

## یکپارچگی بهینه ی انرژی خورشیدی در شبکه ی گرمایش یک ناحیه

اصغر قادری ۱، عبدالله انصاری صدر\* ۲، عاصف دینارزهی ۲، عبدالله قدوسیان

۱- استادیار گروه برق (دکتری پلاسما)، دانشگاه آزاد واحد ايرانشهر

۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی برق، دانشگاه آزاد واحد ايرانشهر

### چکیده

اجرای بخشنامه ی اروپایی 2012/27 مستلزم وجود سهم تجدیدپذیر داخل سرمایه ی و گرمایش مکفی ناحیه است. انرژی گرمایی خورشیدی می تواند سهم قابل رشدی را برای این منظور داشته باشد اما به یکپارچگی درون سیستم های گرمایش ناحیه توجه ویژه ای باید داشت. در واقع، ماهیت متغیر و غیرقابل کنترل گرمایش تجدیدپذیر باید بواسطه ی برآورد شدن تقاضای کاربران و هماهنگی خروجی اش با سایر منابع قابل کنترل رسیدگی شود. ذخیره ی انرژی گرمایی غالباً برای بهره برداری از منابع تجدیدپذیر در بهترین حالت شان ضروری است. روش بهینه سازی برای یافتن ارسال انرژی به منابع مختلف انرژی موجود در شبکه ایجاد شده است. روش بهینه سازی می تواند در سطح برنامه ریزی برای یافتن بهترین نسبت های اندازه ی منابع متداول و خورشیدی و تعیین ظرفیت بهینه ی ذخیره استفاده شود. یک مورد تست پس از تشریح مختصر شیوه ی بهینه سازی و مدول های شبیه سازی اش ارائه می شود و نتایج پیرامون مزایای گرمایش خورشیدی بحث می شوند.

واژگان کلیدی: گرمایش ناحیه، گرمایش دمایی خورشیدی، ذخیره ی گرمایی، بهینه سازی، برنامه ریزی خطی عدد صحیح ترکیبی

## ۱- مقدمه

افزایش سهم منابع انرژی تجدیدپذیر (RES) در مصرف انرژی مستلزم بهره برداری بزرگتر از تجدیدپذیرها هم در فرم الکتریکی و هم فرم گرمایی شان است. می دانیم که شبکه ی سرمایش و گرمایش ناحیه (DHC) در ارتقای بهره برداری RES در بخش گرمایی نقش دارد. کنش متقابل اکید بین فرم الکتریکی و گرمایی انرژی در چند دهه ی اخیر بوسیله ی شبکه ی گرمایش ناحیه و کارخانجات همزایش بهره برداری شده است. همزایش بهره برداری از سوخت اولیه را افزایش می دهد که به راندمان بیشتر و انتشار کمتر گاز گلخانه ای نسبت به تولید مجزای برق و گرما منجر می شود. باتوجه به اینکه این موضوع به فرم تکنولوژیکی بالغ نرسیده است، اروپا بخشنامه ی 2012/27 را درمورد راندمان انرژی اعلام کرد که مستلزم وجود سهم تجدیدپذیر درون باصلاح سرمایش و گرمایش موثر ناحیه ای است. سهم تجدیدپذیر در گرمایش ناحیه می تواند بواسطه ی ورودی های مختلف رخ دهد: احتراق سوخت تجدیدپذیر با کاربرد منبع زمین گرمایی، استفاده از انرژی الکتریکی تجدیدپذیر و تبدیل آن به گرما از طریق پمپ- گرمایی برگشت پذیر یا جای دادن سهم گرمایش خورشیدی به شبکه ی گرمایش. بهرحال، بخشنامه ی اروپایی عنوان می کند: سرمایش و گرمایش موثر ناحیه به معنی سیستم گرمایش یا سرمایش ناحیه با استفاده از حداقل ۵۰ درصد انرژی تجدیدپذیر، ۵۰ درصد گرمای مازاد، ۷۵ درصد گرمایش همزایشی یا ۵۰ درصد ترکیب چنین انرژی و گرما است. در این دیدگاه، ارزیابی عملکردهای کارخانجات گرمایش ناحیه ای جدید یا نوسازی قدیمی ها مستلزم تحلیل سهم موثر شیوه های مختلف انرژی در تامین کاربر نهایی بادر نظر گرفتن دسترس پذیری به منبع تجدیدپذیر و تقاضاهای کاربر نهایی در طی فصول مختلف سال و در یک قالب زمانی سازگار با چرخه ی کاری تجدیدپذیر یعنی یک روز در صورت در نظر گرفته شدن ورودی خورشیدی است.

ورود یک منبع تجدیدپذیر به یک کارخانه ی همزایش در واقع مستلزم بازتعریف استراتژی مدیریت اش است. معمولاً ارزیابی تولید توان با ۲ مولفه انجام می شود: توان و گرمای ترکیبی گاز سوخته شده (CHP) و یک بویلر. آنها معمولاً تحت یک لوپ کنترلی ساده بکارانداخته می شوند که نقطه ی کاری کارخانه را برای برآورده کردن تقاضاهای گرمایی کاربر (باتوجه به اینکه غالباً بعنوان طرح تعقیب بار گرمایی شناخته می شود) جلومی برد که در آن CHP بار پایه را تامین می کند و بویلر بارهای پیک را پوشش می دهد. اگر چندین منبع توان موجود باشند، یکپارچگی شان باید از پس خصوصیات مختلف، هزینه های علیاتی و محدودیت های تخصصی برآید، برای مثال [3] را مشاهده کنید. در نتیجه، تعریف اجرای استراتژی مدیریت کارخانه در حداقل هزینه اش یا استفاده از بیشترین سهم محتمل تجدیدپذیر با تعداد محدود مولفه ها کار آسانی نیست. اگر منابع تجدیدپذیر غیرقابل کنترل و نوبتی بکار گرفته شوند، عدم پیش بینی پذیری شان چالش های جدیدی را برای مدیریت کارخانه به همراه دارد. راه حل مشکل منابع غیرقابل تجدیدپذیر همانند خورشید یا باد کاربرد ذخیره ی انرژی است. اگر عناصر ذخیره برای هموار کردن سطوح تولید تجدیدپذیرها مفید باشند، ماهیت یکپارچه شان مستلزم آن است که مدیریت انرژی نه تنها در جهت کمینه سازی هزینه ها برای یک لحظه ی زمانی بلکه نسبت به یک بازه ی زمانی تلاش می کند برای مثال، انرژی تولید شده توسط کارخانه ی خورشید در طی روز می تواند ذخیره و بعدها استفاده شود.

علاوه بر یکپارچگی RES، موضوع بحرانی دیگری که امروزه غالباً در مدیریت شبکه ی DHC یافت می شود تعامل میان تولیدکنندگانی است که می توانند به سهم نقش گرمایی شان به شبکه بیفزایند. در این صورت، گرما می تواند از فرایندهای مختلف ناشی شود و لذا پروفایل زمانی خودش را دارد که باید با نیازهای کلی کاربران نهایی تطابق داده شود.

