تعیین ظرفیت بهینه و آنالیز حساسیت سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما بر پایه محرکه اولیه پیل سوختی برای یک آپارتمان مسکونی

محمد صادق قاضی زاده [۱]، عادل غلامی [۲و*]، سید میر جواد رودکی [۳]

تاریخ دریافت مقاله:
۱۳۹۰/۴/۱۷
تاریخ پذیرش مقاله:
۱۳۹۰/۶/۲۰

چکیده:

اخیرا بحث‌های مربوط به انرژی و موضوع گرم شدن جهانی منجر شده است که استفاده از انرژی های نو به شدت مورد توجه قرار بگیرد. یکی از گزینه‌های مناسب برای این منظور استفاده از CCHP با محرکه اولیه پیل سوختی می‌باشد. مهمترین مزیت سیستم های CCHP کارائی بالا و آلودگی کم شان می باشد. محرکه‌های سیستم‌های تولید همزمان می‌تواند موتور گازسوز، میکرو توربین، پیل سوختی و یا موتور استرلینگ باشد. در بین محرکه های اولیه پیل سوختی به دلیل بازده بالا، آلودگی بسیار کم ، نداشتن قطعات متحرک، مدولار بودن و داشتن رنج‌های گسترده بهترین گزینه برای CCHP می‌باشد. در این مقاله برای یک آپارتمان نمونه در تهران با در دست داشتن دیماند حرارتی، سرمایی و الکتریکی و با ارزیابی اقتصادی ظرفیت بهینه و رژیم کاری پیل سوختی در چهار سناریو مختلف تعیین شده است. سناریوها بر اساس مشخصات وضعیت کنونی و آینده پیل سوختی و با در نظر گرفتن هزینه آلاینده های اجتماعی تعریف شده است. مسئله با هدف ماکزیمم کردن ارزش فعلی خالص با روش حل غیر خطی آمیخته با عدد صحیح حل شده است. و همچنین ظرفیت بهینه و رژیم کاری بویلر کمکی و چیلر جذبی بدست آمده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که استفاده از پیل سوختی در شرایط کنونی اقتصادی نیست ولی در آینده نزدیک و یا با در نظر گرفتن هزینه اجتماعی آلاینده‌ها اقتصادی خواهد بود. در پایان کارایی طرح در سناریوهای مختلفی با توجه به تغییرات پارامترهای مهم (قیمت سوخت، قیمت برق فروشی به شبکه و هزینه سرمایه گذاری) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که تغییر این پارامترها تاثیر بسزای روی عملکرد سیستم دارند.

کلمات کلیدی:
تولید سه گانه برق– سرما و حرارت، بهینه سازی، پیل سوختی، آلاینده های زیست محیطی، آنالیز حساسیت

۱) دکترای مهندسی برق ، عضو هیئت علمی دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، ghazizadeh@pwut.ac.ir
۲) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (مدیریت انرژی) دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، gholamiadel7@gmail.com
۳) دکترای مهندسی شیمی، عضو هیئت علمی دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، J.Roudaki.com@yahoo.com
* نویسنده مسئول

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

مقدمه

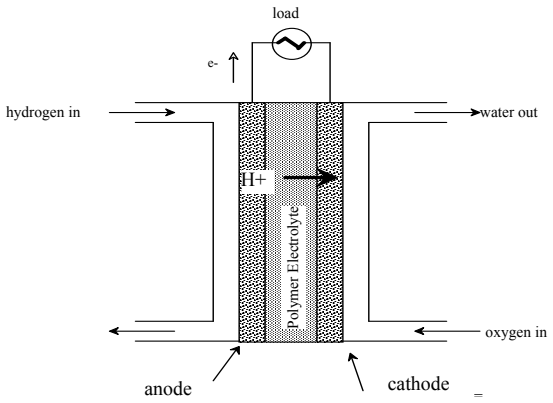
سیستم‌های تولید پراکنده با هدف بهینه‌سازی در مصرف انرژی، کاهش اتلافات ناشی از انتقال و توزیع انـرژی الکتریکـی در شبکه و نیز کاهش آلودگی‌های ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌های بزرگ، بـه کـار گرفتـه مـی‌شـوند. تولیـد انـرژی الکتریکی در مقیاس بزرگ و انتقال آن به مصرف‌کنندگان تلفات زیادی به همراه 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، غالبا از راندمان الکتریکی پایینی برخوردار بوده و علاوه بر افزایش مصرف سوخت موجب افزایش آلاینده‌هـای زیسـت محیطـی مـی‌گردنـد. مجموعه این عوامل و عواملی مانند قابلیت اطمینان بیشتر، تجدید ساختار در صنعت برق و... کشورهای جهان را به سـمت اسـتفاده از تولیدات پراکنده سوق داده است. در این میان استفاده از سیستم‌های تولید پراکنده همزمان بر پایه محرکه اولیه پیل سوختی به خـاطر راندمان بالا، قابلیت انشعاب ، عملکرد بدون صدا، اثرات زیست محیطی کم، ظرفیت کوچک می‌تواند تکنولوژی ایـده‌آلـی بـرای تولیـد قدرت توزیعی و محلی باشد. سلول‌های سوختی دما بالا به دلیل تولید قابل ملاحظـه‌ای از گرمـای اتلافـی، کـاملا بـرای اسـتفاده از نیروگاه‌های با تولید همزمان مناسب است. اما در صورتیکه پارامترهای لازم آن (ظرفیت، برنامه‌کاری، مکـان و...) بـه صـورت دقیـق انتخاب نشوند ممکن است کارایی طرح کاهش پیدا کند. بر این اساس دیدگاه‌های مختلفی برای تعیین پارامترهـای واحـدهای تولیـد همزمان ارائه شده است. توابع هدف از دید شبکه، مالک واحد و سرمایه گذار تعریـف و بـا روش‌هـای گونـاگونی مـورد بررسـی قـرار گرفته‌اند. در مرجع [۵] مولفین مسئله را از دید صاحب آپارتمان با هدف افزایش ارزش خـالص فعلـی(Net Present Value) بـا استفاده از الگوریتم ژنتیک حل کرده‌اند. در مرجع [۶] مسئله بهینه سازی با هدف کاهش هزینه سالیانه سیستم CCHP به صورت غیر خطی آمیخته با عدد صحیح (Mixed integer Nonlinear programming) حل شده است و مولفین نتایج بدست آورده را نیز آنالیز حساسیت کرده‌اند. در مرجع [۷] چهار نوع پیل سوختی از لحاظ اقتصادی با هم مقایسه شده است. در مرجع [۸] ابتدا معادله توازن انرژی برایCCHP نوشته شده است. سپس یک تابع هدف سه منظوره جهت یافتن ظرفیت بهینه سیستم طراحی تعریف شده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شده است. تابع سه منظوره مجموع سه تابع، صرفه جویی در هزینه کـل (Annual total cost saving)، صرفه جویی در انرژی اولیه (Primary energy savings) و شدت کاهش آلاینده‌های زیست محیطی (Carbon dioxide emission reduction) می‌باشد. در مرجع [۱۰] ظرفیت بهینه پیل سوختی از نوع PEM با در نظـر گـرفتن هزینـه کل به عنوان تابع هدف و به کمک الگوریتم ژنتیک حل شده است. در مرجع [۱۲] مولفین ابتدا برای یک میکرو توربین با اسـتفاده از آنالیز اکونومیک – انرژی قیمت برق و حرارت تولید شده را بدست آورده وسپس با در نظر گرفتن سود سالانه (Annual profit) به عنوان تابع هدف، ظرفیت ماکزیمم را در دو حالت اتصال به شبکه و در حالت جدا از شبکه بدست آورده‌اند.

