

طراحی و بهینه سازی یک سیستم CCHP از منظر انرژی برای یک پردیس مسکونی واقع در شهر اهواز

سید محمد جواد آل محمد^{۱*}، سمیه یعقوبی کوپایی^۱

۱- گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

خلاصه

در این مقاله پس از معرفی سیستم های تولید انرژی سگانه و تشریح مزایای اصلی آنها یک رویه پیشنهادی جهت طراحی سیستم های تولید انرژی سه گانه بر اساس کمینه کردن مصرف سوخت و صرفه جویی در انرژی ارائه شده است. در بخش مطالعات عددی یک مطالعه نمونه جهت آشنایی با نحوه تعیین اندازه بهینه ادوات یک سیستم تولید انرژی سه گانه جهت بکارگیری در یک پردیس مسکونی واقع در کلان شهر اهواز با شرایط آب و هوایی گرم، در نظر گرفته شده است. تقاضای الکتریکی، گرمایشی و سرمایشی این پردیس مسکونی مطابق با الگوی بار مصرف کنندگان مطالعه صورت گرفته در برنامه MATLAB کدنویسی شده و نتایج مربوط به آن در قالب یک آنالیز انرژی محور بدست آمده است.

کلمات کلیدی: بازیابی حرارت، سیستم تولید انرژی سه گانه، تولید ترکیبی برق، گرمایش و سرمایش، تولید همزمان.

۱. مقدمه

با رشد جمعیت و تغییر سبک زندگی تقاضای جهانی برای انرژی بیش از پیش شده است. از طرفی استفاده از سوخت های فسیلی جهت تولید انرژی مشکلات متعددی از جمله محدود بودن این قبیل سوخت ها و همچنین آلودگی های زیست محیطی ناشی از استفاده از آنها را به همراه دارد. از این رو تأمین تقاضای انرژی مشترکین از طریق رویه های جایگزین مانند بکارگیری منابع تجدیدپذیر و همچنین بهبود بهره وری سیستم های تولید انرژی فعلی جهت کاهش مصرف سوخت، در سال های اخیر بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است. امروزه استفاده از سیستم های تولید انرژی سه گانه^۱ یا ترکیب سرمایش گرمایش و برق (CCHP) یک روش مناسب جهت افزایش راندمان سیستم های تولید انرژی محسوب می گردد که توسط مهندسين حوزه انرژی معرفی شده است. در سیستم تولید انرژی سه گانه هر سه تقاضای الکتریکی، سرمایشی و گرمایشی توسط یک واحد تولید کننده توان (PGU) و از طریق یک منبع سوخت تأمین می گردد. واحد تولید کننده توان مجموعه محرک اولیه^۲ و ژنراتور است که توربین های گازی، موتورهای احتراق داخلی و غیره از جمله این واحدها محسوب می گردند. در سیستم های CCHP واحد PGU با مصرف سوخت انرژی الکتریکی تولید می کند، که ضمن

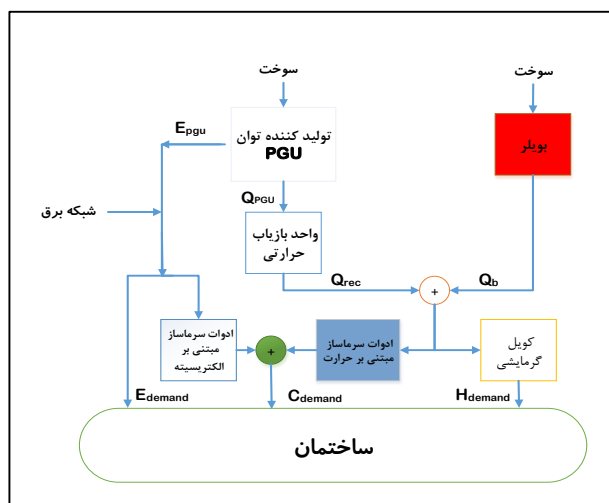
¹ Trigenation

² Combined Cooling, Heating and Power

³ Power Generation Unit

⁴ Prime Mover

تولید انرژی الکتریکی انرژی حرارتی نیز حاصل می شود. در سیستم های سنتی رایج این حرارت هنگام تولید انرژی الکتریکی اتلاف می گردد و عموماً وارد محیط زیست می شود و آلودگی هایی به همراه دارد. حال آنکه در سیستم های CCHP در کنار تولید انرژی الکتریکی، حرارت اتلافی بازیابی و احیا شده و نیرویی تازه می یابد که می تواند تقاضاهای گرمایشی و سرمایشی را مرتفع کند. حرارت ایجاد شده در فرایند تولید انرژی الکتریکی، پس از بازیابی کیفیت لازم برای به کارگیری در ادوات گرما ساز مانند کویل حرارتی جهت تأمین تقاضای گرمایشی و یا تجهیزات سرما ساز مانند چیلر جذبی جهت مرتفع نمودن تقاضای سرمایشی (و یا هردو) را بدست می آورد. لذا با به کارگیری یک منبع سوخت منفرد ضمن تأمین دیماندهای انرژی در مصرف سوخت و کاهش آلودگی های زیست محیطی بسیار اثر بخش خواهد بود. مفهوم کلی یک سیستم CCHP در شکل (۱) نشان داده شده است. واحد تولید کننده توان (PGU) با مصرف سوخت تقاضای انرژی الکتریکی ساختمان را مرتفع می نماید. چنانچه انرژی الکتریکی تولید شده توسط این واحد از انرژی الکتریکی مورد تقاضای ساختمان کمتر باشد، کمبود آن از شبکه سراسری برق خریداری می گردد. همچنین در صورتی که میزان انرژی تولیدی بیشتر از تقاضای ساختمان باشد می توان مازاد آن را در صورت فراهم بودن بسترهای فنی و حقوقی به شبکه سراسری برق ارسال نمود. همچنین حرارت تولید شده حاصل از فرایند تولید انرژی الکتریکی، به واحد بازیاب حرارتی انتقال داده می شود تا پس از بازیابی و بهبود کیفیت، تقاضاهای سرمایشی و گرمایشی را تأمین کند. با به کارگیری بویلر کمکی می توان نقصان احتمالی حرارت بازیابی شده از واحد PGU را جهت تأمین تقاضاهای حرارتی برطرف نمود. بدین شکل بخشی از حرارت بازیابی شده به عنوان ورودی تجهیزات برودتی مبتنی بر حرارت (چیلر حرارتی یا سایر تجهیزات) مورد استفاده قرار می گیرد و سرمایش و برودت ساختمان را تأمین کند. از بخش دیگر حرارت بازیابی شده نیز می توان جهت مرتفع نمودن تقاضای گرمایشی توسط کویل حرارتی بهره جست. اگرچه در طرح های مختلف یک سیستم CCHP قدرت انتخاب بین ادوات مختلف تأمین کننده تقاضاهای حرارتی وجود دارد، در اینجا فرض شده است که در کنار ادوات سرما ساز مبتنی بر حرارت، ادوات سرما ساز مبتنی بر الکتریسیته همچون کولرها، چیلرهای تراکمی و ... نیز به صورت یک واحد کمکی وجود دارند. لذا می توان اینگونه تصور نمود که امکان فراهم نمودن بخشی از تقاضای سرمایشی با مصرف انرژی الکتریکی نیز وجود دارد.