با شروع از ملاحظات قبلی، کاربرد یک ابزار بهینه سازی و شبیه سازی در ارزیابی شبکه ی DHC در فاز برنامه ریزی و در فاز زمان واقعی تعیین کننده است. در بیست سال گذشته، رویکردهای مختلفی برای حل مشکل مدیریت در حوزه های کاربردی مختلف از تعهد ایستگاه های توان تا مدیریت کارخانه های CHP یا سیستم DHC مطرح شده اند. اخیراً مفهوم بهینه سازی برای مدیریت سیستم های انرژی پیچیده با بیش از یک منبع انرژی اعمال شده است. رفرنس های [11-13] به بهینه سازی منابع

انرژی تجدیدپذیر نزدیک شده اند که در آن مفاهیم مختلف یکپارچگی ساختمان های پراکنده و تعریف پتانسیل بسط راه حل تحلیل شده اند.

نقطه ی اصلی مقاله ی موجود در کاربرد یک شیوه ی مدیریت انرژی بهینه برای ارزیابی عملکرد گرمایش ناحیه با سهم قابل توجه انرژی تجدیدپذیر است. روش مذکور در صورت اعمال در فاز برنامه ریزی کارخانه یا تازه سازی سهم قابل اطمینان منابع مختلف توان را ارائه می کند که امکان ارزیابی درجه ی انجام معیارهای تعریف شده در دستور اروپایی مبنی بر راندمان انرژی را میسر می کند.

این مقاله با تجربه ی بدست آمده در مدیریت سیستم های کلاسیک DHC به موضوعات شبیه سازی و بهینه سازی مرتبط با جای دادن RES در سیستم می پردازد. در بخش بعدی، خلاصه ای از شبیه سازی سیستم گرمایی خورشیدی مطرح می شود درحالیکه در بخش سوم، خصوصیات کلی شیوه ی بهینه سازی تشریح می شود. در بخش چهارم، تشریح مورد تست همراه با بحث مهمترین نتایج ارائه می شود. نهایتاً برخی نتیجه گیری ها و چشم اندازها ترسیم می شوند.

## ۲- مدل کلکتور خورشیدی

مدل کلکتور خورشیدی مبتنی بر تست حالت پایای استاندارد اروپایی EN12975 است. مطابق با این تست، توان خروجی Psh و راندمان کلکتور به شرح ذیل تعیین می شوند:

$$\eta = \frac{P_{sh}}{GS} = \eta_0 - \frac{a_1(T_f - T_a)}{G} - \frac{a_2(T_f - T_a)^2}{G} \quad (1)$$

$$P_{sh} = \left[ \eta_0 G - a_1(T_f - T_a) - a_2(T_f - T_a)^2 \right] S \quad (2)$$

پارامترهای  $\eta_0$ ،  $a_1$  و  $a_2$  معمولاً در برگه داده های کلکتور گزارش می شوند. ضمیمه مدل دقیق تری را برای کلکتورهای مسطح تشریح می کند که ناظم زاویه ی برخورد (IAM) را همانند تست شبه دینامیک EN12975 در نظر می گیرد. درخشندگی جهانی  $G_0$  روی سطح کلکتور حاصل جمع ۳ سهم مطابق با تابش مستقیم، به تابش انتشاری و تابش منعکس شده از زمین است:

$$G_0 = G_{bn} \cos \theta + G_{dh} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho G_{th} \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (3)$$

که در آن مقدار شاخص  $\rho$  در گستره ی  $0.1 \div 0.3$  است.

تابش در شرایط آسمان صاف با مدل مون- اسپنسر ارزیابی می شود. بیان کامل پارامترهای  $G_{bn}$ ،  $G_{dh}$  و  $G_{th}$  و زاویه ی برخورد  $\theta$  را می توان در رفرنس [17] یافت.

تابندگی آسمان صاف  $G_0$  بادر نظرگفتن شرایط مترولوژیکی (ابرها، غبار و غیره) بواسطه ی ضریب تجربی KM کاسته می شود:

$$G = K_M G_0 \quad (4)$$

KM از پایگاه داده ی اروپایی بنام PVGIS استنتاج می شود. میانگین ضریب مترولوژیکی برای هر ماه با مقایسه ی انرژی کل دریافتی گزارش شده توسط PVGIS با انرژی متناظر محاسبه شده با (3) بدست آمده است. بنابراین، ضرایب ماهیانه به روز مرکزی هر ماه تخصیص داده شده اند و ضرایب مترولوژیکی برای هر روز سال با درون گیری روان (یعنی هرمیت مکعبی تکه ای) کسب شده اند.

### ۳- بهینه سازی تعهد واحد

هدف اصلی سیستم انرژی بررسی شده ارائه ی انرژی گرمایی به مجموعه ای از کاربران نهایی است. مطرح شده است که یک محدودیت قراردادی تولید انرژی را به نیازهای این مشتریان گره می زند که باید در هر زمانی برآورده شود. محدودیت غیرمنحصربفرد وجود چندین منبع توان درون سیستم سبب انتخاب انجام زمان بندی تولید است. از این حیث، یک شیوه ی بهینه سازی برای تعریف تعهد هر مدول اجرامی شود. در ذیل، خصوصیات عمده ی سیستم انرژی تحلیل شده و شیوه ی بهینه سازی مشخص می شوند.

#### ۱.۳ بررسی موردی

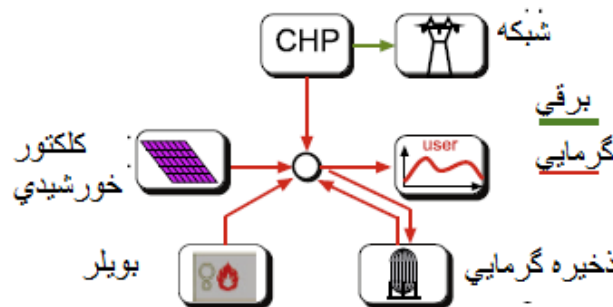
بررسی موردی عنوان شده در اینجا با سیستمی انجام می شود که صفحه آرایی آن در شکل ۱ گزارش شده است. ساختار شامل مدول تولید CHP و یک بویلر است، سوخت هر دو مدول گاز طبیعی است. کارخانه ی گرمایی خورشید به سیستمی همراه با مدول ذخیره ی گرمایی متصل می شود. همه ی اجزای متصل به شبکه ی گرما باید درخواست کاربر را تامین کنند. در سمت الکتریکی، CHP توان الکتریکی اش را به شبکه می فروشد و هیچ کاربر الکتریکی داخلی لحاظ نمی شود.

#### ۲.۳ تابع هزینه

در بررسی موردی، هر واحد تولید خصوصیات و هزینه های خود را دارد بنابراین یک معیار کلی باید برای کار موثر سیستم بکار بسته شود. معیارهای بسیار برای اجرای کیفیت مدیریت سیستم انرژی تعیین می شوند؛ مثلاً موضوع اقتصادی بادر نظر گرفتن هزینه ی کلی عملیات سیستم یا محیطی با لحاظ کردن انتشارات سیستم در محیط. در این تحقیق، به جنبه ی اقتصادی با تلاش برای ارزیابی بهترین آرایه ی منبع گرمایی RES درون ساختار موجود برای کمینه سازی هزینه ی عملیاتی کل توجه می شود. تابع هدف C برای بررسی موردی و دوره ی زمان بندی گسسته شده در بازه های زمانی N به شرح ذیل بیان می شود:

$$C = \sum_{i=1}^N [c_f P_c(t_i) + c_b B_c(t_i) - c_s(t_i) P_e(t_i)] \Delta t \quad (5)$$

Cf و cb هر دو ثابت در نظر گرفته می شوند و Cf احتمالاً به انگیزه ی مالی عرضه شده برای همزایی مثلاً در ایتالیا بستگی دارد. CS تابع زمان است با توجه به اینکه بسته به قیمت بازار انرژی برق بصورت ساعتی فرق می کند. لازم به ذکر است که تابع هزینه، حتی اگر تابع زمان باشد، ترکیب خطی از هزینه ی هر واحد است.