مبانی پیل سوختی

پیل سوختی یک سیستم الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی سوخت – عموما هیـدروژن (و یـا متـانول) و هـوا را بـه طـور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. این مولد انرژی دارای بازده بالایی است. در پیل سوختی هیدروژن در قسـمت آنـد اکسـید شده و به پروتون و الکترون تقسیم می‌شود. الکترون تولیدی جریان الکتریسیته را موجب می‌گردد. پروتون با عبور از غشاء تبادل یـون به سمت کاتد رفته و در حضور کاتالیزور با اکسیژن هوا و الکترون بازگشتی از پیل به آب تبدیل می‌شود و بدین‌ترتیب آلـودگی بوجـود

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

نمی‌آید. ولی درصورتیکه از گاز طبیعی به عنوان سوخت استفاده شود تبدیل گاز طبیعی به هیدروژن در رفورمر باعث می‌شود که مقداری آلاینده منتشر شود. واکنش‌های صورت گرفته در آند، کاتد و ما حصل نهایی بصورت زیر است:



شکل ۱: نحوه تولید برق در پیل سوختی

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$$
$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O \qquad (1)$$
$$2H_2 + O_2 \; 2H_2O$$

انواع سلول های سوختی

چهار نوع سلول سوختی می توانند برای تولید قدرت مورد استفاده قرار گیرند، که مشخصه اصلی آنها در جدول ۱ نشان داده شده است[۱].

جدول ۱: مشخصه اصلی سلول های سوختی

نوع سلول سوختی	دما	هدایت کننده یونی	راندمان	نوع الکترلیت
سلول سوختی قلیایی (AFC)	۶۰-۹۰	H^+	۶۰	محلول KOH 35%
سلول سوختی اسید فسفریک (PAFC)	۱۶۰ - ۲۲۰	O^{-2}	۳۷ - ۴۲	استد فسفریک
سلول سوختی با کربنات مذاب (MCFC)	۶۰۰ - ۶۵۰	CO_3^{-2}	۵۰ – ۶۰	کربنات مذاب
سلول سوختی اکسید جامد (SOFC)	۸۰۰ - ۱۰۰۰	H^+	۶۰ - ۶۵	اکسید جامد

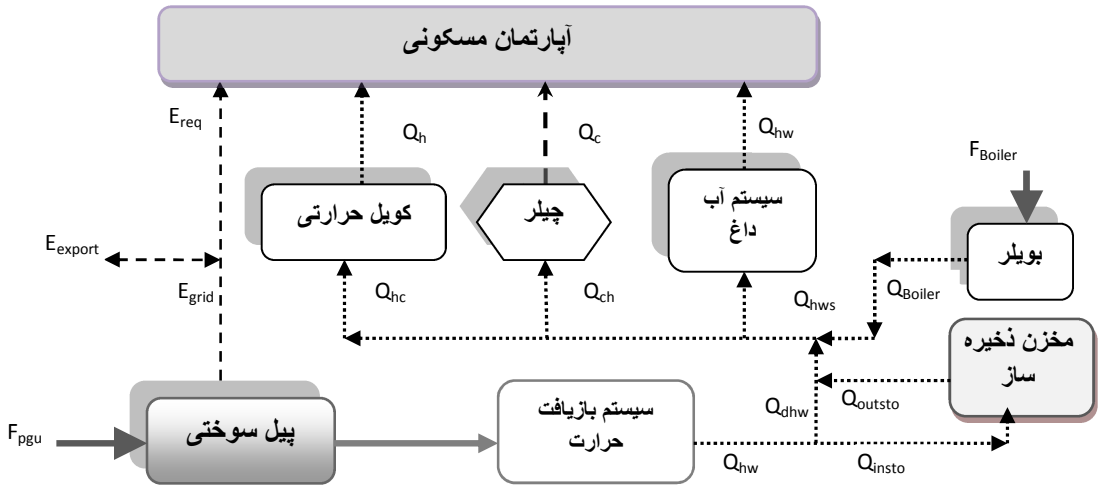
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

در این مقاله برای تامین برق ، حرارت و سرما از پیل سوختی SOFC به علت داشتن مزایای زیر استفاده شده است[۱و۷] .

