

برنامه‌ریزی بهینه‌ی سیستم‌های چند حاملی انرژی با هدف بهبود قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری

آزاده امیری^۱، محمد رستگار^۲ و محمد محمدی^۳

^۱دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، azadeh.amiri@shirazu.ac.ir

^۲دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، mohammadrastegar@shirazu.ac.ir

^۳دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، m.mohammadi@shirazu.ac.ir

چکیده-ارتباط میان حامل‌های انرژی در سیستم‌های چند حاملی انرژی، بستر بهره‌وری پرزاده و مقرون به صرفه از گونه‌های مختلف انرژی را فراهم نموده است. در یک سیستم چند حاملی انرژی، حامل‌های انرژی دریافت، تبدیل و ذخیره می‌گردند و متناسب با نیاز مصرف‌کنندگان، مسیرهای تامین انرژی مشخص می‌شود. در این مقاله، در ابتدا مدلی از سیستم‌های چند حاملی انرژی شامل انواع مبدل‌ها و ذخیره‌کننده‌ها بر اساس نظریه گراف‌ها ارائه گردیده است. سپس روشی تحلیلی برای محاسبه‌ی انرژی تامین نشده در سیستم چند حاملی انرژی بیان شده است. بر همین اساس، به منظور برنامه‌ریزی بهینه‌ی سیستم‌های چند حاملی انرژی، یک مسئله‌ی بهینه‌سازی با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و بهبود قابلیت اطمینان طرح‌ریزی گردیده است. از آنجایی که معادلات ماهیتی غیرخطی دارند، روشی کارآمد برای خطی‌سازی معادلات و کاهش حجم محاسباتی مسئله ارائه شده است. مطالعات موردی تاثیر انواع ذخیره‌کننده‌های انرژی بر بهبود قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌ها را نشان می‌دهد.

کلید واژه-ارزیابی تحلیلی قابلیت اطمینان، برنامه‌ریزی بهینه، ذخیره‌کننده انرژی، سیستم چند حاملی انرژی

۱- مقدمه

بروز خرابی در تجهیزات به دلیل خطاهای فنی و محیطی، عملکرد مطمئن سیستم را به مخاطره می‌اندازد. بنابراین جهت انتخاب مسیر بهینه‌ی تامین انرژی، در نظر گرفتن دو هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و افزایش قابلیت اطمینان سیستم، کارآمد خواهد بود.

در مرجع [۸]، یک سیستم چند حاملی انرژی شامل منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌سازها، بر اساس تئوری گراف‌ها مدل‌سازی شده است. همچنین به منظور استفاده از مدل ارائه شده در مسئله‌ی بهینه‌سازی، ابتدا مدل خطی شده و سپس هزینه‌ی بهره‌برداری از تجهیزات در تابع هدف لحاظ شده است. اگرچه در این مقاله مدلی مناسب برای برآورد هزینه‌ها با بار محاسباتی کم ارائه گردیده است، اما مدل ذکر شده قابل تعمیم جهت ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم نمی‌باشد.

در مراجع [۹-۱۶]، مدل‌هایی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های چند حاملی انرژی ارائه شده است. در مقالات [۹-۱۲]، قابلیت اطمینان سیستم‌های چند حاملی انرژی بر اساس روش شبیه‌سازی مونت کارلو^۲ ارزیابی گردیده است. مدل‌های ارائه شده در این مقالات، علاوه بر حجم محاسباتی بالا، دارای

با گسترش صنایع و شهرها، نیاز انسان به انرژی به طور قابل توجهی افزایش یافته است؛ در این راستا، سازمان بین‌المللی انرژی یا IEA، از رشد ۵۰٪ درصدی مصرف جهانی انرژی در طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۵۰ خبر می‌دهد [۱]. با ایجاد ارتباط میان حامل‌های انرژی، بستری مناسب برای بهره‌وری پرزاده از انواع مختلف انرژی فراهم می‌گردد. سیستم‌های چند حاملی انرژی با استفاده از مبدل‌ها، ذخیره‌کننده‌ها و ... امکان ایجاد این ارتباط را بوجود می‌آورند.

