

ارزیابی اقتصادی و آنالیز حساسیت سیستم سی سی اچ پی برای آپارتمان مسکونی در تهران

عادل غلامی^۱، سید جواد میررضایی رودکی^۱ و محمد صادق قاضی زاده^۲
۱- دانشکده انرژی، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور) تهران- ایران
۲- دانشکده برق، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور) تهران- ایران
Gholamiadel7@gmail.com

واژه‌های کلیدی: تولید سه گانه برق- سرما و حرارت، بهینه سازی، موتورگازسوز، آپارتمان، حل غیر خطی آمیخته با عدد صحیح

چکیده

استفاده از سیستم‌های سه‌گانه تولید برق، سرما و حرارت (CCHP) برای تامین برق، سرما و حرارت، چون که یکی از راه‌حل‌های ممکن برای افزایش بازده و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی می‌باشند به سرعت در واحدهای مسکونی در حال افزایش می‌باشند. در این مقاله برای یک آپارتمان نمونه در تهران با در دست داشتن دیماندر حرارتی، سرمای و الکتریکی و با ارزیابی اقتصادی ظرفیت بهینه و رژیم کاری موتورگازسوز تعیین شده است. مسئله با هدف ماکزیمم کردن سود خالص سالانه با روش حل غیر خطی آمیخته با عدد صحیح به کمک نرم افزار GAMS حل شده است. و همچنین ظرفیت بهینه و رژیم کاری بویلر کمکی و چیلر جذبی بدست آمده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که استفاده از CCHP بر پایه محرکه اولیه موتور گازسوز برای واحدهای مسکونی اقتصادی می‌باشد. در پایان کارایی طرح در سناریوهای مختلفی با توجه به تغییرات پارامترهای مهم (قیمت سوخت، تعرفه برق شبکه و قیمت برق فروشی به شبکه) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان

می‌دهد که تغییر این پارامترها تاثیر بسزای روی عملکرد سیستم دارند.

۱- فهرست نمادهای به کار رفته

هزینه تعمیر و نگهداری موتور (Rs/Kwh)	$C_{o\&m}$
بیشترین ظرفیت الکتریکی مجاز موتور (Kw)	E_{GE}^{max}
کمترین ظرفیت الکتریکی مجاز موتور (Kw)	E_{GE}^{min}
بیشترین ظرفیت حرارتی مجاز موتور (Kw)	Q_{GE}^{max}
کمترین ظرفیت حرارتی مجاز موتور (Kw)	Q_{GE}^{min}
هزینه اولیه موتور (Rs)	I_{OGE}
قیمت گاز مصرفی بویلر (Rs/m^3)	c_{bf}
قیمت فروش برق به شبکه (Rs/Kwh)	c_c
قیمت گاز مصرفی موتور (Rs/m^3)	c_f
هزینه سوخت موتور (Rs)	C^{Fuel}
قیمت خرید برق از شبکه (Rs/Kwh)	c_g
هزینه خرید برق از شبکه (Rs)	C_{Grid}

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

پایینی برخوردار بوده و علاوه بر افزایش مصرف سوخت موجب افزایش آلاینده‌های زیست محیطی می‌گردند. مجموعه این عوامل و عواملی مانند قابلیت اطمینان بیشتر، تجدید ساختار در صنعت برق و... کشورهای جهان را به سمت استفاده از تولیدات پراکنده سوق داده است. در این میان استفاده از سیستم‌های تولید پراکنده همزمان با راندمان کلی ۷۰ تا ۹۰ درصد یکی از راهکارهای مؤثر در بهینه‌سازی مصرف انرژی است. اما در صورتیکه پارامترهای لازم آن (ظرفیت، برنامه‌کاری، 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، مالک واحد و سرمایه‌گذار تعریف و با روش‌های گوناگونی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در مرجع [۲۰۱] مسئله از دید یک کارخانه‌دار با هدف کاهش دوره بازگشت سرمایه برای یک موتور گازسوز و موتور استرلینگ بررسی شده است. در مرجع [۳] مسئله از دید صاحب آپارتمان با هدف افزایش NPV با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شده است. در مرجع [۴] بهینه‌سازی با هدف کاهش هزینه سیستم CCHP و به صورت غیر خطی آمیخته با عدد صحیح^۱ حل شده و نتایج بدست آمده نیز آنالیز حساسیت شده است. در مرجع [۵] مسئله بهینه‌سازی با هدف ماکزیمم کردن سود خالص سالانه^۲ حل شده است. در مرجع [۶] مولف ابتدا بالانس انرژی را برای CCHP نوشته و جواب بهینه سیستم را با هدف ماکزیمم کردن صرفه جویی در هزینه کل^۳ + صرفه جویی در انرژی اولیه^۴ + شدت کاهش آلاینده‌های زیست محیطی^۵ بدست آورده است. در مرجع [۷] مولف برای یک میکرو توربین با استفاده از آنالیز اکونومیک - انرژی قیمت برق و حرارت تولید شده را بدست 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 بدست آورده است. در مرجع [۸] مولف جواب بهینه سیستم را با هدف مینیمم کردن هزینه سالانه و با استفاده

C_s	هزینه پرسنل (Rls)
I	عدد باینری (-)
n	طول عمر مفید پروژه (year)
AP	سود سالانه طرح (Rls)
$E_{GE}^{d,h}$	توان الکتریکی تولیدی موتور (Kw)
C_{PGE}	ظرفیت موتور گازسوز (Kw)
E_D	میزان تقاضای الکتریکی آپارتمان (Kw)
E_{grid}	میزان برق خریداری از شبکه (Kw)
Q_{GE}	توان حرارتی بازیافت شده از موتور (Kw)
Q_D	تقاضای حرارتی آپارتمان (Kw)
r	نرخ بهره واقعی (percent)
R_b	درآمد حاصل از کاهش خرید برق (Rls)
R_M	درآمد پیرداخت مابه‌التفاوت قیمت سوخت (Rls)
R_o	درآمد حاصل از اسقاط موتور (Rls)
R_{Re}	درآمد حاصل از بازیافت حرارت (Rls)
R_s	درآمد ناشی از فروش برق به شبکه (Rls)
T_i	مدت زمان رژیم کاری (hours)
U_{bf}	میزان گاز مصرفی بویلر (m^3/Kwh)
HR	نرخ حرارتی (kWh/m^3)
$C_{O\&M}$	کل هزینه تعمیر و نگهداری موتور (Rls)
$GE\eta$	بازده موتور گازسوز (درصد)
$b\eta$	بازده بویلر (درصد)