- به علت عملکرد دمایی بالا دارای بیشترین راندمان نسبت به سایر پیل‌های سوختی می‌باشد.
- از گرمای تولید شده می‌توان برای افزایش بازدهی مجدد استفاده نمود.
- امکان بازسازی درونی سوخت به خاطر عملکرد دمایی بالا وجود دارد.
- نیازی به کاتالیست‌های گران قیمت ندارد.
- برای استفاده از سوخت‌های مختلف نیازی به مبدل‌های سوخت نیست.
- از آنجاییکه پیل سوختی اکسید جامد دارای الکترولیت جامد است مشکل خوردگی مواد کم می‌باشد .
- برای ساخت اجزای پیل می‌توان از فن‌آوری لایه نازک استفاده نمود.

نیروگاههای تولید همزمان بر مبنای پیل سوختی

شکل (۱) نمای کلی یک سیستم تولید سه گانه برق – سرما و حرارت را نشان می دهد. هسته اصلی این سیستم یک پیل سوختی است که محرک اولیه سیستم می‌باشد. حرارت خروجی از پیل سوختی توسط سیستم‌های بازیافت حرارت(Heat Recovery Steam Generator) بازیافت می‌شود. حرارت جذب شده معمولا به صورت آب داغ و یا بخار برای نیاز گرمایشی و یا سرمایشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ظرفیت سیستم‌های تولید همزمان با پیل سوختی SOFC معمولا بین ۱کیلووات تا ۱ مگاوات است. بازده این سیستم‌ها نیز بین ۸۰ تا ۹۰ درصد تغییر می‌کند. سیستم CCHP از پیل سوختی، سیستم بازیافت گرما ، سیستم سرمایش، بویلرکمکی ، کویل‌های حرارتی مطابق شکل تشکیل شده است[۸].



شکل ۲: جریان انرژی در CCHP

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

تولید گرما در سلول های سوختی

نرخ تولید گرما در سلولهای سوختی از رابطه بدست می آید[۱].

$$Q= - (\frac{T.\Delta S}{F})i + i\sum \Delta E + i^2 R \quad (2)$$

که اولین جمله بر مبنای آنتروپی (ΔS) واکنش، دومین جمله معرف گرمای تولیدی به دلیل برگشت ناپذیری‌ها به واسطه حرکت‌های جنبشی آهسته واکنشها و محدودیتهای انتقال جرم (که $\sum \Delta E$ مجموع پتانسیل هاست) و جمله سوم گرمای ژول حاصله از اتلافات اهمی (که i جریان است) است.

در سلول های سوختی رابطه بین گرمایی تولید شده و توان الکتریکی به صورت زیر می باشد.[۱۰]

$$(H_{d,h}^{CHP}) \le 0.75 E_{d,h}^{CHP} \quad (3)$$

$H_{d,h}^{CHP}$ گرمایی تولید شده توسط محرک اولیه (پیل سوختی) و $E_{d,h}^{CHP}$ توان الکتریکی تولید شده توسط پیل می‌باشد.

طرح مسئله برای تعیین ظرفیت بهینه CCHP

استفاده از واحدهای تولید همزمان در منازل 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، مکان نصب واحد و.... انتخاب این پارامترها باید با توجه به تغییرات بار الکتریکی – حرارتی و سرمایی منزل مسکونی و قیمت بازار و سایر پارامترها صورت گیرد. طراحی سیستم براساس تقاضای برق و حرارت و سرما واحد مسکونی در طول سال صورت گرفته است. بدین ترتیب برای ارائه طرح پارامترهای مجهول به صورت زیر خلاصه می شوند:[۶، ۱۱ و ۴]

- ظرفیت نامی پیل سوختی 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:

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

هزینه ها

هزینه اولیه پیل سوختی

هزینه اولیه پیل سوختی با تقریب خوبی به صورت تابعی خطی از ظرفیت پیل سوختی با استفاده از رابطه (۴) بدست آمده است. هزینه اولیه شامل هزینه انواع تجهیزات و پیل سوختی می‌باشد و هزینه زمین صفر در نظر گرفته می‌شود [۶ و ۱۱].

$$I_{FC} = \sum_{d}\sum_{h} E_{FC}^{d,h}(C_{FC}) \qquad (4)$$

که I_{FC} هزینه اولیه پیل سوختی بر حسب دلار و C_{FC} هزینه سرمایه گذاری پیل که واحد آن $/Kw می باشد.

هزینه اولیه بویلر کمکی

هزینه اولیه بویلر کمکی از را رابطه (۵) بدست می آید[۵].

$$I_B = 250\times10^4.H^{0.87} \qquad (5)$$

که $\mathbf{I_B}$ هزینه سرمایه گذاری بویلر کمکی بر حسب دلار و **H** ظرفیت بویلر برحسب کیلووات می باشد.

هزینه اولیه CCHP

هزینه اولیه، مجموع هزینه اولیه پیل سوختی با تجهیزات جانبی ($\mathbf{I_{0FC}}$)، هزینه اولیه بویلر کمکی ($\mathbf{I_{0B}}$) هزینه اولیه چیلر جذبی ($\mathbf{I_{0AB}}$) می باشد.

$$I_{0CHP} = I_{0FC} + I_{0B} + I_{0AB} \qquad (6)$$

هزینه سالانه تعمیر و نگهداری تجهیزات

این هزینه شامل هزینه ثابت و متغیر است. در این مقاله این هزینه ضریبی از ظرفیت واحد در نظر گرفته شده است[۵].

$$C_{O\&M} = \sum_{d}\sum_{h} E_{FC}^{d,h}(c_{o\&m})T_i \qquad (7)$$

که $C_{O\&M}$ هزینه تعمیر و نگهداری سالانه می باشد که واحد $C_{O\&M}$ دلار و واحد $c_{o\&m}$ ، $/Kwh می باشد.