یک سیستم چند حاملی انرژی، شامل عناصر متنوعی مانند CHP^۱، ترانز سفورماتور، بویلر، ذخیره‌ساز انرژی و ... می‌باشد. این سیستم‌ها، حامل‌های انرژی را از شبکه‌های متناظر دریافت و با تبدیل و یا ذخیره‌سازی انرژی، انرژی مورد نیاز مصرف‌کنندگان را تامین می‌نمایند [۲]. از آنجایی که هزینه‌ی بهره‌برداری از تجهیزات متفاوت است، انتخاب مسیر مناسب تامین انرژی، باعث کاهش هزینه‌های بهره‌برداری خواهد شد [۳-۷]. از سوی دیگر،

² Monte Carlo simulation (MCS)

¹ Combined Heat and Power

۲- مدل ماتریسی سیستم چند حاملی

با استفاده از نظریه گرافها می توان هر سیستم چند حاملی انرژی را به کمک گرهها و یالها مدل سازی کرد. اصل روش بیان شده در این مقاله بر اساس یالها می باشد.

یک سیستم چند حاملی انرژی، دارای مسیرهای ورودی و خروجی مختلفی است. مسیرهای ورودی که هر کدام بیانگر یک حامل انرژی خاص می باشند، متناسب با فاکتورهای توزیع بین اجزا سیستم تقسیم می شوند. به عبارت دیگر، فاکتورهای توزیع بیانگر میزان ورود انرژی به یک مبدا می باشند. این ضرایب مقادیری بین یک تا صفر دارند.

ماتریسهای زیر سیستم چند حاملی را تعریف می کنند. ماتریس تعداد مسیریها با A نمایش داده می شود که تعداد مسیریها از هر ورودی به هر خروجی را بیان می کند.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nm} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ماتریس B را ماتریس شاخه ها می نامیم که تعداد شاخه های هر ورودی را نشان می دهد.

$$B = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$b_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} \quad (3)$$

$$i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad j \in \{1, 2, \dots, m\}$$

ماتریس فاکتور توزیع با U بیان می شود که فاکتورهای توزیع بین مسیریها را شامل می شود و نحوه توزیع انرژی را بین هر ورودی و خروجی ذکر می کند.

$$U = \begin{pmatrix} u_{11} & \dots & u_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{n1} & \dots & u_{nm} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$u_{ij} = \begin{cases} a_{ij} & b_i \leq 1 \\ 0 & b_i > 1, \quad a_{ij} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^m u_{ij} = 1 \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (6)$$

۳- فرمول بندی ریاضی مساله پیشنهادی

تابع هدف مساله بهینه سازی از دو بخش انرژی تامین نشده و هزینه تشکیل شده است بنابراین با یک مساله دو هدفه روبهرو

دقت کافی نمی باشند؛ زیرا در این مدل ها، خرابی همزمان تجهیزات مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین ارزیابی انجام شده وابسته به سناریوهای تولید شده می باشد.

نویسندگان [۱۳-۱۶]، روش های تحلیلی ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم های چند حاملی انرژی را ارائه نموده اند. در مرجع [۱۳]، سیستم چند حاملی انرژی بر اساس روابط ماتریسی مدل شده و سپس متوسط انرژی تامین نشده^۲ محاسبه گردیده است. در مرجع [۱۴]، سیستم چند حاملی انرژی با کمک گرافها مدل سازی گردیده و حداکثر شارش توان بر اساس کاتستها محاسبه شده است. سپس بر اساس حداکثر شارش توان محاسبه شده، شاخص EENS محاسبه گردیده است. در مقاله [۱۵]، یک روش تحلیلی برای ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه های شعاعی ارائه شده است. مدل های ارائه شده در این مقالات، علی رغم دقت بیشتر نسبت به روش شبیه سازی مونت کارلو، مناسب برای استفاده در مسائل برنامه ریزی بهینه ی سیستم های چند حاملی انرژی نمی باشند؛ زیرا به دلیل ماهیت غیر خطی روابط، همگرایی مسئله بهینه سازی به جواب بهینه عمومی قابل تضمین نیست.

