

**بهینه‌سازی سیستم‌های تولید هم‌زمان برق، حرارت و برودت (CCHP) با استفاده از روشی ترکیبی و نوین\***محمد مصطفی غفوریان<sup>(۱)</sup>حمید نیازمند<sup>(۲)</sup>

**چکیده** باتوجه به اهمیت انرژی و محدود بودن منابع موجود، برنامه‌ریزی مناسب برای گسترش استفاده از سیستم‌های پربازده امری اجتناب‌ناپذیر است. سیستم‌های CCHP از جمله سیستم‌هایی است که به منظور بالا بردن راندمان تولید انرژی و کاهش هزینه‌های مربوط به کار می‌رود. از زمان ظهور این سیستم‌ها تا به امروز، روش‌های مختلفی به منظور تعیین ظرفیت تجهیزات و بهینه‌سازی آنها ارائه شده‌است. در پژوهش حاضر، پس از معرفی اجمالی روش‌های تعیین ظرفیت، شامل روش ماکزیمم بار (MLM)، روش ماکزیمم مستطیل (گرمایی)  $MRM_h$  و الکتریکی  $MRM_e$  و روش یکنواخت سود سالیانه نسبی (REUAB) به ارائه یک روش جدید به منظور بهینه‌سازی سیستم CCHP برای یک مجتمع مسکونی با محرک اولیه موتور گازسوز پرداخته می‌شود. در این روش سه معیار انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی به همراه ملاحظات مربوط به روش‌های گذشته بسط داده می‌شود و در انتها با اعمال شرایط واقعی برای محرک اولیه نتایج بهینه‌سازی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

**واژه‌های کلیدی** روش یکنواخت سود سالیانه نسبی، روش ماکزیمم مستطیل، سیستم‌های CCHP.

### Optimization of Combined Cooling Heating and Power System (CCHP) by a Novel Hybrid Method

M.M. Ghafurian

H. Niazmand

**Abstract** The importance of energy and shortage of its sources have necessitated appropriate planning for developing systems with high efficiency. Combined cooling, heating and power generation systems CCHP, are systems that used for increasing the efficiency of generated energy, while decreasing costs. Since the invention off CCHP systems, different methods have been provided for determination capacity of equipment and their optimization. In this research, at first these systems summary are presented and then three main methods namely maximum load method (MLM), maximum rectangle method (heating  $MRM_h$  and electric  $MRM_e$ ) and relative equivalent uniform annual benefit method (REUAB), for determination of capacity of prime mover have been introduced. Then for a residential convened that its prime mover is gas engine, with consideration three mentioned methods and a new proposed method, for optimization the CCHP will be explained. Finally, the results of the optimization with applying real conditions for prime mover are investigated.

**Key Words** Relative equivalent uniform annual benefit; Maximum rectangle method; CCHP systems.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۹/۸ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۸/۱۵ می‌باشد. DOI: 10.22067/fum-mech.v30i1.60627

(۱) دانشجوی دکتری مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسنده مسئول: استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد. niazmand@um.ac.ir

## مقدمه

پس از افزایش عمده بهای سوخت در سه دهه اخیر، اهمیت بحث سوخت جایگزین، افزایش کارایی انرژی و کاهش آلودگی زیست محیطی، تمایل به استفاده از فناوری‌های جدید، از جمله سیستم تولید هم‌زمان برق، گرما و سرما را افزایش داده است [1].

این سیستم‌ها وظیفه تولید متوالی سه صورت مفید انرژی؛ یعنی حرارت، سرما و الکتریسیته را از یک منبع تولید انرژی به‌عنوان محرک اولیه (Prime mover) برعهده دارند که در اغلب کاربردهای مختلف، با مصرف یک نوع سوخت، انرژی شیمیایی آن را به انرژی مکانیکی و گرمایی تبدیل می‌کنند. معمولاً انرژی مکانیکی برای تولید الکتریسیته و انرژی گرمایی برای تولید بخار، آب گرم و یا هوای گرم مورد استفاده قرار می‌گیرد و با استفاده از سیستم‌های تبرید و مصرف انرژی گرمایی یا الکتریسیته، سرمایش مورد نیاز فراهم می‌شود. از مزایای این سیستم‌ها می‌توان به تولید غیرمتمرکز و مستقل برق، گرما و سرمایش، جلوگیری از تلفات توزیع و انتقال در شبکه سراسری، کاهش مصرف سوخت و افزایش رقابت در تولید برق و نیز کاهش آلاینده‌های زیست محیطی اشاره نمود [1-3].

پژوهش در حوزه طراحی بهینه سیستم‌های CCHP به سال‌ها دور برمی‌گردد. این پژوهش‌ها عمدتاً به طراحی و برآورد کلی استفاده از یک یا چند تکنولوژی خاص و نیز به ارتقای روش بهینه‌سازی این سیستم‌ها پرداخته‌اند [4-7]. در ادامه به برخی از این پژوهش‌ها اشاره می‌شود.

صنایع و همکاران [8]، گیسون و همکاران [9] و غفوریان و همکاران [6,10] در فرایند بهینه‌سازی سیستم‌های CHP و CCHP، نحوه پوشش‌دهی منحنی‌های بار و عملکرد در بار نامی تجهیزات را به‌عنوان تحلیل انرژی بحث نمودند. آنها علاوه بر تحلیل

انرژی به دوره بازگشت سرمایه و نیز سود حاصل از این سیستم‌ها به‌عنوان معیار اقتصادی پرداختند. خلاهای موجود در پژوهش‌های آنها عدم در نظر گرفتن هزینه‌های اسقاطی، ثابت فرض نمودن بازده یا ضریب عملکرد تجهیزات، نادیده گرفتن شرایط محیطی بر عملکرد سیستم و انتشار آلاینده‌ها و در نهایت فرض ثابت بودن قیمت حامل‌های انرژی بود.

گروهی دیگر از محققان نظیر گو و همکاران [11] با استفاده از روشی جدید تحت عنوان روش ماکزیمم مستطیل (Maximum rectangle method (MRM)) به طراحی سیستم CCHP برای کاربردهای مسکونی پرداختند. آنها در دو حالت عملکرد گرمایی و الکتریکی، با استفاده از منحنی‌های تجمعی بارهای سالانه به تعیین ظرفیت محرک‌های اولیه پرداختند. شایان توجه است که در این روش هیچ‌گونه معیار اقتصادی و زیست محیطی در تعیین ظرفیت تجهیزات لحاظ نشده بود.

با گذر زمان، برخی دیگر از پژوهشگران در فرایند بهینه‌سازی این سیستم‌ها علاوه بر معیارهای اقتصادی و انرژی، معیار زیست محیطی را در نظر گرفتند و توابع هدف خود را اصلاح نمودند. گروهی نظیر گیسون و همکاران [12]، معرفت و همکاران [13]، وانگ و همکاران [14] و فومو و همکاران [15] از جمله محققانی بودند که آلاینده  $CO_2$  را به‌عنوان معیار زیست محیطی در فرایند بهینه‌سازی در نظر گرفتند و انتشار آلاینده  $CO_2$  را به‌عنوان یک جریمه در توابع هدف از سود حاصل کم نمودند.

پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که محققان معیار زیست محیطی را با در نظر گرفتن سه آلاینده  $NO_x$ ،  $CO$  و  $CO_2$  در توابع هدف پیاده‌سازی می‌کنند تا به نتایج بهینه‌سازی اعتمادپذیرتری دست یابند. محققانی نظیر صنایع و غفوریان [16]، توکلی دستجرد و همکاران [17] در تحقیقات اخیر خود علاوه بر دو

حالت عملکرد الکتریکی و گرمایی انجام می‌گردد و سپس فرایند بهینه‌سازی با روش سود یکنواخت سالیانه نسبی مبنی بر تکنیک یکنواخت سالیانه انجام خواهد شد. در واقع نوآوری این پژوهش، شامل موارد زیر می‌شود:

- پیاده‌سازی روش‌های پیشین MRM و REUAC و ارائه یک روشی ترکیبی جدید با استفاده هم‌زمان از این دو روش.
- بررسی دو حالت الکتریکی و گرمایی برای روش ماکزیمم مستطیل در ترکیب با روش REUAC.
- مقایسه دو فرایند بهینه‌سازی در انتخاب محرک اولیه با قرار دادن تعداد محرک اولیه به‌عنوان پارامتر طراحی (با ظرفیت‌های متفاوت) در هر کدام از روش‌ها (در مجموع چهار حالت).
- بررسی درصد تغییرات نتایج بهینه‌سازی، با تغییر در شرایط محیطی بر عملکرد محرک اولیه سیستم CCHP.
- بررسی درصد تغییرات پارامترهای طراحی با افزایش ۱۰ درصدی قیمت حامل‌های انرژی و مقایسه آن با دیگر روش‌ها.

### روش‌های تعیین ظرفیت سیستم‌های CCHP

با پیشرفت تکنولوژی و پیدایش سیستم‌های تولید پراکنده به‌منظور تأمین بارهای مورد نیاز محل مصرف، روش‌های گوناگونی برای تعیین ظرفیت تجهیزات به‌ویژه محرک اولیه ارائه شده‌است که در ادامه به سه روش رایج پرداخته می‌شود.

