

تعیین بهینه ظرفیت و برنامه کاری سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت در یک واحد صنعتی با محرک اولیه موتور گازسوز

عادل غلامی^{۱*}، کارشناس ارشد، محمدصادق قاضی‌زاده^۲، استادیار گروه برق
جواد پاک‌دامن^۳، کارشناس ارشد، میثم انصاری^۴، کارشناس ارشد مهندسی برق
^۳دانشکده مکانیک و انرژی - دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور) - تهران - ایران
Gholamiadel7@gmail.com - javadpakdaman@stud.pwut.ac.ir
^۴دانشکده برق - دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور) - تهران - 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 بازده بالا، بیش از سایرین مورد استفاده قرار گرفته‌اند. هدف اصلی این مطالعه، تعیین بهینه ظرفیت و برنامه کاری یک سیستم CHP بر پایه موتور گازسوز در طول ساعات شبانه‌روز برای تأمین برق و حرارت یک کارخانه به صورت هم‌زمان است. همچنین بر اساس نصب این سیستم در کارخانه، ظرفیت و برنامه 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 مسئله بهینه‌سازی برای یک کارخانه نمونه با توجه به قوانین موجود در ایران حل شده است. در پایان، کارایی طرح در سناریوهای مختلفی با توجه به تغییرات قیمت سوخت، تعرفه 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.

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 بهینه سیستم CCHP را براساس آنالیز انرژی، اقتصادی و محیط زیست در استراتژی‌های که CCHP به عنوان تأمین کننده انرژی با اولویت تأمین برق^۵، تأمین کننده انرژی با اولویت تأمین حرارت^۶ و تأمین کننده انرژی با اولویت تأمین برق و حرارت به صورت هیبریدی^۷ عمل می‌کند، به دست آورده‌اند. کاوادیس و همکاران [۱۴]، مسئله بهینه‌سازی را با هدف ماکزیمم کردن سود خالص سالانه^۸ حل کرده‌اند. هنگبورن و همکاران [۱۵]، بهینه‌سازی را با هدف کاهش هزینه سیستم CHP و به صورت غیر خطی آمیخته با عدد صحیح^۹ حل کرده و نتایج به دست آمده را نیز آنالیز حساسیت کرده‌اند. در [۱۶]، مؤلف ابتدا معادله تعادل انرژی را برای واحد CCHP لحاظ کرده و جواب بهینه سیستم را با هدف ماکزیمم کردن تابع هدف سه منظوره به دست آورده است. تابع هدف سه منظوره، مجموع صرفه‌جویی در هزینه کل^{۱۰}، صرفه‌جویی در انرژی اولیه^{۱۱} و شدت کاهش آلاینده‌های زیست محیطی^{۱۲} می‌باشد. کمپوس سیلادور و همکاران [۱۷]، مسئله 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 برنامه 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 اولیه موتور گازسوز

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

۱. مقدمه

سیستم‌های تولید پراکنده با هدف بهینه‌سازی در مصرف انرژی به صورت 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^۱) 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 کارخانه تازه تأسیس است. این حرارت می‌تواند جایگزین حرارت تولیدی توسط بویلرهای بخار شود؛ اما در صورتی که پارامترهای لازم آن (ظرفیت، برنامه کاری، مکان و...) به صورت دقیق انتخاب نشوند، ممکن است کارایی 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 بهینه سیستم میکرو CCHP بر پایه 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 همکاران [۲] ظرفیت بهینه را برای سیستم CCHP بر پایه پیل سوختی به دست آورده‌اند. سان [۵]، مسئله را از دید یک کارخانه‌دار و با محرک اولیه موتور گازسوز، و کنگ و همکاران [۶]، مسئله را از دید یک کارخانه‌دار و با محرک اولیه موتور استرلینگ با هدف کاهش دوره بازگشت سرمایه مورد بررسی قرار داده‌اند. فرانگولس و همکاران [۷] نیز، مسئله را از دید صاحب کارخانه با هدف افزایش ارزش خالص فعلی^۲ (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 سرمایه‌گذاری 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 مسئله بهینه‌سازی را با ماکزیمم کردن سود سالانه و با استفاده از روش غیر خطی (TOOCS-off)^۳ به کمک نرم‌افزار LINGO حل کرده است. در [۱۲] صنایع و اردالی، برای میکروتوربین با استفاده از آنالیز اقتصاد - انرژی^۴،

