

# بهینه‌سازی چندمعیاره بهره‌برداری از سیستم‌های تولید هم‌زمان برق، گرما و برودت در یک ریزشبکه توزیع

فرشاد امیری و مهرداد ستایش‌نظر

مختلف و با حفظ قیود تعیین شوند. برای بهینه‌سازی مسئله بهره‌برداری بهینه سیستم تولید هم‌زمان، معیارهای عملکرد به عنوان توابع هدف در نظر گرفته می‌شوند. مطابق مقالات ارائه‌شده در این زمینه، معیارهایی مانند بازدهی تبدیل انرژی و اثرات زیست‌محیطی به طور هم‌زمان در نظر گرفته شده‌اند و معیارهای صرفه‌جویی در مصرف انرژی اولیه یا مصرف سوخت و کاهش انتشار آلاینده‌ها به معیار اصلی که صرفه‌جویی در هزینه است اضافه می‌شوند [۳] و [۴]. در [۵] معیار عملکرد مطمئن، اساس تحلیل بهره‌برداری بهینه سیستم تولید هم‌زمان انتخاب شده است و روش ارزیابی اقتصادی و فنی آن، مبتنی بر مدیریت تقاضای حرارتی و تقاضای الکتریکی است. در [۶] یک راهبرد مدیریت ریسک برای برنامه‌ریزی تأمین بار الکتریکی و حرارتی در شرایط عدم اطمینان متغیرهای تصمیم‌گیری ارائه گردیده که مدل کنترل پیش‌بینی برای کاهش ریسک ارائه شده است. در [۷] راهبرد بهره‌برداری ترکیبی بار حرارت-برق (HETS)<sup>۵</sup> به عنوان یک راهکار مناسب کاهش مصرف انرژی اولیه (PEC)<sup>۶</sup>، هزینه بهره‌برداری (COST)<sup>۷</sup> و انتشار کربن‌دی‌اکسید (CDE)<sup>۸</sup> معرفی شده است. در [۸] مسئله بهره‌برداری بهینه سیستم تولید هم‌زمان برق، گرما و برودت به صورت یک برنامه خطی برای حداقل‌سازی هزینه‌های تولید انرژی و هزینه‌های تولید گازهای گلخانه‌ای مدل‌سازی شده است. مرجع [۹] از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های تولید هم‌زمان استفاده کرده که مسئله را با روش بهینه‌سازی و مبتنی بر ویژگی‌های عملکرد تجهیزات تحلیل کرده است. در [۱۰] یک مدل برنامه غیر خطی عدد مختلط، جهت بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های تولید هم‌زمان و با توجه به معیارهای صرفه‌جویی در انرژی و کاهش هزینه بهره‌برداری، ارائه شده است که ابتدا عملکرد سیستم را مطابق معیار صرفه‌جویی انرژی، بهینه‌سازی می‌کند و سپس نتایج را برای بهینه‌کردن معیار دوم و کاهش هزینه به کار می‌برد. در مراجع فوق، بهینه‌سازی‌ها برای سیستم تولید هم‌زمان و بدون لحاظ نمودن ساختار ریزشبکه است و تفاوت اصلی این تحقیق با مراجع فوق، ارائه یک چارچوب برای تعیین مقدار تولید بهینه و نیز تعیین راهبرد بهینه بهره‌برداری از سیستم‌های تولید هم‌زمان برق، گرما و برودت در یک ریزشبکه توزیع است.

در این مقاله، مطالعات بهینه‌سازی برای یک ریزشبکه توزیع با مشخصات ارائه‌شده در [۱۱] انجام شده است. بهینه‌سازی با استفاده از تابع هزینه هر کدام از سیستم‌ها انجام شده و برنامه‌ریزی بهینه تولید این ریزشبکه، تعیین شده است. این برنامه‌ریزی بهینه تولید برای تبادل برق بین شین‌های ریزشبکه انجام می‌شود و ارتباط حرارتی بین شین‌ها وجود

چکیده: استفاده بهینه از انرژی و ممانعت از هدررفت آن، یکی از اهداف مهم در رسیدن به توسعه پایدار هر کشور است. در این راستا از فناوری‌های تولید هم‌زمان برق و حرارت که برق و یا توان مکانیکی را تولید نموده و حرارت اضافی را برای مصارف مختلف از جمله گرمایش و سرمایش بازیافت می‌کنند، استفاده می‌شود. این مقاله چارچوبی برای بهره‌برداری از سیستم‌های تولید هم‌زمان برق، گرما و برودت در یک ریزشبکه توزیع، ارائه می‌دهد و مقدار تولید بهینه هر سیستم را تعیین می‌نماید. ابتدا با استفاده از توابع هزینه سیستم تولید هم‌زمان، برنامه‌ریزی تولید بهینه برای سیستم‌ها صورت می‌گیرد و در این برنامه‌ریزی تولید، تلفات ریزشبکه هم تعیین می‌گردد. سپس با مشخص شدن مشارکت هر کدام از سیستم‌ها در تولید برق ریزشبکه، راهبرد بهره‌برداری بهینه سیستم‌ها تعیین می‌شود. هدف اصلی ارائه این روش، بهینه‌سازی معیار عملکرد جامع سیستم‌های تولید هم‌زمان است. معیارهای مورد بررسی در این مقاله شامل مصرف انرژی اولیه، انتشار آلاینده‌ها و هزینه بهره‌برداری است. مطالعات عددی برای یک ریزشبکه ۹ شینه ارائه شده و نتایج آن با مقالات مرجع مقایسه گردیده و مزیت روش پیشنهادی بررسی شده است.