هزینه سالانه سوخت مصرفی پیل سوختی

$$C_{Fuel} = \sum_{d}\sum_{h} E_{FC}^{d,h}\left(\frac{c_f}{HR.\alpha_{d,h}}\right) \qquad (8)$$

$\mathbf{C_{Fuel}}$ هزینه سالانه سوخت مصرفی پیل سوختی ، $\mathbf{c_f}$ هزینه سوخت بر حسب **$/Kwh** ، **HR** نرخ حرارتی (**Rate Heat**) و $\alpha_{d,h}$ بازده پیل سوختی می‌باشد که از رابطه بدست می آید[۱۰].

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

$$\alpha_{d,h} = 0.2716 \quad \text{for PLR<0.05}$$
$$\alpha_{d,h} = 0.9033\text{PLR}^5 - 2.9996PLR^4 + 3.6503PLR^3 - 2.0704PLR^2 + 0.4623PLR + 0.3747 \quad (9)$$
$$\text{for PLR>0.05}$$

PLR نسبت ضریب بار (**Load Factor Ratio**) پیل سوختی می‌باشد.

هزینه سالانه خرید برق از شبکه

$$\mathrm{C_{grid}} = \sum_d \sum_h (E_{\mathrm{Req}}^{d,h} - E_{FC}^{d,h}) c_g \quad (10)$$

$\mathbf{C_{grid}}$ برحسب دلار، $\mathbf{c_g}$ قیمت برق خریداری شده از شبکه برحسب **$/kwh** و $E_{\mathrm{Req}}^{d,h}$ مقدار برقی که از شبکه خریداری می شود. آپارتمان به شبکه توزیع (خط ۴۰۰ ولت) متصل می‌شود تا در صورتیکه پیل سوختی نتواند برق مورد نیاز آپارتمان را تأمین کند، برق مورد نیاز آن از شبکه تأمین شود.

درآمدها

درآمدهایی که پس از نصب واحد برای مالک ایجاد می‌شود در حالت کلی به موارد زیر تقسیم می‌شوند[۶ و ۱۱].

درآمد ناشی از فروش برق

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

$$R_{Se} = \sum_d \sum_h E_{FC}^{d,h} c_c T_i \quad (11)$$

c_c قیمت برق فروشی CHP به شبکه که واحد آن $/Kwh می‌باشد.

درآمد بازیافت حرارت

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

$$R_{\mathrm{Re}} = \sum_d \sum_h (Q_D - Q_b) U_{bf} c_{cf} T_i \quad (12)$$

Q_D برابر دیماند حرارتی مصرف کننده ، Q_b حرارت تولید شده توسط بویلر، U_{bf} مقدار مصرف گاز توسط بویلر کمکی و c_{cf} قیمت سوخت (گاز طبیعی) بویلر می‌باشد.

درآمد ناشی از کاهش خرید برق

پس از اجرای طرح، تمام یا بخشی از برق مورد نیاز آپارتمان توسط پیل سوختی تأمین می‌شود.

$$R_b = \sum_d \sum_h (P_D - P_g) c_g T_i \quad (13)$$

P_D برابر دیماند الکتریکی مصرف کنند، P_g برق خریداری شده توسط شبکه و c_g قیمت برق خریداری شده از شبکه می‌باشد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

درآمد اسقاط تجهیزات

پس از اتمام عمر موتور، اسقاط آن نیز دارای ارزش درآمدی است. درآمد اسقاط معمولا ضریبی از هزینه اولیه آن است[۱۱].

$$R_s = 0.1 \times I_{0CHP} \quad (14)$$

I_{0CHP} هزینه اولیه سیستم CCHP می‌باشد که شامل هزینه پیل سوختی، بویلر کمکی، چیلر جذبی و کل تجهیزات جانبی می‌باشد.

درآمد پرداخت بابت سوخت مصرفی

در ایران برای تشویق سرمایه گذاران به استفاده از واحدهای تولید همزمان، برای مولدهایی که راندمان الکتریکی موثر ٪ ٤٢ داشته باشند به ازاء هر کیلووات ساعت برق تولیدی، ارزش یک چهارم گاز طبیعی مصرف شده به عنوان سوخت مصرفی به فروشنده پرداخت خواهد شد.. این مقدار از (۳۰) بدست می‌آید[۳].

$$R_M = 0.25 c_f . E_{GE} . \left(\frac{1}{\alpha_{d,h} . HR} \right) T_i \quad (15)$$

قیود

مجموع توان الکتریکی تولیدی پیل سوختی و توان تبادلی 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 پیل سوختی باید در محدوده مشخصی تعیین شود. معادلات ۱۶ تا ۲۵، کلیه قیود مورد نیاز را نشان می‌دهد[۶ و ۱۰] .

$$E^{grid}_{d,h} + E^{CHP}_{d,h} + E^{CHP}_{d,h,sal} \geq L_{d,h,ele} \quad (16)$$

$$H^{CHP}_{d,h} \leq 0.75 E^{CHP}_{d,h} \quad (17)$$

$$I \times (H^{\min}_{CHP}) \leq H^{CHP}_{d,h} \leq I \times (H^{\max}_{CHP}) \quad (18)$$

$$I \times (E^{\min}_{CHP}) \leq E^{CHP}_{d,h} \leq I \times (E^{\max}_{CHP}) \quad (19)$$

$$\gamma . H^{CHP}_{d,h} + H^{Boiler}_{d,h} \geq L_{d,h,thermal} \quad (20)$$

$$E^{CHP}_{d,h_j} - E^{CHP}_{d,h_{j-1}} \leq \Delta E_U \quad (21)$$

$$E^{CHP}_{d,h_{j-1}} - E^{CHP}_{d,h_j} \leq \Delta E_D \quad (22)$$

$$(T^{on}_{j-1} - MUT)(I_{j-1} - I_j) \geq 0 \quad (23)$$

$$(T^{off}_{j-1} - MDT)(I_j - I_{j-1}) \geq 0 \quad (24)$$

$$n_{start-stop} \geq N^{\max} \quad (25)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