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)

1. Combined Heat and Power

2. Net Present Value (NPV)

3. Techno-economic Optimal Operation of Cogeneration Systems

4. Energy Economic

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، ۴-۶ و ۱۰-۱۸]:

● درآمدها

● هزینه‌ها

● قیود

● تابع هدف

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

۱.۱.۲. 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، ۴-۶ و ۱۰-۱۸]:

۱.۱.۲.۱. 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 رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$R_S = \sum_d \sum_h E_{GE}^{d,h} \cdot C_c \cdot T_i \quad (1)$$

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 آگزوز موتور، می‌تواند توسط سیستم‌های بازیافت گرما^۱ بازیافت شود.

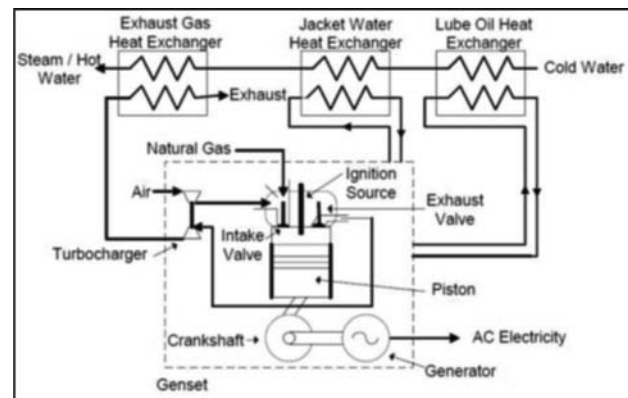
$$R_{Re} = \sum_d \sum_h (Q_D - Q_b) U_{bf} \cdot C_{bf} \cdot T_i \quad (2)$$

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

با فروش مازاد الکتریسیته 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 ذخیره‌گازی فراوان است، بنابراین توسعه این‌گونه مولدهای گازسوز می‌تواند بسیار مفید باشد.



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

استفاده از واحدهای تولید هم‌زمان در کارخانه‌ها، مزایای زیادی برای مالکین واحدهای صنعتی و صاحبان کارخانه‌ها به همراه دارد؛ اما کارایی 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 کارایی خود را از دست بدهد. برای ارائه یک طرح کامل، پارامترهای زیادی باید مشخص شوند. برخی از این پارامترها عبارت‌اند از: فناوری واحد، ظرفیت واحد، برنامه 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 نقطه 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 شبکه برق ایران، خرید برق از شبکه یا فروش برق به آن در سه رژیم کاری با تعرفه‌های مختلف صورت می‌گیرد. بدین ترتیب، برای ارائه طرح پارامترهای مجهول به‌صورت زیر خلاصه می‌شوند:

● ظرفیت نامی موتور گازسوز

● ظرفیت نامی بویلرهای بخار کمکی

● برنامه کاری موتور گازسوز در سه رژیم مختلف

● برنامه کاری بویلرهای بخار در سه رژیم مختلف

تعیین این پارامترها باید طی یک مسئله بهینه‌سازی از دید مالک

1. Heat Recovery Steam Generator (HRSG)

ظرفیت الکتریکی موتور با تخمین رگرسیون به دست می آید [۱]:

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

۲.۲.۲. هزینه تعمیر و نگهداری

این هزینه معمولاً شامل هزینه ثابت و متغیر است که به صورت

ضریبی از ظرفیت واحد در نظر گرفته می شود [۱ و ۱۱]:

$$C_{O\&M} = \sum_d \sum_h E_{GE}^{d,h} (C_{O\&M}). T_i \quad (۸)$$

که $C_{O\&M}$ هزینه تعمیر و نگهداری بر واحد تولید است (\$/kWh).

