نشریه علمی - پژوهشی مدیریت انرژی
شماره اول / سال اول / پاییز ۱۳۹۰ / صفحه ۲- ۱۰

تعیین بهینهٔ ظرفیت و برنامهٔ کاری سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت در یک واحد صنعتی با محرک اولیهٔ موتور گازسوز

عادل غلامی[1*]، کارشناس ارشد، **محمدصادق قاضی‌زاده**[2]، استادیار گروه برق
جواد پاک‌دامن[3]، کارشناس ارشد، **میثم انصاری**[4]، کارشناس ارشد مهندسی برق
[3،1] دانشکده مکانیک و انرژی ـ دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)ـ تهران ـ ایران
Gholamiadel7@gmail.com - javadpakdaman@stud.pwut.ac.ir
[4،2] دانشکده برق ـ دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)ـ تهران ـ ایران
ghazizadeh@pwut.ac.ir - ansari.meisam@gmail.com

دریافت مقاله: ۹۰/۱/۲۶
پذیرش مقاله: ۹۰/۷/۸

چکیده: با تجدید ساختار در صنعت برق، تولیدات پراکنده جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند. سیستم‌های تولید هم‌زمان به دلیل بازدهٔ بالا، بیش از سایرین مورد استفاده قرار گرفته‌اند. هدف اصلی این مطالعه، تعیین بهینهٔ ظرفیت و برنامهٔ کاری یک سیستم **CHP** بر پایهٔ موتور گازسوز در طول ساعات شبانه‌روز برای تأمین برق و حرارت یک کارخانه به‌صورت هم‌زمان است. همچنین بر اساس نصب این سیستم در کارخانه، ظرفیت و برنامهٔ کاری بویلرهای بخار بهینه می‌شوند. در این مقاله، با در دست داشتن بار الکتریکی و حرارتی کارخانه، ظرفیت بهینه سیستم **CHP**، از دید صاحب کارخانه با هدف بیشینه کردن **NPV** طرح به دست آمده است. سپس مسئلهٔ بهینه‌سازی برای یک کارخانهٔ نمونه با توجه به قوانین موجود در ایران حل شده است. در پایان، کارآیی طرح در سناریوهای مختلفی با توجه به تغییرات قیمت سوخت، تعرفهٔ خرید برق شبکه و قیمت فروش برق به شبکه، مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: سیستم‌های تولید هم‌زمان، موتور ژنراتور گازسوز، بهینه‌سازی، ارزش خالص کنونی طرح، آنالیز حساسیت.

۱. مقدمه

سیستم‌های تولید پراکنده با هدف بهینه‌سازی در مصرف انرژی به‌صورت کاهش اتلاف ناشی از انتقال و توزیع انرژی الکتریکی در شبکه و نیز کاهش آلودگی‌های ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی به کار گرفته می‌شوند. استفاده از سیستم‌های تولید هم‌زمان (CHP[1]) با راندمان کلی ۷۰ تا ۹۰ درصد یکی از راهکارهای مؤثر در بهینه‌سازی مصرف انرژی است. در صورت استفاده از این سیستم‌ها، می‌توان مقدار حرارت قابل توجهی را بازیافت کرد و در نتیجه، نیاز کمتری به بویلرهای بخار موجود و یا نصب بویلرهای بخار با ظرفیت بالا در یک کارخانهٔ تازه تأسیس است. این حرارت می‌تواند جایگزین حرارت تولیدی توسط بویلرهای بخار شود؛ اما در صورتی که پارامترهای لازم آن (ظرفیت، برنامهٔ کاری، مکان و...) به‌صورت دقیق انتخاب نشوند، ممکن است کارآیی طرح کاهش پیدا کند. بر این اساس، دیدگاه‌های مختلفی برای تعیین پارامترهای واحدهای تولید هم‌زمان ارائه شده است. توابع هدف از دید شبکه، کارخانه‌دار و سرمایه‌گذار تعریف و با روش‌های گوناگونی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. غلامی و همکاران [۱]، ظرفیت بهینهٔ سیستم میکرو CCHP بر پایهٔ موتور گازسوز را از دید یک سرمایه‌گذار برای آپارتمان مسکونی به دست آوردند. تابع هدف را ماکزیمم کردن سود سالانه در نظر گرفته‌اند. طالبی و همکارش [۲] ظرفیت بهینه را برای سیستم CCHP بر پایهٔ پیل سوختی به دست آورده‌اند. سان [۵]، مسئله را از دید یک کارخانه‌دار و با محرک اولیهٔ موتور گازسوز، و کنگ و همکاران [٦]، مسئله را از دید یک کارخانه‌دار و با محرک اولیهٔ موتور استرلینگ با هدف کاهش دورهٔ بازگشت سرمایه مورد بررسی قرار داده‌اند. فرانگوپولس و همکاران [۷] نیز، مسئله را از دید صاحب کارخانه با هدف افزایش ارزش خالص فعلی[2] (NPV) با استفاده از الگوریتم ژنتیک تحلیل کرده‌اند. همچنین سان NPV و همکاران [۸]، مسئله را با هدف حداکثرسازی راندمان انرژی بررسی کرده‌اند. کنگ و همکاران [۹]، یک سیستم تولید هم‌زمان برق، حرارت و سرمایش در مقیاس کوچک را مورد بررسی آزمایشگاهی قرار داده‌اند. هاشمی [۱۱]، پیکربندی سیستم را متشکل از CHP، بویلر کمکی، مخزن ذخیره‌ساز گرما، چیلر جذبی در نظر گرفته، و مسئلهٔ بهینه‌سازی را با ماکزیمم کردن سود سالانه و با استفاده از روش غیر خطی (TOOCS-off)[3] به کمک نرم‌افزار LINGO حل کرده است. در [۱۲] صنایع و اردالی، برای میکروتوربین با استفاده از آنالیز اقتصاد ــ انرژی[4]، قیمت برق و حرارت تولید شده را به دست آورده و سپس با در نظر گرفتن سود سالانه به عنوان تابع هدف، ظرفیت ماکزیمم را در دو حالت اتصال به شبکه و در حالت جدا از شبکه به دست آورده‌اند. پیدرو و همکاران [۱۳]، ظرفیت بهینهٔ سیستم CCHP را براساس آنالیز انرژی، اقتصادی و محیط زیست در استراتژی‌های که CCHP به عنوان تأمین کنندهٔ انرژی با اولویت تأمین برق[5]، تأمین کنندهٔ انرژی با اولویت تأمین حرارت[6] و تأمین کنندهٔ انرژی با اولویت تأمین برق و حرارت به‌صورت هیبریدی[7] عمل می‌کند، به دست آورده‌اند. کاوادیس و همکاران [۱٤]، مسئلهٔ بهینه‌سازی را با هدف ماکزیمم کردن سود خالص سالانه[8] حل کرده‌اند. هنگبورن و همکاران [۱۵]، بهینه‌سازی را با هدف کاهش هزینهٔ سیستم CHP و به‌صورت غیر خطی آمیخته با عدد صحیح[9] حل کرده و نتایج به دست آمده را نیز آنالیز حساسیت کرده‌اند. در [۱٦]، مؤلف ابتدا معادلهٔ تعادل انرژی را برای واحد CCHP لحاظ کرده و جواب بهینهٔ سیستم را با هدف ماکزیمم کردن تابع هدف سه منظوره به دست آورده است. تابع هدف سه منظوره، مجموعِ صرفه‌جویی در هزینهٔ کل[10]، صرفه‌جویی در انرژی اولیه[11] و شدت کاهش آلاینده‌های زیست محیطی[12] می‌باشد. کمپوس سیلادور و همکاران [۱۷]، مسئلهٔ بهینه‌سازی را با هدف افزایش NPV برای یک سیستم CHP خانگی با استفاده از قوانین موجود در اسپانیا حل کرده‌اند. مؤلف، بهینه‌سازی را برای دو حالت استفاده از مخزن ذخیره‌ساز و عدم استفاده از مخزن ذخیره‌ساز انجام داده است و در نهایت، مسئله را آنالیز حساسیت کرده است.

