استراتژی بهره‌برداری در مرحله طراحی سیستم، می‌توان علاوه بر هزینه‌های بهره‌برداری، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و هزینه‌های تعمیر و نگهداری سیستم را مطابق با رویه بیان شده در بخش ۲.۱.۱ محاسبه نمود که به دنبال آن شاخص مجموع هزینه‌های بهره‌برداری سالیانه قابل محاسبه می‌باشد. به این طریق با حل مسأله بهینه‌سازی مذکور، ساینز ادوات مختلف بکار گرفته شده در سیستم CCHP مورد مطالعه به گونه‌ای محاسبه می‌گردد که تابع هدف (۶) کمینه شود.

### ۳- رویه پیشنهادی بهره‌برداری از سیستم CCHP مورد مطالعه

پس از تعیین ساینز مناسب ادوات مختلف در سیستم CCHP مورد مطالعه، می‌بایست نقطه کار بهینه بهره‌براری هر یک از اجزاء تعیین گردد که این مهم از طریق حل یک مسأله بهینه‌سازی بدست خواهد آمد. در این مرحله به منظور استفاده حداکثری از ظرفیت تولیدی سیستم انرژی طراحی شده، امکان فروش انرژی الکتریکی به شبکه سراسری برق در نظر گرفته می‌شود. از این رو تابع هدف در مسأله بهینه‌سازی مورد مطالعه، بیشینه‌سازی سود ناشی از بهره‌برداری مجموعه در نظر گرفته شده است.

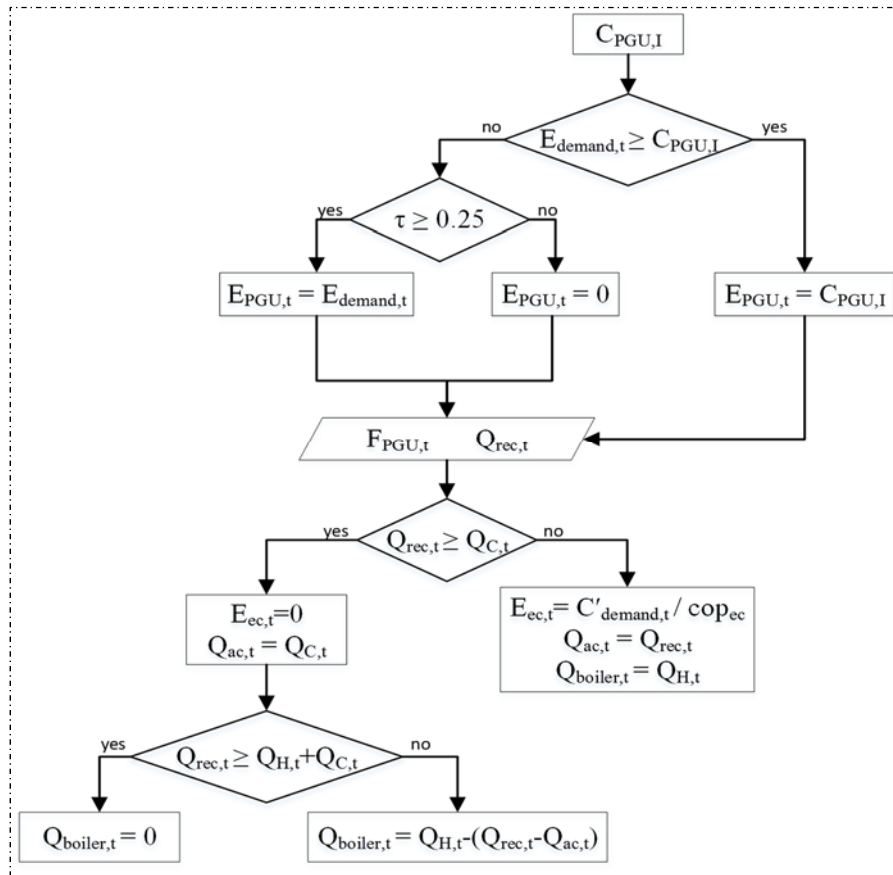
از این رو تابع هدف مسأله بهینه‌سازی مذکور مطابق با رابطه زیر در بازه زمانی ۲۴ ساعته تعریف می‌گردد:

$$O.F = \min \{ \sum_{h=1}^{24} (C_F \cdot F_{Pur,h} + [C_E \cdot E_{Pur,h}] \cdot u - [C_E \cdot E_{Set,h}] \cdot u') + \sum_{h=1}^{24} C_i \cdot O_{Gen,h}^i \} \quad (21)$$

که در این رابطه  $E_{Pur,h}$  و  $F_{Pur,h}$  به ترتیب انرژی الکتریکی و گاز خریداری شده از شبکه،  $E_{Set,h}$  انرژی الکتریکی فروخته شده به شبکه در ساعت  $h$  می‌باشد.

همچنین  $u_h$  و  $u'_h$  پارامترهای کنترلی هستند که از خرید و فروش همزمان برق جلوگیری می‌کنند. علاوه بر این، عبارت دوم در رابطه (۲۱) بیانگر هزینه تعمیر و نگهداری سیستم در طول ۲۴ ساعت می‌باشد.

در این مسأله متغیرهای مستقل نقطه کار واحد PGU در هر ساعت، میزانی از تقاضای سرمایه‌اشی (برحسب درصد) که توسط چیلر الکتریکی ( $C_{ec,t}$ )، و میزانی از تقاضای سرمایه‌اشی (برحسب درصد) که توسط چیلر جذبی در هر ساعت تامین می‌گردد ( $C_{ac,t}$ ).