در این مقاله مدلی جامع و کاربردی برای سیستم های چند حاملی انرژی بر اساس نظریه گرافها ارائه شده است. مطابق روش ارائه شده، هر سیستم چند حاملی انرژی با تجهیزات متنوع قابل مدل سازی است. پس از مدل سازی سیستم در قالب روابط ماتریسی، روشی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم ارائه می شود. در این روش، تاثیر نرخ خرابی تمامی تجهیزات شبکه و همچنین اثر خرابی همزمان تجهیزات بر قابلیت اطمینان سیستم، قابل ارزیابی است. از آنجایی که مدل قابلیت اطمینان استخراج شده ماهیت غیرخطی دارد، روشی کارا و موثر برای خطی سازی مدل ذکر شده ارائه شده است. سپس مدل ارائه شده در برنامه ریزی بهینه ی سیستم چند حاملی انرژی مورد استفاده قرار گرفته است. تابع هدف مسئله بهینه سازی شامل هزینه های بهره برداری و انرژی تامین نشده سیستم می شود. از آنجایی که ماهیت توابع هدف متفاوت می باشند، از روش معیار جامع برای تبدیل مسئله بهینه سازی دوهدفه به مسئله بهینه سازی تکهدفه استفاده شده است. بر همین اساس، سیستمی نمونه شامل ذخیره ساز، CHP و انواع مبدلها در نظر گرفته شده و با اهداف متفاوت، به صورت بهینه برنامه ریزی شده است.

^۲ Expected energy not supplied (EENS)

ماتریس نرخ تعمیر را با M نشان می‌دهیم و المان‌های آن نرخ تعمیر مسیرها را بیان می‌کنند و به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$M = \begin{pmatrix} M_{11} & \dots & M_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{n1} & \dots & M_{nm} \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$M_{ij} = \begin{cases} 1 & a_{ij} = 0 \\ \sum_{r=1}^{a_{ij}} \mu_r & a_{ij} \neq 0 \end{cases} \quad (12)$$

ماتریس بازده با Z نشان داده می‌شود و میزان بازده مسیرها را با در نظر گرفتن فاکتورهای توزیع u_r و بازده میبل‌ها ρ_r بیان می‌کند.

$$Z = \begin{pmatrix} z_{11} & \dots & z_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & \dots & z_{nm} \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$z_{ij} = \begin{cases} 0 & a_{ij} = 0 \\ \sum_{r=1}^{a_{ij}} u_r \rho_r & a_{ij} \neq 0 \end{cases} \quad (14)$$

ماتریس ظرفیت خروجی ξ ، ظرفیت خروجی مسیرها از هر ورودی به هر خروجی را نشان می‌دهد و اگر توان‌های ورودی برحسب وات باشند المان‌های این ماتریس نیز برحسب وات می‌باشند. این ماتریس از ضرب هر المان ماتریس بازده در توان ورودی مربوط به مسیر متناظر آن به دست می‌آید.

$$\xi = \begin{pmatrix} z_{11}P_1 & \dots & z_{1m}P_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1}P_n & \dots & z_{nm}P_n \end{pmatrix} \quad (15)$$

ماتریس ظرفیت کل سیستم که با S نشان داده می‌شود، برحسب حالات سالم و خراب بودن مسیرها و ماتریس ظرفیت، تعریف می‌شود.

به ازای هر خروجی 2^n حالت داریم که n تعداد ورودی‌ها و ۲ نشانگر دو حالت سالم و خراب بودن هر مسیر می‌باشد. بنابراین ماتریس ظرفیت کل با توجه به این حالات در دسترس بودن و نبودن مسیرها و ماتریس ظرفیت به صورت زیر خواهد شد:

$$S = \begin{pmatrix} \xi_{11} + \xi_{21} + \dots + \xi_{n1} & \dots & \xi_{1m} + \xi_{2m} + \dots + \xi_{nm} \\ \xi_{21} + \xi_{31} + \dots + \xi_{n1} & \dots & \xi_{2m} + \xi_{3m} + \dots + \xi_{nm} \\ \xi_{11} + \xi_{21} + \dots + \xi_{n1} & \dots & \xi_{11} + \xi_{21} + \dots + \xi_{n1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \xi_{11} + \xi_{21} + \dots + \xi_{(n-1)1} & \dots & \xi_{1m} + \xi_{2m} + \dots + \xi_{(n-1)m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