$E_{d,h}^{grid}$ برق خریداری شده از شبکه، $E_{d,h}^{CHP}$ توان الکتریکی تولید شده توسط CCHP جهت مصرف داخلی، $E_{d,h,sal}^{CHP}$ توان الکتریکی اضافی تولید شده توسط CCHP جهت فروش به شبکه، $L_{d,h,ele}$ دیماند الکتریکی مورد نیاز مصرف کننده، $H_{d,h}^{CHP}$ حرارت تولید شده توسط CCHP، $H_{CHP}^{\min}$ و $H_{CHP}^{\max}$ مقدار حداقل و حداکثر توان حرارتی که پیل سوختی مجاز است تولید کند، $E_{CHP}^{\min}$ و $E_{CHP}^{\max}$ مقدار حداقل و حداکثر توان الکتریکی پیل سوختی مجاز است تولید کند، γ بازده استفاده از حرارت تولید شده توسط CCHP، $H_{d,h}^{Boiler}$ حرارت تولید شده توسط بویلر، $L_{d,h,Thermal}$ دیماند حرارتی مورد نیاز مصرف کننده، E_{d,h_j}^{CHP} توان الکتریکی تولید شده توسط CCHP در گام J ، ΔE_U و مقدار حداکثر افزایش توان پیل سوختی در یک گام، ΔE_D مقدار حداکثر کاهش توان پیل سوختی در یک گام ، T_{j-1}^{on} تعداد گام‌های که پیل سوختی روشن است و T_{j-1}^{off} تعداد گام‌های که پیل سوختی خاموش است، MUT حداقل تعداد گام‌های که پیل سوختی باید روشن باشد، MDT حداقل تعداد گام‌های که پیل سوختی باید خاموش باشد، I یک متغیر باینری است که وضعیت خاموش – روشن بودن پیل سوختی را نشان می دهد برای I=1 یعنی پیل سوختی در وضعیت روشن است و برای I=0 یعنی پیل سوختی در وضعیت خاموش قرار دارد، N^{max} ماکزیمم تعداد دفعات روشن و خاموش شدن پیل سوختی و $n_{start-stop}$ تعداد دفعات روشن و خاموش شدن پیل سوختی است.

تابع هدف

در این مقاله، مسئله با هدف بیشینه کردن (NPV) حل می‌شود که با استفاده از رابطه (۲۵) محاسبه می‌شود و CF میزان سود سالیانه است و با استفاده از رابطه (۲۷) محاسبه می شود.

$$NPV = CF\left(\frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n}\right) + R_s\left(\frac{1}{(1+r)^n}\right) - I_{oCHP} \tag{26}$$

$$CF = (R_{se} + R_{\mathrm{Re}} + R_b + R_M) - (C_{O\&M} + C_{Fuel} + C_{grid}) \tag{27}$$

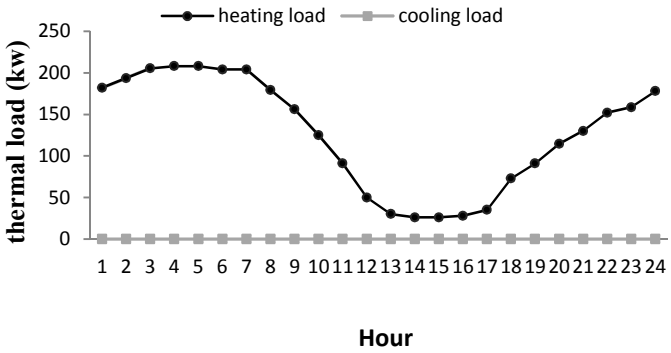
مطالعه موردی

تقاضای الکتریکی ، حرارتی و سرمای آپارتمان نمونه که با استفاده از نرم افزار Carrier HAP4.2 بدست آمده به صورت شکل های ۳، ۴ و ۵ می‌باشد. برای اجتناب از پیچیدگی مسئله، میانگین هر نمودار در سه تعرفه در نظر گرفته شده است. تعرفه‌ها به صورت زیر تعریف می‌شوند.

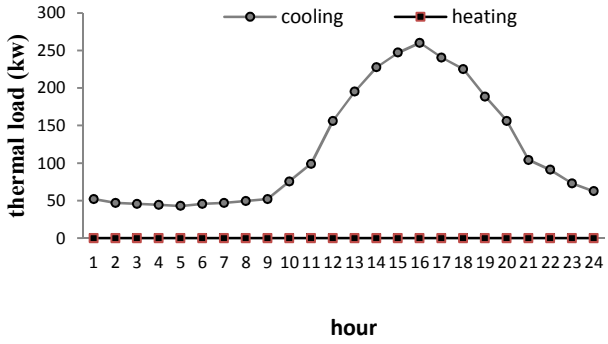
۱) بار پایه: از ساعت ۲۳ الی ۷
۲) بار میانه : از ساعت ۷ الی ۱۸
۳) بار پیک: از ساعت ۱۸ الی ۲۳

این سه نمودار (شکل‌های ۳، ۴ و ۵) و جدول ۱ اطلاعات مورد نیاز برای حل مسئله را نشان می‌دهد.