شکل ۱- صفحه آرایی مولفه ها درون بررسی موردی

#### ۳.۳ مدل مدول ها

در حالیکه ورودی توان گرمایی به سیستم در بخش قبلی تشریح شده است، داده های اصلی مولفه های بررسی موردی در ذیل خلاصه شده اند.

**CHP ۱,۳,۳**

جنبه ی اصلی درخصوص مدل سازی CHP پیرامون رابطه ی توان توان خروجی  $P_e$  و گرمایی  $P_t$  و توان ورودی اش  $P_c$  است. این خصوصیت با معادلات ذیل بیان می شود:

$$\begin{aligned} P_t(t_i) &= k_0 \delta(t_i) + k_1 P_e(t_i) \\ P_c(t_i) &= a_0 \delta(t_i) + a_1 P_e(t_i) \end{aligned} \quad (6)$$

که در آن، در ساده ترین مورد، ضرایب  $k_1$  و  $a_1$  ثابت هستند، در اینصورت منحنی می تواند با رویکرد خطی تکه ای با تقسیم بندی گستره ی کاری CHP در بازه های خطی شود که این ضرایب می توانند بواسطه ی ثابت ها تقریب زده شوند. هزینه ی واحد سوخت ماشین بدلیل واژه ی  $a_0$  با افزایش توان الکتریکی کاهش می یابد. وضعیت خاموش/ روشن دستگاه در بازه ی زمانی معین  $t_i$  با متغیر دوتایی  $\delta(t_i)$  بیان می شود که در کران های عملیاتی برای CHP گنجانده شده است:

$$\delta(t_i) P_{e_{min}} \leq P_e(t_i) \leq \delta(t_i) P_{e_{max}} \quad (7)$$

متغیر دوتایی  $\delta(t_i)$  همچنین برای ورود سایر محدودیت های عملیاتی همچون حداقل مدت دار (MOT)، حداقل زمان خاموشی (MST)، کران های رمپ استفاده می شود که جزئیات آن در رفرنس [19] آمده است.

**۲,۳,۳ بویلر**

بویلر تحت این فرض مدل سازی می شود که رابطه ای که توان ورودی  $B_c$  را به خروجی پیوندی دهد با یک راندمان ثابت تعیین می شود:

$$B_c = \frac{B_t}{\eta_b} \quad (8)$$

که در آن ضرایب  $\eta_b$  به پارامترهای فنی بویلر بستگی دارد و می توان از برگه داده های سازنده ی بویلر بدست آورد. کران های مربوط به حداکثر توان بویلر لحاظ می شوند.

**۳,۳,۳ ذخیره ی انرژی گرمایی**

ذخیره ی انرژی گرمایی به شرح ذیل ارائه می شود:

$$P_s(t_i) \Delta t = \eta_d S_t(t_{i-1}) - S_t(t_i) \quad (9)$$

واژه ی ذخیره بواسطه ی قرارداد منبع تشریح می شود طوریکه توان  $P_s(t_i)$  در طی فاز تخلیه ی ذخیره مثبت است. کران های مربوط به حداکثر انرژی ذخیره شده لحاظ می شوند.

**۴,۳ معادلات مدل**

ساختار مدل بالاخص روابط میان جریان های مختلف توان با معادلات تعادل مخصوص به هر حامل انرژی بیان می شوند. هیچ تعادلی برای تعادل الکتریکی در بررسی موردی وجود ندارد باتوجه به اینکه کل توان الکتریکی تولیدی توسط CHP به شبکه تحویل داده می شود. تعادل بین عبارات خروجی و منبع برای معادله ی گرمایی به شرح ذیل تعیین می شود:

$$P_t(t_i) + B_t(t_i) + P_{sh}(t_i) + P_s(t_i) = U_t(t_i) + D_t(t_i) \quad (10)$$

عبارت  $D_t$  بیش تولید گرمای ناشی از کلکتورهای خورشیدی و یا CHP را تخمین می زند. این عبارت که به علامت مثبت محدود می شود، می تواند در مورد تولید بالای توان خورشیدی با تقاضای پایین کاربر گرمایی فعال شود یا وقتی شرایط ویژه ی قیمت گذاری الکتریکی برای حفظ CHP فراتر از تقاضای کاربر مناسب شود.  $D_t$  بالاخص در ارزیابی سهم توان همزایی شده برای کسب انگیزه های مالی برای مورد ایتالیا مهم است.

### ۵.۳ تکنیک بهینه سازی

شیوه ی بهینه سازی باید پروفایل های تولید CHP و بویلر را برای کمینه سازی تابع هزینه ای تعریف شده در (5) بشرط ایفای معادلات تعادل و محدودیت های مولفه ها بیابد. حاصلجمع معادلات مدل عبارتنداز:

#### معادلات تعادل؛

معادلات ساختاری محدودیت ها و واحدهای تولید توان.

تابع کمینه شده خطی است، اولین نوع معادلات هم بواسطه ی تعریف خطی است درحالیکه دومین معادله ای که بطورموثر ارائه شده است، در بدترین حالت، بصورت تابع خطی تکه ای لحاظ می شود. این فرضیات به انتخاب الگوریتم بهینه سازی منجر می شوند که از این خصوصیات بهره می گیرد. تنها متغیرهای بهینه سازی که خطی بودن را ایفانمی کنند با محدودیت های فنی مرتبط هستند، مثلاً حالت روشن / خاموش CHP که در (6) یافت می شود. بنابراین شیوه های برنامه نویسی خطی عدد صحیح ترکیبی (MILP) می توانند برای حل مسئله ی بهینه سازی استفاده شوند. آنها می توانند به مسئله ی مقیاس بزرگ رسیدگی کنند و پیش ازین در زمینه ی مدیریت انرژی همانند رفرنس های ۴ و ۱۰ اعمال شده اند.

ابعاد مسئله ی بهینه سازی به دوره ی زمان بندی و گسسته سازی زمان بستگی دارند. مثلاً زمان بندی یک هفته ای بررسی موردی برمبنای ساعت مستلزم یافتن ۱۶۸ مقدار Pe و همین مقدار Bt است. چندین متغیر دیگر باید برای تشریح توابع خطی تکه ای و سایر محدودیت ها وارد شوند که در رفرنس ۱۰ تشریح شد. هزینه ی محاسباتی روش تاحدزیادی منوط به تعداد متغیرهای موجود در فرمول بندی است. درکل تحلیل هزینه بار محاسباتی روش در رفرنس ۷ یافت می شود اما هزینه بار محاسباتی بهینه سازی یک هفته ای همیشه قابل قبول بوده است.

برمبنای ملاحظات قبلی، شیوه ی بهینه سازی بنام XEMS13 درون محیط محاسباتی MATLAB ایجاد شده است. یک فلوچارت از بهینه ساز ایجاد شده بنام XEMS13 در شکل ۲ نشان داده شده است که در آن داده های ورودی روش به سه مقوله تقسیم می شوند:

- ۱- تشریح ساختار کارخانه و دوره ی زمان بندی که بهینه سازی اجرامی شود؛
- ۲- پایگاه داده ی مولفه های حاوی منحنی خصوصیات CHP، بویلرها و غیره؛
- ۳- پروفایل زمان کمیت های دینامیک مثل قیمت انرژی برق، تقاضای کاربر، تولید منابع تجدیدپذیر و غیره.