شکل ۱- استراتژی بهره‌برداری پیشنهادی در مرحله طراحی سیستم CCHP نمونه.

همچنین قیود زیر نیز باید در هر ساعت برقرار باشند:

$$C_{ec,t} + C_{ac,t} = 100\% \quad (22)$$

$$E_{grid,t}^{CCHP} = E_{demand,t} + E_{ec,t} - E_{PGU,t} \quad (23)$$

$$E_{ec,t} = \frac{C_{ec,t} \times C_{demand,t}}{cop_{ec}} \quad (24)$$

$$Q_{boiler,t} = (Q_{ac,t} + Q_{hx}) - Q_{rec,t} \quad (25)$$

$$Q_{ac,t} = \frac{C_{ac,t} \times C_{demand,t}}{cop_{ac}} \quad (26)$$

$$Q_{hx} = \frac{H_{demand,t}}{\eta_{hx}} \quad (27)$$

$$F_{grid,t}^{CCHP} = \frac{Q_{boiler,t}}{\eta_b} + \frac{E_{PGU,t}}{\eta_{et}} \quad (28)$$

$$u_h + u'_h = 1 \quad u_h, u'_h \in \{0,1\} \quad (29)$$

در ادامه پیاده‌سازی رویه پیشنهادی در یک مجتمع مسکونی واقع در شهر اهواز شبیه‌سازی و نتایج آن بیان گردیده است.



## ۴- نتایج عددی

### ۴-۱- اطلاعات سیستم مورد مطالعه

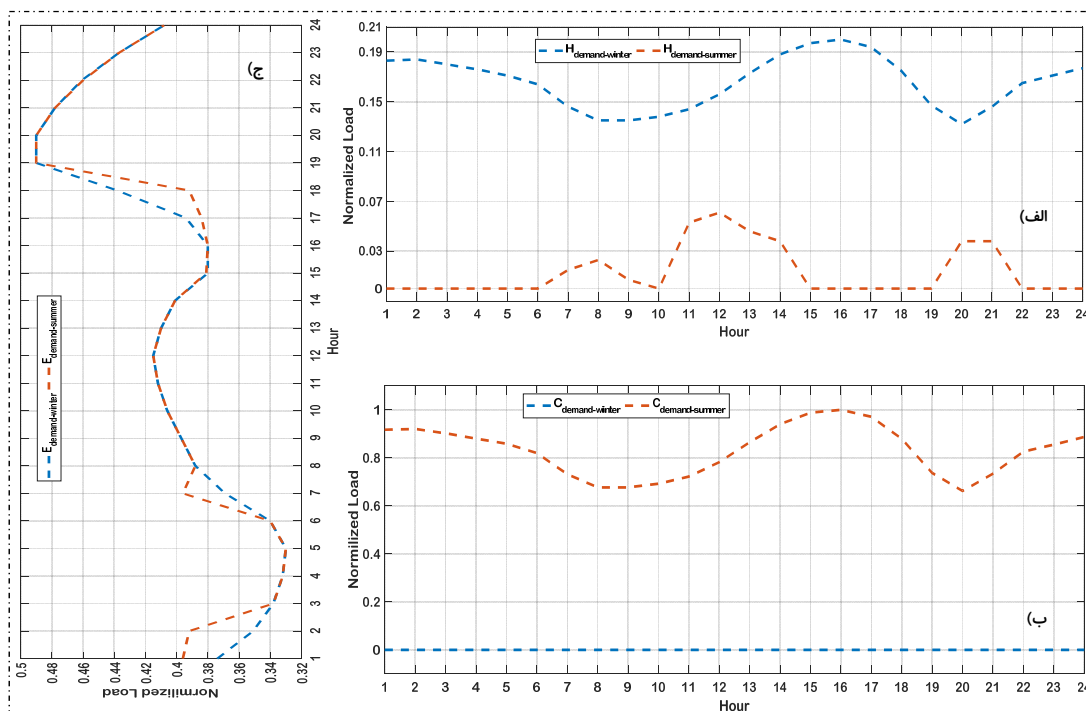
پردیس مسکونی مد نظر در این مطالعه شامل ۱۵ بلوک ۷ طبقه است که مساحت هر طبقه برابر ۱۰۰۰ متر مربع و مساحت کل ۱۰۵۰۰۰ متر مربع می‌باشد. در شکل (۲)، الگوی تغییرات تقاضاهای انرژی شامل تقاضای گرمایشی و سرمایشی، و همچنین تقاضای الکتریکی این پردیس مسکونی برای یک روز متداول، به عنوان نمونه‌ای از الگوی بار در دو فصل گرم و سرد نشان داده شده است. شایان ذکر است که این منحنی‌ها به صورت نرمالیزه شده (در مبنای واحد) نسبت به بیشینه بار سرمایشی در فصل گرم ارائه شده‌اند.