**روش ماکزیمم بار (Maximum load method)** (MLM). در روش ماکزیمم بار، الکتریسیته مورد نیاز با خریداری از شبکه الکتریسیته، گرمایش توسط بویلر با خرید سوخت از شبکه گاز و سرمایش توسط سیستم‌های سرمایشی در مکان مورد نظر فراهم

معیار اقتصادی و انرژی، انتشار آلاینده‌های  $CO_2$ ،  $NO_x$  و  $CO$  را در معیار زیست‌محیطی تابع هدف تکمیل نمودند؛ هرچند برخی از مشکلات نظیر فرض بازده ثابت تجهیزات، فرض ثابت بودن قیمت حامل‌ها و نیز نادیده گرفتن شرایط محیطی بر عملکرد تجهیزات، در پژوهش‌های آنها مشاهده می‌شد.

با مطالعه عمیق‌تر پیشینه روش‌های طراحی سیستم‌های CCHP، می‌توان دریافت از جمله محدودیت‌های اساسی روش‌های ارائه شده ([8-10, 12-17]) عدم کارایی آنها در متغیر بودن قیمت حامل‌های انرژی و عدم کنترل معقول در فرایند بهینه‌سازی است. به طوری که در همه پژوهش‌ها، قیمت حامل‌های انرژی ثابت فرض شده‌است. این در حالی است که قیمت حامل‌های انرژی در فصول مختلف برحسب نوع کاربری و میزان و زمان مصرف متفاوت می‌باشد. دلیل اصلی این فرض را می‌توان پایین بودن (نامتعادل بودن) قیمت حامل‌ها در برخی کشورها دانست که باعث می‌شود الگوریتم‌های بهینه‌سازی ظرفیت‌های نامعقولی (بالتر از حد مورد نیاز) را برای تجهیزات به‌خصوص محرک اولیه انتخاب کنند. محققان برای رفع این مشکل، از میانگین قیمت در زمان پرباری و کم‌باری استفاده می‌کنند و نیز با محدود کردن حد بالا و پایین برای پارامتر طراحی ظرفیت نامی محرک اولیه، فرایند بهینه‌سازی را کنترل می‌کنند.

در این پژوهش با در نظر گرفتن کلیه نواقص موجود در پژوهش‌های اخیر و با اعمال کامل سه معیار انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی به ارائه یک روش ترکیبی جدید به‌منظور بهینه‌سازی سیستم‌های تولید هم‌زمان برق، حرارت و برودت پرداخته می‌شود. در این پژوهش فرض متغیر بودن بودن قیمت حامل‌های انرژی، تغییر عملکردی تجهیزات با ظرفیت نامی و شرایط محیطی اعمال می‌شود. در روش جدید کنترل فرایند بهینه‌سازی توسط روش ماکزیمم مستطیل در دو

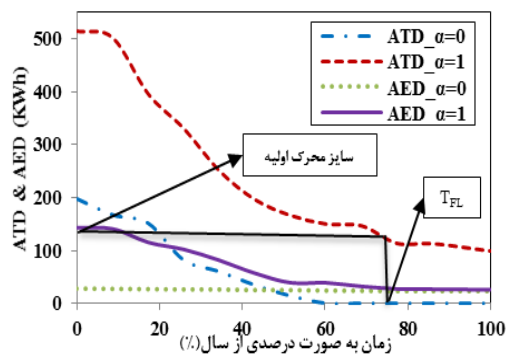
(AED) حاصل از این دو رابطه در شکل (۱) برای چهار حالت عملکرد گرمایی و الکتریکی و با فرض اعمال بار سرمایشی (صفر و یک بودن ضریب  $\alpha$ ) ارائه شده است.

به منظور محاسبه ماکزیمم مستطیل ( $A_{MRM,max,i}$ ) انتخابی در این روش از رابطه (۳) استفاده می شود و در نهایت به کمک رابطه (۴) ظرفیت نامی محرک اولیه مشخص می گردد. در روش ماکزیمم مستطیل الکتریکی،  $E_{MRM,e}$  همان ظرفیت نامی محرک اولیه ( $E_{nom}$ ) می باشد؛ در حالی که در روش ماکزیمم مستطیل گرمایی  $H_{MRM,h}$  معادل ظرفیت نامی محرک اولیه است که این میزان گرمای  $H_{MRM,h}$  را تولید کند. شکل (۲) این روند را برای چهار حالت در دو شرایط عملکرد گرمایی ( $MRM_h$ ) و الکتریکی ( $MRM_e$ ) نشان می دهد [18, 19].

$$A_{MRM_i(kwh)} = ATD(or AED)(kW) \times T_{FL}(\%) \quad (3)$$

$$\begin{cases} E_{MRM,e} = \frac{A_{MRM,max,e}}{T_{FL}(\%)} & , E_{nom} = E_{MRM,e} \\ H_{MRM,h} = \frac{A_{MRM,max,h}}{T_{FL}(\%)} & , E_{nom} = f(H_{MRM,h}) \end{cases} \quad (4)$$

که در این روابط  $T_{FL}(\%)$  زمان عملکرد در بار کامل می باشد.



شکل ۱ منحنی تجمعی برای دو نوع گرمایشی و الکتریکی در دو حالت  $\alpha=0$  و  $\alpha=1$

می شود؛ به طوری که برای تعیین ظرفیت تجهیزات گرمایشی و سرمایشی از نقطه پیک منحنی های بار گرمایشی و سرمایشی استفاده می شود. متأسفانه در ایران، نوعاً انتخاب تجهیزات براساس این روش می باشد که نواقص نظیر اتلافات بالا، هزینه اولیه بالا و غیره را شامل می شود [18].

**روش ماکزیمم مستطیل ( $MRM$ )**. از دیگر روش های تعیین ظرفیت محرک اولیه روش ماکزیمم مستطیل می باشد که به دو دسته الکتریکی ( $MRM_e$ ) و گرمایی ( $MRM_h$ ) تقسیم می شود. در روش ماکزیمم مستطیل گرمایی بارهای گرمایی مورد نیاز محل مصرف ( $H_{dem}$ ) و در روش ماکزیمم مستطیل الکتریکی بارهای الکتریسیته مورد نیاز محل مصرف ( $E_{dem}$ ) برحسب مقیاس زمانی موجود، مطابق با روابط (۱ و ۲)، به صورت نزولی رسم می شوند. سپس با انتخاب بزرگترین مستطیل در زیر هر منحنی، ظرفیت نامی و زمان عملکرد محرک اولیه به دست می آید. به طوری که ارتفاع مستطیل نشان دهنده ظرفیت نامی محرک اولیه و عرض آن عملکرد زمانی محرک اولیه در بار کامل می باشد.

$$ATD(t) = H_{dem}(t) + \alpha \times \frac{C_{dem}(t)}{COP_A} \quad (1)$$

$$AED(t) = E_{dem}(t) + \alpha \times \frac{C_{dem}(t)}{COP_E} \quad (2)$$

در واقع استفاده از روابط (۱ و ۲) و نیز ضریب  $\alpha$ ، به منظور تخمین کلی از بارهای مصرفی در مقیاس زمانی می باشد؛ به طوری که با برابر یک قرار دادن ضریب  $\alpha$ ، میزان بار سرمایشی مورد نیاز ( $C_{dem}$ ) به منحنی های تجمعی الکتریسیته و گرما اضافه می گردد و طراحی بر مبنای حداکثر نیازهای گرمایی یا الکتریکی به همراه بار سرمایشی خواهد بود و در صورت صفر بودن آن، طراحی بر مبنای حداقل نیازها خواهد بود. منحنی های تجمعی گرمایی ( $ATD$ ) و الکتریکی

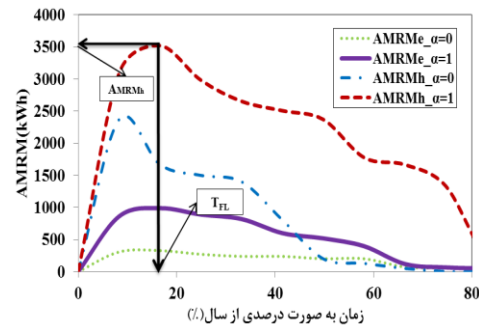
یکنواخت نسبی اختلاف بین هزینه‌ها و درآمدهای کل سیستم سنتی  $EUAB_{trad}$  و هزینه‌ها و درآمدهای کل سیستم تولید هم‌زمان  $EUAB_{CCHP}$  در طول یک سال می‌باشد که به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$REUAB \left( \frac{\$}{year} \right) = EUAB_{trad} - EUAB_{CCHP} \quad (5)$$

که  $EUAB_{trad}$  اختلاف هزینه‌ها و درآمدهای سیستم سنتی (متداول) را نشان می‌دهد که برای پوشش‌دهی بارهای گرمایش، سرمایش و الکتریسیته محل مصرف، با رابطه (۶) تخمین زده می‌شود. نکته قابل اهمیت در این روش، انتخاب ظرفیت نامی سیستم سرمایش است که برای این منظور، دو حالت هزینه‌ای بررسی می‌شوند؛ حالت اول تأمین سرمایش فقط با چیلر تراکمی و حالت دوم تأمین سرمایش فقط با چیلر جذبی است و هر کدام از این دو حالت که مقدار هزینه کمتری داشته باشد، به‌عنوان سیستم انتخابی در نظر گرفته می‌شود.

$$EUAB_{trad} = \sum_{j=1}^T [E_{buy} \times \rho_{e,buy} + m_f \times \rho_f + \sum_{k=1}^3 (m_{trad}^k \times \epsilon_k)] \times \tau + \sum_{r=1}^n [M + R - A]_r \times N_{C_r} \times n_r \quad (6)$$

در این رابطه، هزینه‌ها شامل هزینه‌های تعمیرات و نگهداری، هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و اسقاطی، هزینه‌های مصرف سوخت  $(\rho_f)$  و خرید الکتریسیته  $(\rho_{e,b})$  و جریمه انتشار آلاینده‌ها می‌باشد.  $\tau$  شمارنده نوع تجهیزات و  $n$  تعداد آنها و  $\epsilon_k$  فاکتور جریمه انتشار آلاینده می‌باشد که مقدار آن در جدول (۱) برحسب نوع آلاینده ارائه شده است.  $R$  هزینه اولیه سالیانه است که توسط رابطه (۷) به‌دست می‌آید [21].