کلیدواژه: برنامه‌ریزی بهینه تولید، تعیین راهبرد بهینه، ریزشبکه توزیع، سیستم‌های تولید هم‌زمان، هزینه بهره‌برداری.

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر سیستم‌های تولید هم‌زمان برق، گرما و برودت (CCHP)<sup>۱</sup> در سراسر دنیا مورد توجه زیادی واقع شده است. سیستم تولید هم‌زمان با استفاده مفید از حرارت هدررفته، می‌تواند از نظر اقتصادی، بازدهی انرژی و شرایط زیست‌محیطی نسبت به سیستم‌های تولید جداگانه (SP)<sup>۲</sup> انرژی بهتر عمل کند. حالت‌های بهره‌برداری اثر مستقیمی بر روی عملکرد سیستم تولید هم‌زمان دارند [۱]. بر این اساس، تنظیم به موقع حالت‌های بهره‌برداری و طراحی یک راهبرد بهره‌برداری مطلوب بسیار مهم خواهد بود. حالت‌های بهره‌برداری سیستم‌های تولید هم‌زمان، تبعیت از بار الکتریکی (FEL)<sup>۳</sup> و تبعیت از بار حرارتی (FTL)<sup>۴</sup> است [۲]. در شرایط بهره‌برداری، هر یک از این حالت‌ها می‌توانند به عنوان راهبرد بهره‌برداری تلقی گردند و این راهبردها با استفاده از بهینه‌سازی معیارهای

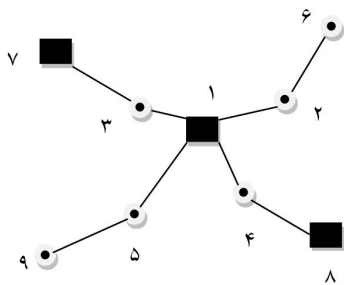
این مقاله در تاریخ ۱۶ فروردین ماه ۱۳۹۶ دریافت و در تاریخ ۱۵ فروردین ماه ۱۳۹۶ بازنگری شد.

فرشاد امیری، دانشکده مهندسی برق، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، (email: Farshadamiri1366@gmail.com).

مهرداد ستایش‌نظر، دانشکده مهندسی برق، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، (email: m\_setayesh@sbu.ac.ir).

5. Hybrid Electrical and Thermal System
6. Primary Energy Consumption
7. Operation Cost
8. Carbon Dioxide Emissions

1. Combined Cool, Heat, and Power
2. Separate Production
3. Following the Electric Load
4. Following the Thermal Load



شکل ۳: ریزشبهه با اضافه‌شدن سیستم‌های تولید هم‌زمان برق، گرما و برودت.

### ۲-۳ ریزشبهه توزیع

ریزشبهه مورد استفاده در این مقاله، یک سیستم توزیع ۹ شینه است که در شکل ۳ آمده است [۱۱]. در ریزشبهه، ۳ سیستم تولید هم‌زمان برق، گرما و برودت در شین‌های ۱، ۷ و ۸ قرار داده شده که هدف بهینه‌سازی، برنامه‌ریزی بهینه تولید و تعیین راهبرد بهینه بهره‌برداری سیستم‌های تولید هم‌زمان است.

### ۳- تشریح معیارهای مورد بررسی در حالت‌های تولید جداگانه و تولید هم‌زمان FEL و FTL

برای عملکرد سیستم‌های تولید هم‌زمان معیارهای متعددی اهمیت دارند. از این معیارها می‌توان برای تعیین بهترین راهبرد عملکرد، بهره برد [۱۳].

#### ۳-۱ مصرف انرژی اولیه

$$PEC_{SP} = F_{boiler}^{SP} K_f + E_{grid}^{SP} K_e \quad (1)$$

$$PEC_E = F_{m-E} K_f \quad (2)$$

$$PEC_T = E_{grid} K_e + F_{m-T} K_f \quad (3)$$

که  $PEC_{SP}$ ،  $PEC_E$  و  $PEC_T$  به ترتیب مصرف سوخت اولیه در زمان بهره‌برداری از سیستم تولید هم‌زمان در حالت تولید جداگانه، حالت FEL و حالت FTL هستند. در (۱)، سوخت مورد نیاز بویلر برای تأمین حرارت است و  $K_f$  ضریب تبدیل سوخت به انرژی اولیه است. همچنین  $E_{grid}$  برق خریداری شده از شبکه سراسری برای تأمین برق مورد نیاز و  $K_e$  ضریب تبدیل برق به واحد انرژی اولیه است. در (۲)، سوخت  $F_{m-E}$  کل مورد نیاز برای بهره‌برداری سیستم تولید هم‌زمان در حالت FEL است. در (۳) سوخت کل مورد نیاز برای بهره‌برداری سیستم تولید هم‌زمان در حالت FTL است و  $E_{grid}$  برق مورد نیاز در حالت FTL است که در صورت لزوم از شبکه خریداری می‌شود.