مقدار بیشینه تقاضاهای انرژی سرمایشی، گرمایشی و الکتریکی در طول سال به ترتیب برابر با ۶۵۰۰، ۳۹۲۰ و ۳۲۰۰ کیلووات می‌باشد. در ادامه جهت ارزیابی توابع هدف مورد نظر، متغیرهای مورد نیاز برای مدل‌سازی سیستم مرجع (HVAC) و سیستم CCHP در جدول (۱) آورده شده‌اند. مقادیر داده شده بیانگر مقدار متعارف برای هر یک از تجهیزات می‌باشد [۱۲، ۱۳، ۱۴]. همچنین قیمت‌های واحد تجهیزات و هزینه‌های حامل‌های انرژی مطابق با جداول (۴) و (۵) در نظر گرفته شده‌اند. لازم به ذکر است که قیمت تجهیزات بر اساس مرجع [۱۵] در نظر گرفته شده است و این مقادیر از واحد پول کشور چین مطابق با ارزش روز یووان به تومان تبدیل شده است. علاوه بر این هزینه سرمایه‌گذاری واحد PGU مطابق با روش بیان شده در مرجع [۱۲] از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$C_{cap}(PGU) = -108.8 \cdot \ln(C_{PGU}) + 1953 \quad (30)$$

گفتنی است قیمت انرژی الکتریکی بر اساس تعرفه خانگی اعلام شده توسط وزارت نیرو برای مناطق گرمسیر به ازای مصرف در ساعات اوج بار شبکه در فصل گرم (از ساعت ۱۳ الی ۱۶ و ۲۰ الی ۲۴) ۲۵٪ گران‌تر از قیمت پایه بوده و یا به عبارتی به مصرف انرژی در این ساعات جریمه تعلق می‌گیرد، و همچنین به ازای مصرف انرژی در ساعات کم باری شبکه (ساعت ۱ الی ۸) قیمت انرژی ۱۴٪ کمتر از قیمت پایه محاسبه می‌گردد. همچنین برای فصل سرد نیز به ازای ساعات اوج بار (ساعت ۱۹ الی ۲۴) هزینه انرژی ۳۰٪ گران‌تر از قیمت پایه و در ساعات کم باری (ساعت ۱ الی ۸) ۱۷٪ ارزانتر از قیمت پایه می‌باشد [۱۶]. در این قسمت نتایج عددی حاصل از اجرای رویه ارائه شده در بخش‌های ۲ و ۳ برای پردیس مسکونی مذکور، جهت بیشینه‌سازی توابع هدف مطرح شده، یعنی افزایش حداکثری نرخ صرفه‌جویی در هزینه کل سالانه در بخش طراحی، و سود ناشی از بهره‌برداری سیستم CCHP در بخش بهره‌برداری ارائه شده است.

قابل ذکر است که، سیستم مورد مطالعه در محیط کدنویسی نرم‌افزار MATLAB7.10.0 بر روی یک رایانه شخصی با مشخصات RAM 4، Core i5 شبیه‌سازی شده است. همچنین جهت حل مسأله بهینه‌سازی مورد نظر از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک استفاده شده است. در الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، جمعیت اولیه برابر ۱۰۰ کروموزوم، نرخ تقاطع و نرخ جهش نیز به ترتیب برابر ۰/۰۷، و ۰/۳۵ در نظر گرفته شده، که این مقادیر با استفاده از روش تست و تنظیم تعیین شده‌اند. گفتنی است در فرآیند تولید مجدد از روش چرخه رولت جهت تولید فرزند برای نسل بعد استفاده شده است.



شکل ۲- الگوی تقاضای بارهای مصرفی نرمالیزه شده پردیس مسکونی مفروض، الف) تقاضای گرمایشی، ب) تقاضای سرمایشی، ج) تقاضای الکتریکی [۱۸].

جدول ۱- پارامترهای فنی برای سیستم CCHP و سیستم HVAC [۱۲، ۱۳، ۱۴].

سیستم	متغیر	نماد	مقدار
سیستم CCHP	راندمان واحد PGU	$a_0$	۰/۱۷۹۷
		$a_1$	۲/۳۲۹
		$a_2$	-۲/۳۳۴
		$a_3$	۰/۸۲۶۴
	راندمان کویل گرمایشی	$\eta_h$	۰/۸
	ضریب عملکرد چیلر جذبی	$COP_{ch}$	۱/۲
	راندمان بویلر	$\eta_b$	۰/۸
سیستم HVAC	راندمان الکتریکی	$\eta_e^{HVAC}$	۰/۳۵
	راندمان کویل گرمایشی	$\eta_h^{HVAC}$	۰/۸
	ضریب عملکرد چیلر الکتریکی	$COP_{ec}$	۳/۵
	راندمان بویلر	$\eta_b^{HVAC}$	۰/۸
	راندمان شبکه انتقال برق	$\eta_{grid}$	۰/۹۵

جدول ۲- هزینه سرمایه‌گذاری (تومان به ازای هر کیلووات) [۱۵].

تجهیزات	هزینه سرمایه‌گذاری (کیلووات/تومان)
کویل حرارتی	۱۲۰۰۰۰
بویلر	۱۸۰۰۰۰
چیلر جذبی	۷۲۰۰۰۰
چیلر الکتریکی	۵۸۲۰۰۰

## جدول ۳- قیمت حامل‌های انرژی (تومان به ازای هر کیلووات ساعت) [۱۶]، [۱۷].

فصل	انرژی الکتریکی			گاز طبیعی
	قیمت پایه	جریمه مصرف در ساعات پرباری	تخفیف مصرف در ساعات کم باری	قیمت پایه
تابستان	۵۸/۵	۱۵	۸/۵	۱۰/۴۳
زمستان	۴۸	۱۵	۸/۵	۱۳/۰۴