هستیم. واحد هزینه واحد پولی مثل دلار است و واحد انرژی تامین نشده پریونیت یا kwh است در نتیجه واحدهای دو بخش متفاوت اند. برای حل کردن چنین مساله دو هدفه با واحدهای متفاوت می‌تواند از روش LP Metric استفاده شود. در این روش تابع هدف‌ها به کمک ضرایب وزنی به یک مساله تک هدفه تبدیل می‌شوند.

$$\min OF = w_1 \frac{COST}{COST_{base}} + w_2 \frac{EENS}{EENS_{base}} \quad (7)$$

w_1 و w_2 ضرایب وزنی هستند که می‌توانند هر عدد دلخواهی باشند در واقع این ضرایب میزان اهمیت هر بخش نسبت به بخش دیگر را نشان می‌دهند. برای محاسبه $EENS_{base}$ باید w_2 را صفر قرار دهیم و مساله بهینه‌سازی را برای تابع هدف COST حل کنیم. سپس مقادیر به دست آمده برای متغیرهای مساله را در تابع هدف EENS قرار دهیم تا مقدار $EENS_{base}$ محاسبه شود. برای محاسبه $COST_{base}$ به روشی مشابه عمل می‌کنیم. در بخش‌های زیر به مدل سازی تابع هدف انرژی تامین نشده و هزینه می‌پردازیم.

۱-۳- ارزیابی قابلیت اطمینان

با مدل‌سازی سیستم چند حاملی انرژی با استفاده از ماتریس‌ها می‌توانیم به سادگی انرژی تامین نشده را محاسبه کنیم. در محاسبه انرژی تامین نشده ذخیره‌کننده‌های انرژی را هم مدل می‌کنیم.

ماتریس نرخ خرابی با Λ نشان داده می‌شود که المان‌های آن نرخ خرابی مسیرها را نشان می‌دهند. λ_{ij} نرخ خرابی مسیر i به j را بیان می‌کند.

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \Lambda_{11} & \dots & \Lambda_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Lambda_{n1} & \dots & \Lambda_{nm} \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\Lambda_{ij} = \begin{cases} 0 & a_{ij} = 0 \\ \lambda_{ij} & a_{ij} = 1 \\ \lambda_{ij}^{total} & a_{ij} > 1 \end{cases} \quad (9)$$

اگر بیش از یک مسیر بین یک ورودی و یک خروجی داشته باشیم آن‌ها را موازی می‌گیریم و به صورت زیر نرخ خرابی آن را محاسبه می‌کنیم. λ_r و μ_r به ترتیب نرخ خرابی و نرخ تعمیر مسیر r را نشان می‌دهند.

$$\lambda_{ij}^{total} = \frac{\prod_{r=1}^{a_{ij}} \lambda_r (\sum_{r=1}^{a_{ij}} \mu_r)}{\prod_{r=1}^{a_{ij}} (\lambda_r + \mu_r)} \quad (10)$$

$$Q' = \begin{pmatrix} q'_{11} & \dots & q'_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q'_{n1} & \dots & q'_{nm} \end{pmatrix} \quad (25)$$

$$q'_{ij} = \frac{\Lambda_{ij}}{M_{ij} + \Lambda_{ij}} \quad (26)$$

ماتریس قابلیت اطمینان با R نشان داده می شود و بر حسب حالات و ماتریس های دسترس پذیری و عدم دسترس پذیری محاسبه می شود.

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & \dots & r_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{2^m 1} & \dots & r_{2^m m} \end{pmatrix} \quad (27)$$

ذخیره کننده های انرژی در ورودی را به کمک ماتریس توان ورودی P به صورت زیر مدل سازی می کنیم.

$$P = \begin{pmatrix} p_1 + P_1^{dis} - P_1^{ch} \\ \vdots \\ p_n + P_n^{dis} - P_n^{ch} \end{pmatrix} \quad (28)$$

که P^{ch} نرخ توان شارژ و P^{dis} نرخ توان دشارژ را نشان می دهد و P توان تولیدی ورودی را بیان می کند. ذخیره کننده های انرژی در خروجی به کمک ماتریس بار مورد تقاضا L مدل سازی می شوند.