۳.۲.۲. هزینه سوخت موتور [۱ و ۱۱]

$$C_{Fuel} = \sum_d \sum_h E_{GE}^{d,h} \left(\frac{C_f}{HR \cdot \eta_{GE}} \right) \quad (۹)$$

که C_f قیمت گاز طبیعی، HR نرخ حرارتی و η_{GE} بازده موتور گازسوز است.

۴.۲.۲. هزینه پرسنل

$$C_s = constant \quad (۱۰)$$

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

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

$$C_{grid} = \sum_d \sum_h (E_D - E_{GE}^{d,h}) \cdot C_g \quad (۱۱)$$

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

۳.۲. قیود

مجموع توان الکتریکی تولیدی موتور گازسوز و توان تبدلی 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 محدوده مشخصی تعیین شود. روابط زیر، کلیه قیود مورد نیاز مسئله را نشان می دهد [۱۰ و ۱۱]:

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

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

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

$$R_b = \sum_d \sum_h (E_D - E_g^{d,h}) C_g \cdot T_i \quad (۳)$$

که E_D دیماند الکتریکی ساختمان، $E_g^{d,h}$ برق خریداری شده از شبکه بعد از نصب سیستم CHP و C_g قیمت خرید برق از شبکه می باشد.

۴.۱.۲. درآمد اسقاط تجهیزات

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

$$R_{O} = 0.1 \times I_{O\text{ CHP}} \quad (۴)$$

$I_{O\text{ CHP}}$ هزینه اولیه تجهیزات سیستم CHP می باشد که شامل موتور گازسوز، سیستم بازیافت حرارت و بویلر کمکی می باشد.

۵.۱.۲. درآمد عدم قطعی برق

با نصب موتور گازسوز، تمام یا بخشی از برق مورد نیاز کارخانه توسط موتور گازسوز تأمین می شود. بدین ترتیب، قابلیت اطمینان برق رسانی به کارخانه بیشتر می شود و در طول سال، کارخانه کمتر با قطعی برق مواجه می گردد. این درآمد را می توان به صورت عدد ثابتی به عنوان متوسط سالیانه در محاسبات منظور کرد.

$$R_{nbo} = constant \quad (۵)$$

با توجه به ثابت بودن این درآمد و عدم تأثیر آن در پاسخ مسئله از آن صرف نظر می شود.

۶.۱.۲. درآمد پرداخت مابه التفاوت

در بیشتر کشورهای دنیا از جمله ایران، برای تشویق سرمایه گذاران به استفاده از واحدهای تولید هم زمان، تعرفه گاز مصرفی CHP کمتر از گاز شهری (معمولاً برابر گاز نیروگاهی) در نظر گرفته می شود. بدین ترتیب، در صورت استفاده از گاز شهری، مابه التفاوت قیمت گاز شهری و نیروگاهی به مالکین این واحدها پرداخته می شود. این مقدار در کشور ایران توسط وزات نفت به صورت رابطه زیر اعمال می شود. [۱، ۳ و ۱۵]:

$$R_M = 27.11 E_{GE}^{d,h} \cdot U_f \cdot T_i \quad (۶)$$

که U_f مقدار سوخت مصرفی توسط موتور گازسوز است.

۲.۲. هزینه ها

۱.۲.۲. هزینه اولیه

هزینه اولیه، شامل هزینه انواع تجهیزات و موتور است و هزینه زمین صفر در نظر گرفته می شود. این هزینه در ظرفیت های بین ۵۰۰ کیلووات تا ۱۸۰۰ کیلووات با تقریب خوبی به صورت تابعی خطی از

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. مسئله 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