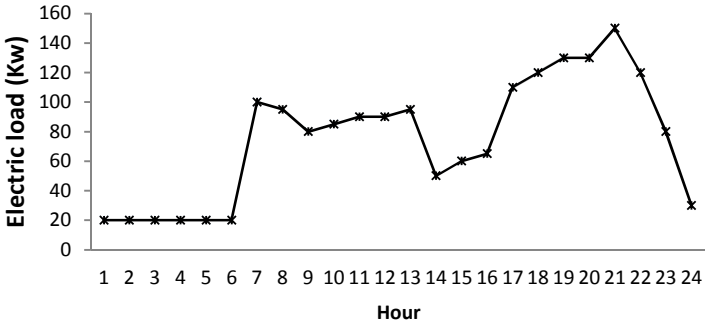
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]



شکل٣: دیماند حرارتی و سرمایی ساختمان نمونه – دی ماه



شکل٤: دیماند حرارتی و سرمای ساختمان نمونه – تیر ماه



شکل٥: متوسط الکتریسیته مصرفی سالانه در ٢٤ ساعت

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

محاسبه ظرفیت بهینه پیل سوختی

پس از حل مسئله با روش غیر خطی آمیخته با عدد صحیح بوسیله نرم افزار GAMS ظرفیت بهینه بدست آمده صفر است (پیل سوختی در وضعیت خاموش I=0) به عبارت دیگر با شرایط فعلی استفاده از سیستم‌های تولید همزمان بر پایه محرک اولیه پیل سوختی اقتصادی نیست. مهمترین عامل آن هزینه سرمایه گذاری بالای پیل است. با توجه مزایایی خوبی که این سیستم ها دارند. برای اینکه این سیستم ها از جذابیت اقتصادی بالای برخودار شوند دو راهکار زیر پیشنهاد می‌شود.

۱) برق خریدار شده توسط شرکت برق با قیمت بالاتری نسبت به حالت عادی خریداری شود.
۲) هر مدول تولید همزمان، مقدار مشخصی مواد آلاینده به هوا منتشر می‌کند که هزینه‌هایی به ما تحمیل می‌کنند که در واقع هزینهٔ کاهش کارایی انسان بر اثر این آلاینده‌ها می‌باشند با توجه به اینکه مقدار آلاینده‌های تولید شده توسط پیل سوختی نسبت به سیستم‌های تولید توان مرسوم بسیار کم‌تر است. می‌توان هزینه مقدار کاهش تولید آلاینده را به عنوان درآمد جهت تشویق سرمایه‌داران به آنها پرداخت نمود.

با توجه به دو مورد بالا و اینکه در آینده هزینه ساخت پیل سوختی کاهش می‌یابد در نتیجه برای ارزیابی پیل سوختی چهار سناریو به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

- سناریو اول: نصب سیستم تولید همزمان برق – حرارت و سرما بر پایه محرک اولیه پیل سوختی در وضعیت کنونی و بدون پرداخت درآمد ناشی از کاهش تولید گازهای آلاینده
- سناریو دوم : نصب سیستم تولید همزمان برق – حرارت و سرما بر پایه محرک اولیه پیل سوختی در وضعیت کنونی و با پرداخت درآمد ناشی از کاهش تولید گازهای آلاینده
- سناریو سوم: نصب سیستم تولید همزمان برق – حرارت و سرما بر پایه محرک اولیه پیل سوختی با داشتن ویژگی-های سیستم‌های آینده و بدون پرداخت درآمد ناشی از کاهش تولید گازهای آلاینده
- سناریو چهارم: نصب سیستم تولید همزمان برق – حرارت و سرما بر پایه محرک اولیه پیل سوختی با در نظر گرفتن سیستم های با شرایط سیستم‌های آینده و با پرداخت درآمد ناشی از کاهش تولید گازهای آلاینده.

درآمد ناشی از کاهش گازهای گلخانه‌ای توسط سیستم تولید همزمان بر پایه پیل سوختی از رابطه بدست می‌آید[۷].

$$R_{em} = (de_{co_2}.C_{co_2} + de_{NO_x}.C_{NO_x} + de_{co}.C_{co}).E_{FC}^{d,h}.T_i \qquad (28)$$

de اختلاف تولید گاز منتشر شده پیل سوختی با سیستم مرسوم تولید توان برحسب gr/kwh می باشد ، C قیمت گاز منتشر شده می‌باشد که واحد آن $/gr می‌باشد، $E_{FC}^{d,h}$ توان پیل سوختی و T_i ساعات کارکرد پیل سوختی می‌باشد .

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

جدول ۲: مقادیر ثابت‌های مورد نیاز برای حل مسئله[۲، ۱۰، ۱۵ و ١٦]

پارامتر	کنونی	آینده	پارامتر		کنونی	آینده
$Q_C^{\min}$	۰	۰		peak	۱۴۶۰	۱۹۹۶.۵
$Q_C^{\max}$	۳۰۰	۳۰۰	c_b	Middle	۳۶۰	۷۹۸.۶
$P_C^{\min}$	۰	۰		Base	۱۸۰	۱۸۱.۵
$P_C^{\max}$	۳۰۰	۳۰۰		peak	۴۷۰	۱۹۹۶.۵
HR	۱۰.۴۲	۱۰.۴۲	c_g	Middle	۱۴۳	۷۹۸.۶
C_f	۲۹.۱۷	۶۹۰		Base	۳۶	۱۸۱.۵
$C_{o\&m}$	۷۵	۴۰		peak	۱۴۶۰	۱۴۶۰
n	۱۰	۲۰	h	Middle	۴۳۸۰	۴۳۸۰
C_a	۲۰۰۰	۴۰۰		Base	۲۹۲۰	۲۹۲۰
η	۴۷	۶۰	U_{bf}	U_{bf}	۰.۱۲۱	۰.۱۰۷۳
COP_{AB}	۰.۸۷	۰.۸۷		E_{co_2}	۵۰۵	۵۰۵
C_{co_2}	۲۴۰	۲۴۰		E_{NO_x}	۰.۰۳	۰.۰۳
C_{NO_x}	۶۴۲۴۰	۶۴۲۴۰		E_{co}	۰.۰۳	۰.۰۳
C_{co}	۸۱۷۵۰	۸۱۷۵۰		MUT	۲	۲
ΔE_U	۱۰۰	۱۰۰		MDT	۲	۲
ΔE_D	۱۵۰	۱۵۰		N^{max}	۵	۵