$$L = \begin{pmatrix} l_1 - P_1^{dis} + P_1^{ch} \\ \vdots \\ l_m - P_m^{dis} + P_m^{ch} \end{pmatrix} \quad (29)$$

که P^{ch} نرخ توان شارژ و P^{dis} نرخ توان دشارژ را نشان می دهد و l بار مورد تقاضا را بیان می کند. برای محاسبه انرژی تامین نشده ماتریس انرژی تامین نشده EENS را به صورت زیر می یابیم و از جمع درایه های این ماتریس انرژی تامین نشده کل حساب می کنیم.

$$EENS = \begin{pmatrix} EENS_1 \\ EENS_2 \\ \vdots \\ EENS_m \end{pmatrix} \quad (30)$$

$$EENS_j = \Delta \tau (l_j - \sum_{k=1}^{2^n} v_{kj} * r_{kj}) \quad (31)$$

$$EENS_{Total} = \sum_{j=1}^m EENS_j \quad (32)$$

$\Delta \tau$ بازه زمانی را نشان می دهد.

ظرفیت انرژی موجود در باتری در هر لحظه SOC نام دارد که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$SOC_i(t) = \sum_{tt=1}^{tt=i} (P_i^{ch} \eta_i - P_i^{dis} / \eta_i) + SOC_i^0 \quad (33)$$

ماتریس فرکانس که با F نشان داده می شود به این صورت تعریف می شود که اگر ظرفیت حالتی بیشتر یا مساوی بار مورد تقاضا از آن حالت باشد درایه متناظر برابر یک می شود در غیر این صورت درایه متناظر برابر صفر می شود.

$$F = \begin{pmatrix} f_{11} & \dots & f_{12^n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{m1} & \dots & f_{m2^n} \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$f_{jk} = \begin{cases} 1 & s_{kj} \geq l_j \\ 0 & s_{kj} < l_j \end{cases} \quad (18)$$

$$j \in \{1, 2, \dots, m\} \quad k \in \{1, 2, \dots, 2^n\}$$

در این ماتریس s_{kj} المان k از ماتریس S است و l_j بار مورد تقاضا در خروجی زام است. ماتریس G بر حسب ماتریس فرکانس به صورت زیر تعریف می شود:

$$G = \begin{pmatrix} g_{11} & \dots & g_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{2^m 1} & \dots & g_{2^m m} \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$g_{kj} = 1 - f_{kj}^T \quad (20)$$

$$j \in \{1, 2, \dots, m\} \quad k \in \{1, 2, \dots, 2^n\}$$

در ماتریس V اگر ظرفیت حالتی بیشتر یا مساوی بار مورد تقاضا شود درایه متناظر ماتریس برابر بار مورد تقاضا می شود در غیر این صورت برابر ظرفیت حالت می شود.

$$V = \begin{pmatrix} v_{11} & \dots & v_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{2^m 1} & \dots & v_{2^m m} \end{pmatrix} \quad (21)$$

$$v_{kj} = g_{kj} s_{kj} + f_{kj}^T l_j \quad (22)$$

$$j \in \{1, 2, \dots, m\} \quad k \in \{1, 2, \dots, 2^n\}$$

ماتریس در دسترس پذیری با R' نشان داده می شود. درایه های این ماتریس میزان در دسترس بودن مسیرها از هر ورودی به هر خروجی را نشان می دهند که بر حسب ماتریس های نرخ خرابی و نرخ تعمیر تعریف می شوند.

$$R' = \begin{pmatrix} r'_{11} & \dots & r'_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r'_{n1} & \dots & r'_{nm} \end{pmatrix} \quad (23)$$

$$r'_{ij} = \frac{M_{ij}}{M_{ij} + \Lambda_{ij}} \quad (24)$$

ماتریس عدم دسترس پذیری با Q' نشان داده می شود. درایه های این ماتریس میزان عدم دسترس بودن مسیرها از هر ورودی به هر خروجی را نشان می دهند که بر حسب ماتریس های نرخ خرابی و تعمیر تعریف می شوند.