در این مقاله، روابطی برای تعریف هزینه‌ها، درآمدها و قیود لازم برای مسئله، ارائه و تابع هدف بر اساس بیشینه کردن NPV از دید صاحب کارخانه ارائه، و همچنین بهینه‌ترین ظرفیت و برنامهٔ کاری از لحاظ اقتصادی و خصوصیات عملکردی موتور و بویلرهای بخاردر هر سناریو محاسبه شده است.

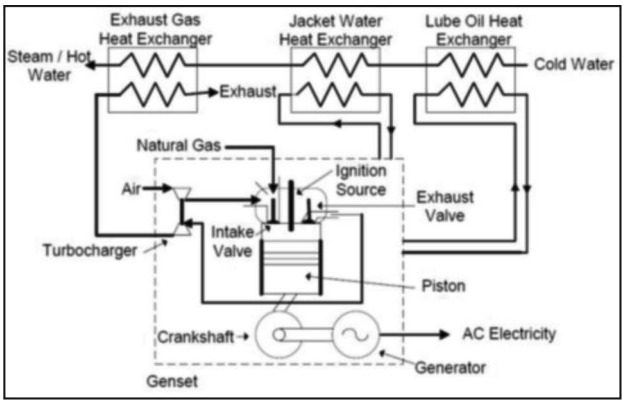
۲. مدل‌سازی سیستم‌های تولید هم‌زمان برق و حرارت با محرک اولیهٔ موتور گازسوز

سیستم تولید هم‌زمان ارائه شده همان‌گونه که در شکل (۱) مشاهده می شود، شامل یک موتور احتراقی گازسوز به عنوان محرک اولیه است که ضمن تولید الکتریسیته و تأمین نیازهای الکتریکی شبکه،

1. Combined Heat and Power
2. Net Present Value (NPV)
3. Techno-economic Optimal Operation of Cogeneration Systems
4. Energy Economic

5. Following the electric load(FEL)
6. Following the thermal load(FTL)
7. Hybrid electric-thermal load operation(HETS)
8. Annual profit(AP)
9. Mixed integer Nonlinear programming
10. Annual total cost saving (ATCS)
11. Primary Energy Savings (PES)
12. Carbon Dioxide Emission Reduction (CDER)

با فروش مازاد الکتریسیتهٔ تولیدی و بازیافت حرارت آن، موجب درآمدزایی و صرفه‌جویی سالیانه در واحد شده که در نهایت، هزینه‌های ناشی از خرید و نصب موتور احتراقی و مجموعه تولید پراکنده را جبران می‌کند. با توجه به اینکه ایران، کشوری با منابع ذخیرهٔ گازی فراوان است، بنابراین توسعهٔ این‌گونه مولدهای گازسوز می‌تواند بسیار مفید باشد.



شکل (۱): نمایی از سیستم CHP با محرک اولیهٔ موتور گازسوز [۱۱]

استفاده از واحدهای تولید هم‌زمان در کارخانه‌ها، مزایای زیادی برای مالکین واحدهای صنعتی و صاحبان کارخانه‌ها به همراه دارد؛ اما کارآیی این واحدها وابستگی زیادی به تعیین پارامترهای آن دارد. اگر پارامترهای مورد نیاز طرح به دقت تعیین نشود، ممکن است در آینده با تغییر شرایط، طرح کارآیی خود را از دست بدهد. برای ارائهٔ یک طرح کامل، پارامترهای زیادی باید مشخص شوند. برخی از این پارامترها عبارت‌اند از: فناوری واحد، ظرفیت واحد، برنامهٔ کاری واحد، قوانین اتصال به شبکه و... . انتخاب این پارامترها باید با توجه به تغییرات بار الکتریکی و حرارتی کارخانه و قیمت بازار و سایر پارامترها صورت گیرد. با توجه به اینکه نقطهٔ پرباری و کم‌باری کارخانه، کمتر از ۲۰ درصد با هم اختلاف دارند، لذا می‌توان تقاضای برق و حرارت کارخانه در طول سال را ثابت فرض کرد و طراحی بهینه را برای نقاط پرباری کارخانه انجام داد. همچنین با توجه به ساختار شبکهٔ برق ایران، خرید برق از شبکه یا فروش برق به آن در سه رژیم کاری با تعرفه‌های مختلف صورت می‌گیرد. بدین ترتیب، برای ارائهٔ طرح پارامترهای مجهول به‌صورت زیر خلاصه می‌شوند:

- ظرفیت نامی موتور گازسوز
- ظرفیت نامی بویلرهای بخار کمکی
- برنامهٔ کاری موتور گازسوز در سه رژیم مختلف
- برنامهٔ کاری بویلرهای بخار در سه رژیم مختلف

تعیین این پارامترها باید طی یک مسئلهٔ بهینه‌سازی از دید مالک کارخانه صورت گیرد. در این مقاله، فرض می‌شود سرمایه‌گذار طرح، همان مالک کارخانه است. بدین ترتیب،برای تعریف مسئله باید موارد زیر به دقت مشخص شوند [۱، ۲، ٤-٦ و ۱۰-۱۸]:

- **درآمدها**
- **هزینه‌ها**
- **قیود**
- **تابع هدف**

در این مقاله، مسئله برای یک دورهٔ بلندمدت ۲۰ ساله طرح می‌شود.