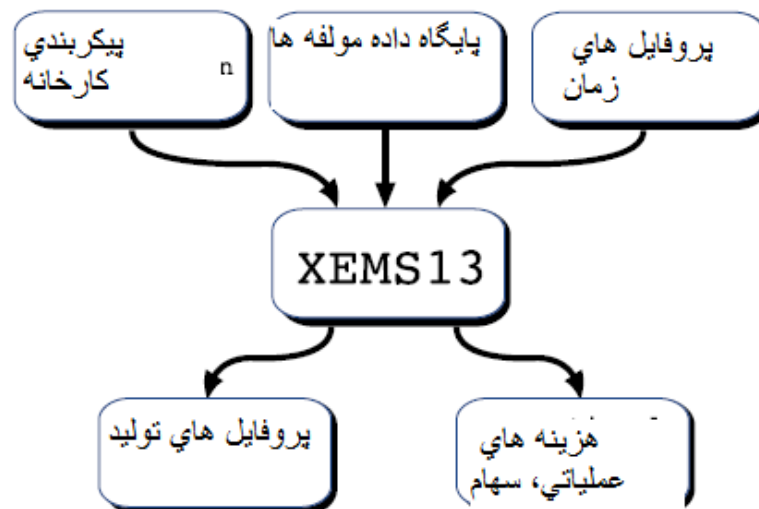
#### ۴- تحلیل بررسی موردی در شمال ایتالیا

روش بهینه سازی قبلاً تشریح شده برای بررسی مورد تست واقعی گرایش ناحیه اعمال شده است. هدف بررسی اعتبارسنجی سیستم کلکتور خورشیدی روی شرایط اقتصادی است.

مورد تست گرمایش مقیاس کوچک ناحیه را با تقاضای گرمایی پیک زمستان اندکی بالاتر از ۴ مگاوات ارائه می کند. سایت با یک CHP با توان برقی اسمی ۱۰۶۴ کیلووات با ضرایب برقی ثابت و گرمایی معادل با  $\eta_p = 0.398$  ،  $\eta_t = 0.460$  (ضریب  $a_0=0$  و  $k_0=0$ ) در (6) و MOT=MST=6h تجهیز می شود. بویلر توان گرمایی اسمی ۵ مگاوات با راندمان ثابت  $\eta_B = 0.92$  دارد. افزوده شدن ذخیره ی گرمایی با حداکثر ظرفیت 2MWh با خود تخلیه ای ۰/۵ درصد در ساعت لحاظ می شود. برای انجام تحلیل، ۳ مورد با افزودن مولفه در یک زمان برای ارزیابی تاثیر اقتصادی اش شبیه سازی و بهینه می شوند. موارد در جدول ۱ خلاصه می شوند.

۳ مورد برمبنای یک ساعت در هر ماه برای کل ۱۲ هفته شبیه سازی می شوند. هر هفته برمبنای زمان ساعتی گسسته می شوند طوریکه تعداد کل ۱۶۸ بازه ی زمانی کسب می شود. در ذیل به ۳ هفته ی ویژه توجه شده است که جنبه های جالب توجهی دارند:

هفته ی زمستان: با بار گرمایی بالا و توان خورشیدی پایین؛  
 هفته ی نیم فصل: با بار گرمایی پایین و توان خورشیدی پایین؛  
 هفته ی تابستانی: با حداقل بار گرمایی و توان خورشیدی بالا.



شکل ۲- فلوجارت شیوه ی بهینه سازی ایجادشده

#### ۱,۴ داده های ورودی

تابش خورشیدی برای هریک از ۱۲ هفته با معادلات (۳) - (۴) و لحاظ کردن سطح کلی ۱۰۰۰ مترمربع کلکتورهای گرمایی محاسبه می شود که حداکثر اندازه ای است که می توان به انگیزه های اقتصادی از دولت ایتالیا دسترسی داشت. زاویه ی سمت نجومی در صفر و زاویه ی شیب تا ۷۰ درجه تنظیم می شود. در شکل ۳، توان خالص ارائه شده با کلکتورهای خورشیدی نمایش داده می شود. تاثیرات ترکیبی زاویه ی شیب و ضریب کاهش مترولوژیکی که در (۴) تعیین شد به حداقل توان تولیدی در هفته ی نیم فصل منجر می شوند. بعلاوه، تغییرات روز به روز توان خروجی منوط به مقادیر مختلف دما در طی روزها هستند. این مقادیر سنجش می شوند و بنابراین ائتلاف کلکتورها را متاثر می کنند که در (۲) تعیین شد.

قیمت فروش انرژی برق در کل پروتال بازار برق ایتالیا برای هریک از ۱۲ هفته قابل دسترس است. حتی اگر تفاوت هایی بین دوره های مختلف سال وجود داشته باشند، تقریباً همه ی روزها ۲ الگوی پیک را با قیمت های بالاتر در اول صبح و اواخر شب نشان می دهند (شکل ۴ را بنگرید). تقاضای گرمایی کل در خروجی کارخانه سنجش می شود و پروفایل زمانی اش به مدت ۳ هفته ی مشخص شده در شکل ۵ نشان داده شده است. پروفایل توان زمستانی با پیک صبحگاهی تقریباً ۴ مگاوات و حداقل مقدار در طی ساعات شب توصیف شده است که تقریباً یک چهارم پیک است. بار نیم فصل با یک پروفایل کم سطح با ۲ پیک روزانه تقریباً ۶ صبح و ۶ عصر توصیف می شود، بار زمستانی در طی روز تقریباً مسطح است.

#### ۲,۴ نتایج بهینه سازی

شیوه ی بهینه سازی برای هریک از هفته های نمونه اعمال می شود و پروفایل های بهینه ی سطوح تولید توان کسب می شوند. سهم انرژی منابع توان مختلف علاوه بر پروفایل های زمانی کسب می شوند و این مقادیر برای ارزیابی بهره برداری از توان گرمایش خورشیدی در شرایط اقتصادی و انرژی استفاده می شوند.

بهینه سازی در دوره ی زمان بندی زمان یک هفته ای و بر مبنای ساعتی اجرائد. در این شرایط، موردی با مولفه های بیشتر یعنی مورد ۳ مستلزم مسئله ای با ۱۵۷۹۵ متغیر کلی است که ۵۰۴ تای آن دوتایی بودند. مسئله بوسیله ی یک شاخه ی استاندارد و حل کننده ی MILP حل می شود. مسئله ۱۱۰۹۲ محدودیت دارد و در کامپیوتر 1.7 GHz i7 در زمان CPU اجرایی شود که

تاحدزیدادی به نوع راه حل مسئله بستگی دارد؛ راه حل بهینه بدون ذخیره یا وقتی این مولفه خیلی استفاده نمی شود، مثلاً در طی دوره ی زمستان در چند ثانیه CPU کسب می شود. در مقابل، هفته های نیم فصل، وقتی سهم ذخیره برای کاهش تابع هدف تعیین کننده است، شاخه و تعداد تکرار محدود شده زیادی می شود. در هر صورت، حداکثر تعداد تکرارها تقریباً ۲۰۰۰۰۰ برای زمان CPU تقریباً ۴۰۰ ثانیه بوده است.