شکل ۲. منحنی مساحت‌های به‌دست‌آمده از منحنی تجمعی

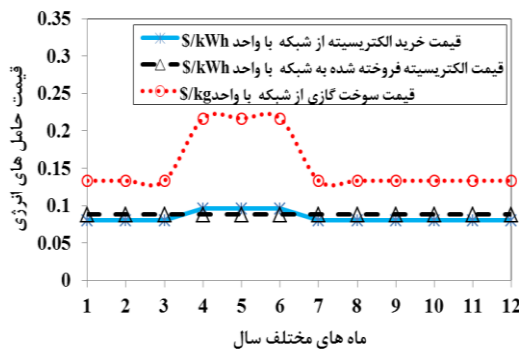
شایان توجه است که با فرض  $\alpha=0$  و  $\alpha=1$  به ترتیب حد پایین و بالا برای تعیین ظرفیت نامی مطلوب محرک اولیه، و نیز پوشش‌دهی بارهای سالانه مشخص می‌گردد.

### روش سود سالیانه یکنواخت نسبی ( $REUAB$ )

(Relative equivalent uniform annual benefit) روش سود سالیانه یکنواخت نسبی، که اخیراً توسط صنایع و غفوریان [17] معرفی شده است، یکی از کامل‌ترین روش‌ها در طراحی سیستم‌های CCHP است. این روش ترکیبی از سه معیار انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی و نیز روش ماکزیمم بار (MLM) می‌باشد که با معرفی شاخصی مبنی بر سود سالانه سیستم تولید هم‌زمان برق، گرما و سرما نسبت به سیستم‌های سنتی (که توسط روش MLM تعیین ظرفیت می‌شود)، ظرفیت بهینه سیستم را تعیین می‌کند. این روش بر مبنای تکنیک یکنواخت سالیانه (Equivalent uniform annual (EUA)) می‌باشد که یکی از فنون با ارزش تحلیل‌های اقتصادی است. در این روش درآمدها و هزینه‌های سیستم به دریافت و پرداخت سالیانه تبدیل می‌شوند. از مزایای این فن نسبت به دیگر فنون اقتصادی، نتیجه یکسان محاسبات پروژه‌ها، با عمر متفاوت است. جزئیات مربوط به این فن در مرجع [21] موجود می‌باشد.

تابع هدف استفاده‌شده در روش سود سالیانه

به ترتیب بهای فروش و خرید الکتریسیته و  $\rho_{e,b}$  و  $\rho_{e,s}$  الکتریسیته و  $\rho_f$  بهای سوخت گازی است که در شکل (۳) به صورت ماهانه ارائه شده است.



شکل ۳ قیمت حامل های انرژی در ماه های مختلف [22, 24]

درواقع روش سود سالیانه یکنواخت نسبی باتوجه به اطلاعات طرح، تحت نام هزینه ها و درآمدهای یکنواخت سالیانه و با در نظر گرفتن سه معیار انرژی، اقتصادی و زیست محیطی (که شامل: مشخصات عملکرد تجهیزات، پوشش دهی کامل منحنی های بار، آلاینده های تولیدی، شرایط محیطی، خرید و تعمیر و نگهداری تجهیزات، قیمت حامل های انرژی، هزینه های خرید الکتریسیته و مصرف سوخت و نیز درآمد حاصل از فروش الکتریسیته و هزینه های اسقاطی است) به بهینه سازی سیستم CCHP با هدف ماکزیمم کردن تابع هدف REUAB می پردازد. از نواقص این روش عدم کنترل فرایند بهینه سازی در تعیین ظرفیت نامی محرک اولیه می باشد به طوری که اگر قیمت حامل های انرژی افزایش یابد، این روش پیش بینی مناسبی از ظرفیت تجهیزات به ویژه محرک اولیه نخواهد داشت [16]. توضیحات بیشتر در بخش های بعدی ارائه خواهد شد.

روش ترکیبی جدید (MRM & REUAB). باتوجه به مباحث مطرح شده در زمینه کنترل فرایند بهینه سازی به خصوص ظرفیت نامی محرک اولیه، روشی جدید به منظور بهینه سازی سیستم های تولید هم زمان برق، حرارت و برودت بیشتر در بخش های بعدی ارائه می شود. در این روش کنترل

$$R = CRF \times Co \quad (7)$$

CRF (Capital-Recovery Factor) فاکتور بازیافت سرمایه می باشد که توسط رابطه (۸) محاسبه می شود [21].

$$CRF = \frac{i(1+i)^k}{(1+i)^k - 1} \quad (8)$$

جدول ۱ فاکتور جریمه انتشار آلاینده ها [17]

مقدار	علامت	پارامتر
۶/۸۵۳	$\epsilon_{NOx}$	فاکتور انتشار آلاینده NOx (\$/kg)
۰/۰۲۰۸۶	$\epsilon_{CO}$	فاکتور انتشار آلاینده CO (\$/kg)
۰/۰۲۴	$\epsilon_{CO_2}$	فاکتور انتشار آلاینده CO <sub>2</sub> (\$/kg)

درحقیقت فاکتور بازیافت سرمایه، سرمایه اولیه تجهیزات (Co) را باتوجه به نرخ بهره (i)، در مدت (k) دوره به پرداخت های مساوی یکنواخت توزیع می کند. A نیز، هزینه سالانه اسقاطی است که توسط رابطه (۹) ارزیابی می شود [21]:

$$A = SV \times \left[ \frac{i}{(1+i)^k - 1} \right] \quad (9)$$

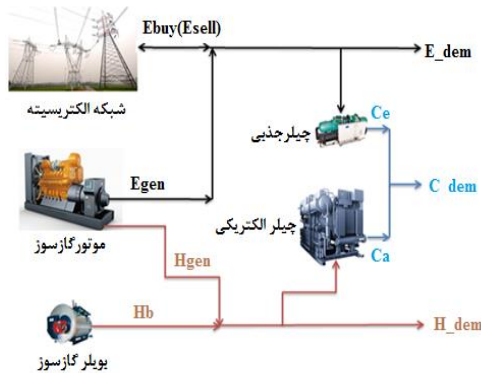
درحقیقت درآمد یکنواخت سالیانه (Equivalent uniform income) در سیستم سنتی، تنها ناشی از هزینه اسقاطی تجهیزات است. از طرف دیگر، هزینه یکنواخت سالیانه سیستم تولید هم زمان برق، حرارت و برودت (EUAB<sub>CCHP</sub>) توسط رابطه (۱۰) تعریف می شود که مشابه رابطه سیستم های تولید متداول است، اما تفاوت آن در فروش الکتریسیته و تجهیزات سیستم است که در درآمد یکنواخت سالیانه سیستم CCHP محسوب خواهد شد.

$$EUAB_{CCHP} = \sum_{j=1}^T [E_{buy} \times \rho_{e,buy} - E_{sell} \times \rho_{e,sell} + m_f \times \rho_f + \sum_{k=1}^3 (m_{CCHP}^k \times \epsilon_k)] \times \tau \sum_{r=1}^P M + R - A_r \times Nc_r \times n_r \quad (10)$$

تناسبی بین هزینه حامل‌های انرژی و هزینه اولیه تجهیزات برقرار نباشد، به‌وجود می‌آید. از طرفی دیگر با اعمال این روش افزایش نامتعارف ظرفیت نامی موتور گازسوز با افزایش هزینه حامل‌های انرژی قابل کنترل می‌باشد.