۱.۲. درآمدها

تمامی این روابط، از طریق معادلات اعمالی وزارت نیرو و وزارت نفت بر قبوض مصرفی کارخانه‌ها استخراج شده است. درآمدهایی که پس از نصب واحد برای مالک ایجاد می‌شود، در حالت کلی به موارد زیر تقسیم می‌شوند [۱، ۲، ٤-٦ و ۱۰-۱۸]:

۱.۱.۲. درآمد ناشی از فروش برق

در صورتی که تولید واحد بیش از مصرف کارخانه باشد، مالک کارخانه می‌تواند آن را طی عقد قرارداد تضمینی به شبکه بفروشد. مقدار این درآمد طبق رابطهٔ (۱) محاسبه می‌شود.

$$R_s = \sum_d \sum_h E_{GE}^{d,h} . C_c . T_i \qquad (۱)$$

که $E_{GE}^{d,h}$ توان الکتریکی تولیدی توسط موتور گازسوز، C_c قیمت فروش برق توسط CHP به شبکه و T_i مدت زمان کارکرد موتور گازسوز را نشان می‌دهد.

۲.۱.۲. درآمد بازیافت حرارت (درآمد ناشی از عدم تولید حرارت توسط بویلر)

حرارت موجود در گاز خروجی از اگزوز موتور، می‌تواند توسط سیستم‌های بازیافت گرما[1] بازیافت شود.

$$R_{Re} = \sum_d \sum_h (Q_D - Q_b) U_{bf} . C_{bf} . T_i \qquad (۲)$$

که Q_D بار حرارتی ساختمان، Q_b توان حرارتی تولید شده توسط بویلر کمکی، U_{bf} مقدار سوخت مصرفی بویلر و C_{bf} قیمت سوخت (گاز طبیعی) می‌باشد.

۳.۱.۲. درآمد ناشی از کاهش خرید برق

مشترک مورد نظر قبل از نصب سیستم CHP، برق مورد نیاز خود

1. Heat Recovery Steam Generator (HRSG)

را از شبکه خریداری می‌کرد، ولی بعد از نصب CHP این هزینه حذف شده و به عنوان درآمد در محاسبات لحاظ شده است.

$$R_{\mathrm{b}} = \sum_{\mathrm{d}} \sum_{\mathrm{h}} \left(\mathrm{E_D} - \mathrm{E}_g^{\mathrm{d,h}}\right) \mathrm{C_g}.\,\mathrm{T_i} \qquad (۳)$$

که $\mathrm{E_D}$ دیماند الکتریکی ساختمان، $\mathrm{E}_g^{\mathrm{d,h}}$ برق خریداری شده از شبکه بعد از نصب سیستم CHP و $\mathrm{C_g}$ قیمت خرید برق از شبکه می‌باشد.

۴.۱.۲. درآمد اسقاط تجهیزات

پس از اتمام عمر تجهیزات CHP، اسقاط آن نیز دارای ارزش درآمدی است. درآمد اسقاط، معمولاً ضریبی از هزینهٔ اولیه آن است که این ضریب در ایران معادل یک دهم تعیین شده است [۱ و ۱۸].

$$\mathrm{R_O} = 0.1 \times \mathrm{I_{o\ CHP}} \qquad (۴)$$

$\mathrm{I_{0CHP}}$ هزینهٔ اولیه تجهیزات سیستم CHP می‌باشد که شامل موتور گازسوز، سیستم بازیافت حرارت و بویلر کمکی می‌باشد.

۵.۱.۲. درآمد عدم قطعی برق

با نصب موتور گازسوز، تمام یا بخشی از برق مورد نیاز کارخانه توسط موتور گازسوز تأمین می‌شود. بدین ترتیب، قابلیت اطمینان برق‌رسانی به کارخانه بیشتر می‌شود و در طول سال، کارخانه کمتر با قطعی برق مواجه می‌گردد. این درآمد را می‌توان به‌صورت عدد ثابتی به‌عنوان متوسط سالیانه در محاسبات منظور کرد.

$$R_{nbo} = constant \qquad (۵)$$

با توجه به ثابت بودن این درآمد و عدم تأثیر آن در پاسخ مسئله از آن صرفنظر می‌شود.

۶.۱.۲. درآمد پرداخت مابه‌التفاوت

در بیشتر کشورهای دنیا از جمله ایران، برای تشویق سرمایه‌گذاران به استفاده از واحدهای تولید هم‌زمان، تعرفهٔ گاز مصرفی CHP کمتر از گاز شهری (معمولاً برابر گاز نیروگاهی) در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب، در صورت استفاده از گاز شهری، مابه‌التفاوت قیمت گاز شهری و نیروگاهی به مالکین این واحدها پرداخته می‌شود. این مقدار در کشور ایران توسط وزات نفت به‌صورت رابطهٔ زیر اعمال می‌شود. [۱، ۳ و ۱۵]:

$$R_M = 27.11\mathrm{E_{GE}^{d,h}}.\,U_f.\,T_i \qquad (۶)$$

که $\mathrm{U_f}$ مقدار سوخت مصرفی توسط موتور گازسوز است.

۲.۲. هزینه‌ها

۱.۲.۲. هزینهٔ اولیه

هزینهٔ اولیه، شامل هزینهٔ انواع تجهیزات و موتور است و هزینهٔ زمین صفر در نظر گرفته می‌شود. این هزینه در ظرفیت‌های بین ۵۰۰ کیلووات تا ۱۸۰۰ کیلووات با تقریب خوبی به‌صورت تابعی خطی از ظرفیت الکتریکی موتور با تخمین رگرسیون به دست می‌آید [۱]:

$$I_{\mathrm{OGE}} = 139803 + 300.7\mathrm{E_{GE}} \qquad (۷)$$

۲.۲.۲. هزینهٔ تعمیر و نگهداری

این هزینه معمولاً شامل هزینهٔ ثابت و متغیر است که به‌صورت ضریبی از ظرفیت واحد در نظر گرفته می‌شود [۱ و ۱۱]:

$$C_{O\&M} = \sum_{d} \sum_{h} E_{GE}^{d,h} \left(C_{o\&m)}\right).\,T_i \qquad (۸)$$

که $\mathrm{C_{o\&m}}$ هزینهٔ تعمیر و نگهداری بر واحد تولید است ($/kWh).

۳.۲.۲. هزینهٔ سوخت موتور [۱ و ۱۱]

$$C_{Fuel} = \sum_{d} \sum_{h} E_{GE}^{d,h} \left(\frac{C_f}{HR.\,\eta_{GE}}\right) \qquad (۹)$$

که $\mathrm{C_f}$ قیمت گاز طبیعی، HR نرخ حرارتی و η_{GE} بازدهٔ موتور گازسوز است.