شکل ۱- ساختار یک سیستم CCHP نمونه

همانطور که در شکل ۱ دیده می شود، واحد تولید کننده توان (PGU)، هسته مرکزی یک سیستم CCHP می باشد. در کنار آن واحد بازیابی حرارت، ادوات سرماساز و گرماساز، ادوات ذخیره سازی انرژی الکتریکی و ادوات ذخیره سازی انرژی حرارتی (در صورت بکارگیری) اجزاء یک سیستم CCHP را تشکیل می دهند. همانطور که گفته شد واحد تولید کننده توان در سیستم های CCHP از یک محرک اولیه و یک ژنراتور تشکیل شده است. انواع متداول محرک های اولیه شامل میکروتوربین ها، توربین های بخار، توربین های گازی، موتورهای احتراق داخلی، پیل های سوختی و موتورهای استرلینگ می باشند [۱].

در مطالعات مختلف صورت گرفته شده در زمینه بکارگیری این سیستم های تولید انرژی، تنوع گسترده ای در نوع واحد تولید کننده توان بکار گرفته شده وجود دارد. به طور نمونه مرجع [۲] یک سیستم انرژی CCHP مبتنی بر توربین گازی جهت تأمین تقاضاهای انرژی یک مجتمع مسکونی در شهر تهران را مورد بررسی قرار داده است و دو راهبرد دستیابی به حداکثر میزان تولید انرژی الکتریکی در حالت دنبال کننده بار حرارتی و کمینه سازی مصرف سوخت را مورد ارزیابی قرار داده است. همچنین در مرجع [۳] بهینه سازی بهره برداری و کمینه کردن هزینه های سرمایه گذاری سیستم تولید انرژی و کاهش انتشار گاز CO₂ را در یک تابع چند منظوره مورد بررسی قرار داده است. در مرجع [۴] یک چارچوب با راهبرد چندهدفه به منظور دستیابی به فناوری بهینه سیستم های تولید همزمان انرژی با در نظر گرفتن اهداف اقتصادی، فنی و زیست محیطی ارائه گردیده است. همچنین در مرجع [۵] ارزیابی سیستم پیل سوختی اکسید جامد از منظر عملکرد مناسب و بهینه انرژی در سیستم تولید انرژی CHP جهت استفاده در منازل مسکونی، مورد ارزیابی قرار گرفته است. مرجع [۶] تاثیر شرایط جوی بر نحوه طراحی سیستم تولید انرژی CCHP مبتنی بر موتور احتراق داخلی را با رویکردی متفاوت مورد بررسی قرار داده است به طوری که پنج موقعیت آب و هوایی مختلف در کشور ایران را انتخاب نموده و مصرف حامل های انرژی را برای هر موقعیت محاسبه کرده است نتایج حاصل بیانگر تفاوت ۱۲ درصدی نسبت متوسط سالانه صرفه جویی انرژی سوخت بین گرمترین و سردترین شهر مورد بررسی وجود داشته است.

انتخاب مناسب ترین نوع واحد تولید کننده توان (PGU)، به عوامل مختلفی نظیر میزان سرمایه گذاری اولیه، شرایط آب و هوایی، نوع کاربری، تمایلات مالکان و بهره برداران سیستم، و غیره وابسته است. به طور مثال سیستم تولید انرژی جهت به کارگیری در یک هتل با سیستم به کارگیری شده در یک پادگان نظامی دارای تفاوت های اساسی است که هر یک الزامات و تمهیدات خاص خود را می طلبد. شایان ذکر است که مطالعات صورت گرفته در حوزه سیستم های تولید انرژی در دو محور برنامه ریزی^۱ و بهره برداری^۲ قابل تقسیم بندی هستند. در بخش برنامه ریزی به تعیین نوع و اندازه تجهیزات پرداخته می شود و در بخش بهره برداری از سیستم های تولید انرژی، به تعیین شیوه بهره برداری و تعیین نقطه کار بهینه آن ها در بازه زمانی مورد نظر پرداخته می شود [۷ و ۸]. شیوه های مختلف بهره برداری به دو صورت دنبال کننده بار الکتریکی (ELF) و دنبال کننده بار حرارتی (TLF) مورد ارزیابی واقع می شوند. [۹، ۱۰، ۱۱]. در بهره برداری به روش دنبال کننده بار الکتریکی هدف اصلی ابتدا تأمین انرژی الکتریکی توسط واحد PGU و سپس تولید سرمایه و گرمایش است. در واقع پس از احتراق سوخت ابتدا تمام انرژی الکتریکی مورد نیاز تولید می شود و پس از فراهم نمودن تقاضای الکتریکی، تمام و یا بخشی از تقاضاهای حرارتی برطرف می گردد که در صورت کمبود، این تقاضا توسط بویلر تأمین می شود. شایان ذکر است که، در ساختمان های مسکونی این روش به دلیل هزینه های بهره برداری کمتر، از محبوبیت بیشتری برخوردار است. در حالت بهره برداری دنبال کننده بار

¹ Planning

² Operation

³ Electrical Load Following

⁴ Thermal Load Following

حرارتی برخلاف روش قبل ابتدا فراهم کردن تمام تقاضای حرارتی مد نظر است و سپس تمام یا بخشی از تقاضای الکتریکی برطرف می شود. این نوع بهره برداری در برخی صنایع نظیر سرامیک سازی و تولید سیمان مورد توجه است [۸].