۲- مقدمه:

سیستم‌های تولید پراکنده با هدف بهینه‌سازی در مصرف انرژی، کاهش اتلافات ناشی از انتقال و توزیع انرژی الکتریکی در شبکه و نیز کاهش آلودگی‌های ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌های بزرگ، به کار گرفته می‌شوند. تولید انرژی الکتریکی در مقیاس بزرگ و انتقال آن به مصرف کنندگان تلفات زیادی به همراه دارد. از طرف دیگر نیروگاه‌های بزرگ تولید برق به دلیل ظرفیت و حجم تولید زیاد علاوه بر داشتن هزینه‌های زیاد در سرمایه‌گذاری، نصب و راه اندازی و نیز تعمیر و نگهداری، غالباً از راندمان الکتریکی

^۱-Mixed integer Nonlinear programming

۲- Annual profit (AP)

۳- Annual total cost saving (ATCS)

۴- Primary Energy Savings (PES)

۵- Carbon Dioxide Emission Reduction (CDER)

بیست و پنجمین کنفرانس بین المللی برق

بالانس انرژی الکتریکی برای سیستم مورد مطالعه به صورت زیر می باشد.

$$E_{grid} + E_{pgu} = E + E_p + E_{ec} \quad (1)$$

E_{grid} برابر است با مقدار الکتریسته خریداری شده از شبکه (در صورتی که برق تولید شده توسط محرکه اولیه پاسخگوی نیاز مصرف کننده نباشد) E_{pgu} برابر است با مقدار برق تولید شده توسط محرکه اولیه، E برابر است با مقدار برق مصرفی (تجهیزات الکتریکی و سیستم روشنایی) و E_p برابر است با الکتریسته پارازیتی^۲ و E_{ec} برق مصرف شده توسط چیلر تراکمی می باشد. مقدار برق مصرفی توسط چیلر تراکمی از رابطه (۲) محاسبه می شود.

$$E_{ec} = \frac{Q_{ec}}{COP_e} \quad (2)$$

که Q_{ec} بار سرمای تولید شده توسط چیلر تراکمی و COP ظریف عملکرد^۳ چیلر تراکمی می باشد. سوخت مصرفی محرکه اولیه از رابطه (۳) بدست می آید. که η_e بازده الکتریکی محرکه اولیه می باشد.

$$F_{pgu} = \frac{E_{pgu}}{\eta_e} \quad (3)$$

مقدار حرارت بازیافت شده از محرک اولیه از رابطه (۴) قابل محاسبه است.

$$Q_r = F_{pgu} \eta_{rec} (1 - \eta_e) \quad (4)$$

η_{rec} بازده سیستم بازیافت حرارت می باشد.

مقدار حرارت مورد نیاز برای چیلر جذبی و همچنین کویل حرارتی از رابطه (۵) قابل محاسبه است.

$$Q_r + Q_b = Q_{rc} + Q_{rh} \quad (5)$$

Q_b حرارت تولید شده توسط بویلر، Q_{rc} و Q_{rh} به ترتیب حرارت مورد نیاز چیلر جذبی و کویل حرارتی می باشند.

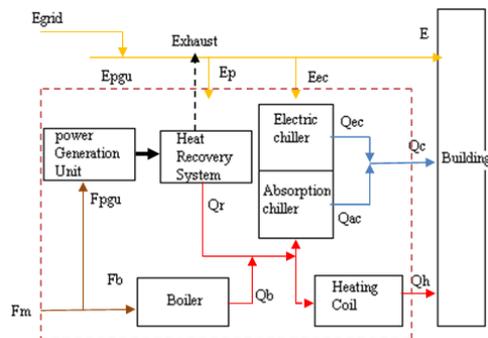
از روش حل غیر خطی آمیخته با عدد صحیح بدست آورده است.

۳- تکنولوژی تولید برق- سرما و حرارت توسط موتور گازسوز (gas engine)

شکل ۱ نمای کلی یک سیستم تولید سه گانه برق - سرما و حرارت را نشان می دهد. هسته اصلی این سیستم یک موتور احتراقی گازسوز است که محرک اولیه سیستم می باشد. حرارت خروجی از آگروز این موتور توسط سیستم های بازیافت حرارت^۱، بازیافت می شود. حرارت جذب شده معمولا به صورت آب داغ و یا بخار برای نیاز گرمایشی و یا سرمایشی مورد استفاده قرار می گیرد. ظرفیت سیستم های تولید همزمان با موتور گازسوز معمولا بین ۵۰ کیلووات تا ۱۰ مگاوات است. بازده این سیستم ها نیز بین ۸۰ تا ۹۵ درصد تغییر می کند. با توجه به رشد حدود ۹ درصدی تقاضای برق در هر سال و امکان استفاده از این منبع انرژی بویژه در فصول گرم سال جهت تولید برق، توسعه سیستم های تولید همزمان می تواند یکی از بهترین راهکارها جهت برطرف نمودن مشکلات تولید برق به ویژه در ساعات اوج بار تلقی گردد.

۱-۳- جریان انرژی در CCHP:

سیستم CCHP از موتور گازسوز، سیستم بازیافت گرما، سیستم سرمایش، بویلر کمکی، کویل های حرارتی مطابق شکل (۱) تشکیل شده است.



شکل ۱- جریان انرژی در CCHP

v -Parasitic electric energy

۸ -Chiller's coefficient of performance

۶ -Heat Recovery Steam Generator (HRSG)

بیست و پنجمین کنفرانس بین المللی برق

سرمایشی (چیلر) می باشد. و F برابر است با سوخت مصرف شده توسط سیستم CCHP.