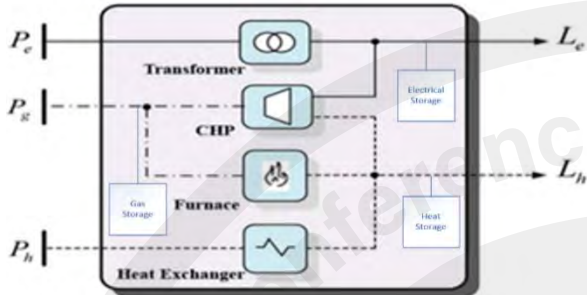
مطالعاتی ثابت یا متغیر باشند.

$$SOC_i^{\min} \leq SOC_i(t) \leq SOC_i^{\max} \quad (34)$$

$$SOC_i^{\max} = Cap_i \quad (35)$$

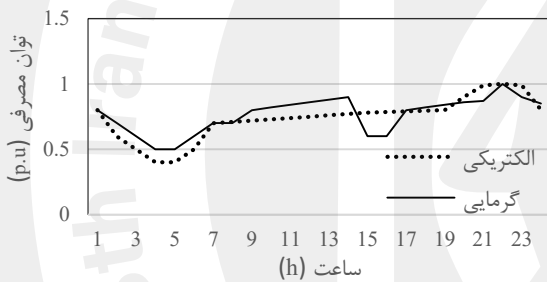
۴- مطالعات موردی

سیستم نمونه شکل ۱ در نظر گرفته شده است:



شکل ۱: سیستم نمونه مورد بررسی [۳]

منحنی بار الکتریکی و گرمایی برای یک دوره ۲۴ ساعته بر حسب پریونیت به صورت شکل ۲ در نظر گرفته شده است.



شکل ۲: منحنی بار الکتریکی و گرمایی

داده های فرض شده مساله بهینه سازی به صورت جدول ۱ می باشند:

جدول ۱: مشخصات عناصر سیستم

مبدلها	بازده	نرخ خرابی (failure/year)	نرخ تعمیر (repair/year)
ترانسفورماتور	۰.۹۸	۰.۰۰۴۱	۳۶۵
CHP	۰.۳	۵	۳۵۵
تبدیل گاز به برق			
CHP	۰.۴	۴.۵	۳۶۰
تبدیل گاز به گرما			
کوره گرمایی	۰.۸	۳	۳۰۰
مبدل گرمایی	۰.۹	۵	۳۵۰

در شبکه ذکر شده، حداقل توان ورودی برای تمامی تجهیزات شبکه صفر و حداکثر توان ورودی برای CHP، مبدل گرمایی، ترانسفورماتور و کوره گرمایی بترتیب برابر ۲، ۲، ۱/۵ و ۱ پریونیت در نظر گرفته شده است.

تابع هزینه به صورت خطی به شکل زیر مدل می شود:

$$TC = d_1 p_1 + 3p_2 + 5p_3 \quad (45)$$

ضریب d_1 به صورت سه پله ای تعریف می شود به صورتی که

در رابطه (۳۳) η_i بازده ذخیره کننده انرژی و P_i^{ch} نرخ شارژ و P_i^{dis} نرخ دشارژ می باشد. SOC_i^0 انرژی ذخیره شده اولیه در ذخیره کننده انرژی است.

$$P_i^{ch}(t) \leq B_i^{ch}(t) * P \max_i^{ch} * A_i^{storage} \quad (36)$$

$$P_i^{dis}(t) \leq B_i^{dis}(t) * P \max_i^{dis} * A_i^{storage} \quad (37)$$

$$B_i^{ch}(t) + B_i^{dis}(t) \leq 1 \quad (38)$$

$$A_i^{storage} = \frac{M_i^{storage}}{M_i^{storage} + \lambda_i^{storage}} \quad (39)$$

$$SOC_i(T) = SOC_i^0 \quad (40)$$

B_i^{dis} و B_i^{ch} ضرایب باینری هستند که نشان می دهند در هر لحظه ذخیره کننده می تواند فقط شارژ یا دشارژ شود. $P \max_i^{ch}$ ماکسیمم توان شارژ و $P \max_i^{dis}$ ماکسیمم توان دشارژ ذخیره کننده می باشد. $A_i^{storage}$ در دسترس بودن باتری را برحسب نرخ خرابی $\lambda_i^{storage}$ و نرخ تعمیر آن $M_i^{storage}$ بیان می کند. رابطه (۴۰) نشان می دهد که ظرفیت انرژی ذخیره کننده در ابتدای بازه مطالعاتی و انتهای آن بهتر است با هم برابر باشند. معادلات (۳۳) تا (۴۰) برای ذخیره کننده در بخش ورودی نوشته شده است برای ذخیره کننده در بخش خروجی همین معادلات با تبدیل A به Z استفاده می شود.