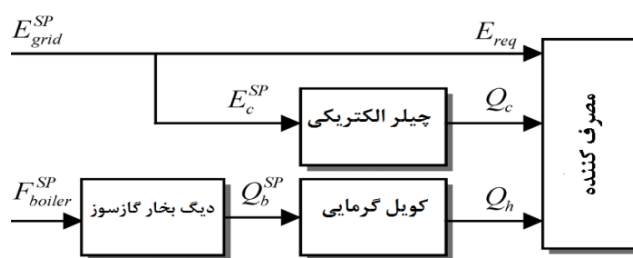
#### ۳-۲ انتشار کربن دی‌اکسید

$$CDE_{SP} = F_{boiler}^{SP} \mu_f + E_{grid}^{SP} \mu_e \quad (4)$$

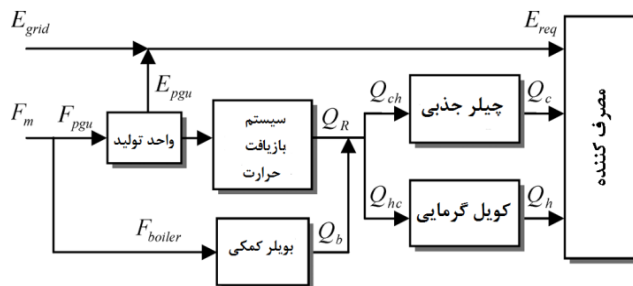
$$CDE_E = (F_{pgu} + F_{boiler}) \mu_f \quad (5)$$

$$CDE_T = E_{grid} \mu_e + F_{m-T} \mu_f \quad (6)$$

که  $CDE_{SP}$ ،  $CDE_E$  و  $CDE_T$  به ترتیب، انتشار کربن دی‌اکسید در زمان بهره‌برداری از سیستم تولید هم‌زمان در حالت تولید جداگانه، حالت FEL و حالت FTL هستند. در (۴)  $\mu_e$  و  $\mu_f$  به ترتیب ضرایب تبدیل سوخت و برق به کربن دی‌اکسید و در (۵) سوخت مورد نیاز واحد تولید سیستم است.



شکل ۱: نمودار جریان انرژی به روش معمولی.



شکل ۲: نمودار جریان انرژی به روش تولید هم‌زمان.

ندارد. بدین صورت که سیستم‌های تولید هم‌زمان با توجه به تابع هزینه خود، سهمی از تولید کل برق مصرفی ریزشبهه را به صورت بهینه، عهده‌دار می‌شوند. سپس در مرحله دوم با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، راهبرد بهره‌برداری بهینه سیستم‌های تولید هم‌زمان تعیین خواهد شد. الگوریتم پیشنهادی، معیار عملکرد جامع<sup>۱</sup> (UPC) سیستم‌های تولید هم‌زمان است که انرژی الکتریکی همه شین‌های ریزشبهه را تأمین می‌کند. لازم به ذکر می‌باشد که از نرم‌افزارهای Matlab و GAMS در شبیه‌سازی استفاده شده است.

### ۲- مدل‌سازی سیستم‌ها

#### ۲-۱ مدل سیستم تولید جداگانه

جریان انرژی در سیستم تولید جداگانه برای تأمین بار الکتریکی، حرارتی و برودتی در شکل ۱ نشان داده شده است [۱۲]. یک چیلر الکتریکی برای تأمین بار برودتی سیستم در نظر گرفته شده و حرارت خروجی از دیگ بخار جهت تأمین بار حرارتی استفاده می‌شود. برق مورد نیاز چیلر الکتریکی و نیاز مصرف‌کننده هم از شبکه برق سراسری تأمین می‌شود. در شکل ۱،  $E_{grid}$  برق مورد نیاز از شبکه است.  $E_c$  و  $E_{req}$  برق مورد نیاز مصرف‌کننده (تجهیزات و روشنایی) و برق دریافتی توسط چیلر الکتریکی در روش تولید جداگانه است.  $Q_c$  و  $Q_h$  به ترتیب سرمای خروجی از چیلر و حرارت خروجی از کویل گرمایی هستند. سوخت مورد نیاز برای دیگ بخار کمکی گازسوز، جهت تأمین حرارت مورد نیاز است.

#### ۲-۲ مدل سیستم تولید هم‌زمان برق، گرما و برودت

مدل سیستم تولید هم‌زمان برق، گرما و برودت در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۲]. این سیستم تولید هم‌زمان شامل یک واحد تولید برق (توربین گازی)، یک سیستم بازیافت حرارت، یک دیگ بخار کمکی، یک چیلر جذبی و کویل گرمایی است.

$$COST_{CCHP} = E_{pgu} \times \left( \frac{1}{\eta_{pgu}} - \frac{(1-\eta_{pgu})\eta_{rec}}{\eta_{pgu}\eta_{boiler}} \right) \times [C_f + \mu_f C_c] + \frac{Q_{req}}{3\eta_{boiler}} \times [C_f + \mu_f C_c] \quad (12)$$

### ۴-۲ تعیین راهبرد بهره‌برداری بهینه

با توجه به برنامه‌ریزی تولید بهینه هر کدام از سیستم‌های تولید هم‌زمان در مرحله قبل، راهبرد بهینه بهره‌برداری با توجه به معیار عملکرد جامع برای هر سیستم و این بار با توجه به تولید جدید هر سیستم، تعیین می‌شود.

### ۴-۲-۱ معیار عملکرد جامع

این معیار همه معیارهای مذکور را با ضرایب وزنی در بر می‌گیرد و معیار عملکرد جامع نامیده می‌شود و هزینه بهره‌برداری، انتشار آلودگی کربن‌دی‌اکسید و مصرف انرژی اولیه را حداقل می‌سازد. ضرایب وزنی را با توجه به روش‌های وزن‌دهی یکسان که در بسیاری از مسایل تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار می‌گیرد، به طور مساوی بین سه معیار مذکور تقسیم می‌کنیم [۱۴]

$$UPC = W_1 \frac{PEC_{CCHP}}{PEC_{SP}} + W_2 \frac{CDE_{CCHP}}{CDE_{SP}} + W_3 \frac{COST_{CCHP}}{COST_{SP}} \quad (13)$$

$$W_1 + W_2 + W_3 = 1$$

الگوریتم تعیین راهبرد بهینه برای سیستم‌های تولید هم‌زمان از مقایسه معیار عملکرد جامع به صورت (۱۴) در ۲ حالت FEL و FTL عمل می‌کند

$$UPC_E - UPC_T = \frac{1}{3} \left( \frac{PEC_E - PEC_T}{PEC_{SP}} + \frac{CDE_E - CDE_T}{CDE_{SP}} + \frac{COST_E - COST_T}{COST_{SP}} \right) \quad (14)$$