از نقطه نظر نتایج مشخص می شود که: اولویت شیوه ی بهینه سازی در فصل بار گرمایی بالا حفظ دستگاه CHP سوئیچ شده برای کل هفته و استفاده از بویلر برای دنبال کردن تقاضای گرمایی است. پروفایل یک روز از زمان بندی هفته ی زمستان در شکل ۶ گزارش شده است. در این شکل و در اشکال ذیل، سهم منابع متعدد توان بصورت ساعتی، در یک گراف ستونی انباشته نشان داده شده اند. حاصلجمع عبارات تولید با رجوع به معادله ی تعادل (۱۰) باید همیشه معادل با بار گرمایی اما در حضور عبارات ذخیره یا اتلاف باشند. همانطور که مشاهده می شود، نقش گرمایش خورشیدی در مورد زمستان تقریباً قابل اغماض است و ذخیره ی گرمایی در مدیریت سیستم نقش ویژه ای ندارد (شکل ۷ را بنگرید). نقش ذخیره ی انرژی در مورد دوره ی نیم فصل کاملاً متفاوت است. در این صورت، در واقع ذخیره ی انرژی امکان استفاده ی موثر از نقش خورشید را فراهم می کند. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می شود، بهینه ساز برای پراکندگی غالب توان خورشیدی سودمندتر است باتوجه به اینکه تقاضای گرمایی از طریق CHP با اجرای حداقل سطح توانی اش ایفای می شود. در مقابل، استفاده از ذخیره ی گرمایی امکان بهره برداری از انرژی خورشیدی را میسر می کند حتی اگر گاهی اوقات از تقاضای کاربر بزرگتر باشد. در این صورت، انرژی ذخیره شده برای تامین بار در طول شب و تقاضای پیک عصر استفاده می شود که در شکل ۹ نشان داده شده است. بویلر صرفاً برای غلبه بر محدودیت های ظرفیتی ذخیره استفاده می شود که نمی تواند بار را تا سوئیچ صبحگاهی روی CHP تامین کند. نقش مثبت ذخیره برای بهره برداری از سهم خورشیدی در طی تابستان تعیین کننده است. همانطور که در شکل ۱۰ مشخص شده است، بهینه ساز از توان خورشیدی صرفاً در طول بعدازظهر استفاده می کند درحالی که در صبح، به CHP سوئیچ می کند و تقریباً همه ی توان خورشیدی را پراکنده می کند. ذخیره ی گرمایی امکان انباشت انرژی خورشیدی صبحگاهی و کاربرد بعدی آن در بعدازظهر و تمام بار شب را با جلوگیری کامل از سوئیچ روی بویلر فراهم می کند (شکل ۱۱ را بنگرید).

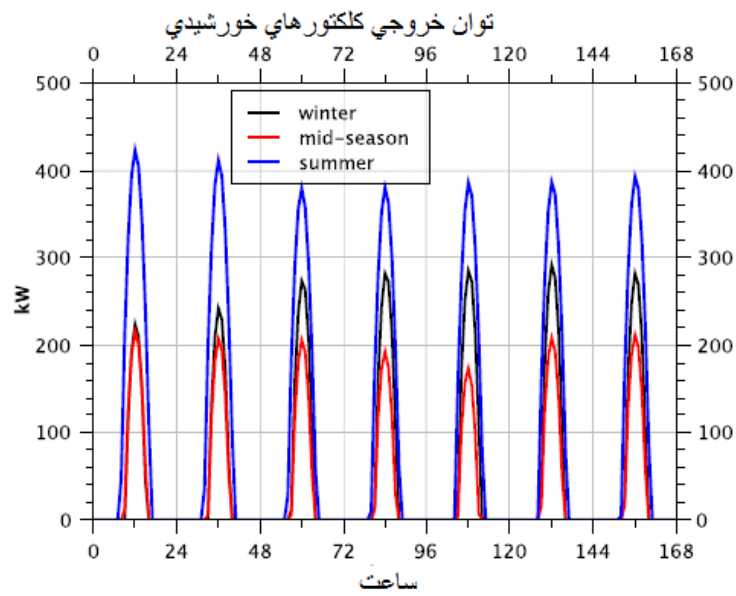
سرانجام سهم توان خورشیدی در کل سال با جمع کردن کلیه ی سهم ها کسب می شود. کارخانه ی خورشیدی بر مبنای اندازه و مقادیر تابش قادر به تامین ۶/۳۳ درصدی بار گرمایی است. در هر صورت باید تاکید شود که این سهم بعلت بهینه سازی اقتصادی نمی تواند داخل کارخانه در مورد ۲ متناسب شود: از چشم انداز اقتصادی در تابستان غالب گرمای خورشیدی پراکنده می شود باتوجه به اینکه اجرای CHP و بهره برداری از عواید ناشی از فروش انرژی برق به لحاظ اقتصادی راحت تر است. در مورد ۲، سهم گرمایش خورشیدی بطور موثر استفاده شده در کل سال به ۲/۶۳ درصد محدود می شود درحالی که بخش الباقی پراکنده می شود. در مورد ۳، استفاده از ذخیره ی گرمایی امکان بهره برداری از کل گرمایش خورشیدی در بالابردن سهم آن تا حداکثر محتمل ۶/۳۳ درصد نقش دارد.

هزینه ی کل مدیریت سالانه ی کارخانه از چشم انداز اقتصادی در هر ۳ مورد مطروحه محاسبه می شود و لذا مقایسه ی مزایای سهم خورشیدی مشخص می شود. افزودن گرمایش خورشیدی صرفاً بدون ذخیره ی گرمایی (مورد ۲) امکان کاهش هزینه های اجرایی تقریباً ۴/۸ درصد را نسبت به مورد همزایی فراهم می کند. افزودن ذخیره ی گرمایی (مورد ۳) کاهش مهمتر هزینه های عملیات تا ۱۲/۵ درصد را به همراه دارد.