۴.۲.۲. هزینهٔ پرسنل

$$C_s = constant \qquad (۱۰)$$

این هزینه مقداری ثابت است و معمولاً برای واحدهایی با ظرفیت کمتر از ۲ مگاوات صفر فرض می‌شود.

۵.۲.۲. هزینهٔ خرید برق از شبکه[۱ و ۱۱]

$$\mathrm{C_{grid}} = \sum_{\mathrm{d}} \sum_{\mathrm{h}} \left(\mathrm{E_D} - \mathrm{E_{GE}^{d,h}}\right).\,\mathrm{C_g} \qquad (۱۱)$$

کارخانه به شبکهٔ توزیع فشار متوسط (خط ۲۰ کیلوولت) متصل می‌شود تا برق مورد نیاز کارخانه در صورت عدم تأمین از طریق موتور گازسوز، از شبکه تأمین‌شود.

۳.۲. قیود

مجموع توان الکتریکی تولیدی موتور گازسوز و توان تبادلی با شبکه باید تقاضای الکتریکی کارخانه را تأمین کند. همچنین حرارت بازیافتی از موتور و حرارت تولیدی بویلرهای کمکی، باید تقاضای حرارتی کارخانه را پاسخ دهند. ظرفیت موتور گازسوز باید در محدودهٔ مشخصی تعیین شود. روابط زیر، کلیهٔ قیود مورد نیاز مسئله را نشان می‌دهد [۱۰ و ۱۱]:

$$\begin{aligned}
&E_{GE}^{d,h} + E_g^{d,h} = E_D \\
&Q_{GE}^{d,h} + Q_B^{d,h} = Q_D \\
&Q_{GE}^{d,h} \le 1.1 E_{GE}^{d,h} \\
&I \times (Q_{GE}^{min}) \le Q_{GE}^{d,h} \le I \times (Q_{GE}^{max}) \\
&I \times (E_{GE}^{min}) \le E_{GE}^{d,h} \le I \times (E_{GE}^{max}) \\
&\mathrm{E_{GE}^{max}} \le 1000
\end{aligned} \qquad (۱۲)$$

I یک متغیر باینری است که در صورت روشن بودن موتور برابر یک و در صورت خاموش بودن آن برابر صفر است.

حداکثر ظرفیت بازیافت حرارت از چنین سیستمی ۱/۱ برابر ظرفیت تولید برق آن است.

با توجه به محدودیت مالی کارخانه، خرید موتور با ظرفیت بیشتر از ۱۰۰۰ کیلووات امکان‌پذیر نیست.

۳. تابع هدف

در این مقاله، مسئله با هدف بیشینه کردن ارزش خالص کنونی NPV طرح حل، و با استفاده از رابطهٔ (۱۳) محاسبه می‌شود [٤-٦ و ١١]:

$$NPV=CF(((1+r)^n-1)/(r(1+r)^n))+R_0\ (1/(1+r)^n)-CA \quad (۱۳)$$

CF_i میزان سود سالیانه است و با استفاده از رابطهٔ (١٤) محاسبه می‌شود. R_o درآمد اسقاطی است که از رابطهٔ (٤) به دست می‌آید و I_{CHP} هزینهٔ سرمایه‌گذاری CHP، r نرخ بهره و n طول عمر مفید تجهیزات CHP می‌باشد.

$$CF = (R_s + R_{Re} + R_b + R_{nbo} + R_M) - (C_{o\&M} + C_{Fuel} + C_{grid} + C_s) \quad (١٤)$$

٤. مطالعهٔ موردی

پارامترهای CHP برای یک کارخانهٔ نمونه در شهرک صنعتی پرند تهران با تقاضای الکتریکی ۲۰۰ کیلووات و تقاضای حرارتی ۵۰۰ کیلووات با استفاده از روش ارائه شده تعیین می‌شود. جدول (۱) اطلاعات مورد نیاز برای حل مسئله را نشان می‌دهد. در این مطالعه، رژیم پیک نشان دهندهٔ ساعات ۲۲-۱۸ در روز، رژیم میان باری نشان دهندهٔ ساعات ۱۸-٦ در روز و رژیم کم باری نشان دهندهٔ ساعات ٦-۲۲ در روز است.

لازم به ذکر است که اطلاعات مربوط به موتور از کاتالوگ‌های کمپانی Deutz سازندهٔ موتورهای گازسوز استخراج شده است [٤،١ و ١١-١٥].

جدول (۱): مقادیر ثابت‌های مورد نیاز برای حل مسئله

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
E_D	۲۰۰	HR	۱۰/۳۵	U_f	۰/۲۷
Q_D	۵۰۰	C_s	صفر	U_{bf}	۰/۰۹۷
Q_{GE}^{min}	صفر	E_{GE}^{min}	صفر	$C_{o\&mGe}$	١٤٠
Q_{GE}^{max}	۵۰۰	E_{GE}^{max}	۱۰۰۰	$C_{o\&mb}$	۳۰
n	۲۰	r	٪۱۲	C_f	۲۹/۱۷
η_b	۸۰	C_f^*	۷۰۰	η_{GE}	٪٤٥
C_g پیک	٤۷۰	C_c پیک	۷۲۰	T پیک	١٤٦٠
C_g میانه	١٤٢/٥	C_c میانه	۳۵۹	T میانه	٤۳۸۰
C_g پایه	۳۵/٦	C_c پایه	۱۸۰	T پایه	۲۹۲۰
C_g^* پیک	۷۸۰	C_C^* پیک	٤۳۰		
C_g^* میانه	۳۹۰	C_C^* میانه	٤۳۰		
C_g^* پایه	۱۹۵	C_C^* پایه	٤۳۰		

نتایج حاصل از حل مسئله برای دو حالت قبل و بعد از هدفمند کردن یارانه‌ها به دست آمده است. در حالت دوم، کل پارامترها با علامت ستاره نشان داده شده است. مسئلهٔ مورد نظر از نوع آمیخته با عدد صحیح است که برای حل آن از نرم‌افزار GAMS استفاده شده است.

پس از حل مسئله، برای هر دو حالت موتور گازسوز با ظرفیت نامی ۱۰۰۰ کیلووات و بویلر کمکی به ظرفیت ۵۰۰ کیلووات در هر سه رژیم انتخاب می‌شود. بویلر کمکی در حالتی که CHP کار می‌کند، در وضعیت خاموش قرار دارد و بدین سبب با این ظرفیت انتخاب شده تا در صورت خرابی CHP بتواند حرارت مورد نیاز کارخانه را با قابلیت اطمینان بالا تأمین کند. بدیهی است در این حالت، برق مشترک توسط شبکه تأمین خواهد شد.