### مدل‌سازی سیستم CCHP

عملکرد سیستم CCHP براساس چیدمان تجهیزات و تداخل آن با شبکه تعیین می‌شود. هرچند که پارامترهای مشخصه عملکردی محرک اولیه نظیر بازده حرارتی، قدرت نامی و مقدار حرارت قابل بازیافت نقش مؤثری خواهند داشت [12]. شکل (۴) شماتیکی از سیستم سه‌گانه در تداخل با شبکه را نشان می‌دهد. استراتژی عملکرد این سیستم بدین صورت است که الکتریسیته مورد نیاز ساختمان توسط موتور گازسوز ( $E_{gen}$ ) تأمین می‌شود و اگر الکتریسیته اضافی مورد نیاز باشد، با خریداری از شبکه ( $E_{buy}$ ) تأمین خواهد شد. در غیر این صورت الکتریسیته اضافی در صورت عدم نیاز مجموعه ( $E_{sell}$ ) به شبکه سراسری فروخته می‌شود. این استراتژی توسط رابطه (۱۲) بیان شده است.



شکل ۴ شماتیک سیستم CCHP تداخل با شبکه

$$\begin{cases} E_{sell} = E_{demt} - E_{gen} & , E_{buy} = 0 \\ & \text{if } E_{gen} > E_{demt} \\ E_{buy} = E_{gen} - E_{demt} & , E_{sell} = 0 \\ & \text{if } E_{gen} < E_{demt} \end{cases} \quad (12)$$

فرایند بهینه‌سازی توسط روش ماکزیمم مستطیل انجام می‌گردد. به‌طوری‌که حد بالا و پایین پارامترهای طراحی مربوط به ظرفیت نامی موتور گازسوز، توسط ظرفیت‌های انتخابی روش ماکزیمم مستطیل گرمایی و الکتریکی انتخاب می‌شوند و سپس فرایند بهینه‌سازی با تابع هدف چندمعیاره REUAB اعمال می‌شود. این روند در رابطه (۱۱) ارائه شده است.

$$\begin{cases} Max\{REUAB\} = (n_j \times E_{nom})^{opt} \\ Min\{E_{MRM_i}\} < n_j \times E_{nom} < Max\{E_{MRM_i}\} \end{cases} \quad (11)$$

اندیس  $i$  در  $MRM_i$  نشان‌دهنده، انتخاب محرک اولیه براساس پوشش‌دهی بارهای الکتریکی ( $MRM_e$ ) و گرمایی ( $MRM_h$ ) است.

با اعمال این روش، اعتمادپذیری به نتایج الگوریتم بهینه‌سازی افزایش می‌یابد؛ زیرا ظرفیت انتخابی در محدوده نیازهای ساختمان (از نقطه‌نظر زمان عملکرد و پیک مصرفی) انتخاب می‌شود. از طرفی اگر قیمت الکتریسیته و حامل‌های انرژی تناسب مورد نیاز را نداشته باشند، فرایند بهینه‌سازی، ظرفیت‌های نامعقولی را پیشنهاد نخواهد داد. به‌عبارتی دیگر، اگر فرض شود قیمت حامل‌های انرژی پایین باشد، فرایند بهینه‌سازی ظرفیت‌های بسیار پایین را انتخاب خواهد نمود که در مقیاس مطالعه موردی، کاربرد ندارد و هزینه طراحی سیستم بالاتر از هزینه نصب و راه‌اندازی آن خواهد شد. این بدین معنی است که فرایند ترجیح می‌دهد که کلیه الکتریسیته مورد نیاز ساختمان را با خریداری از شبکه تأمین کند، زیرا از نقطه‌نظر اقتصادی توجیه‌پذیرتر است. از طرفی اگر قیمت حامل‌های انرژی تناسب نداشته باشند، به‌طوری‌که قیمت سوخت خیلی پایین‌تر از هزینه خرید الکتریسیته باشد، فرایند بهینه‌سازی، ظرفیتی بسیار بزرگ انتخاب خواهد نمود. این مشکل نیز زمانی که



جدول ۲ روابط مربوط به مشخصات فنی موتور گازی [7, 19].

متغیر y	متغیر x	رابطه	توصیف
(kW)			
E <sub>gen</sub>	H <sub>gen</sub>	$y = 0.578x - 8.422$	$y \leq 100$
		$y = 6 \times 10^{-5} x^2 + 0.7401x$	$100 < y \leq 3500$
F	E <sub>gen</sub>	$y = 2.65x - 21.44$	$x \leq 100$
		$y = -7 \times 10^{-5} x^2 + 2.727x$	$100 < x \leq 3500$

همچنین مشخصه‌های عملکردی بویلر و چیلرهای جذبی و تراکمی توسط روابط زیر ارزیابی می‌شوند:

$$\eta_{nom,b} = 0.03234 \times \text{Log}(H_{b,nom}) + 0.6387 \quad (15)$$

$$\text{COP}_{nom,a} = 10^{-8} \times C_{om,a}^2 + 7 \times 10^{-5} \times C_{nom,a} + 0.6493 \quad (16)$$

$$\text{COP}_{nom,e} = 1.5243 \times C_{nom,e}^{0.1012} \quad (17)$$

که  $H_{b,nom}$ ،  $C_{nome}$  و  $C_{noma}$  به ترتیب ظرفیت نامی بویلر پشתיبان، چیلر الکتریکی و چیلر جذبی است.

در تحلیل اقتصادی این پژوهش از تکنیک یکنواخت سالیانه استفاده شده است که کلیه معیارهای اقتصادی نظیر ارزش زمانی پول، هزینه‌ها و درآمدها و نیز عمر سیستم را در نظر می‌گیرد. برای این منظور هزینه سرمایه‌گذاری اولیه تجهیزات سیستم تولید هم‌زمان، هزینه‌های عملکردی، اسقاطی و تعمیرات نگهداری در جدول (۳) ارائه شده است.

آنالیز زیست‌محیطی انجام گرفته براساس مقدار  $Co$ ،  $Co_2$  و  $No_x$  تولیدشده ناشی از احتراق سوخت گازی در محفظه‌های احتراق می‌باشد که اثر این آلودگی به صورت یک جریمه به هزینه کل سیستم اضافه خواهد شد.

$E_{demt}$  توسط رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود که مجموع الکتریسیته بخش روشنایی ( $E_{dem}$ ) و نیز بخش سرمایش است.

$$E_{demt} = E_{dem} + c_{dem}/COP_e \quad (13)$$

حرارت به دست آمده از سیستم خنک‌کاری و گاز خروجی موتور گازسوز ( $H_{gen}$ )، می‌تواند برای تأمین نیازهای گرمایشی استفاده شود و در صورت کمبود گرمایش، از طریق بویلر پشתיبان ( $H_b$ ) تأمین خواهد شد.

سرمایش مورد نیاز ( $C_{dem}$ ) هم در صورت اضافه بودن گرمای تولیدی محرک از طریق چیلر جذبی ( $C_a$ ) و در صورت کمبود، از طریق الکتریسیته اضافی یا خریداری از شبکه، توسط چیلر الکتریکی ( $C_e$ ) تأمین خواهد شد که روابط مربوط به این استراتژی در زیر آورده شده است.

$$\begin{cases} \text{if } H_{gen} < H_{dem} \rightarrow \begin{cases} C_e = C_{dem} \\ H_b = H_{dem} - H_{gen} \\ C_a = 0 \end{cases} \\ H_{gen} > H_{dem} \rightarrow \begin{cases} C_e = C_{dem} - C_a \\ H_b = 0 \\ C_a = (H_{gen} - H_{dem}) \times COP_{ab} \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

**تحلیل انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی.** انتخاب

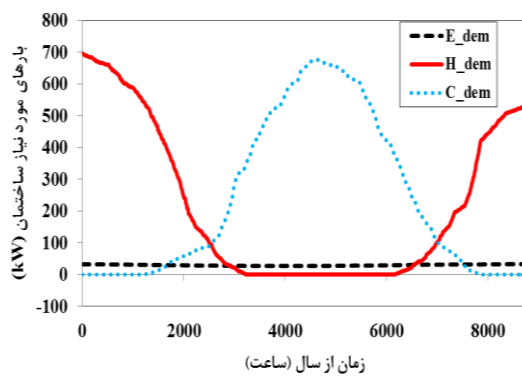
بهینه سیستم CCHP علاوه بر تحلیل‌های انرژی مستلزم آنالیزهای اقتصادی و زیست‌محیطی می‌باشد. همان‌طور که گفته شد پارامترهای مشخصه عملکردی تجهیزات به خصوص محرک اولیه نظیر بازده حرارتی، قدرت نامی و مقدار حرارت قابل بازیافت نقش مؤثری در طراحی سیستم‌های CCHP دارد. از این رو روابط مربوط به عملکرد موتور گازسوز، به منظور اعمال استراتژی بیان شده در جدول (۲) آورده شده است. این روابط با استفاده از داده‌های واقعی مربوط به تجهیزات تجاری به دست آمده است.



این پژوهش، یک مجتمع مسکونی در تهران می‌باشد. این ساختمان شامل ۸ طبقه و هر طبقه شامل ۴ واحد به مساحت  $120m^2$  می‌باشد که مشخصات آن در جدول (۴) آورده شده‌است. منحنی برق، حرارت و برودت ماهانه ساختمان در کل سال، در شکل (۵) نشان داده شده‌است.