## ۴-۲- نتایج طراحی سیستم CCHP

با حل مسأله بهینه‌سازی مربوط به بخش طراحی، اندازه ظرفیت بهینه واحد PGU و سایر ادوات تشکیل دهنده سیستم CCHP بر مبنای یک آنالیز اقتصاد محور بدست آمده است. لازم به ذکر است که، هزینه سرمایه‌گذاری و نیز هزینه تعمیرات و نگهداری تجهیزات موجود در هر دو سیستم انرژی HVAC و CCHP متناسب با ظرفیت نامی و همچنین نقطه کار بهره‌برداری آن‌ها در طول سال تعیین می‌شود. جهت محاسبه تابع هدف مورد نظر در این محاسبات یعنی نرخ صرفه جویی در کل هزینه‌های سالیانه، طول عمر پروژه برابر با ۲۰ سال و نرخ تورم برابر با ۷٪ در نظر گرفته شده است. همچنین هزینه تعمیرات و نگهداری واحد PGU برابر با ۱/۵ تومان بر کیلووات ساعت در نظر گرفته شده و از هزینه تعمیرات و نگهداری سایر تجهیزات صرفه نظر شده است. نتایج بدست آمده از حل این مسأله در جدول (۴) نشان داده شده است. همچنین ظرفیت بهینه واحد PGU به عنوان متغیر مستقل مسأله بهینه‌سازی ۲۴۷۰ کیلووات محاسبه شده است که با در نظر گرفتن این مقدار کاهش ۴۰٪/۲۰٪ ای در مجموع هزینه‌های سالیانه سیستم CCHP نسبت به سیستم مرجع روی می‌دهد. علاوه بر این ظرفیت مناسب سایر تجهیزات سیستم به عنوان متغیرهای وابسته و منطبق با رویه گفته شده در بخش (ب) ۱.۲. ۱ محاسبه شده و نتایج آن در جدول (۵) ارائه شده است.

شایان ذکر است در سیستم CCHP مورد مطالعه علی‌رغم افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و همچنین هزینه‌های تعمیر و نگهداری، به دلیل کاهش قابل ملاحظه در هزینه‌های بهره‌برداری، مجموع هزینه‌های سالیانه آن کاهش یافته است. علت کاهش عمده در هزینه‌های بهره‌برداری را می‌توان استفاده از گاز طبیعی به عنوان یک حامل انرژی ارزان جهت تامین تمامی یا بخشی از تقاضای انرژی الکتریکی و همچنین بازیابی انرژی حرارتی اتلافی و استفاده مجدد از آن بر شمرد.

## جدول ۴- نتایج تحلیل اقتصاد محور جهت طراحی سیستم CCHP (برحسب تومان).

نوع سیستم	هزینه‌های سرمایه‌گذاری	هزینه‌های تعمیر و نگهداری	هزینه‌های بهره‌برداری	مجموع هزینه‌های سالیانه	نرخ صرفه جویی
HVAC	$3/9942e+8$	---	$1/7677e+9$	$2/1671e+09$	
CCHP	$6/0985e+8$	$3/1356e+7$	$1/3057e+9$	$1/7251e+09$	-۲۰٪

جدول ۵- ظرفیت مناسب تجهیزات مختلف در سیستم CCHP مورد مطالعه.

نام تجهیز	ظرفیت مناسب (کیلووات)
واحد PGU	۲۴۷۰
چیلر جذبی	۵۳۰۰
چیلر الکتریکی	۱۲۰۰
بویلر	۳۸۰

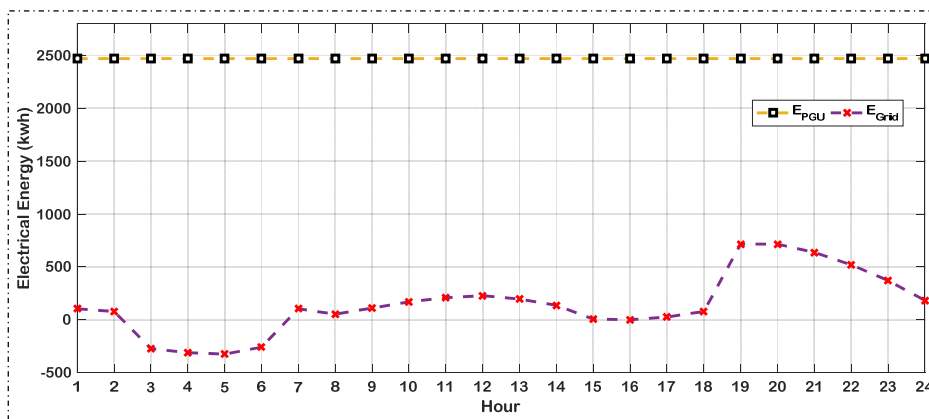
#### ۴-۳- نتایج بهره‌برداری از سیستم CCHP

در این قسمت مطابق با رویه گفته شده در بخش (۳)، پس از تعیین اندازه هر یک از تجهیزات سیستم تولید انرژی مورد مطالعه، الگو بهره‌برداری بهینه برای یک روز نمونه از فصل زمستان و همچنین یک روز نمونه از فصل تابستان منطبق با الگوی تقاضای مشترکین در شکل (۳)، محاسبه شده است. میزان هزینه‌های پرداختی بابت خرید انرژی الکتریکی از شبکه و سوخت مورد نیاز، هزینه تعمیرات و نگهداری واحد تولید کننده توان (PGU)، و همچنین درآمد حاصل از فروش برق به شبکه برای هر دو فصل در جدول (۶) ارائه شده است. با توجه به نتایج جدول دیده می‌شود که برای روزهای نمونه در هر دو فصل، مجموع هزینه‌ها بسیار بیشتر از درآمد می‌باشد و لذا بهره‌برداری از سیستم CCHP مورد مطالعه سودآوری به همراه ندارد. البته قابل ذکر است که در فصل زمستان به دلیل عدم فروش انرژی به شبکه سراسری، بهره‌برداری از سیستم درآمدزایی نیز به همراه ندارد.