بر خلاف دو روش گفته شده، در روش بهره برداری مبتنی بر بهینه سازی، تقاضای الکتریکی و حرارتی نسبت به یکدیگر الویت ندارند. در این روش یک مساله بهینه سازی با تابع هدف مشخص تعریف می گردد و سپس نقطه کار ادوات مختلف سیستم با یافتن پاسخ بهینه مساله محاسبه می شود. تابع هدفی که در این مساله بکار گرفته می شود می تواند در حوزه انرژی و تکنولوژی، اقتصادی، مسائل زیست محیطی و یا ترکیبی از هر سه مورد باشد. قابل ذکر است که، در برخی از مطالعات صورت گرفته مبتنی بر بهینه سازی به توسعه یک مدل چند هدفه پرداخته اند که ترکیبی از انواع حوزه های مذکور، در تعیین رویه بهره برداری از سیستم CCHP مورد مطالعه نقش داشته اند. در این مقاله هدف دستیابی به اندازه بهینه واحد PGU جهت صرفه جویی هرچه بیشتر در مصرف سوخت می باشد.

۲. رویه پیشنهادی طراحی سیستم CCHP مورد مطالعه

به هنگام طراحی یک سیستم CCHP، می بایست مراحل مشخصی را در نظر گرفت و مسائلی مانند راندمان و دسترسی پذیری تجهیزات، عدم پیچیدگی به هنگام بهره برداری و مدیریت سیستم را مورد توجه قرار داد. علاوه بر این، تقاضای بار ساختمان که متأثر از شرایط اقلیمی است، یک پارامتر مهم است که می تواند فرآیند طراحی را تحت تاثیر قرار دهد. همانطور که گفته شد در این مقاله ارزیابی سیستم تولید انرژی مورد نظر در منطقه جنوبی کشور صورت می گیرد. شهر اهواز، واقع در استان خوزستان، یک منطقه با شرایط آب و هوایی بسیار گرم است که مطالعات پیاده سازی سیستم CCHP در آن منطقه مورد نظر این تحقیق است. با توجه به گرم بودن هوای شهر اهواز بیشینه انرژی مصرفی برای مشترکین مسکونی مربوط به تقاضای سرمایشی در فصل گرم سال است. همچنین تقاضای گرمایشی در فصل گرم غالباً ناچیز است و اگرچه این تقاضا در فصل سرد وجود دارد، لیکن دوره زمانی روزهای سرد سال در این شهر کوتاه می باشد. لذا در هنگام طراحی یک سیستم CCHP برای مشترکین مسکونی واقع در این شهر، توجه به تولید انرژی الکتریکی و انرژی برودتی از اهمیت بالاتری برخوردار است.

در سیستم های تولید انرژی سنتی تقاضای برودتی معمولاً توسط تجهیزات سرماساز مبتنی بر الکتریسیته، نظیر کولرها، چیلرهای الکتریکی و غیره تأمین می گردد. در نتیجه برای مرتفع سازی تقاضای سرمایشی، مشترکین این منطقه هزینه های بالای مربوط به قبوض برق را متحمل می شوند. علاوه بر این به دلیل تقاضای بالای انرژی الکتریکی در فصل تابستان که بخش عمده آن مربوط به مصرف ادوات سرماساز مبتنی بر الکتریسیته است، تراکم و پرشدگی خطوط توزیع برق افزایش می یابد، که این موضوع می تواند احتمال و خطر رخ داد خاموشی در شبکه های برق را افزایش دهد. از طرفی با به کارگیری روش تولید انرژی CCHP در این منطقه و تمرکز بر تولید برودت، می توان از حرارت اتلافی بازایی شده در فرایند تولید برق استفاده نمود و تمامی یا بخشی از تقاضای سرمایشی مشترکین را مرتفع کرد. این کار علاوه بر کاهش چشم گیر در مصرف سوخت به پایداری شبکه توزیع برق نیز کمک می کند.

دستیابی به اندازه بهینه ظرفیت واحد PGU یک متغیر کلیدی طراحی محسوب می شود که ظرفیت و نقطه کار تجهیزات دیگر را تحت تاثیر قرار می دهد. از این رو در این مقاله ظرفیت واحد PGU با تمرکز بر بار سرمایشی به نحوی تعیین می گردد که مصرف سوخت به حداقل میزان ممکن رسیده و سپس اندازه مطلوب سایر ادوات سیستم، متأثر از اندازه بهینه واحد PGU تعیین می گردد. در ادامه نحوه محاسبه مصرف سوخت برای هر یک از سیستم های تولید انرژی HVAC و CCHP به طور مستقل توضیح داده خواهد شد. جزئیات این موضوع در بخش ۲.۱ ارائه شده است.

۱.۲ محاسبه میزان سوخت مصرفی در سیستم HVAC

در سیستم مجزای تولید انرژی (سیستم سنتی)، تمامی انرژی الکتریکی مورد نیاز از شبکه سراسری برق فراهم می‌شود. انرژی الکتریکی خریداری شده در این سیستم مطابق با رابطه (۱) تعیین می‌گردد:

$$E_{grid,t}^{HVAC} = E_{demand,t} + E_{ec,t} \quad \forall t \in T \quad (1)$$

در این رابطه $E_{grid,t}^{HVAC}$ مجموع انرژی الکتریکی خریداری شده از شبکه، $E_{demand,t}$ تقاضای انرژی الکتریکی مورد نیاز ساختمان و $E_{ec,t}$ انرژی الکتریکی مصرفی چیلر الکتریکی جهت تأمین تقاضای سرمایشی ساختمان در لحظه t می‌باشد. همچنین لازم به ذکر است که T بازه زمانی مورد مطالعه می‌باشد. انرژی الکتریکی مصرفی چیلر الکتریکی مطابق با رابطه (۲) تعیین می‌گردد.

$$E_{ec,t} = \frac{C_{demand,t}}{COP_{ec}} \quad \forall t \in T \quad (2)$$

در رابطه (۲) $C_{demand,t}$ 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 HVAC سوخت مصرفی متناظر با نقطه کار بویلر می‌باشد که برابر است با نسبت انرژی حرارتی تولیدی بویلر (Q_b) به راندمان آن (η_b^{HVAC}) که در رابطه (۳) نشان داده شده است. از طرفی انرژی حرارتی تولیدی بویلر برابر با نسبت گرمایش مورد نیاز مشترکین شامل گرمایش فضا و آب گرم $(H_{demand,t})$ به راندمان کویل حرارتی (η_h^{HVAC}) است.