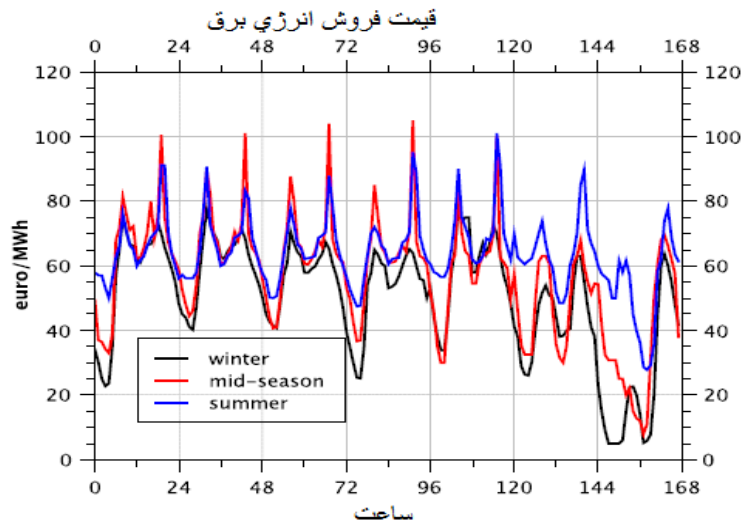


جدول ۱- ساختار موارد تست

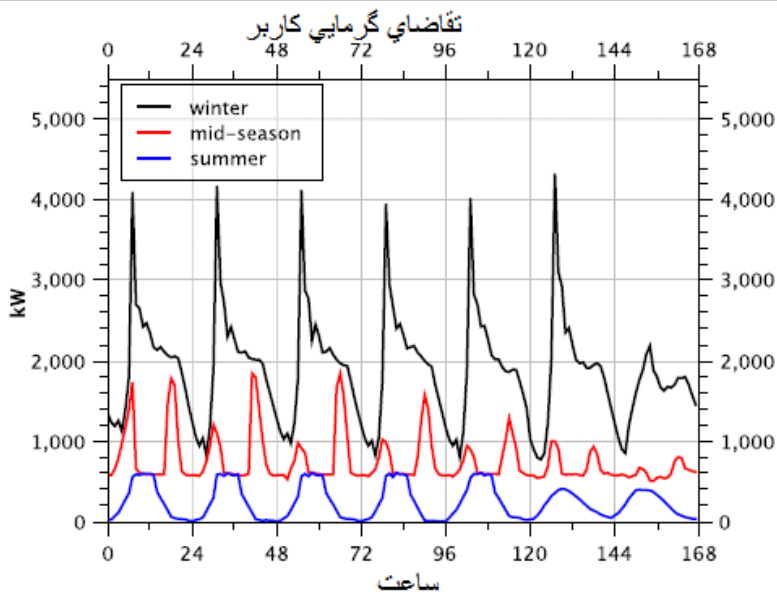
مورد	بویلر	CHP	گرمایش خورشیدی	ذخیره گرمایی
1	بله	بله	خیر	خیر
2	بله	بله	بله	خیر
3	بله	بله	بله	بله



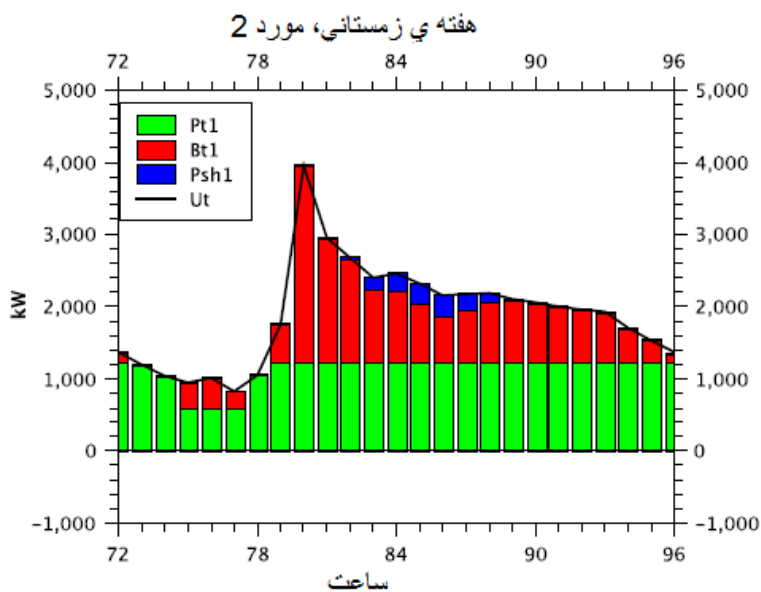
شکل ۳- پروفایل زمان گرمایش خورشیدی در ۳ هفته ی ذکرشده در کل متن



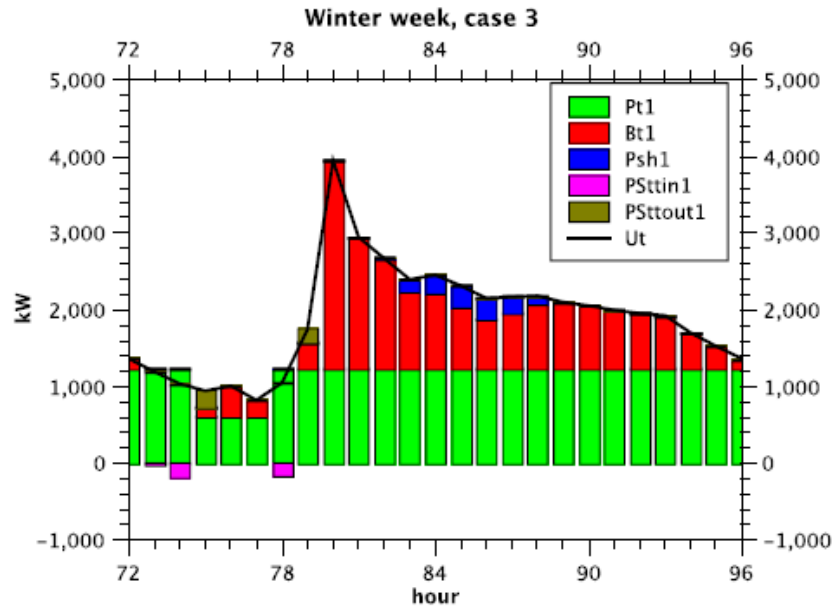
شکل ۴- پروفایل زمان قیمت های فروش برق در ۳ هفته ی ذکرشده در کل متن



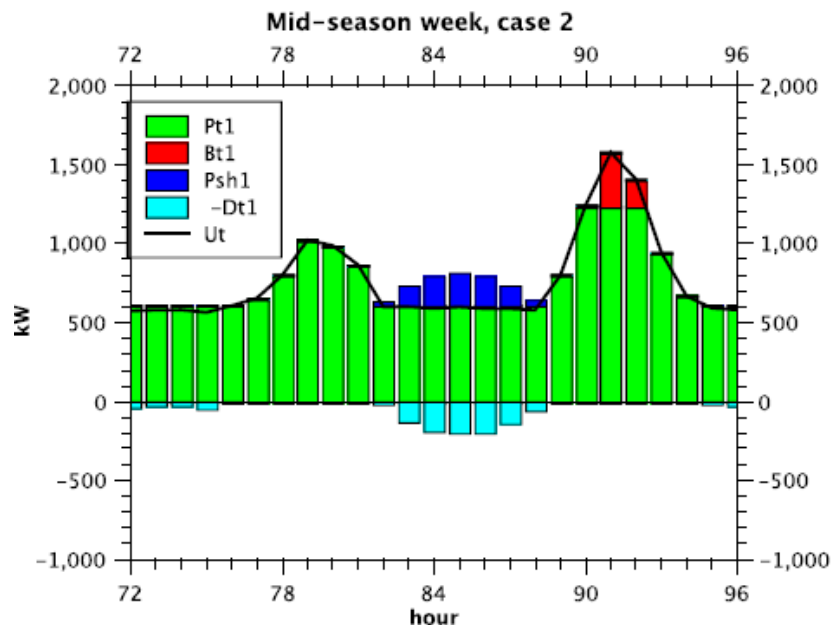
شکل ۵- تقاضای گرمایی کاربر در طی ۳ هفته ی ذکرشده در کل متن



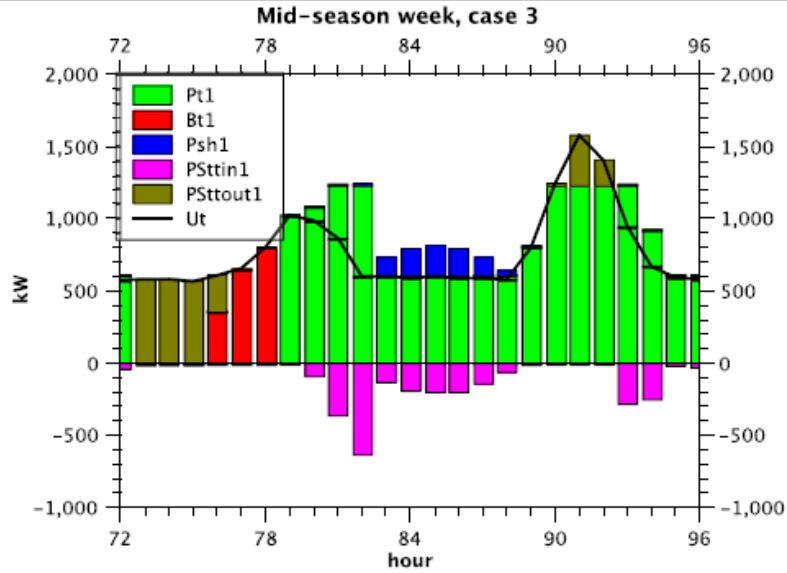
شکل ۶- پروفایل های بهینه:  $P_{T1}$  CHF، بویلر Bt1، گرمایش خورشیدی، Ut بار گرمایی.