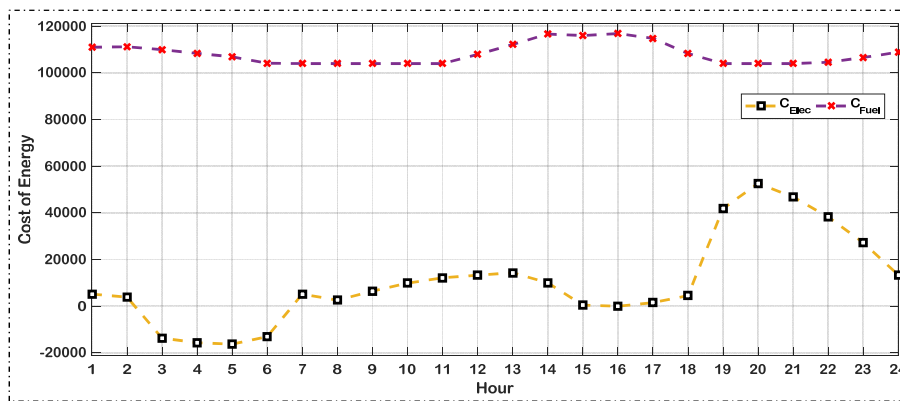
در شکل (۳) انرژی الکتریکی تولیدی توسط واحد PGU و انرژی الکتریکی تبدالی با شبکه در روز نمونه فصل تابستان نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، واحد PGU در همه ساعات با تمام ظرفیت خود بهره‌برداری شده است. از این رو در ساعات ۳ الی ۶ بامداد انرژی تولیدی این واحد بیشتر از تقاضای انرژی مورد نیاز پردیس مسکونی مورد مطالعه است و لذا مقدار اضافه آن به شبکه فروخته می‌شود که این امر باعث افزایش درآمد سیستم می‌گردد. در شکل (۴) نیز هزینه پرداختی برای خرید حامل‌های انرژی یعنی گاز طبیعی و انرژی الکتریکی تبدالی با شبکه در هر ساعت از روز نمونه فصل تابستان نشان داده شده است.

جدول ۶- نتایج آنالیز بهره‌برداری از سیستم CCHP ( برحسب تومان).

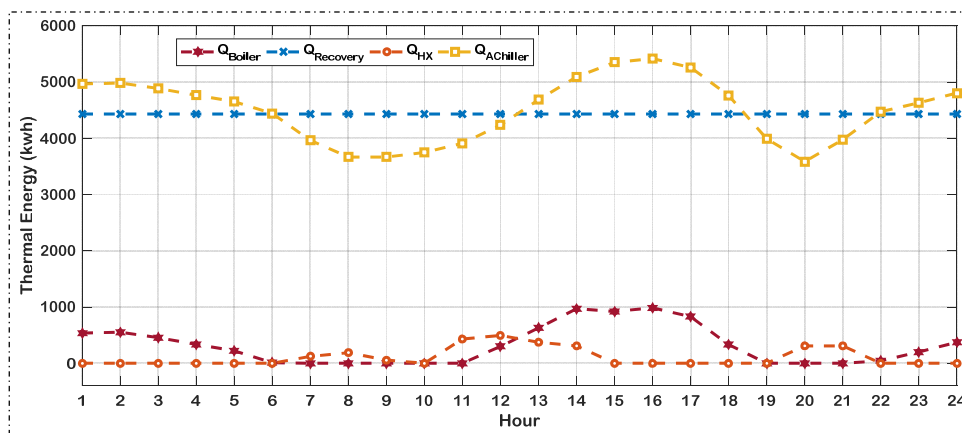
فصل	درآمد	هزینه			تابع هدف (رابطه ۲۲)
		هزینه خرید انرژی الکتریکی	هزینه سوخت	هزینه تعمیر و نگهداری	
تابستان	۵/۸۵e+۴	۳/۰۹۶۸۰e+۵	۲/۵۹۴۶e+۶	۸/۸۹۲۰e+۴	۲/۹۳۴۷۰e+۶
زمستان	---	۹/۹۵۳۶۰e+۵	۲/۲۵۶۳e+۶	۵/۹۲۸۰e+۴	۳/۳۱۱۰e+۶



شکل ۳- انرژی الکتریکی تولیدی توسط واحد PGU و انرژی الکتریکی تبادلی با شبکه در روز نمونه فصل تابستان.