۲-۳- برآورد هزینه های بهره برداری

در این قسمت هزینه تولید انرژی مدل سازی می شود. ماتریس کوپلینگ که رابطه بین توان های ورودی و خروجی را بیان می کند به صورت زیر تعریف می شود:

$$L = CP \quad (41)$$

$$C = Z^T$$

هزینه تولید هریک از ورودی ها را به صورت تابعی برحسب توان هر ورودی مدل سازی می کنیم سپس ماتریس هزینه را تشکیل می دهیم و از جمع تمام درایه های آن ماتریس هزینه کل به دست می آید.

$$COST = \begin{pmatrix} cost_1 \\ \vdots \\ cost_n \end{pmatrix} \quad (42)$$

$$cost_i = d_i p_i + h_i p_i^2 \quad (43)$$

$$i \in \{1, 2, \dots, n\}$$

$$TC = \sum_{i=1}^n cost_i \quad (44)$$

d_i و h_i ضرایب تابع هزینه می باشند که می توانند در دوره

است. از آنجایی که تابع انرژی تامین نشده غیرخطی است آن را با به کارگیری روش‌های خطی‌سازی به شکل کاملاً خطی در آورده می‌شوند. بنابراین مساله بهینه‌سازی در نرم‌افزار GAMS با solver CPLEX قابل حل می‌شود. در این مقاله تاثیر ذخیره‌کننده‌های انرژی روی تابع هدف بررسی شده است و همان‌طور که دیده شد بکار بردن هرچه بیشتر ذخیره‌کننده تاثیر بیشتری روی کاهش هزینه و انرژی تامین نشده دارد.

مراجع

- [1] <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=41433>
- [2] P. Mancarella, "MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models," Energy, 2014.
- [3] F. Kienzle, P. Ahčin, and G. Andersson, "Valuing investments in multi-energy conversion, storage, and demand-side management systems under uncertainty," IEEE Trans. Sustain. Energy, 2011.
- [4] M. S. Javadi, A. Anvari-Moghaddam, and J. M. Guerrero, "Optimal scheduling of a multi-carrier energy hub supplemented by battery energy storage systems," in Conference Proceedings - 2017 17th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 1st IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC / I and CPS Europe 2017, 2017.
- [5] F. Adamek, M. Arnold, and G. Andersson, "On decisive storage parameters for minimizing energy supply costs in multicarrier energy systems," IEEE Trans. Sustain. Energy, 2014.
- [6] M. Schulze and P. Crespo Del Granado, "Optimization modeling in energy storage applied to a multi-carrier system," in IEEE PES General Meeting, PES 2010, 2010.
- [7] M. H. Barmayoon, M. Fotuhi-Firuzabad, A. Rajabi-Ghahnavieh, and M. Moeini-Aghtaie, "Energy storage in renewable-based residential energy hubs," IET Gener. Transm. Distrib., 2016.
- [8] T. Liu, D. Zhang, S. Wang, and T. Wu, "Standardized modelling and economic optimization of multi-carrier energy systems considering energy storage and demand response," Energy Convers. Manag., 2019.
- [9] X. Xu, K. Hou, H. Jia, and X. Yu, "A reliability assessment approach for the urban energy system and its application in energy hub planning," in IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2015.
- [01] Y. Lei et al., "A new reliability assessment approach for integrated energy systems: Using hierarchical decoupling optimization framework and impact-increment based state enumeration method," Appl. Energy, 2018.
- [00] A. Shahmohammadi, M. Moradi-Dalvand, H. Ghasemi, and M. S. Ghazizadeh, "Optimal Design of Multicarrier Energy Systems Considering Reliability Constraints," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 30, no. 2, pp. 878–886, Apr. 2015.
- [02] S. Pazouki, A. Mohsenzadeh, S. Ardalan, and M. R. Haghifam, "Optimal place, size, and operation of combined heat and power in multi carrier energy networks considering network reliability, power loss, and voltage profile," IET Gener. Transm. Distrib., 2016.
- [03] G. Koepfel and G. Andersson, "Reliability modeling of multi-carrier energy systems," Energy, vol. 34, no. 3, pp. 235–244, 2009.
- [04] X. Zhang, L. Che, M. Shahidehpour, A. S. Alabdulwahab, and A. Abusorrah, "Reliability-Based Optimal Planning of Electricity and Natural Gas Interconnections for Multiple Energy Hubs," IEEE Trans. Smart Grid, 2017.
- [05] M. Moeini-Aghtaie, H. Farzin, M. Fotuhi-Firuzabad, and R. Amrollahi, "Generalized Analytical Approach to Assess Reliability of Renewable-Based Energy Hubs," IEEE Trans. Power Syst., 2017.