$$F_{b,t}^{HVAC} = \frac{Q_b}{\eta_b^{HVAC}} = \frac{H_{demand,t}}{\eta_b^{HVAC} \cdot \eta_h^{HVAC}} \quad \forall t \in T \quad (3)$$

با توجه به اینکه انرژی الکتریکی خریداری شده از شبکه برق در نیروگاهها تولید می‌شود، برای محاسبه کل سوخت مصرفی جهت تأمین تمامی تقاضاهای انرژی در سیستم HVAC، می‌بایست مقدار معادل سوخت مصرفی در نیروگاهها به ازاء مقدار انرژی الکتریکی تهیه شده از شبکه $(E_{grid,t}^{HVAC})$ را مطابق با رابطه (۴) محاسبه نمود. در این رابطه η_e^{HVAC} راندمان الکتریکی نیروگاه است و η_{grid} راندمان شبکه می‌باشد که مدل کننده تلفات ناشی از انتقال برق از محل تولید تا محل مصرف است.

$$F_{eg,t}^{HVAC} = \frac{F_{grid,t}^{HVAC}}{\eta_e^{HVAC} \cdot \eta_{grid}} \quad \forall t \in T \quad (4)$$

لذا کل مصرف انرژی سوخت در سیستم سنتی از رابطه (۵) محاسبه می‌گردد [۱۲].

$$F_t^{HVAC} = F_{b.t}^{HVAC} + F_{eg.t}^{HVAC} \quad \forall t \in T \quad (5)$$

۲.۲ محاسبه میزان مصرف سوخت در سیستم CCHP

در سیستم CCHP تقاضای انرژی الکتریکی مورد نیاز در اولویت اول از طریق واحد محرک اولیه (PGU) تامین می گردد و در صورتی که ظرفیت واحد PGU کوچکتر از تقاضای انرژی الکتریکی باشد کمبود انرژی الکتریکی از طریق شبکه سراسری برق فراهم می شود. رابطه (۶) و (۷) این مهم را نشان می دهد. همچنین جهت مرتفع نمودن تقاضای گرمایشی در این سیستم گازهای خروجی با دمای بالا از واحد PGU مورد بازیابی قرار می گیرد تا تقاضاهای گرمایشی توسط کویل حرارتی تامین گردد. تقاضای گرمایشی نیز توسط چیلر جذبی تامین می گردد. قابل ذکر است که در صورت نیاز چیلر الکتریکی کمبود انرژی گرمایشی را فراهم خواهد نمود که انرژی الکتریکی مورد نیاز جهت تغذیه آن نیز از طریق شبکه سراسری فراهم می گردد.

$$E_{pgu.t} = K\% \cdot E_{demand.t} \quad \forall t \in T \quad (6)$$

$$E_{grid.t}^{CCHP} = (1 - K)\% \cdot E_{demand.t} + E_{ec.t} \quad \forall t \in T \quad (7)$$

در این رابطه $E_{pgu.t}$ توان الکتریکی تولیدی توسط واحد محرک اولیه و $E_{grid.t}^{CCHP}$ برق تولید شد توسط شبکه است. از طرفی سوخت مصرفی واحد PGU از رابطه (۸) بدست می آید

$$F_{pgu.t} = \frac{E_{pgu.t}}{\eta_{et}} \quad (8)$$

در این رابطه η_e راندمان تبدیل سوخت به برق PGU است و از رابطه زیر بدست می آید [۱۳].

$$\eta_{e.t} = (a_0 + a_1 L_{load.t} + a_2 L_{load.t}^2 + a_3 L_{load.t}^3) \cdot \eta_{nom.e} \quad (9)$$

که $\eta_{nom.e}$ راندمان واحد PGU در بار کامل است و $L_{load.t}$ میزان بارگیری از واحد PGU در لحظه t است و از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$L_{load.t} = \frac{E_{demand.t}}{P_{capacity}} \quad (10)$$

همچنین $P_{capacity}$ ظرفیت نامی واحد PGU است، شایان ذکر است ضرایب a در معادله (۹) بسته به نوع محرک اولیه اعداد ثابتی هستند که در جدول (۱) ارائه می شود.

در این مقاله واحد PGU یک توربین گازی در نظر گرفته می شود. راندمان الکتریکی توربین گازی در بار کامل مطابق رابطه (۱۱) است [۱۳]:

$$\eta_{nom.e} = 0.04049 \cdot \ln(P_{capacity}) - 0.0687 \quad (11)$$

جهت جلوگیری از عملکرد واحد محرک اولیه، با راندمان پایین در بارهای کم مقدار یک نسبت τ مطابق رابطه (۱۲) از کسر بار الکتریکی جهت تعیین وضعیت روشن/خاموش بودن واحد PGU تعیین می شود. [۱۴]. با توجه به مرجع [۱۵]، ضریب روشن/خاموش PGU برابر ۰/۲۵ است. بنابراین، در این پژوهش نیز، ضریب τ برابر ۰/۲۵ در نظر گرفته می شود. از طرفی تعادل انرژی حرارت مصرفی توسط سیستم چیلر جذبی و کویل گرمایشی از رابطه (۱۳) برابر است با:

$$\tau = \frac{E_{pgu.t}}{E_{capacity}} \quad \forall t \in T \quad (12)$$

$$Q_{rec.t} + Q_{b.t} = Q_{ch.t} + Q_{hc.t} \quad (13)$$

حرارت بازیابی شده از محرک اولیه Q_{rec} ، از رابطه (۱۴) محاسبه می شود:

$$Q_{rec.t} = \frac{E_{pgu.t}}{\eta_{e.t}} \cdot \eta_{th} \quad \forall t \in T \quad (14)$$

و η_{th} در محرک اولیه با توربین گازی برابر است با [۱۳]:

$$\eta_{th} = -0.025 \cdot \ln(P_{capacity}) + 0.64 \quad (15)$$

ذکر این نکته اساسی است که روابط فوق برای محرک اولیه با توربین گازی در محدوده ۱۰۰۰-۱۰۰۰۰ کیلووات بدست آمده است [۱۳].