جدول (۲): توان الکتریکی تولید شده توسط CHP، حرارت بازیافتی از CHP و میزان فروش برق به شبکه

	خروجی الکتریکی (kw)	حرارت بازیافتی (kw)	فروش برق به شبکه (kw)
بار پیک	۱۰۰۰	۵۰۰	۸۰۰
بار میانه	۱۰۰۰	۵۰۰	۸۰۰
بار پایه	۱۰۰۰	۵۰۰	۸۰۰

پارامترهای اقتصادی طرح در دو حالت مطابق جدول (۳) می‌باشد.

جدول (۳): سود سالانه، هزینهٔ کل و دورهٔ بازگشت سرمایهٔ سیستم CHP نصب شده

	سود سالانه (میلیون ریال)	هزینهٔ کل (میلیون ریال)	دورهٔ بازگشت سرمایه (سال)
حالت اول	١٦٦٠	۵۲۰۰	۳/۱۳
حالت دوم	١٩٤٠	۵۲۰۰	۲/٦٨

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر دو حالت بیشترین ظرفیت مجاز برای CHP انتخاب شده است. انتخاب بیشترین ظرفیت به دلایل زیر صورت گرفته است:

- پایین بودن تعرفهٔ گاز مصرفی CHP درحالت اول؛
- بالا بودن تعرفهٔ فروش برق به شبکه نسبت به تعرفهٔ خرید برق از شبکه در هر دو حالت؛
- وجود قرارداد تضمینی و عدم مواجه شدن با ریسک شرکت در بازار.

در حالت دوم، با وجود آنکه قیمت گاز خیلی بالاست و هزینهٔ سوختی بالایی را به مشترک تحمیل می‌کند، ولی در عوض قیمت خرید برق از شبکه نیز بالا رفته و این برای مشترک به منزلهٔ درآمد (درآمد ناشی از نخریدن برق از شبکه) محسوب می‌شود و در کل،

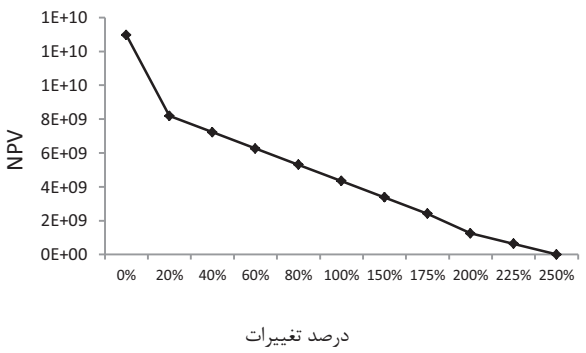
درآمد ناشی از نخریدن برق نسبت به هزینهٔ سوخت بیشتر است.

۵. آنالیز حساسیت

مجموعه عوامل بالا موجب می‌شود افزایش ظرفیت CHP و به دنبال آن، افزایش برق تحویلی به شبکه، همواره موجب سود بیشتر شود، یعنی در این حالت (سناریوی صفر) تمام بویلرها در کل روز خاموش می‌مانند و نیازی به روشن شدن آن‌ها نیست. تغییرات قیمت برق، گاز و پایان یافتن مدت قرارداد خرید تضمینی برق (در ایران ۱۰ سال) ممکن است در آینده کارآیی طرح را دچار مخاطره کند. لذا باید عملکرد طرح در برابر تغییرات پارامترهای حساس مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور، عملکرد طرح در برابر تغییرات قیمت گاز، قیمت خرید برق از شبکه، قیمت فروش برق به شبکه و تغییرات هم‌زمان آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه در حال حاضر، طرح هدفمند کردن یارانه در حال اجراست، آنالیز حساسیت برای حالت دوم در نظر گرفته شده است [۱، ٤-٦ و ۱۰].

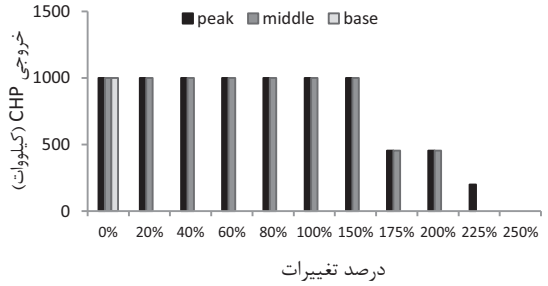
۱.۵. بررسی عملکرد طرح در برابر افزایش قیمت گاز

برای بررسی کارآیی طرح در برابر افزایش قیمت گاز در هر سناریو، قیمت گاز ٪۲۰ نسبت به قیمت پایه (سناریوی صفر) افزایش پیدا می‌کند. این کار تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که NPV طرح کوچک‌تر از صفر شود. شکل(۲) نمودار تغییرات NPV را بر حسب افزایش قیمت گاز نشان می‌دهد.



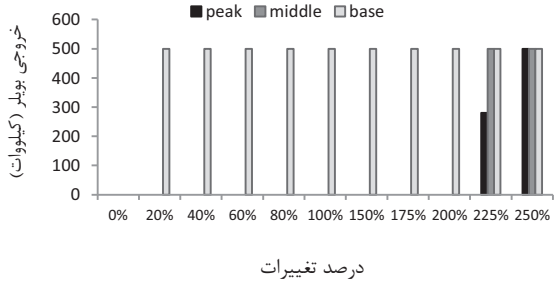
شکل (۲): تغییرات NPV بر حسب افزایش قیمت گاز

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش قیمت گاز، NPV طرح کاهش می‌یابد و با ٪۲۰ افزایش قیمت گاز NPV به علت تغییر رژیم کاری CHP به‌صورت ناگهانی کاهش پیدا می‌کند (شکل۳). به عبارت دیگر، اقتصادی‌تر این است که در بار پایه، سیستم CHP در وضعیت خاموش قرار گیرد و برق مورد نیاز کارخانه از شبکه تامین شود. اگر بنا به هر دلیلی قیمت گاز ٪۲۲۵ افزایش یابد، مقدار NPV صفر می‌شود. در این حالت، طرح مورد نظر توجیه اقتصادی نخواهد داشت. شکل (۳) وضعیت توان تولیدی CHP را در هر رژیم و در سناریوهای مختلف (ساعات پیک، میان باری و اوج بار) نشان می‌دهد.



شکل (۳): تغییرات خروجی CHP بر حسب افزایش قیمت گاز

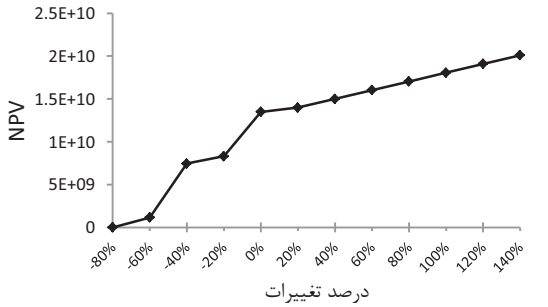
بر این اساس، میزان کیلووات ساعت حرارت تولیدی توسط بویلرها در هر سناریو، مطابق شکل (٤) می‌باشد.