جدول ۴ مشخصات ساختمان مدل‌سازی شده در نرم‌افزار کریبر [25]

پارامتر	نوع و مقدار
میانگین ارتفاع سقف	۲/۷m
جرم واحد سطح ساختمان	۴۸۶۷ kg/m <sup>2</sup>
ضریب انتقال حرارت کلی دیوارها	۱/۵۳ W/(m <sup>2</sup> K)
ضریب انتقال حرارت کلی کفها برای فضاهای غیرقابل تهویه و قابل تهویه	۰/۵۸۶W/(m <sup>2</sup> K) ۲/۸۳۹W/(m <sup>2</sup> K)
تعداد ۶ پنجره برای هر طبقه	دارای ۶ میلی متر گپ آرگون و دارای مساحت ۴ متر مربع
تعداد افراد هر طبقه	۳
روشنایی	۴۳W/m <sup>2</sup>



شکل ۵ منحنی برق، حرارت و برودت ماهانه ساختمان در کل سال

### بهینه‌سازی

در این پژوهش فرایند بهینه‌سازی پارامترهای طراحی

جدول ۳ هزینه‌های اولیه تجهیزات، نسبت به ظرفیت نامی، به همراه هزینه‌های تعمیر و نگهداری [17]

تجهیزات	معادلات هزینه اولیه و تعمیر و نگهداری و اسقاطی
موتور گازسوز	$Co = 1.1(1.881 \times 10^{21} \times E_{nom}^{-10.33} + 1.062 \times 10^7), \quad 50 < E_{nom} < 500kW$ $Co = -1387Ln(E_{nom}) + 17271, \quad 500kW < E_{nom} < 5000kW$ $M = \frac{0.40458 + 324890 E_{nom}}{12260}$ $SV = 0.2 \times Co$
بویلر	$Co = 205HB^{-0.13}$ $, M = 0.0027\$/kWh$ $SV = 0.2 \times Co$
چیلر جذبی	$Co = 540(C_{nom,ab})^{-0.128}$ $, M = 0.003\$/kWh$ $SV = 0.12 \times Co$
چیلر الکتریکی	$Co = 482(C_{nom,com})^{-0.07273}$ $- 1597$ $, M = 0.003\$/kWh$ $SV = 0.12 \times Co$

در این پژوهش، به منظور جلوگیری از تشکیل محصولات مضر، یک محدودیت دمایی برای آگزوز تجهیزات حرارتی (با فرض بازیافت گرما برای موتور گازسوز) در نظر گرفته شده‌است. نکته حائز اهمیت دمای نقطه شبنم محصولات می‌باشد. دمای نقطه شبنم محصولات احتراق نیز وابسته به عواملی چون میزان هوای اضافه، رطوبت، دی اکسید کربن محصولات احتراق و عوامل دیگر است و مطابق با استانداردهای طراحی تجهیزات حرارتی، دمای خروجی آگزوز باید ۵۰ درجه سانتی‌گراد از دمای نقطه شبنم محصولات خروجی بالاتر باشد؛ لذا با ضریب اطمینان مناسب، فرض می‌شود، دمای گاز خروجی برای محرک‌های اولیه از مقدار  $148/8$  درجه سلسیوس و برای بویلرها از  $121$  درجه سلسیوس نباید کمتر شود [16, 20].

مطالعه موردی. مطالعه موردی در نظر گرفته شده در

جدول ۷ نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش MRM & REUAB با فرض انتخاب تعداد محرک اولیه به‌عنوان پارامتر طراحی

پارامتر	روش MRM <sub>e</sub> و REUAB		روش MRM <sub>h</sub> و REUAB	
	$E_{nom,1}$	$E_{nom,2}$	$E_{nom,1}$	$E_{nom,2}$
پارامتر ظرفیت نامی محرک اولیه				
ظرفیت نامی محرک اولیه (کیلووات)	۳۴	۸۷	۲۲	۳۰۳
ظرفیت بویلر (کیلووات)	۴۶۳/۳		۱۹۹/۲	
ظرفیت چیلر الکتریکی (کیلووات)	۵۳۷/۵		۳۵۲/۷	
ظرفیت چیلر جذبی (کیلووات)	۱۱۳/۵		۲۹۸/۳	
ماکزیم سود سالیانه یکنواخت نسبی $(\$/year) \times 10^3$	۹۴/۹		۸۷/۱	

توسط الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار متلب در دو حالت مختلف انجام شده‌است. در حالت اول تعداد محرک اولیه به‌عنوان پارامترهای طراحی در نظر گرفته می‌شود؛ اما در حالت دیگر، تعداد محرک اولیه از پارامترهای طراحی حذف می‌شود و قید انتخاب دو محرک اولیه با ظرفیت‌های متفاوت به فرایند بهینه‌سازی اضافه می‌شود. دلیل این امر، بهره‌برداری بهتر از سیستم در زمانی است که یکی از محرک‌ها نیاز به تعمیر دارد. جدول (۵) محدوده تغییرات پارامترهای طراحی و جدول (۶) قیود بهینه‌سازی را برای این حالات نشان می‌دهند.

جدول ۸ نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش MRM & REUAB با قید انتخاب یک محرک اولیه

پارامتر	روش MRM <sub>e</sub> و REUAB	روش MRM <sub>h</sub> و REUAB
پارامتر ظرفیت نامی محرک اولیه	$E_{nom}$	$E_{nom}$
ظرفیت نامی محرک اولیه (کیلووات)	۱۲۲	۳۲۳
ظرفیت بویلر (کیلووات)	۴۶۲/۸	۲۰۳/۵
ظرفیت چیلر الکتریکی (کیلووات)	۵۳۷/۲	۳۵۵/۷
ظرفیت چیلر جذبی (کیلووات)	۱۱۳/۸	۲۹۵/۳
ماکزیم سود سالیانه یکنواخت نسبی $(\$/year) \times 10^3$	۳۲۷/۵	۳۱۸/۵

جدول ۵ متغیرهای تصمیم‌گیری الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی سیستم

متغیرهای تصمیم‌گیری و قیود	از	تا
تعداد محرک اولیه	۱	۳
تغییرات ظرفیت نامی محرک اولیه (کیلووات)	$Min(E_{MRMi})$	$Max(E_{MRMi})$
تغییرات ظرفیت گرمایشی بویلر (کیلووات)	۰	۱۰۰۰
تغییرات ظرفیت سرمایه‌گذاری چیلر تراکمی (کیلووات)	۰	۱۰۰۰
تغییرات ظرفیت سرمایه‌گذاری چیلر جذبی (کیلووات)	۰	۱۰۰۰

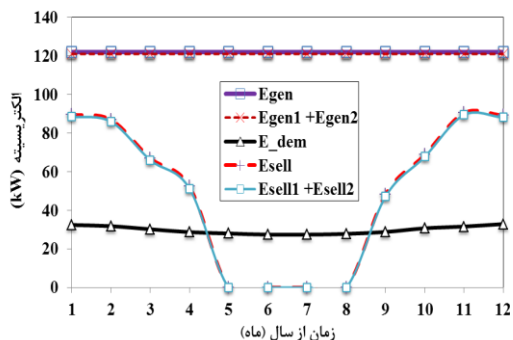
### بحث و نتایج

روند پیاده‌سازی روش ماکزیم مستطیل برای دو حالت عملکرد الکتریکی و حرارتی در شکل‌های (۱) و (۲) ارائه شده‌است. این منحنی‌های تجمعی از منحنی بار حرارتی، سرمایه‌گذاری و الکتریسیته مطالعه‌شده موردی در شکل (۵) به‌دست آمده‌است و محدوده ظرفیت پیشنهادشده برای محرک اولیه توسط روش

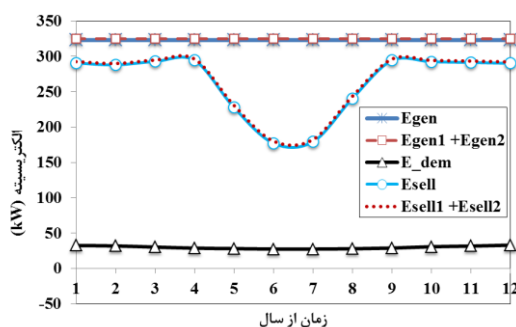
جدول ۶ قیود بهینه‌سازی در الگوریتم ژنتیک

پارامترها	مقادیر	علت محدودیت
تعداد جمعیت	۹۴	شرط هم‌گرایی
نحوه انتخاب	یکنواخت	شرط هم‌گرایی
تناسب مقیاس	رندم	شرط هم‌گرایی
احتمال ترکیب ژنی	۰/۸۵	شرط هم‌گرایی
نوع جهش	-	وابسته به محدودیت
مینیم نرخ جهش	۰/۰۰۰۵	محدودیت نوع جهش
نرخ جهش اولیه	۰/۰۰۵	محدودیت نوع جهش
معیار توقف	۱۰-۶	شرط هم‌گرایی

با ظرفیت انتخابی در هر روش و در شرایط ایده‌آل (دما و ارتفاع سطح دریا) به دست آمده است.