همچنین حرارت مورد نیاز جهت راه اندازی چیلر جذبی جهت تامین سرمایش از رابطه (۱۶) و حرارت لازم برای کویل گرمایشی از رابطه (۱۷) بدست می آید:

$$Q_{ch.t} = \frac{C_{demand.t}}{COP_{ch}} \quad \forall t \in T \quad (16)$$

$$Q_{hc.t} = \frac{H_{demand.t}}{\eta_h} \quad \forall t \in T \quad (17)$$

که COP_{ch} ضریب عملکرد چیلر جذبی و η_h ضریب راندمان کویل گرمایشی است. روش کار بدین طریق است که اگر گرمای بازیابی شده توان مورد نیاز را تامین نکند، کمبود انرژی حرارتی توسط بویلر سیستم CCHP فراهم می شود. سوخت مصرفی اضافه از بویلر از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$F_{b,t} = \frac{Q_{b,t}}{\eta_b} = \frac{Q_{ch,t} + Q_{hc,t} - Q_{rec,t}}{\eta_b} \quad \forall t \in T \quad (18)$$

در رابطه فوق η_b راندمان بویلر کمکی است. لذا میزان مصرف سوخت در سیستم CCHP برابر است با:

$$F_t^{CCHP} = F_{pgu,t} + F_{b,t} \quad \forall t \in T \quad (19)$$

۳. مدل بهره برداری انرژی محور سیستم CCHP

باتوجه به آنچه پیرامون نحوه محاسبه سوخت برای دو سیستم CCHP و HVAC بیان گردید، میزان سوخت مصرفی برای هر دو سیستم محاسبه می گردد، سپس طی این مدل، ظرفیت واحد PGU به نحوی تعیین می گردد تا میزان سوخت مصرفی در سیستم CCHP نسبت به سیستم HVAC حداکثر کاهش ممکن را داشته باشد. از این رو تابع هدف در مساله بهینه سازی انرژی محور بیشینه سازی نسبت صرفه جویی در مصرف انرژی اولیه (PESR)^۱ می باشد. این نسبت به صورت درصد انرژی صرفه جویی شده در سیستم CCHP در قیاس با سیستم HVAC مطابق با رابطه (۲۰) تعریف می شود [۱۴]:

$$FESR_{opt} = \max \left\{ \frac{F^{HVAC} - F}{F^{HVAC}} \right\} \quad (20)$$

۴. پروفیل تقاضای انرژی و متغیرهای مساله

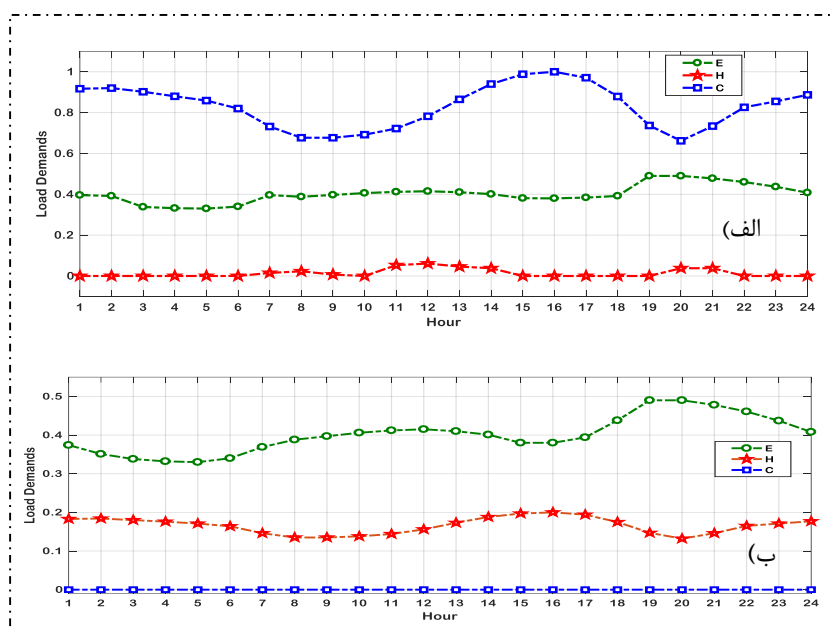
در این قسمت محاسبه مصرف سوخت مطابق با روش ارائه شده بر روی یک پردیس مسکونی واقع در شهرستان اهواز صورت می گیرد. گفتنی است متوسط دمای سالانه این شهر حدود ۴۶ درجه سانتی گراد در تابستان و ۶ درجه سانتی گراد در زمستان است. گرم ترین ماه سال مرداد ماه و سردترین ماه سال بهمن ماه می باشد. به طور کلی می توان گفت که در حدود ۳ ماه از سال هوا سرد و در مدت ۹ ماه نیز هوای گرم بر این شهرستان حاکم می باشد. 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 می باشد. اطلاعات کلی تقاضای بار شامل بارهای گرمایشی، سرمایشی و الکتریکی پردیس مسکونی در شکل ۲. برای دو فصل گرم و سرد نشان داده شده است. همچنین پیک بار هر یک از این تقاضاهای انرژی در جدول ۲. آورده شده است.

همان طور که در شکل ۲. دیده می شود، محور افقی نمودار بیانگر ساعات یک شبانه روز و محور قائم بیانگر میزان تقاضای بار مصرفی است. شایان ذکر است که این منحنی به صورت نرمالیزه شده (بی بعد) نسبت به بیشینه بار سرمایشی در فصل گرم ارائه شده است. در این شکل منحنی آبی رنگ تقاضای بار سرمایشی، منحنی قرمز رنگ تقاضای بار گرمایشی و منحنی سبز رنگ تقاضای بار الکتریکی در دو فصل گرم شکل (۲. الف) و فصل سرد شکل (۲. ب) را نشان داده می دهند.

¹ Primary Energy Saving Ratio

همانطور که در شکل (۲. الف) دیده می شود، در فصل گرم تقاضای بار سرمایشی از بار گرمایشی و بار الکتریکی بیشتر است و این منحنی نسبت به دو منحنی دیگر در سطح بالاتری قرار می گیرد. با توجه به شکل، تقاضای بار سرمایشی در ساعات ۱۶ و ۲۰ به ترتیب به بیشترین و کمترین مقدار خود در این فصل می رسد که تغییرات آن وابسته به دمای هوا در این ساعات است. همچنین بار الکتریکی در ساعت ۴ دارای کمترین مقدار خود است و در ساعات بعد از ۱۸ با اضافه شدن بار روشنایی این مقدار افزایش یافته و در ساعت ۱۹ به بیشترین مقدار خود می رسد. شایان ذکر است که در فصل گرم بار گرمایشی غالباً ثابت و مقدار آن ناچیز است و این مقدار جزئی بیشتر جهت مصارف آب گرم استفاده می گردد.