۴- طرح مسئله برای تعیین ظرفیت بهینه CCHP

استفاده از CCHP در واحدهای مسکونی مزایای زیادی برای مالکین 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 باید پارامترهای زیادی مشخص شوند. برخی از این پارامترها عبارتند از: تکنولوژی واحد، ظرفیت واحد، برنامه کاری واحد، قوانین اتصال به شبکه و... انتخاب این پارامترها باید با توجه به تغییرات بار الکتریکی - حرارتی و سرمایی آپارتمان مسکونی و قیمت بازار و سایر پارامترها صورت گیرد. در این مقاله طراحی سیستم بر اساس تقاضای برق، حرارت و سرمای واحد مسکونی در طول سال صورت گرفته است. بدین ترتیب برای ارائه طرح پارامترهای مجهول به صورت زیر خلاصه می شوند: [۵، ۶ و ۸]

- ظرفیت نامی موتور گازسوز و برنامه کاری آن در سه رژیم مختلف

- ظرفیت نامی بویلر کمکی و برنامه کاری آن در سه رژیم مختلف

- ظرفیت نامی چیلر جذبی و برنامه کاری آن در سه رژیم مختلف

تعیین این پارامترها باید طی یک مسئله بهینه سازی از دید مالک آپارتمان صورت گیرد. بدین ترتیب برای تعریف مسئله باید هزینه ها، درآمدها، قیود و تابع هدف به دقت مشخص شوند:

۴-۱- هزینه ها:

■ هزینه اولیه

در (۱۵) هزینه اولیه موتور گاز سوز آورده شده است. هزینه اولیه موتور گازسوز با تقریب خوبی به صورت تابعی

$$Q_{rc} = \frac{Q_{ac}}{COP_{ac}} \quad (۶)$$

$$Q_{rh} = \frac{Q_h}{\eta_h} \quad (۷)$$

سوخت مصرفی بویلر از رابطه (۸) بدست می آید.

$$F_b = \frac{(Q_{rc} + Q_{rh} + Q_r)}{\eta_b} \quad (۸)$$

بالانس بار سرمایی ساختمان مطابق رابطه (۹) می باشد.

$$Q_c = Q_{ec} + Q_{ac} \quad (۹)$$

$$x = \frac{Q_{ec}}{Q_c} \quad (۱۰)$$

X برابر است با نسبت بار سرمای چیلر تراکمی به بار سرمایی کل. اگر $x=0$ یعنی فقط از چیلر جذبی استفاده شود و اگر $x=1$ از چیلر تراکمی استفاده شود و در غیر این صورت ترکیبی از هر دو استفاده شود.

کل سوخت مصرفی سایت طراحی شده از رابطه (۱۱) بدست می آید.

$$F_{site} = F_{pgu} + F_b \quad (۱۱)$$

و کل سوخت مصرفی آپارتمان نیز مطابق رابطه (۱۲) می باشد.

$$F = F_{site} + \frac{E_{grid}}{\eta_e^{SP}} U \quad (۱۲)$$

$$U = \begin{cases} 1, & E_{grid} \geq 0 \\ 0, & E_{grid} < 0 \end{cases}$$

مقدار سوخت ذخیره شده از رابطه (۱۴) بدست می آید.

$$F^{SP} = \frac{E}{\eta_e^{SP} \eta_{grid}^{SP}} + \frac{E_p^{SP}}{\eta_e^{SP} \eta_{grid}^{SP}} + \frac{Q}{COP_e \eta_e^{SP} \eta_{grid}^{SP}} + \frac{Q_h}{\eta_b^{SP} \eta_h^{SP}} \quad (۱۳)$$

$$PES = \frac{F^{SP} - F}{F^{SP}} = 1 - \frac{F}{F^{SP}} \quad (۱۴)$$

F^{SP} سوخت مصرفی توسط سیستم متداول تولید توان الکتریکی (نیروگاه بخار، گازی و...) و گرمایشی (بویلر) و

بیست و پنجمین کنفرانس بین المللی برق

هزینه اولیه شامل هزینه انواع تجهیزات و موتور می باشد و هزینه زمین صفر در نظر گرفته می شود.

▪ هزینه اولیه بویلر کمکی :

هزینه اولیه بویلر کمکی از رابطه (۲۱) بدست می آید [۶].

$$I_B = 250 \times 10^4 \cdot H^{0.87} \quad (21)$$

که H ظرفیت بویلر بر حسب کیلووات می باشد.

▪ هزینه تعمیر و نگهداری

$$C_{O\&M} = \sum_d \sum_h E_{GE}^{d,h} (C_{o\&m}) T_i \quad (22)$$

این هزینه معمولاً شامل هزینه ثابت و متغیر است. در این مقاله این هزینه ضریبی از ظرفیت واحد در نظر گرفته شده است

▪ هزینه سوخت موتور

$$C_{Fuel} = \sum_d \sum_h E_{GE}^{d,h} \left(\frac{C_f}{HR \cdot \alpha_{d,h}} \right) \quad (23)$$

که α برای موتور گازسوز از رابطه زیر بدست می آید [۸].

$$\alpha_{d,h} = \begin{cases} \frac{\alpha^{25\%} X_{d,h}}{0.25} & \text{if } 0 < X_{d,h} \leq 0.25 \\ \frac{\alpha^{25\%} \cdot (0.5 - X_{d,h}) + \alpha^{50\%} \cdot (X_{d,h} - 0.25)}{0.25} & \text{if } 0.25 < X_{d,h} \leq 0.5 \\ \frac{\alpha^{50\%} \cdot (0.75 - X_{d,h}) + \alpha^{75\%} \cdot (X_{d,h} - 0.50)}{0.25} & \text{if } 0.5 < X_{d,h} \leq 0.75 \\ \frac{\alpha^{75\%} \cdot (1 - X_{d,h}) + \alpha^{100\%} \cdot (X_{d,h} - 0.75)}{0.25} & \text{if } 0.75 < X_{d,h} \leq 1.00 \end{cases}$$