شکل ۶ الکتریسیته سالانه تولید شده و الکتریسیته سالانه مورد نیاز به همراه الکتریسیته فروخته شده، REUAB & MRM<sub>e</sub>



شکل ۷ الکتریسیته سالانه تولید شده و الکتریسیته سالانه مورد نیاز به همراه الکتریسیته فروخته شده، REUAB & MRM<sub>h</sub>

نتایج نشان می‌دهد که با وجود عملکرد محرک‌ها در بار نامی و تولید توان الکتریکی ثابت توسط سیستم CCHP، میزان الکتریسیته فروخته شده ثابت نیست. علت این امر، پوشش‌دهی بخشی از الکتریسیته تولیدی به منظور تأمین سرمایه‌گذاری الکتریکی می‌باشد به طوری که در ماه‌های گرم سال این نیاز به بیشترین مقدار خود می‌رسد. به همین علت فروش الکتریسیته در این ماه‌ها کاهش می‌یابد.

همچنین نتایج نشان می‌دهد که میزان الکتریسیته تولید شده در دو حالت انتخابی برای محرک اولیه و نیز دو حالت عملکرد الکتریکی و حرارتی، تقریباً برابر می‌باشد که این نشان‌دهنده نقش مؤثر تابع هدف در

ماکزیمم مستطیل، به عنوان محدوده تغییرات پارامتر طراحی ظرفیت موتور گازسوز در جدول (۵) استفاده شده است. جدول (۷ و ۸) نتایج حاصل از روش ترکیبی MRM & REUAB را به همراه مقدار تابع هدف در دو فرایند بهینه‌سازی مختلف (برای چهار حالت) نشان می‌دهد. در جدول (۷) که مربوط به حالتی است که تعداد محرک اولیه به عنوان پارامترهای طراحی در نظر گرفته شده و فرایند بهینه‌سازی این قابلیت را دارد تا تعداد مختلف و چیدمان‌های متفاوتی از ظرفیت محرک‌های اولیه را بررسی نماید. حالت دوم که در جدول (۸) ارائه شده، مربوط به حالتی است که با اعمال یک قید، فرایند بهینه‌سازی، تنها به انتخاب یک عدد محرک اولیه، محدود می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در همه حالت‌ها سود سالیانه یکنواخت نسبی مثبت به دست آمده است که این نشان‌دهنده نقش مؤثر سیستم CCHP در کاهش هزینه‌های تأمین گرمایش، سرمایه‌گذاری و الکتریسیته مجتمع مورد نظر نسبت به سیستم سنتی (مطابق با رابطه ۵) می‌باشد. با مقایسه دقیق‌تر مشاهده می‌شود که در حالت عملکرد الکتریکی، سود سالیانه بیشتری نسبت به حالت عملکرد حرارتی به دست می‌آید و بیشترین سود سالیانه یکنواخت نسبی مربوط به حالت انتخاب یک محرک اولیه با ظرفیت  $E_{nom} = 122 \text{ kW}$  می‌باشد این در حالی است که تعداد محرک اولیه به عنوان پارامتر طراحی برای این حالت در نظر گرفته شده است. در ادامه برای ارزیابی بهتر این روش در دو حالت، به بررسی پوشش‌دهی بارهای مورد نیاز ساختمان پرداخته می‌شود.

شکل‌های (۶ و ۷) الکتریسیته سالانه تولید شده به همراه الکتریسیته فروخته شده را در دو حالت انتخاب برای محرک اولیه و در دو حالت عملکردی روش ماکزیمم مستطیل با تابع هدف REUAB، نشان می‌دهند به طوری که میزان الکتریسیته تولید شده متناسب

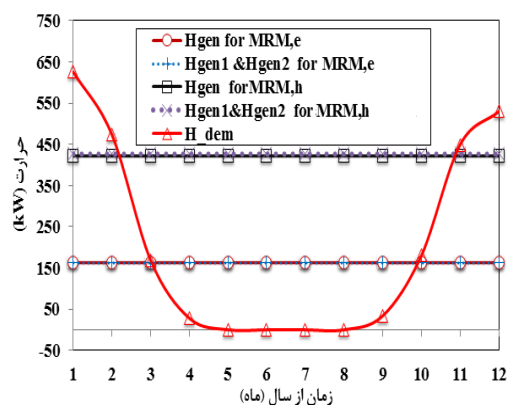
به طور کلی افزایش ظرفیت محرک اولیه، افزایش گرمای دریافتی را به همراه خواهد داشت که این در نتایج هم مشهود است. همان طور که مشاهده می شود در تمام حالات مربوط، میزان حرارت دریافتی از محرکها ثابت است که علت آن عملکرد محرکها در بار نامی است اما همان طور که مشاهده می شود میزان گرمای تولید شده در حالت  $MRM_h$  در هر دو حالت انتخابی بیشتر از  $MRM_e$  می باشد که این باعث کاهش در ظرفیت بویلر خواهد شد؛ زیرا ماکزیمم اختلاف میزان حرارت دریافتی از حرارت مورد تقاضای ساختمان تعیین کننده ظرفیت بویلر پشتیبان خواهد بود که این سیستم باید آن را جبران نماید. از طرفی، اگر گرمای دریافتی بیشتر از گرمای مورد تقاضا باشد، این مقادیر اضافی برای تأمین سرمایش توسط چیلر جذبی به مصرف می رسد. به طوری که ماکزیمم این مقادیر تعیین کننده ظرفیت چیلر جذبی خواهد بود.

همان طور که قبلاً توضیح داده شد ظرفیت چیلر جذبی را ماکزیمم حرارت اتلافی در ماه های گرم سال تعیین خواهد کرد که در شکل (۹) میزان این سرمایش مهیاشده توسط چیلر جذبی به همراه سرمایش مهیاشده توسط چیلر الکتریکی نشان داده شده است. بررسی ها نشان می دهد که در روش  $MRM_h$  & REUAB (شکل B) در هر یک از حالات، سرمایش مهیاشده توسط چیلر جذبی بالاتر از  $MRM_e$  & REUAB (شکل A) می باشد که علت آن ظرفیت های انتخاب شده برای محرک اولیه و در نتیجه میزان حرارت خروجی از آنها است. این روند برای چیلر الکتریکی فرایند معکوسی دارد چون مابقی سرمایش را چیلر الکتریکی باید مهیا کند؛ به طوری که ماکزیمم مقدار کمبود سرمایش مهیاشده توسط چیلر جذبی، تعیین کننده ظرفیت چیلر الکتریکی است.

انتخاب تعداد محرک اولیه برای الکتریسیته تولیدی معین است زیرا در این تابع کلیه هزینه ها نظیر هزینه های اولیه، تعمیر و نگهداری و عملکرد به همراه هزینه های اسقاطی در نظر گرفته شده است. به طوری که می توان گفت برای پوشش دهی منحنی ها شرط انتخاب ماکزیمم سود این شرایط را به وجود آورده است.

از مقایسه دو حالت عملکرد الکتریکی و گرمایی روش ماکزیمم مستطیل مشاهده می شود با وجودی که روش  $MRM_h$  با تابع هدف RUEAB میزان الکتریسیته بیشتری برای فروش دارد ولی مطابق با جدول های (۷ و ۸) سود سالیانه بالاتری را به همراه ندارد. به عنوان مثال با وجودی که در حالت دو انتخاب برای محرک اولیه بیشترین امکان فروش الکتریسیته وجود دارد اما کمترین میزان سود سالیانه را به همراه دارد. علت این موضوع مربوط به هزینه اولیه تجهیزات به خصوص محرک اولیه می باشد چون با افزایش ظرفیت محرک اولیه درست است که امکان فروش برق بالا می رود اما در مقابل هزینه های اولیه آن نیز افزایش می یابد.

شکل (۸) میزان گرمای دریافتی از محرک های اولیه را در دو حالت عملکردی روش ماکزیمم مستطیل و نیز دو حالت انتخابی برای محرک اولیه نشان می دهد.



شکل ۸ میزان گرمای سالانه مورد نیاز به همراه گرمای دریافتی از محرکها، با روش  $MRM$  &  $REUAB$

جدول ۹ درصد تغییرات پارامترهای طراحی و مقدار تابع هدف با پیاده‌سازی روش MRM & REUAB در شرایط واقعی

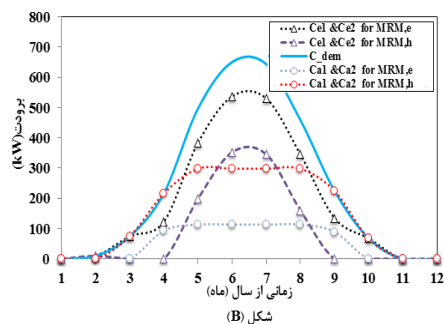
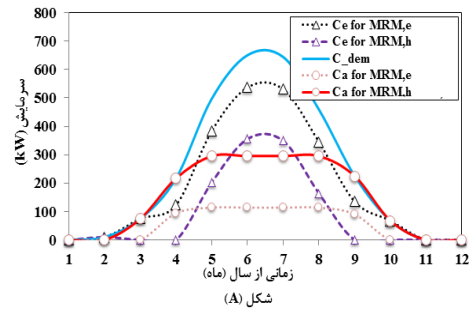
پارامتر	درصد تغییرات حاصل از اعمال روش REUAB & MRMe
محرک اولیه (درصد) ظرفیت	+۱۰/۷
ظرفیت بویلر (درصد)	-۱۱/۷۳
ظرفیت چیلر الکتریکی (درصد)	-۱۰
ظرفیت چیلر جذبی (درصد)	+۹/۶
REUAB (درصد)	-۰/۷۹

$$\frac{f(T)}{f_{nom}} = (1 - 0.01 \frac{T - 25}{5.5}) \quad (17)$$

همچنین، افزایش ارتفاع، به‌ازای هر ۳۰۳ متر (۱۰۰۰ فوت)، ۰/۰۳ بازده را کاهش می‌دهد [8, 27, 28].