در شکل (۲. ب) نیز الگوی تقاضای بار سرمایشی و گرمایشی، و الکتریکی پردیس مسکونی در فصل سرد نشان داده شده است. بر خلاف نمودار فصل گرم، تقاضای بار الکتریکی در فصل سرما نسبت به بار سرمایشی و گرمایشی دارای مقادیر بیشتری است و مطابق این شکل، مقدار بیشینه آن در ساعت ۱۹ رخ می دهد و کمترین مقدار آن مربوط به ساعت ۵ می باشد. بار گرمایشی نیز به ترتیب در ساعات ۱۶ و ۸ دارای بیشترین و کمترین مقدار خود است و یکنواختی بیشتری نسبت به بار الکتریکی دارد. همچنین با توجه به پایین بودن دما تقاضای بار سرمایشی در فصل سرد برابر صفر است.



شکل ۲- الگوی بار مصرفی نرمالیزه شده پردیس مسکونی مفروض، الف) فصل گرم، ب) فصل سرد [۹]

جدول ۱- پیک بار الکتریکی، سرمایش و گرمایش پردیس مسکونی (برحسب کیلووات) [۹].

پردیس مسکونی

پیک بار الکتریکی	۳۲۰۰
پیک بار سرمایشی	۶۵۰۰
پیک بار گرمایشی	۳۹۲۰

در ادامه جهت ارزیابی تابع هدف مورد نظر، متغیرهای مورد نیاز برای مدل سازی سیستم مرجع (HVAC) و سیستم CCHP در جدول ۲ آورده شده اند. مقادیر داده شده بیانگر مقدار متعارف برای هر یک از تجهیزات می باشد [۱۰، ۱۴].

جدول ۲- پارامترهای فنی برای سیستم CCHP و سیستم HVAC

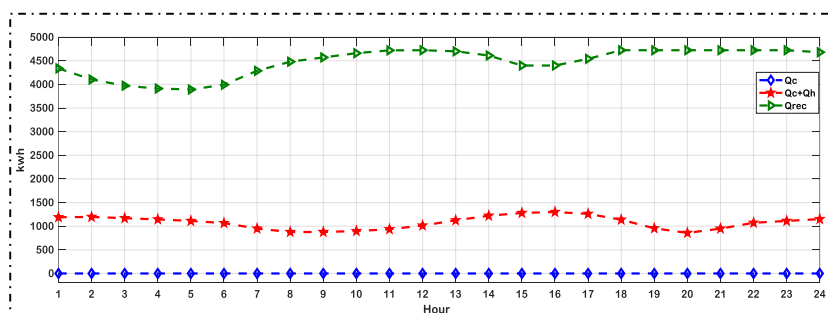
سیستم	متغییر	نماد	مقدار
سیستم CCHP	راندمان واحد PGU	a_0	۰/۱۷۹۷
		a_1	۲/۳۲۹
		a_2	-۲/۳۳۴
		a_3	۰/۸۲۶۴
	راندمان کویل گرمایشی	η_h	۰/۸
	ضریب عملکرد چیلر جذبی	COP_{ch}	۱/۲
سیستم HVAC	راندمان بویلر	η_b	۰/۸
	راندمان الکتریکی	η_e^{HVAC}	۰/۳۵
	راندمان کویل گرمایشی	η_h^{HVAC}	۰/۸
	ضریب عملکرد چیلر الکتریکی	COP_{ec}	۳/۵
	راندمان بویلر	η_b^{HVAC}	۰/۸
	راندمان شبکه انتقال برق	η_{grid}	۰/۹۵

۵. نتایج عددی

در این قسمت نتایج عددی حاصل از اجرای رویه ارائه شده برای پردیس مسکونی مذکور، جهت بهینه سازی تابع هدف مطرح شده، یعنی افزایش حداکثری نرخ صرفه جویی در مصرف سوخت ارائه شده است. قابل ذکر است که، سیستم مورد مطالعه در محیط کدنویسی نرم افزار MATLAB7.10.0 بر روی یک رایانه شخصی با مشخصات RAM 4، Core i5، شبیه سازی شده است. همچنین جهت حل مسأله بهینه سازی مورد نظر از الگوریتم بهینه سازی ژنتیک استفاده شده است. در الگوریتم بهینه سازی ژنتیک، جمعیت اولیه برابر ۱۰۰ کروموزوم، نرخ تقاطع و نرخ جهش نیز به ترتیب برابر ۰/۷، و ۰/۳۵ در نظر گرفته شده، که این مقادیر با استفاده از روش تست و تنظیم تعیین شده اند. گفتنی است در فرآیند تولید مجدد از روش چرخه رولت جهت تولید فرزند برای نسل بعد استفاده شده است. با حل مسأله بهینه سازی اندازه ظرفیت بهینه واحد PGU و سایر

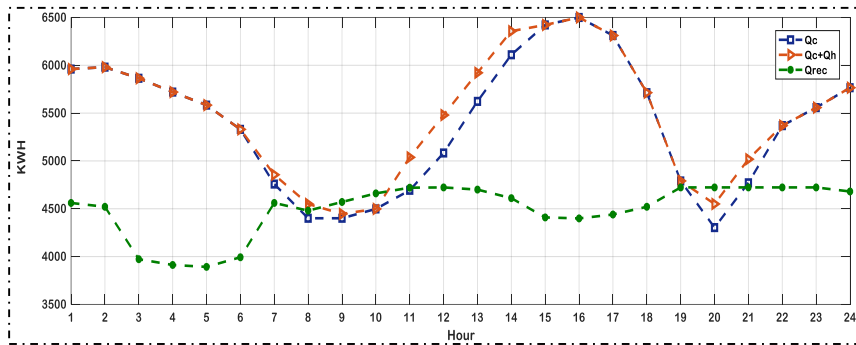
ادوات تشکیل دهنده سیستم CCHP بر مبنای یک آنالیز انرژی محور بدست آمده است. لازم به ذکر است میزان سوخت محاسبه شده شامل دو مولفه می باشد که عبارتند از: سوخت به کار گرفته شده در محرک اولیه (PGU) و گاز ورودی بویلر حرارتی و همچنین سوخت مصرف شده در نیروگاه های تولیدکننده توان الکتریکی جهت تامین توان الکتریکی، که مورد اخیر از تبدیل انرژی الکتریکی دریافتی از شبکه به سوخت مصرفی در نیروگاه توسط رابطه (۸) بدست می آید. علاوه بر این ظرفیت مناسب سایر تجهیزات سیستم به عنوان متغیرهای وابسته محاسبه شده و نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین نمودارهای انرژی و سوخت حاصل از اجرای الگوریتم ژنتیک مطابق با ظرفیت بهینه و نقطه کار بهینه بویلر و چیلر جذبی مشخص و نمودار آنها نیز برای دو فصل گرم و سرد در ترسیم شده است. ظرفیت بهینه واحد PGU به عنوان متغیر مستقل مسأله بهینه سازی ۲۶۸۰ کیلووات محاسبه شده است که با در نظر گرفتن این مقدار سیستم تولید انرژی CCHP، ۱۴٪ نسبت به سیستم مرجع کاهش مصرف سوخت را به همراه داشته است.