اگر در دو حالت FEL و FTL ارتباط برق تولیدی توسط سیستم تولید هم‌زمان و حرارت بازیافتی در واحد بازیافت حرارت به صورت (۱۵) در نظر گرفته شود، به یک نسبت برق به حرارت با عنوان ضریب  $K$  می‌توان رسید

$$E_{pgu} = \frac{\eta_{pgu}}{\eta_{rec}(1-\eta_{pgu})} Q_R = K Q_R \quad (15)$$

پس با توجه به (۱۵)، برق تولیدی توسط سیستم تولید هم‌زمان می‌تواند تابعی خطی بر حسب حرارت بازیافتی باشد. اگر سیستم تولید هم‌زمان با بالاترین بازده از این نسبت در نظر گرفته شود، ارتباط برق مصرف‌کننده با حرارت مصرف‌کننده نیز به صورت (۱۶) خواهد شد

$$E_{req} = \frac{\eta_{pgu}}{\eta_{rec}(1-\eta_{pgu})} Q_{req} = K Q_{req} \quad (16)$$

در این صورت اگر تعادل تقاضاهای برق و حرارت بر هم بخورد، شرایط مذکور باید در دو حالت  $E_{req} \geq K Q_{req}$  و  $E_{req} < K Q_{req}$  مورد بررسی قرار گیرد.

### ۴-۲-۲ شرایط $E_{req} \geq K Q_{req}$

در این حالت، اگر هر کدام از راهبردهای بهره‌برداری انتخاب شود، رابطه‌های زیر برای تحلیل مدل‌سازی معیارها، مورد بررسی قرار خواهد گرفت

### ۳-۳ هزینه بهره‌برداری

$$COST_{SP} = F_{boiler}^{SP} C_f + F_{boiler}^{SP} \mu_f C_c + E_{grid}^{SP} C_e \quad (7)$$

$$COST_E = F_{m-E} C_f + F_{m-E} \mu_f C_c \quad (8)$$

$$COST_T = E_{grid} C_e + F_{m-T} C_f + F_{m-T} \mu_f C_c - E_{excess} C_s \quad (9)$$

در (۷)  $C_f$ ،  $C_c$  و  $C_e$  به ترتیب قیمت سوخت، انتشار کربن‌دی‌اکسید و برق در شبکه مورد نظر و  $COST_{SP}$ ،  $COST_E$  و  $COST_T$  به ترتیب هزینه‌های بهره‌برداری در حالت‌های تولید جداگانه، حالت FEL و حالت FTL هستند. در (۹) مقدار برق اضافی سیستم تولید هم‌زمان است که در صورت فروش برق به شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد و  $C_s$  قیمت فروش برق از سیستم به شبکه سراسری است. در صورتی که در شبکه مورد بررسی، فروش برق برای سیستم تولید هم‌زمان امکان‌پذیر نباشد،  $C_s = 0$  می‌شود.

### ۴- برنامه‌ریزی تولید و تعیین راهبرد بهره‌برداری بهینه

#### ۴-۱ برنامه‌ریزی تولید بهینه در ریزشبکه

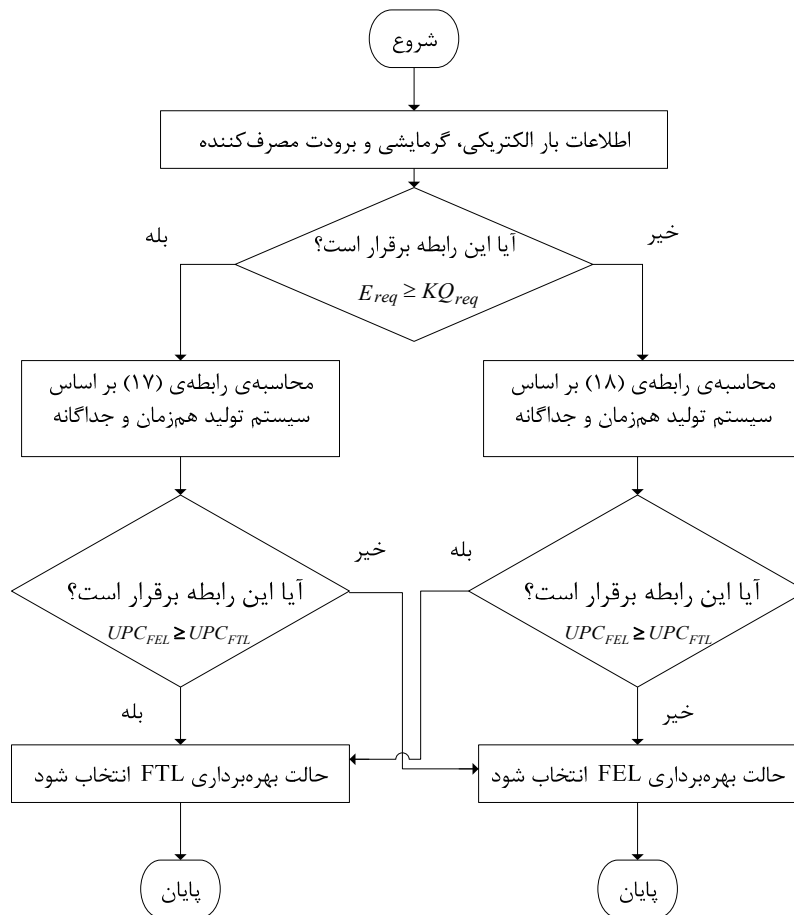
پس از برنامه‌ریزی تولید بهینه، سهم تولید و مشارکت هر سیستم در تولید الکتریسیته کل با در نظر گرفتن تلفات، مشخص شده که این کار با استفاده از تابع هزینه سیستم‌ها انجام می‌گردد. پس از تعیین سهم بهینه تولید هر سیستم تولید هم‌زمان، با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی چندمعیاره، نوع راهبرد بهره‌برداری هر سیستم مشخص می‌شود.