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

جدول۳ : نتایج حاصل از بهینه سازی

پارامتر		سناریو اول	سناریو دوم	سناریو سوم	سناریو چهارم
بار الکتریکی تولید شده توسطCHP (کیلو وات)	پیک	۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰
	میانه	۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰
	پایه	۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰
بار حرارتی تولید شده توسطCHP (کیلو وات)	پیک	۰	۲۲۵	۲۲۵	۲۲۵
	میانه	۰	۲۲۵	۲۲۵	۲۲۵
	پایه	۰	۲۲۵	۲۲۵	۲۲۵
میزان خرید(+) و یا فروش(−) برق از شبکه	پیک	۱۳۸	−۱۶۲	−۱۶۲	−۱۶۲
	میانه	۹۰	−۲۱۰	−۲۱۰	−۲۱۰
	پایه	۳۰	−۲۷۰	−۲۷۰	−۲۷۰
ارزش فعلی یکنواخت(میلیون ریال)		۰	۱۲۴۰	۱۶۶۰	۲۵۵۰
دوره بازگشت سرمایه (سال)		−	۳/۶۹	۱/۰۶	۰/۶۸

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.

$$Q_{heat_load} + Q_{cool_load} = 208 \text{ (kw)}$$

۲۰۸ کیلو وات از جنس حرارت است. در نتیجه برای تامین آن باید از یک بویلر ۲۰۸ کیلو واتی استفاده شود.

برای تیرماه داریم:

$$Q_{heat_load} + Q_{cool_load} = 260 \ (kw)$$

که این ۲۶۰ کیلو وات از جنس سرما بوده و برای تامین آن از چیلر جذبی استفاده می‌شود . گرمای که مورد نیاز است تا این مقدار سرما را تامین کند به صورت (۳۶) محاسبه می شود[۱۲].

$$COP_{AB} = \left(\frac{Q_{cool_load}}{Q_{AB_heating-power}} \right) \qquad (29)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

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

$$Q_{AB_heating-power} = 298.8(kw)$$

در سناریو اول برای اینکه بویلر در طول سال جوابگو نیاز حرارتی و سرمایش مصرف کننده باشد دو تا بویلر ۱۵۰ کیلو وات در نظر گرفته می شود. ولی برای سه سناریو دیگر چون ۲۲۵ کیلووات آن توسط CCHP تامین می‌شود یک بویلر ۷۵ کیلو وات پاسخگو خواهد بود.

محاسبه ظرفیت چیلر جذبی

سیستم سرمایشی (چیلر جذبی و ملحقات آن) در بهینه سازی در نظر گرفته نشده است زیرا ظرفیت این سیستم صرفاً به تقاضای برودتی ساختمان بستگی دارد و مستقل از تغییر اندازهٔ موتورها است و نتیجتاً تاثیری روی آن ندارد. برای اینکه چیلر جذبی پاسخگویی دیماند سرمای در طول سال باشد ظرفیت آن باید ۳۰۰ کیلووات باشد.

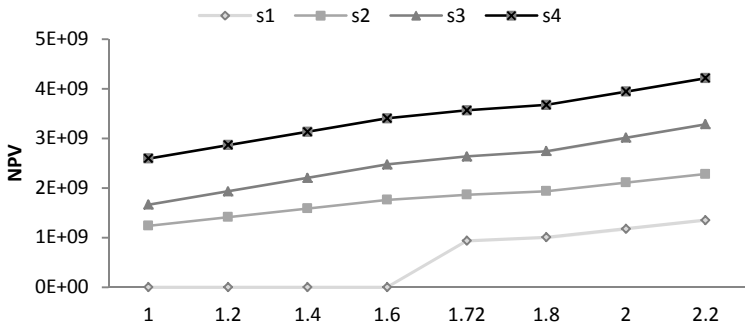
آنالیز حساسیت (sensitivity analysis)

در شرایط کنونی استفاده از پیل سوختی به عنوان محرک اولیه سیستم‌های تولید همزمان اقتصادی نمی‌باشد. ولی در آینده با تغییر پارامترهای مختلف از جمله هزینه سرمایه گذاری، قیمت سوخت، قیمت برق فروشی و ... ممکن است وضعیت اقتصادی طرح تغییر کند. و به همین دلیل تغییر پارامترهای فوق ذکر در چهار سناریو مورد بررسی قرار گرفته است[۶ و ۹].

بررسی عملکرد طرح در برابر افزایش قیمت برق خریداری از CCHP

در این قسمت ابتدا سناریوهایی با قیمت‌های مختلف برق خریداری شده از پیل سوختی تعریف می‌شود. در هر سناریو قیمت برق ۲۰ درصد نسبت به قیمت پایه (سناریوی صفر) افزایش پیدا می‌کند. با توجه به شکل۶ با افزایش قیمت برق خریداری شده از پیل سوختی وضعیت اقتصادی سیستم درکل جذابتر خواهد شد. درسناریو اول اگر قیمت برق خریداری شده از پیل سوختی ۷۲ درصد از قیمت برق خریداری کنونی توسط شبکه بیشتر باشد سیستم اقتصادی خواهد بود. و این بدان دلیل می باشد سیستم با ظرفیت ماکزیمم (۳۰۰ کیلووات) انتخاب شده و درآمد ناشی از فروش برق به شبکه بالا خواهد بود. (s_i بیانگر سناریو iام).