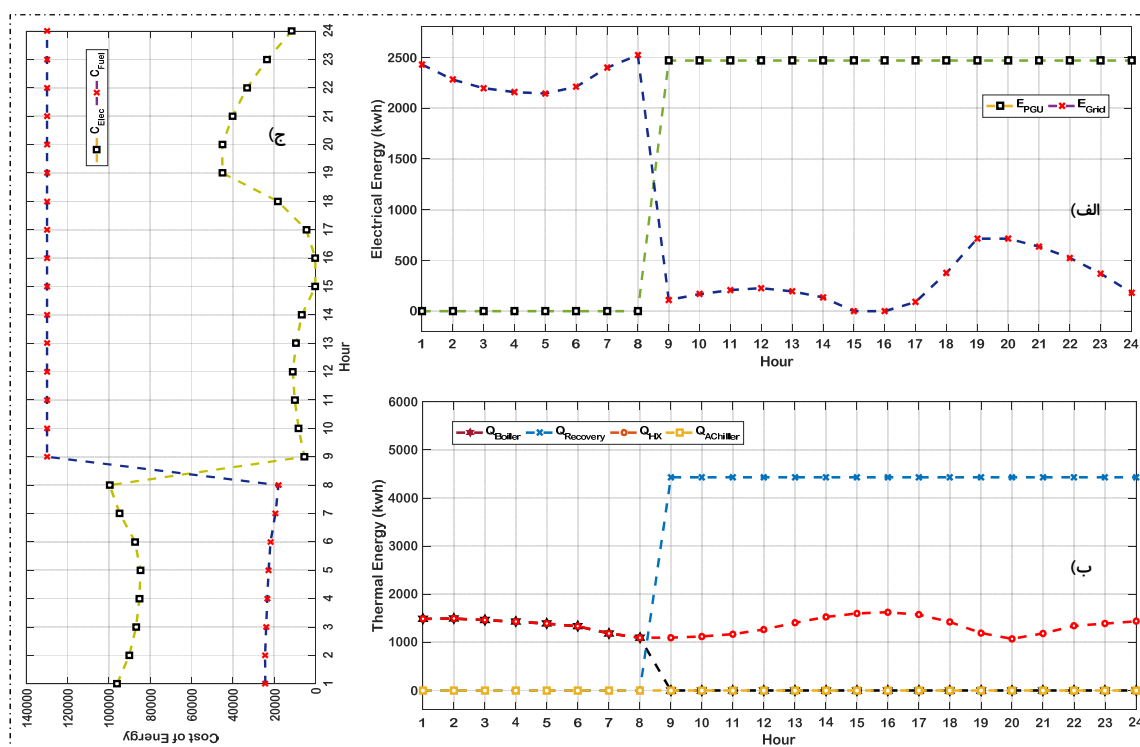
شکل ۴- هزینه خرید گاز طبیعی و تبادل انرژی الکتریکی با شبکه در فصل تابستان (برحسب تومان).



شکل ۵- گردش انرژی حرارتی در سیستم CCHP.

همچنین در شکل (۵) گردش انرژی حرارتی در سیستم CCHP در روز نمونه فصل تابستان نشان داده شده است. قابل ذکر است که حرارت بازیابی شده از واحد PGU و حرارت تولید شده توسط بویلر به عنوان مولد انرژی، و چیلر جذبی و کویل حرارتی به عنوان مصرف‌کننده این انرژی حرارتی جهت مرتفع نمودن نیازهای سرمایشی و گرمایشی عمل می‌کنند.

نتایج آنالیز بهره‌برداری سیستم CCHP برای روز نمونه فصل زمستان در شکل (۶) نشان داده شده است. شکل (۶-الف) مربوط به نحوه تولید انرژی الکتریکی توسط واحد PGU و انرژی الکتریکی تبادل با شبکه می‌باشد. در ساعات ابتدایی شبانه روز، با توجه به ارزان‌تر بودن انرژی الکتریکی شبکه نسبت به انرژی الکتریکی تولید شده توسط واحد PGU، این واحد خاموش می‌ماند و تقاضای انرژی از شبکه سراسری تأمین می‌گردد. در شکل (۶-ب) نیز گردش انرژی حرارتی در روز نمونه فصل زمستان نشان داده شده است. بر خلاف فصل تابستان، تقاضای سرمایشی در این فصل با توجه به سرمای هوا، وجود ندارد و چیلر جذبی همواره خاموش می‌ماند. همچنین با توجه به خاموش بودن واحد PGU در ساعات اولیه انرژی حرارتی جهت بازیابی وجود ندارد. همچنین در شکل (۶-ج) مجموع هزینه‌های پرداختی بابت خرید حامل‌های انرژی در روز نمونه فصل زمستان نشان داده شده است. همانند فصل تابستان، در این فصل نیز در ساعاتی که واحد PGU روشن است هزینه‌های پرداختی بابت خرید گاز طبیعی بسیار بیشتر از هزینه‌های پرداختی بابت خرید انرژی الکتریکی از شبکه است.



شکل ۶- نتایج آنالیز بهره‌برداری سیستم CCHP در فصل زمستان. الف) تخصیص انرژی الکتریکی بین واحد PGU

و شبکه سراسری، ب) گردش انرژی حرارتی، ج) هزینه حامل‌های انرژی.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله مدل‌سازی یک سیستم تولید انرژی سه‌گانه با محرک اولیه توربین گازی به همراه ادوات حرارتی نظیر بویلر، چیلر الکتریکی و چیلر جذبی برای یک پردیس مسکونی واقع در شهر اهواز صورت گرفت. در این مدل‌سازی ظرفیت بهینه واحد PGU به عنوان متغیر مستقل مسأله بهینه‌سازی جهت طراحی سیستم مورد نظر بر اساس یک آنالیز اقتصادی جهت دستیابی به بیشترین میزان صرفه جویی محاسبه گردید. اندازه بدست آمده واحد PGU جهت استفاده در پردیس مذکور برابر ۲۴۷۰ کیلووات تعیین گردید که با در نظر گرفتن این مقدار کاهش ۲۰/۴۰٪ ای در مجموع هزینه‌های سالیانه سیستم CCHP نسبت به سیستم مرجع صورت پذیرفت. از این رو این مهم نشان‌دهنده موفقیت‌آمیز بودن بکارگیری سیستم‌های CCHP در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. پس از طراحی سیستم CCHP مورد مطالعه، راهبرد بهینه بهره‌برداری از سیستم با توجه به الگوی تقاضای بار (الکتریسیته، سرمایش و گرمایش) مصرف‌کنندگان در شهر اهواز برای یک روز نمونه از فصل زمستان و همچنین یک روز نمونه از فصل تابستان محاسبه گردید، که برای هر دو فصل مجموع هزینه‌ها بیشتر از درآمد سیستم می‌باشد. لذا اگرچه بهره‌برداری از سیستم CCHP مورد مطالعه سودآوری به همراه ندارد، لیکن منجر به کاهش چشمگیر در مجموع هزینه‌ها می‌گردد. همچنین در فصل زمستان با توجه به افزایش قیمت گاز نسبت به فصل تابستان، تولید انرژی الکتریکی در برخی ساعات به صرفه نمی‌باشد و لذا واحد تولید کننده توان در این ساعات خاموش می‌باشد. لازم به ذکر است برای اطمینان از صحت نتایج بدست آمده حاصل از کدنویسی انجام شده در نرم افزار متلب این نتایج با نتایج حاصل از مرجع [۱۹] مقایسه گردیده است. در این مرجع نتایج عددی حاصل از اجرای الگوریتم طراحی شده بر روی یک مجتمع مسکونی واقع در شهر دالیان چین ارائه شده است. همانطور که در جدول (۷) قابل مشاهده است نتیجه حاصل از کد نویسی با دقت قابل قبولی با نتیجه موجود در مقاله تطابق دارد که وجود تفاوت جزئی به خاطر تقریبی بودن اطلاعات بار (به کارگیری نرم افزار تخمین داده از نمودار) می‌باشد لذا می‌توان گفت کدهای نوشته شده صحیح می‌باشند.