در شکل ۳. نمودار مربوط به انرژی حرارتی برای فصل زمستان رسم شده است. با توجه سرمای هوا در فصل زمستان مطابق با شکل ۳. تقاضای سرمایشی وجود ندارد و گرمای بازایی شده فقط جهت تقاضای گرمایشی به کار برده می شود گفتنی است با توجه به بیشتر بودن مقدار گرمای بازایی شده از تقاضای حرارتی گرمای بازایی شده مرتفع کننده نیاز حرارتی می باشد. همچنین مطابق با نمودار، در ساعت ۱۵ بیشترین مقدار گرمای مورد نیاز برای پردیس مسکونی مورد بحث نمایان می گردد که در حدود ۱۴۰۰ کیلووات ساعت می باشد. بیشترین مقدار گرمای بازایی شده نیز در ساعت ۱۲ به مقدار ۴۸۰۰ کیلووات ساعت است.



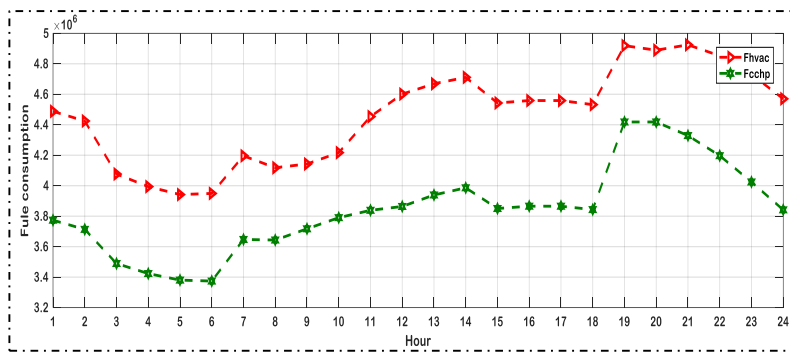
شکل ۳- مقایسه انرژی حرارتی بازایی شده و تقاضای انرژی حرارتی در فصل زمستان

در شکل ۴. نمودار انرژی مربوط به فصل گرم نشان داده شده است، بیشترین و کمترین مقدار گرمای بازایی شده به ترتیب برابر با ۴۶۰۰ و ۳۷۰۰ کیلووات ساعت می باشد که در ساعات ۱۲ و ۴ رخ می دهد. در این حالت بیشترین مقدار گرمای مصرفی در حدود ۶۵۰۰ کیلووات ساعت است که شامل تقاضای سرمایشی و گرمایش می باشد در ساعاتی که گرمای بازایی شده به مقدار کافی برطرف کننده تقاضای برودتی و حرارتی نباشد از بویلر حرارتی برای تامین کمبود انرژی حرارتی استفاده می شود، که غالباً برای تامین گرمای مورد نیاز ورودی چیلر مورد استفاده قرار می گیرد.



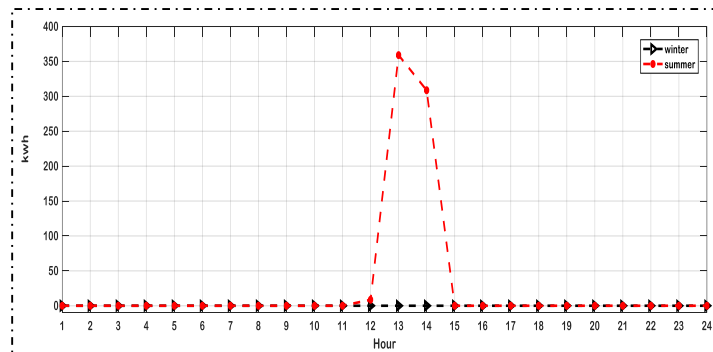
شکل ۴- مقایسه انرژی حرارتی بازیابی شده و تقاضای انرژی حرارتی در فصل تابستان.

مطابق شکل ۵- نمودار مصرف سوخت برای تمام روزهای سال برای سیستم HVAC و CCHP ترسیم شده است. برای سیستم HVAC بیشترین مقدار سوخت مصرفی در حدود ۵ مگاوات ساعت و کمترین مقدار برابر ۳/۹ مگاوات ساعت است و برای سیستم CCHP بیشترین و کمترین مقدار سوخت مصرف شده به ترتیب برابر ۴/۴ و ۳/۳ مگاوات ساعت می باشد.



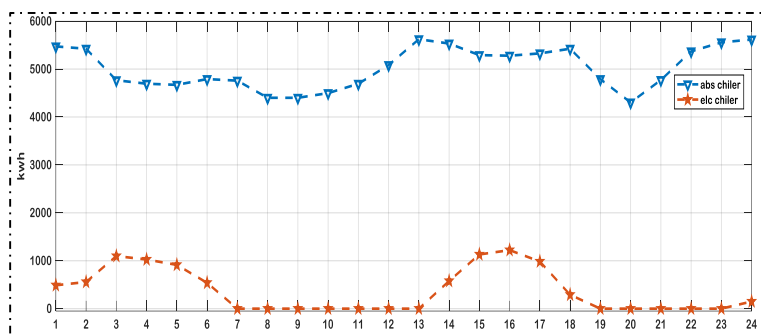
شکل ۵- نمودار مصرف سوخت متناظر بار بهینه در تمام روزهای سال

در شکل ۶. نقطه کار بویلر در فصل زمستان و فصل تابستان نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می شود به جز در فصل زمستان و بازه زمانی ساعت ۱۲ تا ۱۵ در فصل تابستان در باقی ایام سال بویلر خاموش می ماند و گرمای بازیابی شده پاسخگوی نیازهای سرمایشی و گرمایشی است. در واقع استفاده از بویلر در ساعاتی که مقدار گرمای بازیابی شده از مجموع تقاضای گرمایشی و گرمای لازم برای ورودی چیلر کمتر باشد ضرورت دارد.