برای برنامه‌ریزی تولید بهینه، از روش لاندبا در نظر گرفتن تلفات در ریزشبکه از (۱۰) که به کرون معروف است، استفاده شده است. ضرایب  $B$ ، ضرایب تلفات نامیده می‌شوند

$$E_L = \sum_{i=1}^{n_g} \sum_{j=1}^{n_g} E_i B_{ij} E_j + \sum_{i=1}^{n_g} B_{.i} E_i + B_{..} \quad (10)$$

با توجه به این که در ریزشبکه مورد نظر فقط انتقال الکتریکی صورت می‌گیرد و هیچ گونه انتقال حرارتی وجود ندارد، برای برنامه‌ریزی تولید بهینه و پخش توان بین واحدهای تولید هم‌زمان باید تابع هزینه‌ای در اختیار باشد که بر حسب متغیر توان تولیدی واحد تولید لحاظ شود. با توجه به این موضوع تنها زمانی  $E_{pgu}$  (برق تولیدی هر سیستم) می‌تواند جایگزین  $E_{req}$  (برق مورد نیاز مصرف‌کننده) شود که راهبرد بهره‌برداری، حالت FEL انتخاب شده باشد (یعنی زمانی که سیستم‌های تولید هم‌زمان فقط موظف به تأمین برق ریزشبکه هستند). همچنین طبق [۷] اگر برای سیستم تولید هم‌زمان در هر ساعت مشخص، شرایط  $E_{req} < K Q_{req}$  برقرار باشد از حالت FEL استفاده می‌شود. پس برای ریزشبکه، زمانی برنامه‌ریزی بهینه تولید انجام می‌گیرد که در آن ساعت، (۱۱) برقرار باشد. چون در این شرایط است که می‌توان  $E_{pgu}$  را در تابع هزینه، جایگزین کرد و سهم مشارکت هر سیستم را در تأمین برق کل ریزشبکه به دست آورد. در (۱۲) همان حرارت مورد نیاز شینی است که سیستم تولید هم‌زمان در آن قرار دارد زیرا انتقال حرارت در این ریزشبکه انجام نمی‌گیرد. هم به عنوان سهم هر سیستم تولید هم‌زمان، پس از پخش بار بهینه از کل برق مصرفی ریزشبکه، مشخص خواهد شد

$$E_{req} < \frac{\eta_{pgu} Q_{req}}{\eta_{rec}(1-\eta_{pgu})} \quad (11)$$



شکل ۴: الگوریتم تعیین راهبرد بهینه.

جدول ۱: تعیین  $k$  برای بهره‌گیری از برنامه‌ریزی بهینه تولید هم‌زمان.

پارامترها	سیستم ۱	سیستم ۲	سیستم ۳
$E_{req}$ (kw)	۲۸	۲۳	۲۶
$Q_{req}$ (kw)	۷۱,۶۰۷	۵۸,۳۹۲	۶۵,۸۹۲
$K$	۰,۴۱۶	۰,۴۸۶	۰,۴۶۲

$$UPC_E - UPC_T = \frac{F_{boiler-E}}{3} \left[ 1 - \frac{\eta_{boiler}}{\eta_{rec} (1 - \eta_{pgu})} \right] \times \left( \frac{K_f}{PEC_{SP}} + \frac{\mu_f}{CDE_{SP}} + \frac{C_f + \mu_f C_c}{COST_{SP}} \right) + \frac{1}{3} \frac{E_{excess} C_s}{COST_{SP}} \quad (18)$$

با قرار گرفتن مقدار حرارت و برق مورد نیاز مصرف‌کننده در هر زمان، با استفاده از (۱۷) و (۱۸)، توسط الگوریتم مقایسه‌ای شکل ۴، راهبرد بهینه هر سیستم تعیین می‌شود.

### ۵- مطالعه عددی

در مطالعات عددی، ابتدا به بررسی شرایط بهره‌برداری بهینه برای یک ساعت از شبانه‌روز فصل تابستان پرداخته شده است (ساعت ۱۳) که الگوریتم ارائه‌شده قابل بسط به کلیه ساعات سال است. برای برنامه‌ریزی تولید بهینه، شرط نسبت بار (۱۱) برای هر سیستم در این ساعت در نظر گرفته می‌شود و نتایج در جدول ۱ برای هر سیستم به دست آورده شده است. همچنین نتایج برنامه‌ریزی تولید بهینه در جدول ۲ نشان می‌دهد که مقدار  $E_{pgu}$ ، میزان برقی است که سیستم باید برای ریزشکه تولید کند. با مشخص شدن مقدار تولید هر کدام از سیستم‌ها و با برقراری ارتباط بین توان تولیدی جدید و الگوریتم تعیین راهبرد، مطابق جدول ۲، مقدار تولید هر کدام از اجزای سیستم‌ها و همچنین راهبرد بهینه تعیین می‌شود. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، در سیستم‌های ۲ و ۳ با وجود بهره‌برداری بهینه در راهبرد FEL، مقداری حرارت اضافه‌تر از مورد نیاز تولید می‌شود که به علت نبودن ذخیره‌ساز، این مقدار اضافی هدر می‌رود. اگر در همین مدل‌سازی، ذخیره‌ساز لحاظ شود، در مقدار معیارها کاهش بیشتری رخ خواهد داد.