و $X_{d,h}$ برابر است با

$$X_{d,h} = \frac{E_{GE}^{d,h}}{C_{P_{GE}}} \quad (24)$$

▪ هزینه پرسنل

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

▪ هزینه خرید برق از شبکه

$$C_{grid} = \sum_d \sum_h (E_D - E_{GE}^{d,h}) C_g \quad (25)$$

خطی از ظرفیت موتور گازسوز با استفاده از تخمین رگرسیون بدست آمده است [۸ و ۱۱].

$$I_{OGE} = \alpha + \beta \cdot E_{GE} \quad (15)$$

$$J = \sum_{j=1}^k (\alpha + \beta \cdot E_{GE} - I_{OGE})^2 \quad (16)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \alpha} = \sum_{j=1}^k 2 \cdot (\alpha + \beta \cdot E_{GE} - I_{OGE}) = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \beta} = \sum_{j=1}^k 2 \cdot E_{GE} \cdot (\alpha + \beta \cdot E_{GE} - I_{OGE}) = 0 \quad (18)$$

برای تعیین قیمت و رابطه تجهیزات از فرمول ۱۹ استفاده می شود [۱۱].

$$C_Y = C_W \left(\frac{X_Y}{X_W} \right)^\gamma \quad (19)$$

در رابطه ۱۹ با در دست داشتن هزینه خرید تجهیز با ظرفیت C_W ، هزینه خرید تجهیز با ظرفیت C_Y بدست می آید. و γ از جدول زیر بدست می آید.

جدول ۱- لیست مقادیر توان (γ) برای برخی تجهیزات

توان	گستره اندازه	متغیر γ	نوع تجهیز
۰/۷۸	۰/۵ - ۱۰ (MW)	بار حرارتی	بویلر هیتر
۰/۸۱	۱۰ (MW) - ۰/۰۰۷	قدرت	موتور احتراق داخلی
۰/۳۰	۰/۰۷ - ۱۵۰ (m ³)	حجم	تانک ذخیره
۰/۶۵	۱۹۰۰۰ (m ³) - ۱۵۰	حجم	مخزن ذخیره

قیمت یک موتور گاز سوز MWM یک مگاواتی، ۴۵۰۰۰۰ دلار می باشد. (باتوجه به کاتالوگ های شرکت سازنده MWM). و با استفاده از رابطه (۱۹) قیمت سایر ظرفیت ها را بدست آورده و با استفاده از تخمین رگرسیون مقادیر α و β بدست آمده و در نهایت هزینه اولیه موتور گاز سوز برای ظرفیت های مختلف مطابق رابطه (۲۰) می باشد.

$$I_{OGE} = 139803.4 + 300.7 E_{GE} \quad (20)$$

بیست و پنجمین کنفرانس بین المللی برق

استفاده از گاز شهری، مابه‌التفاوت قیمت گاز شهری و نیروگاهی به مالکین این واحدها پرداخته می‌شود. این مقدار از (۳۰) بدست می‌آید.

$$R_M = 27.11E_{GE} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{d,h} \cdot HR} \right) T_i \quad (30)$$

۳-۳-۴- قیود

مجموع توان الکتریکی تولیدی موتور گازسوز و توان تبدلی با شبکه باید تقاضای الکتریکی آپارتمان را تأمین کند. همچنین حرارت بازیافتی از موتور و حرارت تولیدی بویلر کمکی باید تقاضای حرارتی آپارتمان را پاسخ دهند. ظرفیت موتور گازسوز باید در محدوده مشخصی تعیین شود. معادلات ۳۱ تا ۳۵، کلیه قیود مورد نیاز را نشان می‌دهد.

$$E_{GE} + E_{grid} \geq E_D \quad (31)$$

$$\gamma Q_{GE} + Q_B \geq Q_D \quad (32)$$

$$Q_{GE} \leq 1.2E_{GE} \quad (33)$$

$$I \times (Q_{GE}^{min}) \leq Q_{GE} \leq I \times (Q_{GE}^{max}) \quad (34)$$

$$I \times (E_{GE}^{min}) \leq E_{GE} \leq I \times (E_{GE}^{max}) \quad (35)$$

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

۴-۴-۴- تابع هدف :

در این مقاله، مسئله با هدف بیشینه کردن سود سالانه (AP) حل می‌شود و CF با استفاده از رابطه (۳۷) محاسبه می‌شود.

$$AP = CF + R_s \left(\frac{1}{(1+i)^n} \right) - I_{0CCHP} \left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^{n-1}} \right) \quad (36)$$

$$CF = (R_s + R_{Re} + R_b + R_g + R_M) - (I_{0GE} + I_B + C_{Fuel} + C_{Q\&M} + C_{grid}) \quad (37)$$

۵- مطالعه موردی

تقاضای الکتریکی، حرارتی و سرمای آپارتمان نمونه که ۵ طبقه می‌باشد و هر طبقه دو واحد دارد به صورت شکل های ۴ و ۵ می‌باشد. این نمودارها با استفاده از نرم افزار Carrier 2005 بدست آمده است. برای اجتناب از پیچیدگی مسئله،

آپارتمان به شبکه توزیع برق متصل می‌شود تا در صورتیکه موتور گازسوز نتواند برق مورد نیاز آپارتمان را تأمین کند، برق مورد نیاز آن از شبکه تأمین شود.

۴-۲-۴- درآمدها

درآمدهایی که پس از نصب واحد برای مالک ایجاد می‌شود در حالت کلی به موارد زیر تقسیم می‌شوند [۸ و ۷].

■ درآمد ناشی از فروش برق

$$R_S = \sum_d \sum_h E_{GE}^{d,h} \cdot c_c \cdot T_i \quad (26)$$

در صورتی که تولید واحد بیش از مصرف آپارتمان باشد مالک آپارتمان می‌تواند آن را طی قرارداد تضمینی به شبکه بفروشد.

■ درآمد بازیافت حرارت

$$R_{Re} = \sum_d \sum_h (Q_D - Q_b) U_{bf} \cdot c_{cf} \cdot T_i \quad (27)$$

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

■ درآمد ناشی از کاهش خرید برق

$$R_b = \sum_d \sum_h (E_D - E_g) \cdot c_g \cdot T_i \quad (28)$$

پس از اجرای طرح تمام یا بخشی از برق مورد نیاز آپارتمان توسط موتور گازسوز تأمین می‌شود.