شکل ۶- نقطه کار بویلر تحت ظرفیت بهینه

در شکل ۷. نیز نقطه کار چیلر جذبی و چیلر الکتریکی در ساعات شبانه روز برای فصل تابستان ترسیم شده است. توان تولیدی چیلر جذبی به ترتیب در ساعت ۱۳ و ۲۰ دارای بیشترین و کمترین مقدار خود است که این مقادیر برابر ۵۷۰۰ و ۴۱۰۰ کیلووات ساعت می باشند. همانطور که پیش تر گفته شد امتیاز استفاده از سیستم CCHP از این جهت است که گرمای اتلافی حاصل از محرک اولیه در چیلر و تجهیزات گرمایشی به کار گرفته می شود و برودت و حرارت مورد نیاز فراهم می گردد. این مساله در سیستم های انرژی موجود در مناطق گرمسیری همچون شهرستان اهواز که دارای تقاضای بار سرمایشی بزرگ هستند، از اهمیت بالایی برخوردار می باشد. همانطور که در شکل ۷. مشاهده می شود در ساعت ۱۶ چیلر الکتریکی بیشترین مقدار توان تولیدی خود را دارا است زیرا تقاضای سرمایشی در این ساعت بالا است و گرمای بازیابی شده به مقدار کافی برطرف کننده نیاز سرمایشی نیست همچنین بیشترین مقدار انرژی تولیدی چیلر الکتریکی برابر ۱۲۰۰ کیلووات ساعت است.



شکل ۷- نقطه کار چیلر جذبی و الکتریکی تحت ظرفیت بهینه

جدول ۳- ظرفیت مناسب تجهیزات مختلف در سیستم CCHP مورد مطالعه

نام تجهیز	ظرفیت مناسب (کیلووات)
واحد PGU	۲۶۸۰
چیلر جذبی	۵۳۰۰
چیلر الکتریکی	۱۲۰۰
بویلر	۳۸۰

۶. نتیجه گیری

در این مقاله به معرفی سیستم های تولید انرژی سه گانه پرداخته شد. سپس مدلسازی یک سیستم تولید انرژی سه گانه 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 بهینه سازی جهت طراحی سیستم مورد نظر بر اساس یک آنالیز انرژی جهت دستیابی به بیشترین میزان صرفه جویی در مصرف سوخت محاسبه گردید. علاوه بر این ظرفیت مناسب سایر تجهیزات سیستم به عنوان متغیرهای وابسته بدست آمد. شایان ذکر است که اندازه بدست آمده واحد PGU جهت استفاده در پردیس مذکور برابر ۲۶۸۰ کیلووات تعیین گردید که با در نظر گرفتن این مقدار سیستم CCHP نسبت به سیستم مرجع ۱۴/۴۰٪ صرفه جویی انرژی را در افق زمانی یک ساله به همراه خواهد داشت. این مهم نشان دهنده موفقیت آمیز بودن بکارگیری سیستم های CCHP در منطقه مورد مطالعه می باشد.

مراجع

1. AlSulaiman, F.A. F. and Hamdullahpur, I. (2011), "Performance comparison of three trigeneration systems using organic rankine cycles," *Energy*, 36 (9), pp 5741-5754
2. C.T. Group. (2010), "Introducing combined heat and power," Carbon trust.
3. Mago, P.J. and Hueffed, A.K. (2010), "Evaluation of a turbine driven CCHP system for large office buildings under different operating strategies," *Energy Build*, 42 (10) pp1628-36.
4. Zhang, C. and Yang, M Lu, M, Zhu J, Xu.W.(2012) "International conference on medical physics and biomedical engineering thermal economic analysis on LiBr refrigeration-heat pump system applied in CCHP system," *Phys Proc* (33)pp 672-677.
5. E. and E.A. ICF Company. (2008), "Technology characterization: reciprocating engines," Wash. DC: Prep Environ Prot Agency.
6. P. MITCO2. (2006), "Mitigation of industrial CO2 emissions through the use of heat, cooling, and power networks in industrial parks".
7. Moussawi, H., (2016). "Review of tri-generation technologies: Design evaluation, optimization, decision-making, and selection approach," *Energy Conversion and Management Vol 120* pp.157-196.
8. Cho, H. and Smith, AD. and Mago, P. (2014), "Combined cooling, heating and power: a review of performance improvement and optimization," *Applied Energy*, 136 (31), pp 168-185.
9. مشهور، ع. و حبیبیان، م. (۱۳۹۶) "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"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز.



10. Wang JJ, Zhang CF, Jing YY. (2010), "Multi-criteria analysis of combined cooling, heating and power systems in different climate zones in China," *Energy*;87(4), pp 1247-59.
11. Mostafavi Tehrani, S.S., Saffar-Avval, M., Mansoori, Z., Behboodi Kalhori, S., Abbassi, A., Dabir, B., et al., (2013). "Development of a CHP/DH system for the new town of Parand: an opportunity to mitigate global warming in Middle East," *Applied Therm Eng*, (59) , pp 298–308.
- 12 Gogoi, T.K. (2014), "A combined cycle plant with air and fuel recuperator for captive power application," part 1: performance analysis and comparison with nonrecuperated and gas turbine cycle with only air recuperator. *Energy Convers Manage*, (79) PP 771–7.
- 13 Tichi, S.G and Ardehali, M.M and Nazari, M.E., (2010). "Examination of energy price policies in Iran for optimal configuration of CHP and CCHP systems based on particle swarm optimization algorithm," *Energy Policy*, 38(10), pp 6240-50.
- 14 Wang, J.J., and Zhai, Z.Q., and Jing, Y.Y., and Zhang, X.T and Zhang, C.F., (2011) "Influence analysis of building types and climate zones on energetic, economic and environmental performances of BCHP systems," *Appl Energy*;88(9), 3097-112.