if FEL :  $F_{boiler} = 0$   
if FTL :  $F_{excess} = 0$

در نهایت با ساده‌سازی معادلات در معیارهای مورد بررسی، برای هر حالت، UPC نهایی به دست خواهد آمد

$$UPC_E - UPC_T = \frac{E_{grid}}{3} \left[ \frac{\eta_{pgu}}{PEC_{SP}} + \frac{1}{\eta_{pgu}} \frac{\mu_f - \mu_e}{CDE_{SP}} + \frac{1}{\eta_{pgu}} \frac{(C_f + \mu_f C_c) - C_e}{COST_{SP}} \right] \quad (17)$$

۳-۲-۴ شرایط  $E_{req} < KQ_{req}$

در این مورد اگر هر کدام از حالت‌های بهره‌برداری صورت گیرد، رابطه‌های زیر برای معیارهای مذکور قابل استخراج است

if FEL : کمبود حرارت مواجه هستیم  
if FTL :  $E_{grid} = 0$

با ساده‌سازی معادلات هر حالت، معیارهای مورد بررسی برای هر حالت بازنویسی می‌شود

جدول ۲: تعیین مقدار تولید جدید و بهینه هر کدام از اجزای سیستم تولید هم‌زمان در ساعت ۱۳ فصل تابستان.

سیستم ۳	سیستم ۲	سیستم ۱	پارامترها
۴۱,۷۹۸	۲۷,۶۴۳	۶۵,۳۷۳	$E_{req}$ (kw)
۶۵,۸۹۲	۵۸,۳۹۲	۷۱,۶۰۷	$Q_{req}$ (kw)
۰,۶۱۹	۰,۵۵۳	۰,۷۳۰	$UPC_E$
۰,۶۴۸	۰,۵۵۷	۰,۷۶۲	$UPC_T$
FEL	FEL	FEL	راهبرد بهینه
۴۱,۷۹۸	۲۷,۶۴۳	۶۵,۳۷۳	$E_{pgu}$ (kw)
.	.	.	$E_{grid}$ (kw)
۹۰,۴۰۷	۵۶,۸۶۵	۱۵۶,۸۹۵	$Q_{R-E}$ (kw)
.	۱,۵۲۷	.	$Q_{b-E}$ (kw)

جدول ۳: تعیین تولید بهینه و تلفات سیستم‌ها در یک شبانه‌روز (KW).

تلفات (kw)	سیستم ۳	سیستم ۲	سیستم ۱	شبانه‌روز
۲۰,۵۹۵	۲۳۰,۴۳۲	۲۷۲,۱۸۳	۱۳۷,۰۲۱	فصل تابستان
۱۱,۸۷۲	۱۴۳,۰۶۸	۲۱۲,۱۶۴	۲۳,۶۵۳	فصل زمستان

جدول ۴: مقایسه حالات مختلف بهره‌برداری در یک شبانه‌روز.

حالت اول: تولید برق سیستم‌ها، بدون انتقال انرژی الکتریکی در ریزشبه			
مصرف سوخت (kwh)	انتشار کربن دی‌اکسید (g)	هزینه بهره‌برداری (Yuan)	شبانه‌روز
۳۹۲۵,۶۷۷	۹۶۶۴۰۲	۶۸۱,۶۶۶	تابستان
۴۷۷۱,۸۹۳	۱۰۴۲۱۹۸	۶۶۴,۰۸۸	زمستان
حالت دوم (بهینه): تولید کل برق ریزشبه به وسیله ۳ سیستم تولید هم‌زمان با راهبرد بهینه بهره‌برداری به روش پیشنهادی			
مصرف سوخت (kwh)	انتشار کربن دی‌اکسید (g)	هزینه بهره‌برداری (Yuan)	شبانه‌روز
۳۸۷۲,۱۵۰	۸۳۶۶۳۶	۵۹۶,۱۰۳	تابستان
۴۵۰,۱۰۷۹	۹۵۱۶۳۲	۵۸۶,۸۸۱	زمستان

جدول ۵: مقایسه معیارهای مورد نظر در روش‌های مختلف بهره‌برداری.

مجموع معیار جامع	هزینه بهره‌برداری	انتشار آلاینده‌گی	مصرف انرژی	حالات بهره‌برداری
-	۷۶۶,۱۳	۸۲۶۳۷۰	۳۲۳۹,۱	تولید جداگانه
۰,۸۲۰۱	۶۱۹,۷۴	۶۶۴۵۴۰	۲۷۴۳,۷	تولید هم‌زمان و تعیین با روش HET's [۷]
۰,۸۲۰۱	۶۱۹,۷۴	۶۶۴۵۴۰	۲۷۴۳,۷	تولید هم‌زمان با راهبرد بهینه با GAMS
۰,۸۱۸۰	۵۸۰,۸۹	۶۳۹۷۳۰	۲۹۸۵,۴	تولید هم‌زمان و بهینه با راهبرد بهینه بهره‌برداری در روش پیشنهادی با Matlab