جدول (۹) نتایج مربوط به درصد تغییرات پارامترهای طراحی را تحت اعمال شرایط واقعی در فرایند بهینه‌سازی برای حالت عملکردی الکتریکی نشان می‌دهد.

با مقایسه نتایج حاصل از حالت واقعی و حالت ایده‌آل مشاهده می‌شود که مقدار ظرفیت نامی موتور گازسوز به میزان ۱۰/۷ درصد نسبت به حالت ایده‌آل افزایش یافته‌است. در واقع به‌منظور بهینه‌بودن شرایط، فرایند بهینه‌سازی ظرفیت ۱۳۵ کیلوواتی برای موتور گازسوز پیشنهاد می‌شود؛ زیرا با تأثیر دما و ارتفاع که باعث کاهش بازده محرک اولیه می‌شوند، میزان الکتریسیته و گرمای دریافتی از محرک اولیه تغییر می‌یابد و این تغییر در ظرفیت دیگر تجهیزات مؤثر خواهد بود. با مقایسه مقادیر تابع هدف (REUAB) در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که اعمال شرایط واقعی تابع هدف را کاهش می‌دهد؛ زیرا، دما و ارتفاع محیط نصب‌شده سیستم CCHP باعث کاهش بازده محرک اولیه می‌شود، در نتیجه الکتریسیته و گرمای دریافتی از



شکل ۹ میزان سرمایش سالانه مورد نیاز به‌همراه سرمای مهیاشده توسط چیلر جذبی Ca و الکتریکی Ce، با روش MRM & REUAB

### بهینه‌سازی سیستم در شرایط واقعی با تأثیر دما و

ارتفاع محیط. از آن‌جا که مکش هوا برای محرک اولیه موتور گازسوز امری ضروری است، بنابراین خصوصیات هوا از جمله دما و فشار، تأثیر به‌سزایی بر روی عملکرد واقعی سیستم خواهد داشت. به‌عنوان نمونه، بالا بودن بیش از حد دمای محیط، به مرور زمان موجب ذوب شدن تاج پیستون می‌گردد. بنابراین در حالت مطلوب دمای محیط نباید از ۵۵ درجه سانتی‌گراد تجاوز کند و در صورت افزایش دمای محیط عملکرد موتور کاهش می‌یابد [27].

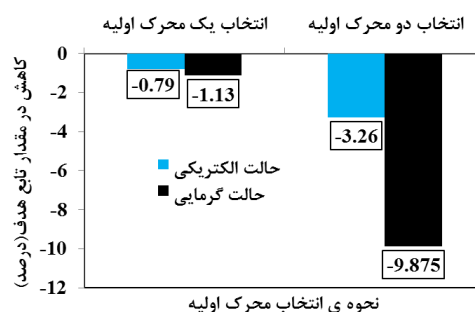
در این پژوهش به‌منظور نزدیک تر شدن به شرایط واقعی اثر این دو پارامتر در نتایج بهینه‌سازی بررسی شده‌است. در واقع فرض شده‌است که بازده و توان موتورهای گازسوز به‌ازای هر ۵/۵ درجه افزایش در دمای هوای محیط، به میزان ۱٪ کاهش پیدا می‌کنند. این تغییرات می‌تواند توسط رابطه زیر تخمین زده می‌شود [8, 26, 27].

افزایشی (برای ظرفیت موتور گازسوز، چیلر جذبی و مقدار تابع هدف) و کاهش (برای چیلر الکتریکی و بویلر) در دیگر مراجع [16] ارائه شده است؛ اما نکته قابل توجه میزان افزایش ظرفیت نامی موتور گازسوز و تابع هدف می باشد؛ زیرا این مقادیر در مراجع دیگر تا ۳۳/۳ درصد برای موتور گازسوز و ۸ درصد برای تابع هدف، در ۱۰ درصد افزایش قیمت حامل های انرژی نیز گزارش شده است. این بدین معنی است که با افزایش ۱۰ درصدی قیمت حامل های انرژی، به منظور دستیابی به بیشترین مقدار تابع هدف، باید ظرفیت محرک اولیه ۳۳/۳ درصد بیشتر از ظرفیت محرک اولیه موجود انتخاب شود. اما با روش ارائه شده در این پژوهش این مقدار به ۲۰ درصد کاهش می یابد در حالی که میزان افزایش سود حاصل (۸ درصد) ثابت می ماند. این نتیجه نشان می دهد که روش ارائه شده در پیش بینی افزایش قیمت حامل های انرژی موفق تر از دیگر روش ها می باشد به طوری که این افزایش قیمت، مستلزم هزینه اضافی نخواهد شد.

### نتیجه گیری

دستیابی به سیستم های تولید هم زمان با تراز انرژی بالا می تواند در بعضی موارد هزینه های اقتصادی بالایی را در پی داشته باشد که ممکن است نسبت به هزینه تولید سنتی انرژی، صرفه اقتصادی مناسبی نداشته باشد؛ لذا استفاده از روش هایی که بتواند بین تولید بالای انرژی و هزینه های معادل، توازن و تعادل منطقی برقرار کند، امری ضروری است. از این رو در این پژوهش به معرفی سه روش ماکزیمم بار (MLM)، ماکزیمم مستطیل (گرمایی)  $MRM_{th}$  و الکتریکی  $MRM_e$  و سود سالیانه یکنواخت نسبی (REUAB) در تعیین ظرفیت تجهیزات سیستم های تولید هم زمان برق حرارت و برودت پرداخته شد. در حقیقت روش چند معیاره سود سالیانه نسبی، هزینه های سیستم تولید

محرک را کاهش خواهد داد؛ بنابراین به منظور پوشش دهی منحنی های بار مورد نیاز ساختمان، خرید الکتریسیته از شبکه و سوخت، به منظور تولید حرارت توسط بویلر مورد نیاز خواهد بود.



شکل ۱۰ میزان تغییرات درصدی مقدار تابع هدف با اعمال شرایط واقعی در حالت های مختلف

هرچند علت دیگر آن را می توان هزینه اولیه واحد تولید توان دانست؛ زیرا عمده هزینه سیستم CCHP نسبت به سیستم سنتی، هزینه واحد تولید توان می باشد و چون در حالت واقعی ظرفیت انتخابی برای محرک اولیه افزایش می یابد، در نتیجه طبق روابط (۵ و ۶) از سود حاصل کاسته خواهد شد.

### بهینه سازی سیستم با تغییر در قیمت حامل های

انرژی. در این بخش نتایج بهینه سازی با افزایش ۱۰ درصد قیمت حامل های انرژی نسبت به قیمت پایه در روش  $MRM_e$  & REUAB ارائه شده است. علت انتخاب این روند، مقایسه نتایج این روش با روش REUAC می باشد.

نتایج بهینه سازی، نشان می دهد که افزایش ۱۰ درصدی قیمت حامل های انرژی مقدار تابع هدف را ۸ درصد، ظرفیت موتور گازسوز را ۲۲ درصد و ظرفیت چیلر جذبی را تا ۳۳ درصد افزایش می دهد. در حالی که ظرفیت بویلر ۸ درصد و ظرفیت چیلر الکتریکی ۱۷ درصد نسبت نتایج بهینه روش  $MRM_e$  & REUAB کاهش خواهد یافت. در واقع روند