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

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

جدول (۳): سود سالانه، هزینه کل و دوره بازگشت سرمایه سیستم CHP نصب شده

دوره بازگشت سرمایه	سود سالانه (میلیون ریال)	هزینه کل (میلیون ریال)	دوره بازگشت سرمایه (سال)
حالت اول	۱۶۶۰	۵۲۰۰	۳/۱۳
حالت دوم	۱۹۴۰	۵۲۰۰	۲/۶۸

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 تعرفه گاز مصرفی CHP در حالت اول؛
- بالا بودن تعرفه فروش برق به شبکه نسبت به تعرفه 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 هزینه سوختی بالایی را به مشترک تحمیل می‌کند، ولی در عوض قیمت خرید برق از شبکه نیز بالا رفته و این برای مشترک به منزله درآمد (درآمد ناشی از نخریدن برق از شبکه) محسوب می‌شود و در کل،

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 رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود [۴-۶ و ۱۱]:

$$NPV = CF \left(\frac{1 - (1+r)^{-n}}{r} \right) + R_0 - CA \left(\frac{1 - (1+r)^{-n}}{r} \right) \quad (13)$$

CF_i میزان سود سالیانه است و با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود. R_0 درآمد اسقاطی است که از رابطه (۴) به دست می‌آید و I_{CHP} هزینه سرمایه‌گذاری CHP، نرخ بهره و n طول عمر مفید تجهیزات CHP می‌باشد.

$$CF = (R_s + R_{Re} + R_b + R_{nbo} + R_M) - (C_{o\&m} + C_{Fuel} + C_{grid} + C_s) \quad (14)$$

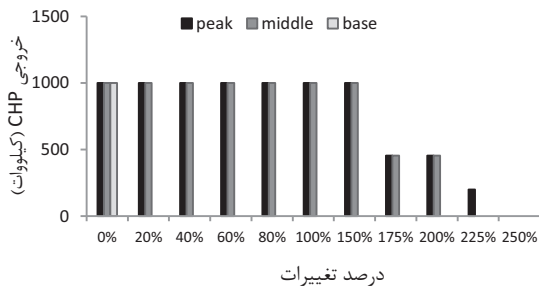
۴. مطالعه موردی

پارامترهای CHP برای یک کارخانه نمونه در شهرک صنعتی پرنده 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 دهنده ساعات ۱۸-۲۲ در روز، رژیم میان باری نشان دهنده ساعات ۶-۱۸ در روز و رژیم کم باری نشان دهنده ساعات ۶-۲۲ در روز است. لازم به ذکر است که اطلاعات مربوط به موتور از کاتالوگ‌های کمپانی Deutz سازنده موتورهای گازسوز استخراج شده است [۱۱-۱۵].

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

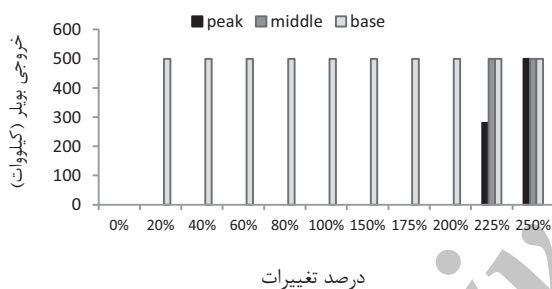
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
E_D	۲۰۰	HR	۱۰/۳۵	U_f	۰/۲۷
Q_D	۵۰۰	C_s	صفر	U_{bf}	۰/۰۹۷
Q_{GE}^{min}	صفر	E_{GE}^{min}	صفر	$C_{o\&mGe}$	۱۴۰
Q_{GE}^{max}	۵۰۰	E_{GE}^{max}	۱۰۰۰	$C_{o\&mb}$	۳۰
n	۲۰	r	٪۱۲	C_f	۲۹/۱۷
η_b	۸۰	C_f^*	۷۰۰	η_{GE}	٪۴۵
C_g	پیک	۷۲۰	C_c	پیک	۴۷۰
	میانه	۳۵۹		میانه	۱۴۲/۵
	پایه	۱۸۰		پایه	۳۵/۶
C_g^*	پیک	۷۸۰	C_c^*	پیک	۴۳۰
	میانه	۳۹۰		میانه	۴۳۰
	پایه	۱۹۵		پایه	۴۳۰