■ درآمد اسقاط تجهیزات

پس از اتمام عمر تجهیزات (موتور گازسوز، بویلر کمکی و چیلر جذبی) اسقاط آن نیز دارای ارزش درآمدی است. درآمد اسقاط معمولاً ضریبی از هزینه اولیه آن است.

$$R_o = 0.1 \times I_{0CCHP} \quad (29)$$

■ درآمد پرداخت مابه‌التفاوت

در بیشتر کشورهای دنیا از جمله ایران برای تشویق سرمایه گذاران به استفاده از واحدهای تولید همزمان، تعرفه گاز مصرفی CHP کمتر از گاز شهری، (معمولاً برابر گاز نیروگاهی) در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب در صورت

بیست و پنجمین کنفرانس بین المللی برق

جدول ۱- مقادیر ثابت‌های مورد نیاز برای حل مسئله [۱۶ و ۱۸]

پارامتر	کنونی	آینده	پارامتر	کنونی	آینده	
Q_{GE}^{min}	۱۰	۱۰	peak	۱۴۶۰	۱۶۰۰	
	Q_{GE}^{max}	۳۰۰	۳۰۰	Middle	۳۶۰	۵۰۰
		۱۰	۱۰	Base	۱۸۰	۱۵۰
E_{GE}^{min}	۱۰.۴۲	۱۰.۴۲	peak	۴۷۰	۱۶۰۰	
			Middle	۱۴۳	۵۰۰	
			Base	۳۶	۱۵۰	
HR	۲۹.۱۷	۶۹۰	peak	۱۴۶۰	۱۴۶۰	
			Middle	۴۳۸۰	۴۳۸۰	
			Base	۲۹۲۰	۲۹۲۰	
$C_{o\&m}$	۸۰	۹۴	peak	۳۰	۹۰	
			Middle	۲۰	۲۰	
			Base	۳۸	۳۸	
η_b	۰.۸۷	۰.۸۷	peak	۰.۱	۰.۱۲	
			Middle	۰.۱	۰.۱۲	
			Base	۰.۱	۰.۱۲	
η_{GE}	۰.۸۷	۰.۸۷	peak	۰.۱	۰.۱۲	
			Middle	۰.۱	۰.۱۲	
			Base	۰.۱	۰.۱۲	
COP _{AB}	۰.۸۷	۰.۸۷	peak	۰.۱	۰.۱۲	
			Middle	۰.۱	۰.۱۲	
			Base	۰.۱	۰.۱۲	

پس از حل مسئله موتور گازسوز با ظرفیت نامی ۲۰۰ کیلووات انتخاب می‌شود. شکل ۲ وضعیت تولید برق و حرارت موتور را در رژیم‌های مختلف کاری در دو حالت نشان می‌دهد.

جدول ۲- نتایج حاصل از بهینه سازی

پارامتر	کنونی	آینده
بار الکتریکی تولید شده توسط CCHP (کیلو وات)	پیک	۲۰۰
	میان	۲۰۰
	پایه	۰
بار حرارتی تولید شده توسط CCHP (کیلو وات)	پیک	۲۴۰
	میان	۲۴۰
	پایه	۰
بویلر کمکی (کیلو وات)	پیک	۰
	میان	۰
	پایه	۱۶۰
میزان خرید (+) و یا فروش (-) برق از شبکه	پیک	-۸۰
	میان	-۱۲۰
	پایه	+۲۰
ظرفیت چیلر جذبی (kW)	۲۳۰	۲۱۵
سود سالیانه (هزار تومان)	۳۰۹۰۰	۷۰۵۰۰
دوره بازگشت سرمایه (سال)	۶/۴۸	۰/۹۵

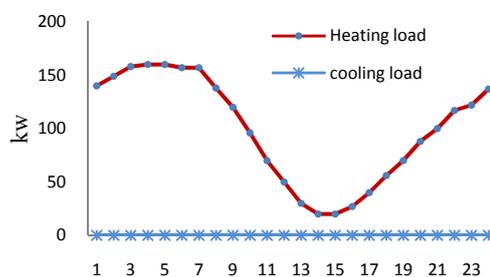
میانگین هر نمودار در سه تعریف به صورت زیر تعریف شده است.^۱

(۱) بار پایه: از ساعت ۲۳ تا ساعت ۷

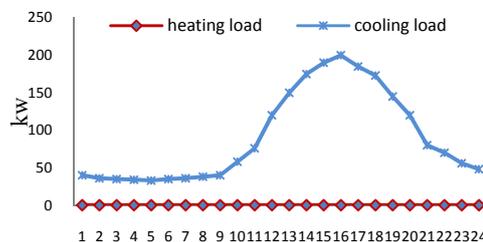
(۲) بار میانه: از ساعت ۷ الی ۱۸

(۳) بار پیک: از ساعت ۱۸ الی ۲۳

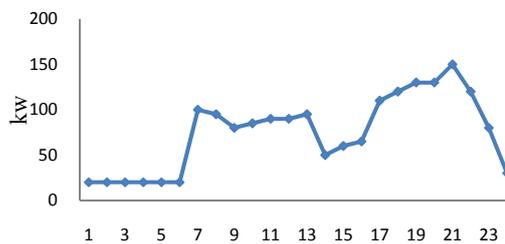
این سه نمودار (شکل‌های ۳، ۴ و ۵) و جدول ۱ اطلاعات مورد نیاز برای حل مسئله را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که اطلاعات مربوط به موتور گازسوز از کاتالوگ‌های کمپانی MWM سازنده موتورهای گاز سوز استخراج شده است.



شکل ۳- دیماندر حرارتی و سرمای ساختمان نمونه - دی ماه



شکل ۴- دیماندر حرارتی و سرمای ساختمان نمونه - تیر ماه



شکل ۵- متوسط الکتریسیته مصرفی سالانه در ۲۴ ساعت

^۱ - این تعریف برای دیماندر الکتریکی، حرارتی و سرمای می‌باشد.