## جدول ۷- نتایج آنالیز اقتصاد محور مطالعه بار مسکونی مقاله مرجع [۱۹]

	بار مسکونی	ATCS			
		$C_{INV}$	$C_{MAN}$	$C_{FC}$	$ATC$
مرجع [۴۹]	سیستم HVAC	---	---	---	---
	سیستم CCHP	---	---	---	---
کدنویسی	سیستم HVAC	$2.1930 \times 10^6$	$1.6267 \times 10^6$	$1.2701 \times 10^7$	$1.6520 \times 10^7$
	سیستم CCHP	$2.8015 \times 10^6$	$1.9286 \times 10^6$	$9.7313 \times 10^6$	$1.4367 \times 10^7$

## مراجع

- [1] AlSulaiman, F.A., and Hamdullahpur, F., "Performance Comparison of Three Trigeneration Systems using Organic Rankine Cycles", Energy, Vol. 36, pp. 5741-5754, (2011).
- [2] C.T. Group. "Introducing Combined Heat and Power", Carbon Trust, (2010).

- [۳] دیو سالار.م.ح، و اسلامی.ف، آل محمد.ح.ر. "سیستم های تولید انرژی سه گانه: معرفی، طراحی، ارزیابی و عملکرد" مجموعه مقالات دومین کنفرانس بین المللی مهندسی برق، شهر یور، تهران (۱۳۹۶).
- [4] Ghaebi, H., Saidi, M., and Ahmadi., "Exergoeconomic Optimization of a Trigeneration System for Heating, Cooling and Power Production Purpose Based on TRR Method and using Evolutionary Algorithm", *Appl. Thermal Eng.* Vol. 36, pp. 113–125, (2012).
- [5] Moussawi, H., "Review of Tri-generation Technologies Design Evaluation, Optimization, Decision-making and Selection Approach", *Energy Conversion and Management*, Vol. 120, pp. 157-196, (2016).
- [6] Cho, H., and Smith, A.D., "Combined Cooling, Heating and Power a Review of Performance Improvement and Optimization", *Applied Energy*, Vol. 136, pp. 168-185, (2014).
- [7] Jiang-Jang, W., Chun-Fa, Z., You-Yin, J., "Multi-criteria Analysis of Combined Cooling, Heating and Power Systems in Different Climate Zones in China", *Applied Energy*, Vol. 87, pp. 1247-1259, (2010).
- [8] Mostafavi, K.P., "Development of a CHP/DH System for the New Town of Parand: an Opportunity to Mitigate Global Warming in Middle East", *Applied Thermal Energy*, Vol. 59, pp. 298–308, (2013).
- [9] Tichi, S.G., Ardehali, M.M., and Nazari, M.E., "Examination of Energy Price Policies in Iran for Optimal Configuration of CHP and CCHP Systems Based on Particle Swarm Optimization Algorithm", *Energy Policy*, Vol. 38, pp. 6240-6250, (2010).
- [10] [https://www.ukpower.co.uk/home\\_energy/gas\\_meter\\_readings](https://www.ukpower.co.uk/home_energy/gas_meter_readings)
- [11] Fumo, N., Mago, P.J., and Chamra, L.M., "Emission Operational Strategy for Combined Cooling, Heating, and Power Systems", *Applied Energy*, Vol. 86, pp. 2344-2350, (2009).
- [12] Wang, K.P., "Performance Comparison of Combined Cooling Heating and Power System in Different Operation Modes", *Applied Energy*, Vol. 88, pp. 4621-4631, (2011).
- [13] Wang, K.P., "Influence Analysis of Building Types and Climate Zones on Energetic, Economic and Environmental Performances of BCHP Systems", *Appl. Energy*, Vol. 88, No. 9 pp. 3097-3112, (2011).
- [14] Wang, K.P., "Multi-criteria Analysis of Combined Cooling, Heating and Power Systems in Different Climate Zones in China", *Appl. Energy*, Vol. 87, No. 4, pp. 1247-1259, (2010).
- [15] Li, C.Z., Shi, Y.M., and Huang, X.M., "Sensitivity Analysis of Energy Demands on Performance of CCHP System", *Energy Convers Manage*, Vol. 49, No. 12, pp. 3491-3497, (2008).