<b>نمادها</b>		
A	هزینه سالانه اسقاطی (\$/year)	هم‌زمان را نسبت به سیستم سنتی (که با روش ماکزیمم بار تعیین ظرفیت می‌شود) می‌سنجد و روش ماکزیمم
AED	الکتریسیته مورد نیاز تجمعی	مستطیل تعادل منطقی به منظور تأمین نیاز ساختمان
ATD	حرارت مورد نیاز تجمعی	برقرار می‌کند. به منظور بهینه‌سازی سیستم CCHP،
C	سرمایش، (kW)	برای یک مجتمع مسکونی با محرک اولیه موتور
CCHP	سیستم تولید هم‌زمان برق، حرارت و برودت	گازسوز از هر سه روش استفاده شد و روش جدیدی
COP	ضریب عملکرد، (%)	تحت نام $MRM_1$ & REUAB ارائه شد. نتایج نشان داد
CRF	ضریب سالیانه‌کننده	که با اعمال این روش نه تنها محدودیت‌های روش‌های
E	الکتریسیته، (kW)	گذشته اعمال می‌شود بلکه فرایند بهینه‌سازی با تغییر
EUAB	کل هزینه و درآمد سالیانه یکنواخت، (\$/year)	قیمت حامل‌های انرژی در هر ماه کارایی دارد و نیازی
F	انرژی سوخت، (kW)	به ثابت فرض نمودن قیمت حامل‌ها در کل سال
H	گرمایش، (kW)	نیست؛ به طوری که سیستم طراحی شده قادر است کلیه
I	نرخ بهره، (%)	نیازهای ساختمان را پوشش دهد و دارای سود سالیانه
J	شمارنده ماه	مثبت باشد.
K	عمر تجهیزات، (year)	با مقایسه حالت‌های بهینه‌سازی، مشاهده می‌شود
LHV	ارزش حرارتی سوخت، (kJ/kg)	که ماکزیمم سود سالیانه در همه حالات مربوط به
m	جرم، (Kg)	انتخاب یک محرک اولیه برای سیستم CCHP به دست
M	هزینه تعمیر و نگهداری، (\$/kWh)	می‌آید و عملکرد سیستم در حالت الکتریکی سود
MLM	روش ماکزیمم بار	بیشتری را نسبت به حالت حرارتی متناظر خود کسب
MRM	روش ماکزیمم مستطیل	می‌کند؛ در صورتی که پوشش‌دهی حالات مربوط به
n	تعداد محرک اولیه	حرارتی بیشتر از حالات مربوط به الکتریکی می‌باشد.
NC	ظرفیت نامی، (kW)	در نهایت نتایج بهینه با اعمال شرایط واقعی برای موتور
R	هزینه اولیه سالیانه شده، (\$/year)	گازسوز نشان داد که طراحی سیستم CCHP بدون
REUAB	سود سالیانه یکنواخت نسبی، (\$/year)	در نظر گرفتن شرایط واقعی عملکرد واحد تولید توان
SV	هزینه اسقاطی در سال جاری، (\$/kWh)	(دما و ارتفاع محیط) می‌تواند گمراه‌کننده باشد
Trad	سیستم متداول (سنتی)	به طوری که بهینه‌سازی پارامترهای طراحی، نزدیک به
		۱۰ درصد خطا خواهند داشت و نیز سود حاصل بیشتر
		از حالت واقعی گزارش می‌شود.
<b>علائم یونانی</b>		از طرفی نتایج بهینه‌سازی سیستم با تغییر در قیمت
$\epsilon$	جریمه انتشار آلاینده‌ها، (\$/kg)	حامل‌های انرژی نشان داد که روش ارائه شده، پیش‌بینی
$\eta$	بازده، (%)	بهتری نسبت به روش REUAB در افزایش ده درصدی
$\rho$	هزینه حامل‌های انرژی، (\$/kWh)	قیمت حامل‌های انرژی دارد.
$\tau$	بازه زمانی، ساعت	



الکتريکی	E	زیر نویس
سوخت	F	a جذبی
تولید شده	Gen	B بویلر
گرمايي	H	Buy خرید
تعداد تجهیزات	J	C سرمایه‌ش مربوط به چیلر (تراکمی یا جذبی)
نوع آلاینده/ شمارنده تجهیزات	K	CCHP سیستم تولید هم‌زمان برق حرارت و برودت
اسمی، نامی	Nom	Dem مورد نیاز
فروش	Sell	
سیستم متداول (ستتی)	Trad	

### مراجع

1. Sanaye, S., Ghafurian, M.M. and Dastjerd, F.T., "Applying Relative Net Present or Relative Net Future Worth Benefit and exergy efficiency for optimum selection of a natural gas engine based CCHP system for a hotel building", *J. Nat. Gas Sci. Eng*, Vol. 34, pp. 305–317, (2016).
2. Mostafaeipour, A., Bardel, B., Mohammadi, K., Sedaghat, A. and Dinpashoh, Y., "Economic Evaluation for Cooling and Ventilation of Medicine Storage Warehouses Utilizing Wind Catchers", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 38, pp.12-19, (2014).
3. Tavakoli Dastjerd, F., Tavakoli Dastjerd, M. and Farahat, S., "Investigated of the Performance of CCHP System in Reducing Pollutants Emission NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> and CO", *23rd Annual International Mechanical Engineering Conference*, Tehran, IRAN, 12-14 May, (2015)
4. Sonar, D., Soni, S.L. and Sharma, D., "Micro-trigeneration for Energy Sustainability: Technologies, Tools and Trends", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 71, pp. 790-796, (2014).
5. Boyce, M.P., "*Handbook for Cogeneration and Combined Cycle Power Plants*", ASME PRESS, (2002).
6. Ghafurian, M.M., Shakib, S.E. and Tavakoli Dastjerd, F., "Modeling and Optimizing of a Combined CHP System, Compression Chiller and Reverse Osmosis Plant (CHP + C + W) in Two Strategies of Connections with Grid", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 37, pp. 1751-1763, (2015).
7. Ebrahimi, M. and Keshavarz, A., "Sizing the Prime Mover of a Residential Micro-combined Cooling Heating and Power (CCHP) System by Multi-criteria Sizing Method for Different Climates", *Energy*, Vol. 54, pp. 291–301, (2013).
8. Sanaye, S., Meybodi Aghaei, M. and Shokrollahi, S., "Selecting the Prime Movers and Nominal Powers in Combined Heat and Power Systems", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, pp. 1177-1188, (2008).
9. Cardona, A. and Piacentino, A., "Methodology for Sizing a Trigeneration Plant in Mediterranean Areas", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, pp. 1665-1680, (2003).

10. Ghafurian, M.M., Tavakoli Dastjerd, F. and Shafiee Mayam, M.H., "Comparison Three Methods in Designing CCHP System for an Industrial of Case Study", *Second National Application Researches in Electrical, Mechanical and Mechatronic Conference*, Tehran, IRAN, 19 February, (2015).
  11. Gu, Q., Renc, H., Gaob, W. and Rend, J., "Integrated Assessment of Combined Cooling Heating and Power Systems under Different Design and Management s for Residential Buildings in Shanghai", *Energy and Buildings*, Vol. 51, pp.143-152, (2012).
  12. Gibson, C. A., Meybodi, M.A. and Behnia, M. "Optimization and Selection of a Steam Turbine for a Large Scale Industrial CHP (combined heat and power) System under Australia's Carbon Price", *Energy*, Vol. 34, pp. 1-17, (2013)
  13. Maerefat, M. and Shafie, P., "Design of CCHP System for Office Buildings in Tehran and Thermodynamical, Environmental and Economical Evaluation in Comparison to Conventional System", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, pp. 124-134, (2014)
  14. Wang, J.J., Zhang, C.F. and Jing, Y-Y., "Multi-criteria Analysis of Combined Cooling, Heating and Power Systems in Different Climate Zones in China", *Applied Energy*, Vol. 87, pp. 1247-1259, (2010).
  15. Fumo, N., Mago, P.J. and Chamra, M., "Emission Operational Strategy for Combined Cooling, Heating, and Power Systems", *Applied Energy*, Vol. 86, pp. 2344–2350, (2009).
  16. Sanaye, S. and Ghafurian, M.M., "Applying Relative Equivalent Uniform Annual Benefit for Optimum Selection of a Gas Engine Combined Cooling, Heating and Power System for Residential Buildings", *Energy and Building*, Vol. 128, pp. 809-818, (2016)
  17. Tavakoli Dastjerd, F., Ghafurian, M.M. and Shakib, E., "Tech Economic Optimization of CCHP System with Rely the Time Value of Money, in Payback Period", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, pp. 254-260, (2015).
۱۸. دستورالعمل مدیریت بار پستها و فیدرهای فشار ضعیف در شبکه‌های توزیع نیروی برق، شماره سند ۲۳۲۳ / ۳۴۲: شرکت توزیع نیروی برق، (۱۳۹۵).
19. Ebrahimi, M. and Keshavarz, A. "Climate Impact on the Prime Mover Size and Design of a CCHP System for the Residential Building", *Energy and Buildings*, Vol. 54, pp. 283-289, (2012).
  20. Darrow, K., Tidball, R., Wang, J. and Hampson, A., "Catalog of CHP Technologies", U.S. Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership, March (2015).
  21. Oskoonejad, M.M., "*Engineering Economy*", Amirkabir University, Tehran, Iran, Amirkabir Publishing, 4th ed., (2007)
  22. [http://bahaye\\_bargh.tavanir.org.ir/](http://bahaye_bargh.tavanir.org.ir/) / Accessed in February, (2015).
  23. <http://www.nigc-mpgc.ir/> / Accessed in February, (2015).
  24. <http://www.abfasb.ir/main.asp?id=778/> / Accessed in February, (2015).
  25. Hourly Analysis Program (HAP) 4.20.
  26. Tavakoli Dastjerd, F., Ghafurian, M.M. and Shafiei Mayam, M.H., "Investigation of How to Choose Capacity of Gas Engine in Optimization CCHP Systems with GA; Case Study: Water Sports Complex", *AmirKabir Journal of Science & Research Mechanical Engineering*, ASJR-ME, Vol. 48, pp.79-92, (2016)

27. Ghafurian, M.M. and Niazmand, H., "New Approach for Estimating the Cooling Capacity of the Absorption and Compression Chillers in a Trigeneration System", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 86, pp. 89-106, (2018).