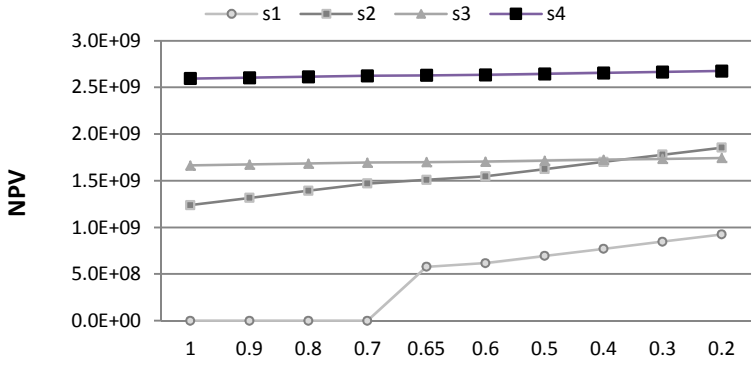
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]



شکل٦ : تغییرات NPV نسبت به تغییرات قیمت برق خریداری از CCHP

بررسی عملکرد طرح در برابر کاهش هزینه سرمایه گذاری پیل سوختی

در این حالت هر سناریو نسبت به سناریو قبل ۱۰ درصد هزینه سرمایه گذاری کاهش پیدا کرده است. همان طـور کـه در شـکل مشاهده می‌شود در کلیه سناریوها با کاهش هزینه سرمایه گذاری NPV بهتر می‌شود. در سناریو اول و دوم به علت بالا بودن هزینه سرمایه گذاری شیب تغییراتNPV شدیدتر می‌باشد. در سناریو اول اگر هزینه سرمایه‌گذاری پیل سوختی ۳۵ درصد کمتر باشد پـروژه اقتصادی خواهد بود (یعنی هزینه اولیه پیل سوختی برابر ۱۳۰۰ دلار برکیلووات باشد).

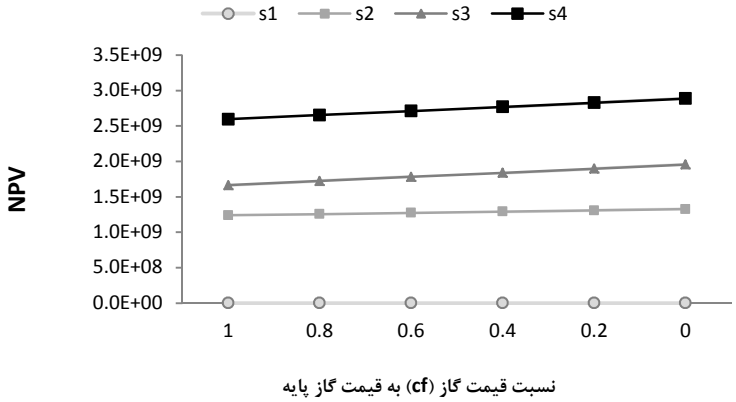


شکل۷ : تغییرات NPV نسبت به تغییرات هزینه سرمایه گذاری پیل سوختی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

بررسی عملکرد طرح در برابر کاهش قیمت گاز مصرفی

در هر سناریو قیمت گاز ۲۰ درصد کمتر از سناریو قبل می باشد . همان طور در شکل مشاهده می‌شود با کاهش قیمت گاز برای سناریو های ۲، ۳ و ۴ وضعیت طرح از لحاظ اقتصادی بهتر می‌شود ولی در سناریو اول با صفر شدن قیمت گاز باز طرح اقتصادی نیست. زیرا در وضعیت کنونی قیمت گاز خیلی پایین می باشد (۲۷/۱۲ ریال) و کاهش آن تاثیر ناچیزی روی NPV پروژه دارد.



شکل ۸: تغییرات NPV نسبت به تغییرات قیمت گاز

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

نتیجه گیری

در این مقاله روابط 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 پیل سوختی، بویلر کمکی و چیلر جذبی با هدف بیشینه کردنNPV تعریف و با استفاده از نرم افزار GAMS حل شد. نتایج نشان می‌دهد با شرایط موجود در ایران، استفاده از سیستم‌های تولید همزمان بر پایه محرک اولیه پیل سوختی برای تأمین برق- سرما و حرارت یک آپارتمان مسکونی اقتصادی نیست. و این ناشی از هزینه بالای سرمایه گذاری پیل سوختی می‌باشد. که با در نظر گرفتن درآمد ناشی از کاهش آلودگی‌های زیست محیطی و همچنین با کاهش هزینه سرمایه گذاری در آینده وضعیت سیستم‌های پیل سوختی جذاب‌تر می‌شود. بررسی تغییرات NPV در سناریوهای مختلف بر اساس تغییر قیمت خرید برق، قیمت سوخت و هزینه سرمایه گذاری نشان می‌دهد رژیم کاری واحد در این سناریوها دچار تغییر می‌شود که در نصب CCHP بر پایه محرکه اولیه پیل سوختی در آپارتمان باید این تغییرات را در نظر داشت.

منابع

[۱] سیستم‌های تولید پراکنده مصوب شرکت مادر تخصصی توانیر، ۵ و ۶ اردیبهشت، قوانین مسکونی " پنجمین همایش بهینه سازی مصرف سوخت در ساختمان تهران "

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

[۳] نیکولای خارتچنگو، مترجم دکتر اصغر برادران رحیمی ، بهار ۱۳۸۰ "سیستم های انرژی پیشرفته " ، انتشارات فرودسی مشهد

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

[5] Christos A. Frangopoulos (2004)"Effect of reliability considerations on the optimal synthesis, design and operation of a cogeneration system" Energy 29, page 309–329

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

[7] I.staffell ,R. Green, K. Kendall, (2008) " Cost targets for domestic fuel cell CHP" journal of power Sources 181 339 – 349

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

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

[10] M.Y El-Sharkh, A. Rahman , M.S. Alam, (2005) "Evolutionary programming-based methodology for economical output power from PEM fuel cell for micro-grid application" Journal of Power Sources 139 , 165-169

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

[11] 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

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

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

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

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

[16] www.energy.ca.gov

[17] www.tavanir.org.ir

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]