بیست و پنجمین کنفرانس بین المللی برق

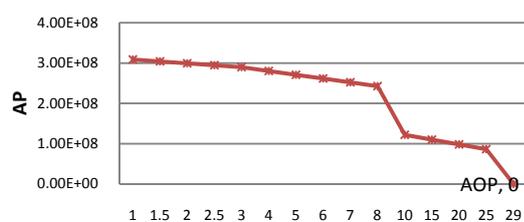
می باشد در نتیجه بهتر است از دو بویلر به ظرفیت های ۱۳۰ و ۱۰۰ کیلووات استفاده شود.

۶- آنالیز حساسیت^۲:

آزاد شدن تعرفه گاز مصرفی و پایان یافتن مدت قرارداد خرید تضمینی برق ممکن است در آینده کارایی طرح دچار مخاطره شود. 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 و قیمت فروش برق شبکه به مورد بررسی قرار می گیرد [۶،۷ و ۱۳].

۶-۱- بررسی عملکرد طرح در برابر افزایش قیمت گاز

برای بررسی کارایی طرح در برابر افزایش قیمت گاز، ابتدا سناریوهایی با قیمت های مختلف گاز تعریف می شود. در هر سناریو قیمت گاز ۵۰ درصد افزایش داده شده است. این کار تا زمانی ادامه پیدا می کند که AP طرح کوچکتر از صفر شود. شکل ۲ نمودار تغییرات AP را بر حسب افزایش قیمت گاز نشان می دهد.



شکل ۲- تغییرات AP بر حسب افزایش قیمت گاز

همانطور که مشاهده می شود با افزایش قیمت گاز، AP طرح کاهش می یابد و با ۸ برابر شدن قیمت گاز (۲۳۳ ریال)، مقدار AP به شدت افت می کند و این ناشی از خاموش شدن موتور در بار میانه است (شکل ۷). با توجه به اینکه قیمت آزاد گاز ۶۹۰ ریال به ازای هر متر مکعب است (تقریباً ۲۳ برابر قیمت کنونی گاز مصرفی CHP) می توان نتیجه گرفت

همانطور که مشاهده می شود بیشترین ظرفیت مجاز برای CCHP انتخاب شده است. انتخاب بیشترین ظرفیت به دلایل زیر صورت گرفته است:

- پائین بودن قیمت گاز مصرفی CCHP
- بالا بودن قیمت فروش برق به شبکه نسبت به قیمت خرید برق از شبکه
- وجود قرارداد تضمینی و عدم مواجه شدن با ریسک شرکت در بازار
- با توجه به جدول ۲ موتورگازسوز در بار پایه خاموش می باشد زیرا قیمت خرید برق از CCHP در بار پایه خیلی پایین است. بنابراین برای تامین ۲۰ کیلووات بار پایه از شبکه، برق خریداری می شود. و همچنین برای تامین حرارت در این ساعت از بویلر کمکی استفاده می شود.

محاسبه ظرفیت بویلر کمکی :

برای پاسخ گویی به نیاز حرارتی و سرمایی مصرف کننده در طول سال، بدترین حالت را در نظر گرفته شده است.

دی ماه : برای بار پایه (ساعت ۲۳ الی ۷) داریم

$$Q_{heat_load} + Q_{cool_load} = 160 \text{ (kw)}$$

برای تیرماه داریم:

$$Q_{heat_load} + Q_{cool_load} = 200 \text{ (kw)}$$

که این ۲۰۰ کیلو وات ($Q_{cool-load}$) از جنس سرما بوده و برای تامین آن از چیلر جذبی استفاده می شود. گرمای (Q_{AB} heating-power) که مورد نیاز است تا این مقدار سرما را تامین کند به صورت (۳۶) محاسبه می شود [۱۰].

$$COP_{AB} = \left(\frac{Q_{cool_load}}{Q_{AB_heating-power}} \right) \quad (38)$$

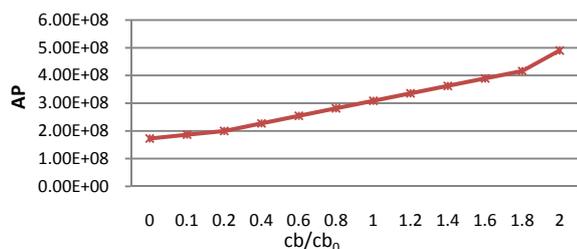
با جاگذاری پارامترهای معلوم در فرمول بالا مقدار گرمای مورد نیاز برای تامین سرما برابر است با:

$$Q_{AB_heating-power} = 230 \text{ (kw)}$$

در نتیجه ظرفیت بویلر کمکی برابر است با ۲۳۰ کیلووات. با توجه به این که ضریب بار حرارتی^۱ ساختمان ۶۰ درصد

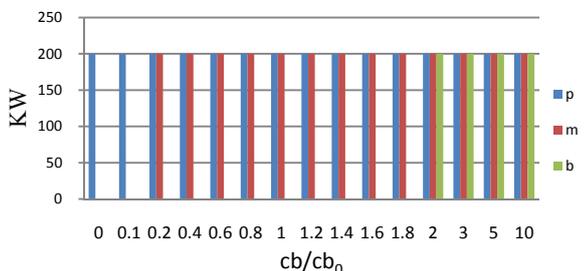
بیست و پنجمین کنفرانس بین المللی برق

وضعیت دچار تغییر خواهد شد. برای بررسی این موضوع سناریوهایی با قیمت‌های مختلف برای خرید برق از شبکه تعریف می‌شود. در هر سناریو قیمت برق شبکه ۱۰٪ نسبت به قیمت خرید برق در سناریوی قبل کاهش (افزایش) پیدا می‌کند. شکل ۱۰ نمودار تغییرات AP بر حسب کاهش قیمت خرید برق از شبکه را نشان می‌دهد.