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

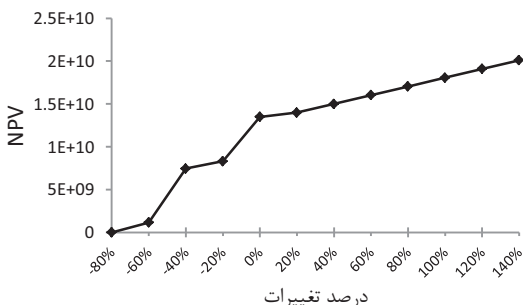
بر این اساس، میزان کیلووات ساعت حرارت تولیدی توسط بویلرها در هر سناریو، مطابق شکل (۴) می‌باشد.



شکل (۴): تغییرات کارکرد بویلرهای کمکی بر حسب افزایش قیمت گاز

۲.۵. بررسی عملکرد طرح در برابر کاهش تعرفه 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 تعرفه برق شبکه

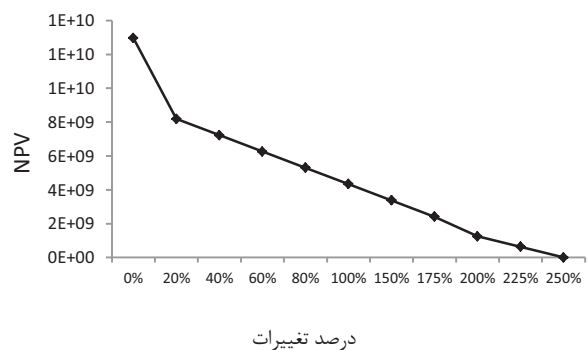
درآمد ناشی از خریدن برق نسبت به هزینه سوخت بیشتر است.

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، ۴-۶ و ۱۰].

۱.۵. بررسی عملکرد طرح در برابر افزایش قیمت گاز

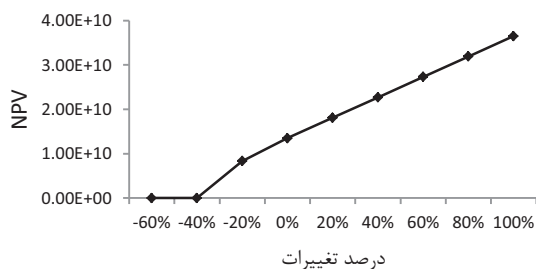
برای بررسی کارآیی طرح در برابر افزایش قیمت گاز در هر سناریو، قیمت گاز ۲۰٪ نسبت به قیمت پایه (سناریوی صفر) افزایش پیدا می‌کند. این کار تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که NPV طرح کوچک‌تر از صفر شود. شکل (۲) نمودار تغییرات NPV را بر حسب افزایش قیمت گاز نشان می‌دهد.



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

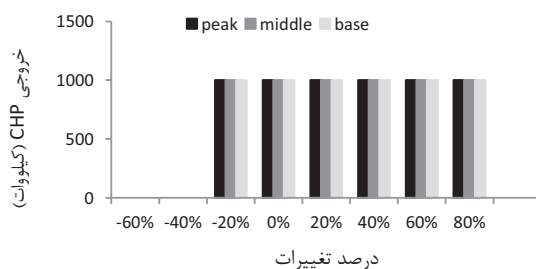
همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش قیمت گاز، NPV طرح کاهش می‌یابد و با ۲۰٪ افزایش قیمت گاز NPV به علت تغییر رژیم کاری CHP به صورت ناگهانی کاهش پیدا می‌کند (شکل ۳). به عبارت دیگر، اقتصادی‌تر این است که در بار پایه، سیستم CHP در وضعیت خاموش قرار گیرد و برق مورد نیاز کارخانه از شبکه تامین شود. اگر بنا به هر دلیلی قیمت گاز ۲۲۵٪ افزایش یابد، مقدار NPV صفر

تغییر می‌کند. شکل (۸)، تغییرات NPV را بر حسب تغییرات قیمت فروش برق نشان می‌دهد.