[۱۶] تعرفه برق و شرایط عمومی آن‌ها، وزارت نیرو، مصوب تیر ماه سال ۹۵- قابل دسترس در:  
[http://www.kzrec.co.ir/my\\_doc/kzrec/Tariff%2095.pdf](http://www.kzrec.co.ir/my_doc/kzrec/Tariff%2095.pdf)



[۱۷] تعرفه گاز و شرایط عمومی آن‌ها، شرکت ملی گاز، مصوب اردیبهشت ماه سال (۹۴)، قابل دسترس در: [www.nigc.ir](http://www.nigc.ir)

[۱۸] حبیبیان، م، مشهور، ا، "تعیین ظرفیت بهینه یک سیستم CCHP برای تامین نیازهای انرژی یک مجتمع مسکونی با در نظر گرفتن هزینه های سرمایه گذاری و هزینه بهره برداری"، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، شهریور (۱۳۹۶).

[19] Miao, L., Hailin, M., and Baoyu, M., "Optimal Design and Operation Strategy for Integrated Evaluation of CCHP (Combined Cooling Heating and Power) System", Energy, Vol. 99, pp. 202-220, (2016).

## فهرست نمادهای انگلیسی

ATC مجموع هزینه سالانه (تومان)

$C_{INV}$  مجموع هزینه سالانه سرمایه گذاری (تومان)

$C_{MAN}$  هزینه سالانه تعمیر و نگهداری (تومان)

$C_{cap,i}$  هزینه سرمایه گذاری یک واحد از تجهیز (تومان)

$C_{FC}$  هزینه سالانه انرژی (تومان)

$C_{ec,t}$  میزانی از تقاضای سرمایه‌اشی (برحسب درصد) که توسط چیلر الکتریکی

$C_{ac,t}$  میزانی از تقاضای سرمایه‌اشی (برحسب درصد) که توسط چیلر جذبی در هر ساعت تامین می‌گردد

$C_{demand,t}$  انرژی حرارتی مورد نیاز برای ایجاد برودت در فضای ساختمان (کیلو وات ساعت)

$\hat{C}_{demand,t}$  میزان تقاضای سرمایه‌اشی که توسط چیلر الکتریکی تامین می‌شود (کیلو وات ساعت)

$cop_{ec}$  ضریب عملکرد چیلر الکتریکی مورد استفاده

$E_{pur}$  میزان انرژی الکتریکی خریداری شده (کیلو وات ساعت)

$E_{grid,t}^{HVAC}$  انرژی الکتریکی خریداری شده از شبکه (کیلو وات ساعت)

$E_{demand,t}$  تقاضای انرژی الکتریکی سیستم (کیلو وات ساعت)

$E_{ec,t}$  انرژی الکتریکی مصرفی توسط چیلر الکتریکی (کیلو وات ساعت)

$E_{PGU,t}$  نقطه کار الکتریکی واحد محرک اولیه (کیلو وات ساعت)

$E_{sel,h}$  انرژی الکتریکی فروخته شده (کیلو وات ساعت)

$E_{pur,h}$  انرژی الکتریکی به ترتیب و گاز خریداری شده از شبکه (کیلو وات ساعت)

$F_{pur,h}$  گاز خریداری شده از شبکه (متر مکعب)

$L_{load,t}$  میزان بارگیری از واحد محرک اولیه (کیلو وات ساعت)

$O_{Gen,m,d,h}^i$  بیانگر میزان تولید انرژی تجهیز (کیلو وات ساعت)

$Q_{rec,t}$  حرارت بازیابی شده (کیلو وات ساعت)

$Q_{c,t}$  حرارت مورد نیاز جهت تامین تقاضای برودتی توسط چیلر جذبی (کیلو وات ساعت)

$Q_{ac,t}$  حرارت مصرفی توسط چیلر جذبی (کیلو وات ساعت)

$Q_{H,t}$  حرارت مورد نیاز جهت تأمین تقاضای گرمایشی توسط کویل حرارتی (کیلو وات ساعت)

$Q_{boiler,t}$  حرارت تولیدی توسط بویلر (کیلو وات ساعت)

$d$  اندیس روز

$m$  اندیس ماه

$h$  اندیس ساعت

$r$  نرخ بهره

$n$  طول عمر پروژه

$R$  ضریب بازپایی است

$\eta_b$  راندمان بویلر

$\eta_{hx}$  راندمان کویل حرارتی

$\eta_{e,t}$  راندمان تبدیل سوخت به انرژی الکتریکی

$\eta_{nome}$  راندمان واحد PGU در بار کامل

$\eta_{th}$  راندمان حرارتی

$\tau$  کسر بار الکتریکی جهت تعیین وضعیت روشن/خاموش

**Abstract**

Rising fossil fuel prices, global warming concerns, advancements in the field of technology, and so on, caused the Trigenation energy systems to be an attractive option to supply consumer energy demands in recent years. Therefore, in this article, these energy systems are introduced, and their main advantages are presented. In addition, different types of Power Generation Unit used in these systems described, and the advantages and disadvantages of each one are listed. Furthermore, a procedure for designing a trigeneration energy system to utilize in tropical areas proposed, that is based on providing maximum cooling demands.

As well as, a procedure for extracting the optimal operation pattern of these energy production systems on different days of the year proposed which is based on an optimization problem. Moreover, a sample numerical study conducted to find out how to determine the optimal size of different devices in a trigeneration power system for use in a tropical residential campus. Electrical, heating and cooling demands of the residential campus are in accordance with the consumption pattern of consumers located in the metropolitan area of Ahwaz with frequent warm weather conditions. The study is codified in the MATLAB program, and its results are derived in the form of economic analysis. It is worth mentioning that, the possibility of selling electrical energy to the main grid is considered in the extraction of optimal operation pattern for a typical summer and winter days. The results indicate that the trigeneration energy production systems are successful in accordance with the proposed approach in tropical regions.