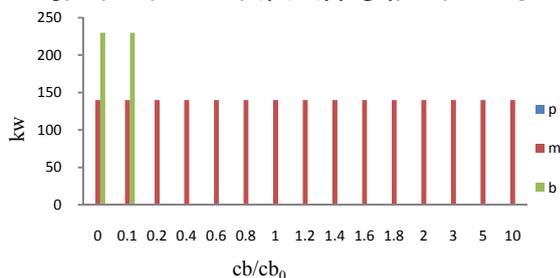


شکل ۱۰- تغییرات AP بر حسب تغییرات تعرفه برق شبکه

با توجه به شکل ۱۰ کاهش قیمت خرید برق از شبکه موجب کاهش AP می‌شود. با صفر شدن قیمت برق شبکه مقدار AP همچنان مثبت است و این موضوع نشان می‌دهد کاهش قیمت برق شبکه سوددهی طرح را کاهش می‌دهد اما به تنهایی نمی‌تواند مقدار AP را صفر کند.



شکل ۱۱- تغییرات خروجی موتور گازسوز بر حسب تغییرات تعرفه برق شبکه

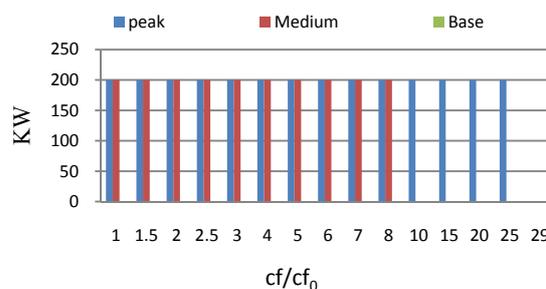


شکل ۱۲- تغییرات خروجی بویلر کمکی بر حسب تغییرات تعرفه برق شبکه

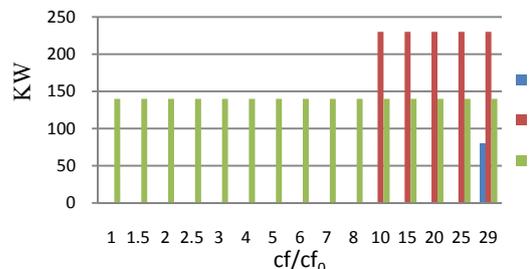
۶-۳- بررسی عملکرد طرح در برابر کاهش قیمت فروش برق به شبکه : [۷ و ۶]

برای بررسی این تغییرات سناریوهایی با قیمت‌های مختلف برای فروش برق به شبکه طرح می‌شود و عملکرد

با آزاد شدن قیمت گاز، بهینه‌ترین حالت این است که سیستم فقط در حالت پیک، برق تولید کند. اگر بنا به دلایلی قیمت گاز از ۸۴۶ ریال (۲۹ برابر قیمت فعلی) بالاتر رفت و دیگر پارامترها ثابت باقی بمانند طرح کارایی خود را از دست می‌دهد. و در این شرایط طرح توجیه اقتصادی ندارد.

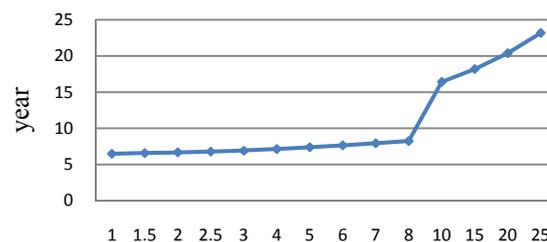


شکل ۷- تغییرات خروجی موتور گازسوز بر حسب افزایش قیمت گاز



شکل ۸- تغییرات خروجی بویلر کمکی با افزایش قیمت گاز

از دیگر پارامترهای مهم اقتصادی برای ارزیابی پروژه‌ها، دوره بازگشت سرمایه می‌باشد. تغییرات دوره بازگشت سرمایه طرح نسبت به تغییرات قیمت گاز در شکل ۹ نشان داده شده است.



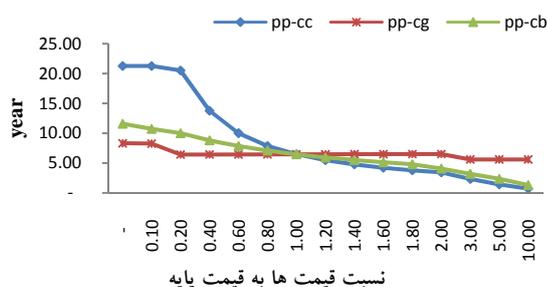
شکل ۹- تغییرات SPP بر حسب تغییرات قیمت گاز مصرفی

۶-۲- بررسی عملکرد طرح در برابر کاهش و یا افزایش تعرفه برق شبکه :

در حال حاضر برای تشویق سرمایه‌گذاران به استفاده از واحدهای تولید همزمان، قیمت فروش برق به شبکه بیشتر از قیمت خرید برق از شبکه است. اما در سال‌های آینده

بیست و پنجمین کنفرانس بین المللی برق

با توجه به شکل ۱۶، cc بیشترین تاثیر را روی AP دارد و این به دلیل بزرگتر بودن cc نسبت به cb و cg می باشد. و چون بار میانه و پیک توسط موتور گازسوز تامین می شود و فقط ۲۰ کیلو وات بار پایه از شبکه خریداری می شود در نتیجه تغییرات ۱۰ درصدی cc تاثیر ناچیزی روی AP دارد.



شکل ۱۷ - تغییرات spp بر حسب افزایش قیمت خرید و فروش برق به شبکه

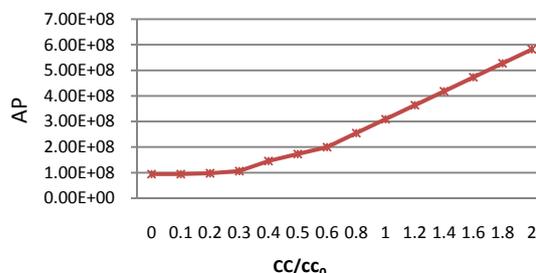
۷- نتیجه گیری

در این مقاله بالانس انرژی برای سیستم های CCHP به طور کامل نوشته شد. و روابط ریاضی مناسبی با کمترین تقریب برای توصیف درآمدها و هزینه ها و قیود موجود در مسئله ارائه شد. سپس مسئله تعیین ظرفیت و رژیم کاری یک موتور گازسوز، بویلر کمکی و چیلر جذبی با هدف بیشینه کردن AP تعریف و با استفاده از نرم افزار GAMS حل شد. نتایج نشان می دهد با شرایط موجود در ایران، استفاده از موتورهای گازسوز برای تأمین برق- سرما و حرارت یک آپارتمان مسکونی اقتصادی می باشد و مزایای زیادی به همراه دارد. بررسی تغییرات AP در سناریوهای مختلف بر اساس تغییر قیمت خرید و فروش برق و قیمت سوخت نشان می دهد رژیم کاری واحد در این سناریوها دچار تغییر می شود که در نصب CCHP در آپارتمان باید این تغییرات را در نظر داشت.