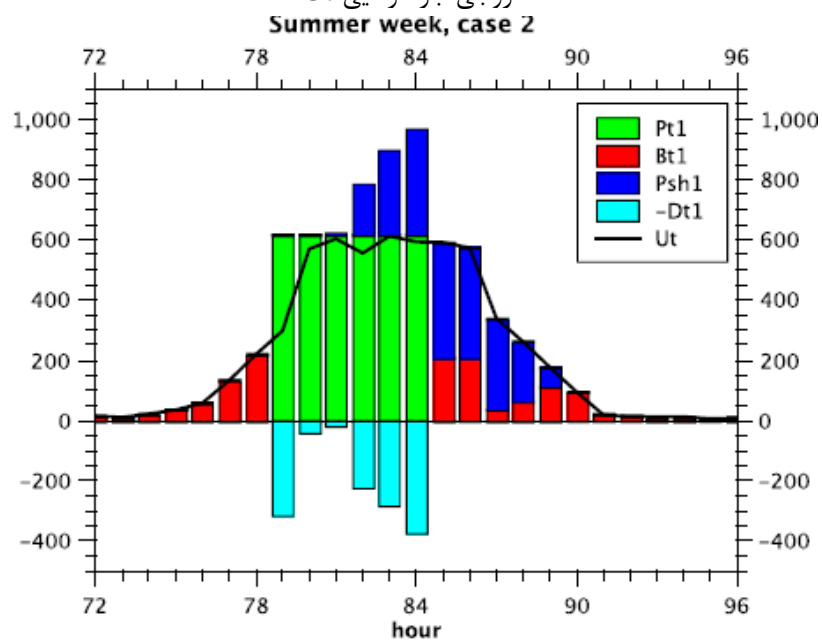
شکل ۷- پروفایل های بهینه: Pt1 CHP، بویلر Bt1، گرمایش خورشیدی، PSttin1، PSttout1 ورودی ذخیره و توان خروجی، بار گرمایی Ut.



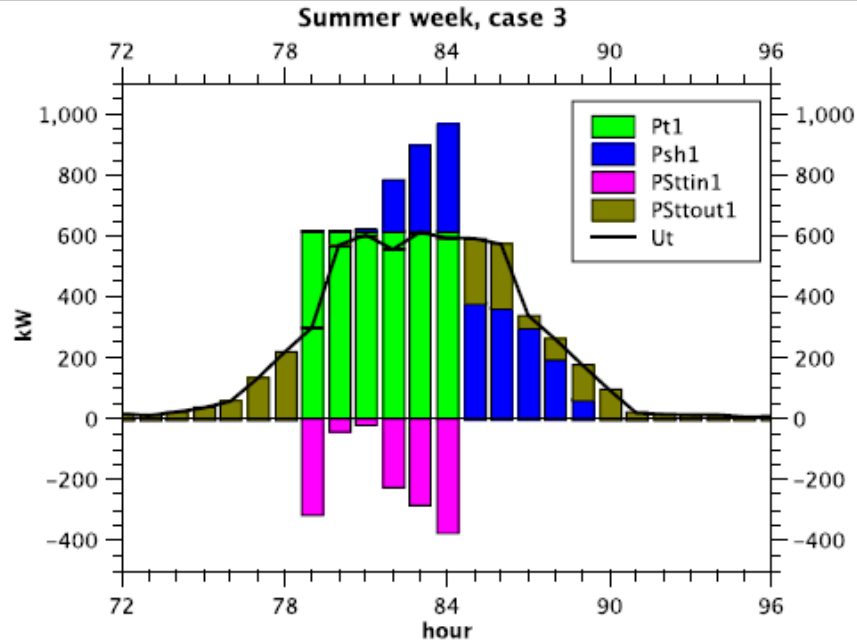
شکل ۸- پروفایل های بهینه: Pt1 CHP، بویلر Bt1، گرمایش خورشیدی، پراکندگی Dt1، بار گرمایی Ut.



شکل ۹- پروفایل های بهینه، Pt1 CHP، بویلر Bt1، گرمایش خورشیدی، Psh1، Psttin1، ورودی ذخیره و توان خروجی، بار گرمایی Ut.



شکل ۱۰- پروفایل های بهینه: Pt1 CHP، بویلر Bt1، گرمایش خورشیدی، Dt1 پراکندگی، Ut بار گرمایی.



شکل ۱۱- پروفایل های بهینه: Pt1 CHP، Bt1 بویلر، Psh1 گرمایش خورشیدی، Dt1 پراکندگی، Ut بار گرمایی.

## ۵- نتیجه گیری ها

یک روش بهینه سازی برای کاهش هزینه های مدیریت توپی انرژی تامین کننده ی شبکه ی گرمایش ناحیه ایجاد شده است. در این مقاله، کاربرد روش برای ارزیابی ورودی های گرمایش خورشیدی ارائه و بحث شده اند. مدل سازی خروجی توان گرمایش خورشیدی با در نظر گرفتن عمده پدیده هایی رسیدگی شده است که توان تولیدی و اتلاف گرمایش کلکتورهای خورشیدی گرمایی را متاثر می کنند. خروجی توان خورشیدی داخل شیوه ی بهینه سازی با امکان تحلیل یک شبکه ی گرمایش کوچک ناحیه ای بر مبنای هفتگی در گسسته سازی ساعتی جای داده شده است.

کد بهینه سازی دارای عملکردهای محاسباتی است که به طراحان امکان ارزیابی عملکردهای سیستم را در زمان منطقی و بهره برداری از اندازه ها و پیکربندی های مختلف کارخانه را می دهد. در نتیجه، شبیه سازی هزینه های مدیریت بهینه ی کارخانه می تواند برای ارزیابی سهم گرمای ناشی از منابع مختلف و مقایسه ی این مقادیر با مقادیر تعیین شده در بخشنامه ی اروپایی 2012/27 برای ارزیابی سوددهی مالی سیستم خورشیدی و ارزیابی مقایسه ای راه حل های مختلف از نظر زمان های بازپرداخت استفاده شود.