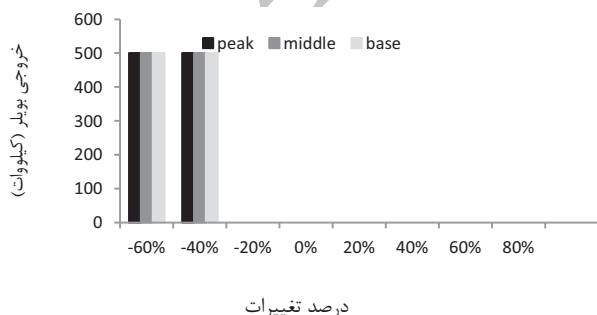
شکل (۸): تغییرات NPV بر حسب تغییرات قیمت فروش برق به شبکه

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با کاهش قیمت فروش برق، مقدار NPV نیز کاهش می‌یابد، به طوری 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 بر حسب تغییرات قیمت فروش برق به شبکه

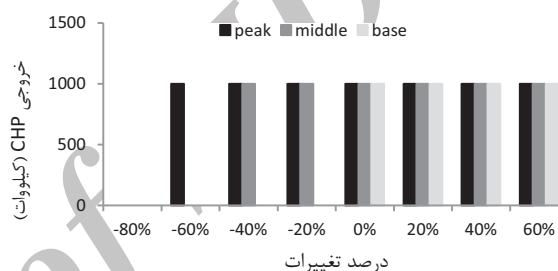
بر این اساس، میزان کیلووات ساعت حرارت تولیدی توسط بویلرها در رژیم‌های کاری مختلف و در هر سناریو مطابق شکل (۱۰) است.



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

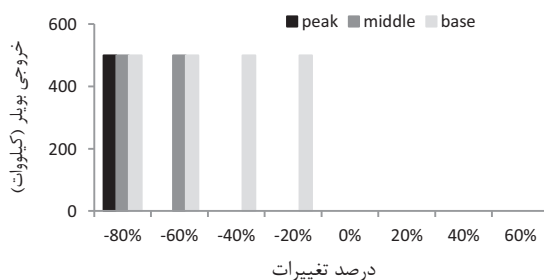
همان‌طور که مشاهده می‌شود، با کاهش ۴۰٪ قیمت برق، بویلرها وارد مدار می‌شوند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش تعرفه برق شبکه، NPV نیز افزایش پیدا می‌کند. در نمودار، دو جهش قابل مشاهده است. اگر تعرفه برق شبکه ۲۰٪ کاهش پیدا کند، CHP در بار پایه خاموش می‌شود (جهش اول) و اگر تعرفه برق شبکه ۶۰٪ کاهش پیدا کند، CHP در بار میانه نیز خاموش خواهد شد (جهش دوم). با توجه به اینکه تعرفه برق شبکه در بار پایه و میانه از بار پیک کمتر می‌باشد، در نتیجه منطقی است که با کاهش تعرفه برق شبکه، مشترک برق مورد نیازش را از شبکه تأمین کند، زیرا هزینه‌اش پایین‌تر است. نتیجه دیگری که از این نمودار می‌توان گرفت، این است که با کاهش تعرفه برق، از سیستم CHP می‌توان جهت پیک‌زدایی^۱ 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٪

1. Peak shaving

نتایج حاصل از آنالیز حساسیت نشان می‌دهد میزان کارایی 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.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل ریاضی مناسبی با کمترین تقریب برای توصیف درآمدها و هزینه‌ها و قیود موجود در مسئله ارائه شد. سپس مسئله تعیین ظرفیت و رژیم کاری یک موتور گاسوز 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 گاسوز برای تأمین برق و حرارت یک کارخانه در هر دو حالت (قبل و بعد از هدفمند کردن یارانه‌ها) اقتصادی می‌باشد.