برای ساعات ۱-۱۹ برابر ۰,۱۸، ساعات ۶-۲ برابر ۰,۰۶ و ساعات ۷-۱۸ برابر ۰,۱۲ است که این روش Time Of Use نام دارد. مشخصات ذخیره کننده های الکتریکی، گرمایی و گازی به صورت زیر می باشند:

جدول ۲: مشخصات ذخیره کننده‌ها

ذخیره‌کننده	بازده	نرخ خرابی (failure/year)	نرخ تعمیر (repair/year)	ظرفیت (pu)	$P_{in,out}^{max}$
گازی	۰,۹۵	۶	۲۰۰	۱	۰,۳
الکتریکی	۰,۹	۵	۲۵۰	۰,۵	۰,۱۵
گرمایی	۰,۸۵	۱۰	۳۰۰	۰,۸	۰,۲

۴-۱- نتایج و تحلیل آن‌ها

چهار سناریو در نظر گرفته شده است و در آن‌ها هزینه و انرژی تامین نشده محاسبه و باهم مقایسه شده است. این چهار سناریو به صورت جدول ۳ می‌باشند:

جدول ۳: سناریوها

سناریو ۱	بدون ذخیره‌کننده
سناریو ۲	ذخیره‌کننده گازی در طرف ورودی
سناریو ۳	ذخیره‌کننده الکتریکی و گرمایی در طرف خروجی
سناریو ۴	هر سه ذخیره‌کننده گازی، الکتریکی و گرمایی

جدول ۴ مقدار هزینه و انرژی تامین نشده را برای سناریو های مختلف با در نظر گرفتن تابع هدف هزینه و انرژی تامین نشده و همچنین تابع هدف تنها هزینه را نشان می‌دهد.

جدول ۴: مقایسه هزینه و انرژی تامین نشده در سناریو های مختلف

شماره سناریو	هدف کاهش هزینه و بهبود قابلیت اطمینان		هدف کاهش هزینه	
	Cost	EENS	Cost	EENS
سناریو ۱	۹۴,۶۱۸	۱,۲۹۵	۹۱,۹۵۵	۱,۳۵۵
سناریو ۲	۹۳,۷۰۴	۱,۲۲۹	۹۰,۹۹	۱,۲۹۳
سناریو ۳	۸۳,۸۱۵	۱,۱۴۶	۸۰,۳۴۶	۱,۲۲۴
سناریو ۴	۸۲,۹۰۱	۱,۰۸۰	۷۹,۳۸۶	۱,۱۶۲

همان‌طور که انتظار می‌رود هزینه و انرژی تامین نشده در سناریو ۱ از همه بیشتر و در سناریو ۴ از همه کمتر است. وجود ذخیره‌کننده باعث کاهش هزینه و انرژی تامین نشده می‌شود و هرچه تعداد آن بیشتر باشد این تاثیر بیشتر است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک سیستم چند حاملی انرژی با استفاده از نظریه گراف‌ها به فرم ماتریسی مدل‌سازی شده است. این مدل‌سازی امکان محاسبه انرژی تامین نشده را فراهم ساخته



- [06] S. Pazouki and M. R. Haghifam, "Optimal planning and scheduling of energy hub in presence of wind, storage and demand response under uncertainty," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2016.