مراجع:

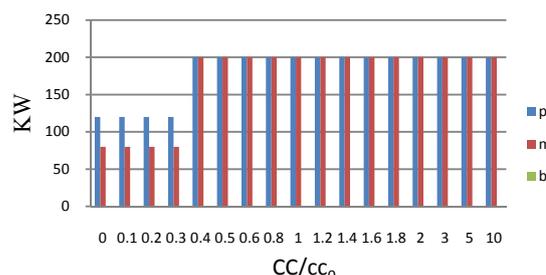
- [1] Zhi-Gao Sun "Energy efficiency and economic feasibility analysis of cogeneration system driven by gas engine", Energy and Buildings 40, pags126-130, 2008
- [2] X.Q. Kong, R.Z. Wang "Energy efficiency and economic feasibility of CCHP driven by stirling engine", Energy Conversion and Management, 45,pags 1433-1442, 2004
- [3] Christos A. Frangopoulos "Effect of reliability considerations on the optimal synthesis, design and

طرح تحت این سناریوها مورد بررسی قرار می گیرد. در هر سناریو قیمت فروش برق ۱۰٪ کمتر از قیمت فروش برق در سناریوی قبل است. شکل ۱۳ تغییرات AP را بر حسب کاهش قیمت فروش برق نشان می دهد.

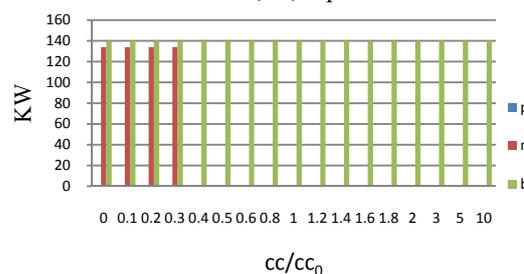


شکل ۱۳- تغییرات AP بر حسب کاهش قیمت فروش

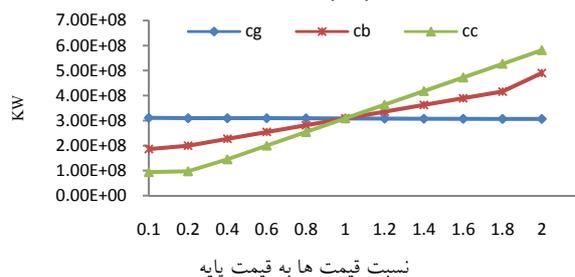
با توجه به شکل ۱۳ با کاهش قیمت فروش برق، مقدار AP نیز کاهش می یابد. از سناریو ۰.۳ برابر قیمت cc تغییرات AP بسیار ناچیز است. زیرا رژیم کاری همان طور که در شکل ۱۴ مشاهده می شود، عوض می شود.



شکل ۱۴- تغییرات خروجی موتور گازسوز بر حسب تغییرات قیمت فروش برق chp به شبکه



شکل ۱۵- تغییرات خروجی بویلر کمکی بر حسب تغییرات قیمت برق فروشی به شبکه



شکل ۱۶- تغییرات AP نسبت به cc, cg و cb

[18] www.tavanir.org.ir

operation of a cogeneration system” Energy 29, page 309–329,2004

[4] C.Z. Li, Y.M. Shi , X.H. Huang, “Sensitivity analysis of energy demands on performance of CCHP system, Energy Conversion and Management 49 (2008) 3491–3497

[5] 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

[6] 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]

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

[8] Hongbo Ren, Weijun Gao , Yingjun Ruan, “Optimal sizing for residential CHP system” , AP plied Thermal Engineering 28 (2008) 514–523

[9] Z.G. Sun, R.Z. Wang, W.Z. Sun , Energetic efficiency of a gas-engine-driven cooling and heating system ap plied Thermal Engineering 24 (2004)

[10] X.Q. Kong, R.Z. Wang, J.Y. Wu, X.H. Huang, Y. Huangfu, Experimental investigation of a micro-combined cooling, heating and power system driven by a gas engine International Journal of Refrigeration 28 (2005)

[11] Bejan, Adrian, Thermal Design & optimization, John Wiley & Sons Inc, New York, 1996.

[12] Aikaterini Fragaki , Anders N. Andersen, David Toke “Exploration of economical sizing of gas engine and thermal store for combined heat and power plants in the UK” Energy 33 (2008) 1659– 1670

[13] محمد صادق قاضی زاده ، میثم انصاری ، جواد پاک

دامن و عادل غلامی " تعیین بهینه ظرفیت و برنامه کاری یک موتور گازسوز و بویلر کمکی جهت تولید همزمان برق و حرارت یک واحد صنعتی " هجدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، ۲۱-۲۳ اردیبهشت ۸۹

[14] قوانین مسکونی " پنجمین همایش بهینه سازی مصرف

سوخت در ساختمان تهران ۵ و ۶ اردیبهشت مربوط به سیستم های تولید پراکنده مصوب شرکت مادر تخصصی توانیر [15] قوانین مربوط به دستوالعمل توسعه مولد مقیاس

کوچک موضوع ابلاغیه ۵۲۵۰۴/۳۵۰ مورخ ۱۳۸۷/۷/۳۰ مصوب شرکت مادر تخصصی توانیر

[16] www.energy.ca.gov

[17] European educational tool on cogeneration, second edition, 2001.