وقتی انرژی گرمایی هزینه ای حاشیه ای تقریباً صفر بتواند جایگزین کاربرد بویلرها شود، امکان مشخص کردن مزایای ورودی های خورشیدی بالاخص برای کاهش هزینه های مدیریت در طی دوره های نیم فصل و تابستان را فراهم می کند. حتی اگر نتایج روش در یک مورد تست نشان داده باشند، نقش ایفا شده توسط ذخیره ی انرژی گرمایی تعیین کننده ظاهر می شود. در واقع، توان تولیدی بواسطه ی سیستم گرمایش خورشیدی بالاخص در طی فصل تابستان بطور موثر با افزایش سهم گرمایش تجدیدپذیر استفاده می شود. نتایج کسب شده امکان تعیین بهترین اندازه ی ذخیره ی انرژی گرمایی را با افزایش بهره برداری از منبع انرژی خورشیدی میسر می کند.

## ضمیمه A

راندمان اتلاف صفر برای کلکتورهای مسطح در (۱) به شرح ذیل بیان می شود:

$$\eta_0 = F' \cdot (\tau\alpha)_{en} \frac{K_{\theta b} G_b + K_{\theta d} G_d}{G} \quad (A.1)$$

تابش مستقیم با رجوع به عبارت تابش اولین شرط است:

$$G_b = G_{bn} \cos \theta \quad (A.2)$$

درحالیکه تابش انتشاری حاصلجمع دومین (انتشار جوی) و سومین عبارت (تابش زمینی) است:

$$G_d = G_{dh} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho G_{th} \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (A.3)$$

ناظم زاویه ی برخورد برای تابش مستقیم همانند [15] مدل سازی می شود:

$$K_{\theta b} = 1 - b_0 \left( \frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (A.4)$$

معمولاً برگه داده های کلکتور  $K_{\theta b}$  در زاویه ی برخورد (مشخصاً ۱۵ درجه) را گزارش می کنند، بنابراین ارزیابی ضریب  $b_0$  (مقدار مشخص: 0.1) محتمل است.

باتوجه به اینکه تابش نوع انتشاری از همه ی جهات می آید، ناظم زاویه ی برخورد کسب می شود با انتگرال گیری  $K_{\theta b}$  نسبت به جو:

$$K_{\theta d} = 1 - b_0 \ln \frac{b_0 + 1}{b_0} \quad (A.5)$$

بالین فرض که تابش مستقیم ۸۵ درصد تابش جهانی (آسمان کاملاً صاف در یک روز تابستانی، همانند تست حالت پایای EN12975) است، ارسال موثر- حاصلضرب ضریب جذب به شرح ذیل تخمین زده می شود:

$$F' \cdot (\tau\alpha)_{en} = \frac{\eta_0}{0.85 \cdot K_{\theta b}(15^\circ) + 0.15 \cdot K_{\theta d}} \quad (A.6)$$

#### واحدها و نامگذاری

a1: ضرایب درجه اول اتلاف گرمای کلکتور (W/Km<sup>2</sup>)

a2: ضرایب درجه دوم اتلاف گرمای کلکتور (W/Km<sup>2</sup>)

Bc(ti): توان ورودی بویلر (kW)

c: تابع هزینه ی عملیاتی

cf: میانگین تامین قیمت گاز طبیعی CHP

cb: میانگین تامین قیمت گاز طبیعی بویلر

cs: قیمت برق فروخته شده به شبکه

Dt: پراکندگی گرمایی (kW)

$F'(\tau\alpha)_{en}$  ترانسپیتانس موثر- حاصلضرب ضریب جذب با برخورد نرمال (p.u)

G, G0: تابش جهانی روی صفحه ی کلکتور (W/m<sup>2</sup>)

Gbn: تابش مستقیم روی سطح عمود بر پرتوی خورشیدی (W/m<sup>2</sup>)

Gdh: تابش انتشاری روی سطح افقی (W/m<sup>2</sup>)

Gth: تابش کلی (مستقیم و انتشاری) روی سطح افقی (W/m<sup>2</sup>)

Km: ضریب مترولوژیکی

$K_{\theta b}$ : ناظم زاویه ی برخورد برای تابش مستقیم  
 $K_{\theta d}$ : ناظم زاویه ی برخورد برای تابش از نوع انتشاری  
 MOT: حداقل مدت دار (h)  
 MST: حداقل زمان تعطیلی (h)  
 N: تعداد بازه های زمانی در دوره ی زمان بندی  
 $P_e(t_i)$ : توان برقی تولید شده از طریق CHP (kW)  
 $P_g(t_i)$ : توان گرمایی تولید شده از طریق CHP (kW)  
 $P_c(t_i)$ : توان ورودی CHP، (kW)  
 $P_s(t_i)$ : توان گرمایی ورودی ذخیره (kW)  
 S: سطح کلکتور (m<sup>2</sup>)  
 $S_d(t_i)$ : مقدار انرژی ذخیره شده (kWh)  
 Ta: دمای محیط (K)  
 Tf: میانگین دمای ورودی/ خروجی سیال کلکتور (K)  
 Ut: تقاضای توان گرمایی کاربرد (kW)  
 $\beta$ : زاویه ی کجی کلکتور (rad)  
 $\eta$ : راندمان کلکتور  
 $\eta_0$ : راندمان اتلاف صفر کلکتور (راندمان نوری)  
 $\eta_e$ : راندمان برقی CHP  
 $\eta_b$ : راندمان بویلر  
 $\eta_d$ : راندمان ذخیره در بازه ی مدت دار  
 $\Delta t$ : طول زمانی هر بازه در دوره ی زمان بندی (h)  
 $\delta(t_i)$ : متغیر دوتایی نشان دهنده ی وضعیت خاموش/ روشن CHP  
 p: ضریب انعکاس زمین  
 $\theta$ : زاویه ی برخورد بین پرتوی خورشیدی و عمود بر کلکتور (rad)

منابع:

- [1] European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling. Strategic research and innovation agenda for renewable heating and cooling. Publications Office of the European Union; 2013.
- [2] Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency. URL: <http://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/ALL/?uri=OJ:L:2012:315:TOC>.
- [3] Kantola M, Saari A. Renewable vs. traditional energy management solutions a Finnish hospital facility case. *Renew Energy* 2013;57:539e45.
- [4] Arroyo J, Conejo A. Optimal response of a thermal unit to an electricity spot market. *IEEE Trans Power Syst* 2000;15(3):1098e104.
- [5] Lund H, Andersen A. Optimal design of small CHP plants in a market with fluctuating electricity prices. *Energy Convers Manag* 2005;46:893e904.

- [6] Henning D, Amiri S, Holmgren K. Modelling and optimisation of electricity, steam and district heating production for a local Swedish utility. *Eur J Oper Res* 2006;175:1224e47.
- [7] Carpaneto E, Cavallero C, Freschi F, Repetto M. Immune procedure for optimal scheduling of complex energy systems. In: *Lecture notes in computer science (including subseries lecture notes in artificial intelligence and lecture notes in bioinformatics)* 4163 LNCS; 2006. p. 309e20.
- [8] Geidl M, Andersson G. Optimal power flow of multiple energy carriers. *IEEE Trans Power Syst* 2007;22(1):145e55.
- [9] Canova A, Cavallero C, Freschi F, Giaccone L, Repetto M, Tartaglia M. Comparative economical analysis of a small scale trigenerative plant: a case study. 2007. p. 1456e9.
- [10] Canova A, Cavallero C, Freschi F, Giaccone L, Repetto M, Tartaglia M. Optimal energy management. *IEEE Ind Appl Mag* 2009;15(2):62e5.
- [11] Dicorato M, Forte G, Trovato M. Environmental-constrained energy planning using energy-efficiency and distributed-generation facilities. *Renew Energy* 2008;33:1297e313.