لازم به توضیح است که واحد پول مقاله اصلی مورد مقایسه، یوان چین می‌باشد و برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی الزاماً از این واحد پول استفاده شده است. با توجه به جدول ۵، معیارهای مورد بررسی کاهش قابل ملاحظه‌ای نسبت به میزان معیارها در زمان تأمین انرژی به صورت جداگانه و بدون انتقال انرژی الکتریکی دارند. همچنین محاسبات مسئله نشان می‌دهد در ساعاتی که مقدار  $E_{req}$  به  $KQ_{req}$  نزدیک‌تر باشد، کاهش مقدار معیارها بیشتر است. به این صورت که هرچه الگوی بار الکتریکی و حرارتی با نسبت ذکرشده به هم شبیه‌تر باشند هزینه بهره‌برداری، مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌گی برای تأمین بار، کاهش بیشتری خواهند داشت که این امر مزیت روش پیشنهادی را نسبت به مراجع بررسی شده نشان می‌دهد.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با توجه به اهمیت موضوع بهره‌برداری از سیستم‌های تولید هم‌زمان در یک ریزشبه، روشی پیشنهادی برای برنامه‌ریزی بهینه تولید این سیستم‌ها ارائه گردید و سهم مشارکت این سیستم‌ها در تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز ریزشبه، مشخص شد. همچنین در این برنامه‌ریزی، تلفات انتقال انرژی الکتریکی از سیستم‌های تولید هم‌زمان به شین‌های ریزشبه در نظر گرفته شده است. ارتباط بین تولید سیستم‌های

در مرحله بعد، برنامه‌ریزی بهینه تولید برای یک شبانه‌روز از فصل تابستان و زمستان انجام شده که جدول ۳ میزان تولید هر سیستم در یک شبانه‌روز از فصل تابستان و زمستان را مطابق اطلاعات بار در [۱۵] نشان داده و نتایج شبیه‌سازی در جدول ۴ آورده شده است.

در جدول ۴ مقایسه‌ای بین میزان معیارها در دو حالت بهره‌برداری تولید جداگانه (هر شین انرژی الکتریکی خود را تأمین کند) و بهره‌برداری هم‌زمان (فقط سیستم‌های تولید هم‌زمان با یک برنامه‌ریزی بهینه تولید انرژی کل ریزشبه را تأمین کنند) صورت گرفته است. همان طور که مشاهده می‌شود در حالت دوم و با استفاده از روش پیشنهادی، معیارهای مورد بررسی کاهش قابل توجهی داشته‌اند.

نهایتاً جدول ۵ مقایسه نهایی روش‌های مختلف بهره‌برداری در ۲ مقاله [۷] و [۱۲] و روش پیشنهادی این مقاله را با توجه به معیارهای مورد نظر برای ۲۴ ساعت در یک روز از تابستان نشان می‌دهد. با توجه به اطلاعات این مسئله، نتایج استفاده از روش [۷] در سطر دوم جدول و همچنین استفاده از الگوریتم [۱۲] بدون در نظر گرفتن برنامه‌ریزی بهینه تولید با نرم‌افزار GAMS در سطر سوم جدول، ارائه شده است. سطر نهایی جدول ۵ نیز نتایج حاصل از روش پیشنهادی این مقاله و به وسیله مدل‌سازی تابع هزینه هر سیستم و اجرای برنامه‌ریزی تولید بهینه سیستم‌ها و همچنین تعیین راهبرد بهینه برای بهره‌برداری را نشان می‌دهد.

[3] G. Chicco and P. Mancarella, "Assessment of the greenhouse gas emissions from cogeneration and trigeneration systems. Part II: analysis techniques and application cases," *Energy*, vol. 33, no. 3, pp. 418-430, Mar. 2008.

[4] N. Fumo, P. J. Mago, and L. M. Chamra, "Emission operational strategy for combined cooling, heating, and power systems," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 11, pp. 2344-2350, Nov. 2009.

[5] E. Cardona and A. Piacentino, "Cogeneration: a regulatory framework toward growth," *Energy Policy*, vol. 33, no. 16, pp. 2100-2111, 2005.

[6] A. Zafra-Cabeza, M. A. Ridao, I. Alvarado, and E. F. Camacho, "Applying risk management to combined heat and power plants," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 938-945, Aug. 2008.

[7] P. J. Mago and L. M. Chamra, "Analysis and optimization of CCHP systems based on energy, economical, and environmental considerations," *Energy Build.*, vol. 41, no. 10, pp. 1099-1106, Oct. 2009.

[8] A. Rong and R. Lahdelma, "An efficient linear programming model and optimization algorithm for trigeneration," *Appl. Energy*, vol. 82, no. 1, pp. 40-63, Sep. 2005.

[9] J. J. Wang, Z. Q. Zhai, Y. Y. Jing, and C. F. Zhang, "Particle swarm optimization for redundant building cooling heating and power system," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 12, pp. 3668-3679, Dec. 2010.

[10] J. Y. Wu, J. L. Wang, and S. Li, "Multi-objective optimal operation strategy study of micro-CCHP system," *Energy*, vol. 48, no. 1, pp. 472-483, 2012.

[11] H. Quintana, H. K. Temraz, and K. W. Hipel, "Two-stage power system distribution planning algorithm," in *Proc. Inst. Elect. Eng. Generation, Transmission, and Distribution*, vol. 140, pp. 17-29, Jan. 1993.

[12] F. Fang, Q. H. Wang, and Y. Shi, "A novel optimal operational strategy for the CCHP system based on two operating modes," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 27, no. 2, pp. 1032-1041, May 2012.

[13] H. Cho, P. J. Mago, R. Luck, and L. M. Chamra, "Evaluation of CCHP systems performance based on operational cost, primary energy consumption, and carbon dioxide emission by utilizing an optimal operation scheme," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 12, pp. 2540-2549, Dec. 2009.