شکل (٤): تغییرات کارکرد بویلرهای کمکی بر حسب افزایش قیمت گاز

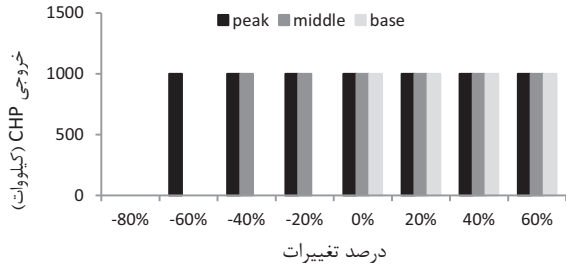
۲.۵. بررسی عملکرد طرح در برابر کاهش تعرفهٔ برق شبکه

اگر در آینده، قیمت برق شبکه کاهش پیدا کند، ممکن است طرح کارآیی خود را از دست دهد. برای بررسی این موضوع، سناریوهایی با قیمت‌های مختلف برای خرید برق از شبکه تعریف می‌شود. در هر سناریو، قیمت برق شبکه ٪۲۰ نسبت به قیمت خرید برق در حالت پایه تغییر پیدا می‌کند. شکل(۵)، نمودار تغییرات NPV را بر حسب تغییر قیمت خرید برق از شبکه نشان می‌دهد.



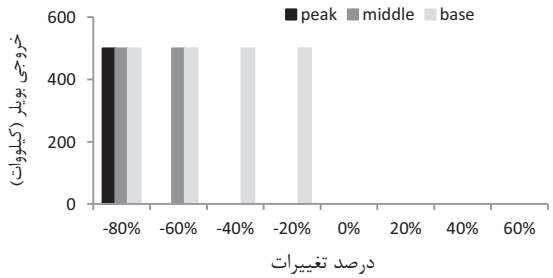
شکل (۵): تغییرات NPV بر حسب کاهش تعرفهٔ برق شبکه

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش تعرفهٔ برق شبکه، NPV نیز افزایش پیدا می‌کند. در نمودار، دو جهش قابل مشاهده است. اگر تعرفهٔ برق شبکه ۲۰٪ کاهش پیدا کند، CHP در بار پایه خاموش می‌شود (جهش اول) و اگر تعرفهٔ برق شبکه ۶۰٪ کاهش پیدا کند CHP در بار میانه نیز خاموش خواهد شد (جهش دوم). با توجه به اینکه تعرفهٔ برق شبکه در بار پایه و میانه از بار پیک کمتر می‌باشد، در نتیجه منطقی است که با کاهش تعرفهٔ برق شبکه، مشترک برق مورد نیازش را از شبکه تأمین کند، زیرا هزینه‌اش پایین‌تر است. نتیجهٔ دیگری که از این نمودار می‌توان گرفت، این است که با کاهش تعرفهٔ برق، از سیستم CHP می‌توان جهت پیک‌زدایی[1] استفاده کرد. این امر ناشی از متفاوت بودن تعرفه‌های برق در سه رژیم است.



شکل (۶): تغییرات خروجی CHP بر حسب کاهش قیمت خرید برق شبکه

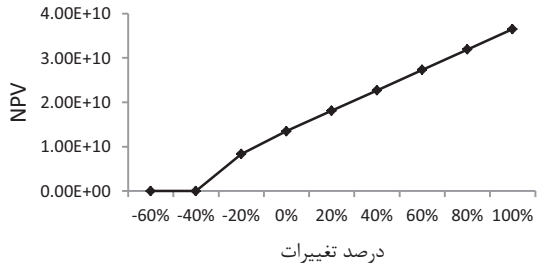
در ساعت‌هایی که CHP خاموش است، برق مورد نیاز توسط شبکه و حرارت مورد نیاز توسط بویلر کمکی تأمین می‌شود (شکل ۷).



شکل (۷): تغییرات کارکرد بویلرهای کمکی بر حسب کاهش قیمت خرید برق شبکه

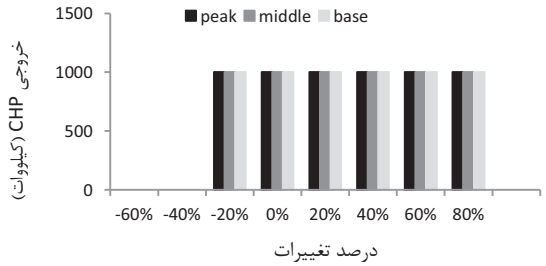
۳.۵. بررسی عملکرد طرح در برابر کاهش قیمت فروش برق به شبکه

برای بررسی این تغییرات، سناریوهایی با قیمت‌های مختلف برای فروش برق به شبکه طرح می‌شود و عملکرد طرح تحت این سناریوها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در هر سناریو، قیمت فروش برق ۲۰٪ تغییر می‌کند. شکل (۸)، تغییرات NPV را بر حسب تغییرات قیمت فروش برق نشان می‌دهد.



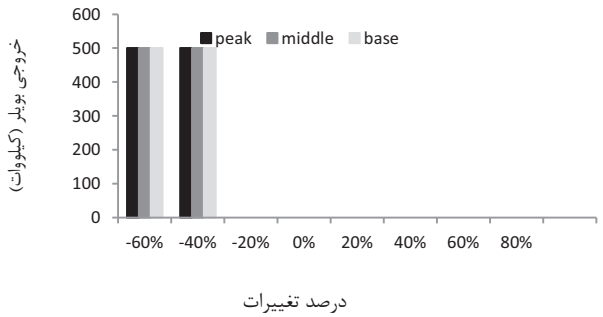
شکل (۸): تغییرات NPV بر حسب تغییرات قیمت فروش برق به شبکه

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با کاهش قیمت فروش برق، مقدار NPV نیز کاهش می‌یابد، به‌طوری که با کاهش ۴۰٪ قیمت فروش برق به شبکه استفاده از CHP اقتصادی نمی‌باشد. شکل (۹) میزان خروجی الکتریکی واحد را در رژیم‌های مختلف نشان می‌دهد. به علت یکسان بودن قیمت فروش برق در سه تعرفه، جهشی در نمودار ایجاد نشده است.



شکل (۹): تغییرات خروجی CHP حسب کاهش قیمت فروش برق به شبکه

بر این اساس، میزان کیلووات ساعت حرارت تولیدی توسط بویلرها در رژیم‌های کاری مختلف و در هر سناریو مطابق شکل (۱۰) است.