۲. دوره بازگشت سرمایه استفاده 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.

۴. 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 هزینه انرژی به صاحب واحد صنعتی تحمیل خواهد شد.

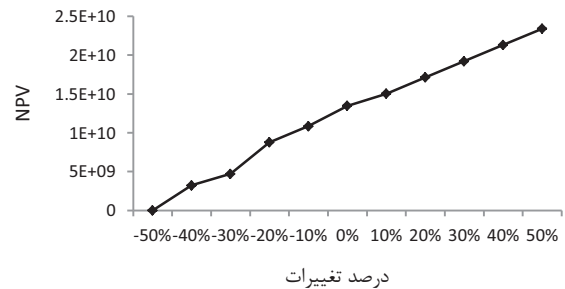
۵. با افزایش هم‌زمان قیمت حامل‌های انرژی وضعیت اقتصادی طرح بهتر خواهد شد.

فهرست علائم

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

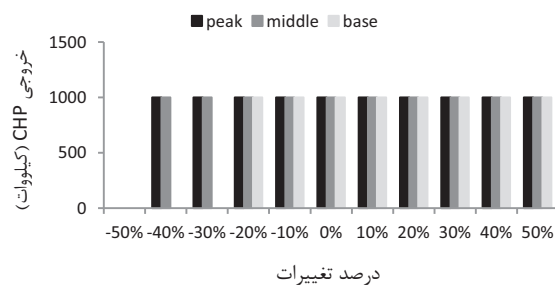
۴.۵. بررسی عملکرد طرح در برابر افزایش هم‌زمان قیمت گاز و قیمت خرید و فروش برق شبکه

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.



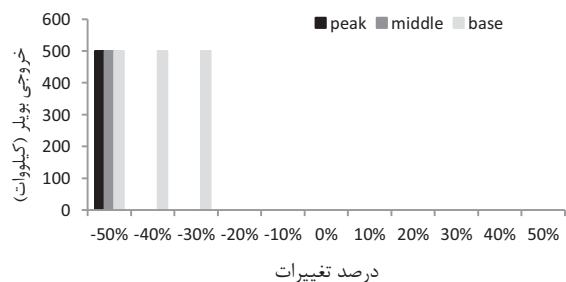
شکل (۱۱): تغییرات NPV بر حسب افزایش هم‌زمان قیمت گاز و قیمت خرید برق از شبکه

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

[6] X.Q. Kong, R.Z. Wang, X.H.Huang "Energy efficiency and economic feasibility of CCHP driven by stirling engine", Energy Conversion and Management, 45, pages 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, pages 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, pages 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, pages 977-987, 2005.

[10] F.J. Wang, J.S. Chiou, P.C. Wu "Economic feasibility of waste heat to power conversion", Applied Energy 84, pages 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 turbines in small-scale combined heat and power systems Applied Energy 86 (2009) 895-900

[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.

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

مراجع

[۱] عادل غلامی، سید جواد میررضایی رودکی و محمدصادق قاضی‌زاده، ارزیابی اقتصادی و آنالیز حساسیت سیستم سی‌سی‌اچ پی برای آپارتمان مسکونی در تهران، بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق (PSC 2010) 10-F-EPG-1818.

[۲] عباد طالبی قادی‌کلایی و جعفر دولت‌آبادی، بررسی فنی اقتصادی کاربرد پیل سوختی در CHP خانگی، سومین سمینار پیل سوختی ایران، ۶ و ۷ آبان ماه سال ۱۳۸۸.

[۳] قوانین مربوط به دستوالعمل توسعه مولد مقیاس کوچک موضوع ابلاغیه ۵۲۵۰۴/۳۵۰ مورخ ۱۳۸۷/۷/۳۰ مصوب شرکت مادر تخصصی توانیر.

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

[۵] Zhi-Gao Sun "Energy efficiency and economic feasibility analysis of cogeneration system driven by gas engine", Energy and Buildings 40, pages 126-130, 2008.