[14] R. M. Dawes and B. Corrigan, "Linear models in decision making," *Psychol. Bull.*, vol. 81, no. 2, pp. 95-106, Feb. 1974.

[15] ف. امیری، بهینه‌سازی چندمعیاره بهره‌برداری از سیستم‌های تولید هم‌زمان برق، گرما و برودت (CCHP) به منظور تأمین بارهای مسکونی و تجاری در محیط بازار برق، پایان‌نامه، دانشکده برق پردیس فنی و مهندسی شهید عباس‌پور، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۹۳.

[16] US Environmental Protection Agency, *Catalog of CHP Technologies: U. S. Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership*, Dec. 2008.

**فرشاد امیری** در سال ۱۳۹۰ مدرک کارشناسی مهندسی برق - قدرت خود را از دانشگاه بوعلی سینای همدان و در سال ۱۳۹۳ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را در گرایش قدرت - تجدیدساختار از دانشگاه شهید بهشتی دریافت نمود. هم‌اکنون نام برده در زمینه توسعه و تعمیرات شبکه‌های توزیع برق تهران به عنوان مدیریت پروژه‌های برق‌رسانی مشغول به فعالیت می‌باشد. زمینه‌های کاری و تحقیقاتی مورد علاقه ایشان: طراحی، تجهیز و راه اندازی پست‌های توزیع برق، مدیریت انرژی الکتریکی، منابع تولید پراکنده، تأسیسات الکتریکی و همچنین ایمنی و بهداشت محیط کار (HSE) در شبکه‌ی توزیع برق می‌باشد.

**مهرداد ستایش نظر** در سال ۱۳۷۳ مدرک کارشناسی مهندسی برق قدرت خود را از دانشگاه علم و صنعت ایران و در سال ۱۳۷۵ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه تربیت مدرس دریافت نمود و در سال ۱۳۷۹ موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی برق قدرت از دانشگاه مذکور گردید. دکتر ستایش نظر از سال ۱۳۷۸ در دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعت آب و برق تهران مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز دانشیار دانشگاه شهید بهشتی می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام برده شامل بازار برق، مدیریت انرژی الکتریکی و شبکه های هوشمند می‌باشد.

جدول پ-۱: پارامترهای مشترک مربوط به سیستم‌ها و ریزشبهه.

پارامتر	مقدار
$COP_{ch}$	۰٫۷
$COP_{ec}$	۳
$C_e$ (Yuan)	۰٫۹۵
$C_f$ (Yuan)	۰٫۴۵
$C_c$ (Yuan/kwh)	۰٫۰۰۰۰۲
$\mu_e$ (g/kwh)	۹۶۸
$\mu_f$ (g/kwh)	۲۲۰
$K_f$	۱٫۰۴۷
$K_e$	۳٫۳۳۶

جدول پ-۲: پارامترهای داخلی سیستم‌های تولید هم‌زمان.

سیستم	بازده سیستم $\eta_{rec}$	بازده بویلر کمکی $\eta_{boiler}$	بازده واحد الکتریکی $\eta_{pgu}$	بازده کویل حرارتی $\eta_{hc}$
۱	۰٫۸	۰٫۸۱	۰٫۲۵	۰٫۸
۲	۰٫۸	۰٫۷۸	۰٫۲۸	۰٫۸
۳	۰٫۸	۰٫۷۷	۰٫۲۷	۰٫۸

تولید هم‌زمان در ریزشبهه و الگوریتم تعیین راهبرد بهینه با استفاده از روش پخش بار بهینه و در جهت تأمین بار الکتریکی یا حرارتی، برقرار شده است. این ارتباط ریزشبهه را قادر می‌سازد تا با استفاده از بهره‌برداری سیستم‌های تولید هم‌زمان، انرژی الکتریکی همه شین‌ها را با کمترین مقدار معیارها تأمین کند. در این مقاله، معیارهایی همچون مصرف انرژی اولیه، انتشار کربن دی‌اکسید و هزینه بهره‌برداری در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از مطالعات عددی و مقایسه انجام شده، مزیت الگوریتم ارائه شده نسبت به مقالات مرجع مورد بررسی را نشان می‌دهد. مطالعات بیشتر از سوی محققین این مقاله برای لحاظ کردن شبکه انتقال حرارت در فرایند بهینه‌سازی در حال انجام است.

### پیوست

پارامترهای مشترک سیستم‌های تولید هم‌زمان و برخی اطلاعات مورد نیاز ریزشبهه در جدول پ-۱ آورده شده است.

سیستم‌های تولید هم‌زمان موجود در ریزشبهه دارای پارامترهای داخلی متفاوتی هستند که در جدول پ-۲ آورده شده است [۱۶]. این سیستم‌ها با محرک اصلی میکرو توربین گازسوز در محدوده تولید توان کمتر از ۱ مگاوات کار می‌کنند. در شین ۱ بزرگ‌ترین سیستم تولید هم‌زمان قرار دارد که در زمان پخش بار به عنوان شین اسلک در نظر گرفته می‌شود.

### مراجع

[1] D. W. Wu and R. Z. Wang, "Combined cooling, heating, and power: a review," *Progr. Energy Combust. Sci.*, vol. 32, no. 5-6, pp. 459-495, Sept./Nov. 2006.

[2] P. J. Mago, N. Fumo, and L. M. Chamra, "Performance analysis of CCHP and CHP systems operating following the thermal and electric load," *Int. J. Energy Res.*, vol. 33, no. 9, pp. 852-864, Jul. 2009.