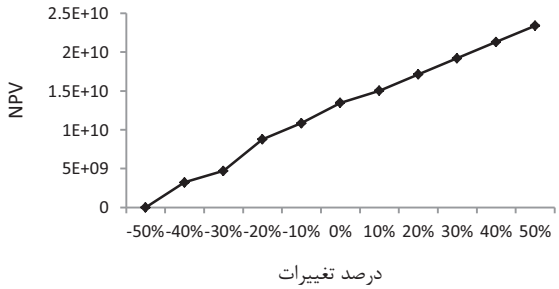
شکل (۱۰): تغییرات کارکرد بویلرهای کمکی بر حسب تغییرات قیمت فروش برق به شبکه

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با کاهش ۴۰٪ قیمت برق، بویلرها وارد مدار می‌شوند.

1. Peak shaving

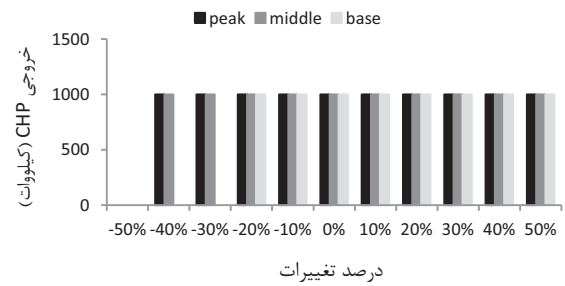
٤.٥. بررسی عملکرد طرح در برابر افزایش هم‌زمان قیمت گاز و قیمت خرید و فروش برق شبکه

در هر سناریو، هر سه قیمت ۱۰٪ نسبت به حالت پایه افزایش یا کاهش پیدا می‌کند. شکل (۱۱)، نمودار تغییرات NPV را بر حسب افزایش هم‌زمان هر سه قیمت از شبکه نشان می‌دهد.



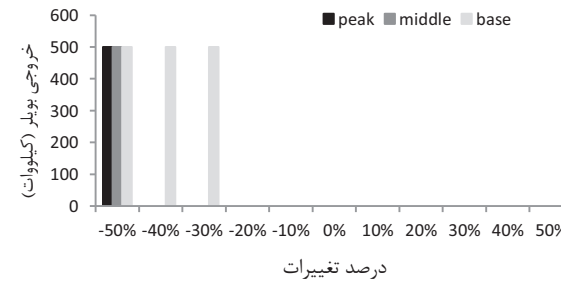
شکل (۱۱): تغییرات NPV بر حسب افزایش هم‌زمان قیمت گاز و قیمت خرید برق از شبکه

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش هم‌زمان قیمت برق و گاز، وضعیت اقتصادی طرح بهتر خواهد شد. اگرچه افزایش قیمت گاز، هزینه را افزایش می‌دهد، ولی افزایش قیمت خرید برق از شبکه و افزایش قیمت فروش به شبکه، درآمد حاصل از طرح را افزایش می‌دهند که در کل، سود طرح بیشتر خواهد شد. شکل (۱۲) وضعیت توان تولیدی CHP را در هر رژیم و در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد.



شکل (۱۲): تغییرات خروجی CHP بر حسب افزایش هم‌زمان قیمت گاز و قیمت خرید برق از شبکه

بر این اساس، میزان کیلووات ساعت حرارت تولیدی توسط بویلرها در رژیم‌های کاری مختلف و در هر سناریو، مطابق شکل (۱۳) است.



شکل (۱۳): تغییرات کارکرد بویلرهای کمکی بر حسب افزایش هم‌زمان قیمت گاز و قیمت خرید برق از شبکه

نتایج حاصل از آنالیز حساسیت نشان می‌دهد میزان کارآیی طرح تا حد زیادی به پارامترهایی نظیر قیمت گاز و خرید/ فروش برق بستگی دارد. از این رو، در بهینه‌سازی باید مقدار این پارامترها با دقت زیاد و نگاه به آینده تعیین شود.

٦. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل ریاضی مناسبی با کمترین تقریب برای توصیف درآمدها و هزینه‌ها و قیود موجود در مسئله ارائه شد. سپس مسئلهٔ تعیین ظرفیت و رژیم کاری یک موتور گازسوز با هدف بیشینه کردن NPV تعریف و با استفاده از نرم‌افزار GAMS حل شد. بهینه‌سازی برای دو حالت قبل و بعد از هدفمند کردن یارانه‌ها انجام شد. نتایج نشان می‌دهد با شرایط موجود در ایران:

۱. استفاده از موتورهای گازسوز برای تأمین برق و حرارت یک کارخانه در هر دو حالت(قبل و بعد از هدفمند کردن یارانه‌ها) اقتصادی می‌باشد.

۲. دورهٔ بازگشت سرمایه استفادهٔ CHP در حالت دوم کمتر است. به عبارت دیگر با هدفمند شدن یارانه، وضعیت اقتصادی سیستم‌های CHP بهتر شد.

۳. بررسی تغییرات NPV در سناریوهای مختلف بر اساس تغییر قیمت خرید و فروش برق و قیمت سوخت نشان می‌دهد رژیم کاری واحد در این سناریوها دچار تغییر می‌شود که در نصب CHP در آپارتمان باید این تغییرات را در نظر گرفت.

رژیم کاری سیستم CHP علاوه بر اینکه تابع قیمت حامل‌های انرژی است، تابع چند تعرفه بودن قیمت‌ها نیز می‌باشد. در حالت‌هایی که قیمت تعرفه‌ها متفاوت است، می‌توان از CHP جهت پیک‌زدایی استفاده کرد.

٤. بررسی تغییرات NPV در سناریوهای مختلف بر اساس تغییر قیمت خرید و فروش برق و قیمت گاز شبکه نشان می‌دهد که می‌توان یک سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت را با بویلرهای بخار یک کارخانه چنان ترکیب کرد که در هر زمان، بهینه‌ترین حالت استفاده از مجموعه سیستم‌ها را به کار برد. در نتیجه، در طول شبانه‌روز کمترین هزینهٔ انرژی به صاحب واحد صنعتی تحمیل خواهد شد.

۵. با افزایش هم‌زمان قیمت حامل‌های انرژی وضعیت اقتصادی طرح بهتر خواهد شد.

فهرست علائم

$C_{o\&m}$	هزینهٔ تعمیر و نگهداری موتور	$Rls/_{Kwh}$
$Q_{\mathrm{GE}}^{\min}$	کمترین ظرفیت مجاز برای موتور	Kw
$Q_{GE}^{\max}$	بیشترین ظرفیت حرارتی مجاز برای موتور	Kw
$E_{\mathrm{GE}}^{\min}$	کمترین ظرفیت الکتریکی مجاز برای موتور	Kw
$E_{\mathrm{GE}}^{\max}$	بیشترین ظرفیت الکتریکی مجاز برای موتور	Kw
I_{0CHP}	هزینهٔ اولیه CHP	Rls

C_{bf}	قیمت گاز مصرفی بویلر	$Rls/_{m^3}$
C_c	قیمت فروش برق به شبکه	$Rls/_{Kwh}$
C_f	قیمت گاز مصرفی موتور	$Rls/_{m^3}$
CF_i	سود سالیانهٔ طرح	Rls
C_{Fuel}	هزینهٔ سوخت موتور	Rls
C_g	قیمت خرید برق از شبکه	$Rls/_{Kwh}$
C_{Grid}	هزینه خرید برق از شبکه	Rls
C_s	هزینه پرسنل	Rls
I	عدد باینری	-
n	طول عمر مفید پروژه	$year$
NPV	ارزش فعلی خالص طرح	Rls
$E_{GE}^{d,h}$	توان الکتریکی تولیدی موتور	Kw
E_D	میزان تقاضای الکتریکی کارخانه	Kw
$E_g^{d,h}$	میزان برق خریداری از شبکه پس از نصب موتور	Kw
$Q_{GE}^{d,h}$	توان حرارتی بازیافت شده از موتور	Kw
$Q_B^{d,h}$	توان حرارتی تولیدی بویلر	Kw
Q_D	تقاضای حرارتی کارخانه	Kw
r	نرخ تنزیل	$percent$
R_b	درآمد حاصل از کاهش خرید برق	Rls
R_M	درآمد پرداخت مابه‌التفاوت قیمت سوخت	Rls
R_{nbo}	درآمد حاصل از عدم قطعی برق	Rls
R_o	درآمد حاصل از اسقاط موتور	Rls
R_{Re}	درآمد حاصل از بازیافت حرارت	Rls
Rs	درآمد ناشی از فروش برق به شبکه	Rls
T_i	مدت زمان رژیم کاری iام	$hours$
U_{bf}	میزان گاز مصرفی بویلر	$m^3/_{Kwh}$
U_f	میزان گاز مصرفی موتور	$m^3/_{Kwh}$
$C_{O\&M}$	کل هزینهٔ تعمیر و نگهداری موتور	Rls
HR	نرخ حرارتی گاز طبیعی	$Kwh/_{m^3}$
η_{GE}	بازدهٔ الکتریکی موتور گازسوز	percsnt
η_b	بازدهٔ بویلر کمکی	percsnt

مراجع

[۱] عادل غلامی، سید جـواد میررضـایی رودکـی و محمدصـادق قاضـی‌زاده، **ارزیـابی اقتصادی و آنالیز حساسیت سیستم سی‌سی اچ پی برای آپارتمان مسکونی در تهـران**، بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق (PSC 2010)10-F-EPG-1818.

[۲] عباد طالبی قادیکلایی و جعفر دولـت‌آبـادی، **بررسـی فنـی اقتصـادی کـاربرد پیـل سوختی در CHP خانگی**، سومین سمینار پیل سوختی ایران، ٦ و ٧ آبان ماه سال ۱۳۸۸.

[۳] قوانین مربوط به دستوالعمل توسعه مولد مقیاس کوچک موضـوع ابلاغیـه ۵۲۵۰٤/۳۵۰ مورخ ۱۳۸۷/۷/۳۰ مصوب شرکت مادر تخصصی توانیر.

[٤] مشخصات فنی مربوط به موتور ژنراتورهای کمپانی Deutz، سال ۲۰۰۷.

[5] Zhi-Gao Sun "*Energy efficiency and economic feasibility analysis ofcogeneration system driven by gas engine*", Energy and Buildings 40, pags126–130, 2008.

[6] X.Q. Kong, R.Z. Wang, X.H.Huang "*Energy efficiency and economic feasibility of CCHPdriven by stirling engine*" ,Energy Conversion and Management, 45,pags 1433–1442,2004.

[7] Christos A. Frangopoulos, George G. Dimopoulos "*Effect of reliability considerations on the optimal synthesis, design and operation of a cogeneration system*" ,Energy 29, pags 309–329,2004.

[8] Z.G. Sun , R.Z. Wang , W.Z. Sun "*Energetic efficiency of a gas-engine-driven cooling and heating system*" , Applied Thermal Engineering 24, pags 941–947, 2004.

[9] X.Q. Kong, R.Z. Wang, J.Y. Wu, X.H. Huang, Y. Huangfu, D.W. Wu, Y.X. Xu *" Experimental investigation of a micro-combined cooling, heating and power system driven by a gas engine*" , International Journal of Refrigeration 28, pags 977–987, 2005.

[10] F.J. Wang , J.S. Chiou , P.C. Wu " *Economic feasibility of waste heat to power conversion*", Applied Energy 84, pags 442–454,2007

[11]Reza Hashemi"*A Developed Offline Model for Optimal Operation of Combined Heating and Cooling and Power Systems* "Ieee Transactions On Energy Conversion, Vol. 24, NO. 1, March 2009.

[12] Sepehr Sanaye , Moslem Raessi Ardali, "Estimating the power and number of micro urbines in small-scale combined heat and power systems Applied Energy 86 (2009) 895–90

[13] Pedro J.Mago, Anna K,Hueffed, "*Evaluation of a turbine driven CCHP system for large office buildings under different operating strategies*", Energy and building 42(2010)1628-1636.

[14] K.C. Kavvadias, A.P. Tosios, Z.B. Maroulis, "Design of a combined heating, cooling and power system: Sizing, operation strategy selection and parametric analysis", Energy Conversion and Management 51 (2010) 833–845.

[15] Hongbo Ren, Weijun Gao , Yingjun Ruan, "Optimal sizing for residential CHP system" , Applied Thermal Engineering 28 (2008) 514–523.

[16] Jiang-Jiang Wang, You-Yin Jing, Chun-Fa Zhang, "Optimization of capacity and operation for CCHP system by genetic algorithm". Applied Energy 87 (2010) 1325–1335].

[17] Campos Celador, A.Erkoreka, K.Martin Escudero, J.M.Sala "*Feasibility of small-scale gas engine-based residential cogeneration in Spain*" University of the Basque Country, Department of Thermal Engineering – ENEDI Reserch Group, Alda. Urquijos/n, CP48013, Bilbao, Spain ,Energy Policy 39 (2011) 3813–3821.

[18] Sanaye, S., Aghaei M. and Shokrollahi, Sh. (2008) Selecting of prime movers and nominal powers in combined heat and power systems, Applied Thermal Engineering, 28, pp. 1177-1188.