

مدل‌سازی اقتصادی و فنی بکارگیری بهینه از ذخیره‌سازهای انرژی در برنامه‌ریزی سیستم‌های انرژی

محمدحسین عباسی سنجدری

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، دانشکده مهندسی مکاترونیک، گروه برق
mh.abbbasi@gmail.com

رضا عفت نژاد

استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، دانشکده مهندسی مکاترونیک، گروه برق (نویسنده مسئول)
reza.efatnejad@kiau.ac.ir

کامبیز رضا پور

استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، دانشکده مهندسی مکاترونیک، گروه مکانیک
rezapour@kiau.ac.ir

یکی از مسائلی که در سیستم‌های قدرت بسیار موردنوجه بهره‌برداران سیستم قرار دارد، تغییرات زیاد و عدم یکنواختی منحنی بار در ساعات مختلف شباهه روز است که این امر باعث افزایش هزینه بهره‌برداری سیستم می‌گردد. در سیستم‌های قدرت معمولاً از ذخیره‌سازهای با ظرفیت و زمان پاسخ‌گویی بالا به عنوان ذخیره بهره‌برداری و ذخیره‌سازهای با سرعت پاسخ‌گویی بالا جهت ذخیره فرکانسی استفاده می‌شود. از آنجایی که تاکنون مقایسه‌ای بین ذخیره‌سازهای بهره‌برداری و فرکانسی و تأثیر آنها در بهره‌برداری اقتصادی تر از سیستم قدرت انجام نپذیرفته، لذا در این مقاله اقدام به بررسی نقش ذخیره‌سازهای تلمبه ذخیره‌ای، هوای فشرده و باتری جهت بهره‌برداری یکپارچه و اقتصادی از یک شبکه تست ۱۱۸ باس استاندارد IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) واحد حرارتی (با استفاده از نرم‌افزار GAMS (General Algebraic Modeling System) شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد ذخیره‌ساز تلمبه ذخیره‌ای نسبت به دو ذخیره‌ساز دیگر عملکرد بهتری در بهره‌برداری یکپارچه و اقتصادی از سیستم دارد. اما ذخیره‌ساز باتری با توجه به ظرفیت پایین خود توانسته است از طریق کاهش هزینه راه اندازی و خاموشی واحدها عملکرد بهتری از خود نسبت به ذخیره‌ساز هوا فشرده که ظرفیت بالاتری داشته نشان دهد.

واژه‌های کلیدی: بهره‌برداری یکپارچه و اقتصادی، ذخیره‌ساز تلمبه ذخیره‌ای، ذخیره‌ساز هوای فشرده، ذخیره‌ساز باتری، برنامه‌ریزی انرژی.

۱. مقدمه

تا قبل از سال ۱۹۶۰ میلادی مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدها فقط به بحث توزیع اقتصادی بار محدود می‌شد. در آن زمان، روش شناخته شده کوهن-تاکر وضعیت اقتصادی بهینه را مشخص می‌کرد. هنگامی که این شرایط برآورده می‌شد، کلیه نیروگاه‌هایی که در مدار بودند، به غیر از نیروگاه‌هایی که به صورت مؤثر با حداقل توان در شبکه بودند، با توجه به میزان سوختشان بارگذاری می‌شدند. بر مبنای روش کوهن-تاکر چندین راه حل برای مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدها پایه‌گذاری گردید که از جمله آن‌ها می‌توان ابداع روش تکرار لامبدا و روش گرادیان برای نیروگاه‌های حرارتی را نام برد (Padhy, 2000; Ting et al., 2006).

مسئله به مدار آوردن نیروگاه‌ها نقش مهمی در بهره‌برداری اقتصادی از سیستم‌های قدرت دارد. مشخص کردن زمان مناسب ورود یا خروج نیروگاه‌ها به مدار از بین حالت‌های ممکن، صرفه‌جویی عظیم اقتصادی در پی خواهد داشت. همچنین ایجاد ذخیره چرخان مناسب در سیستم قدرت، سیستم را از نظر امنیت در وضعیت مطلوبی نگه می‌دارد. مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدها در برگیرنده برنامه روزانه کار نیروگاه‌ها است که در آن باید هزینه‌های بهره‌برداری و روشن/خاموش کردن نیروگاه‌ها کمینه شوند، در حالی که مجموعه محدودیت‌های حاکم رعایت شوند. این مسئله حاوی متغیرهای گستته و پیوسته است که وضعیت روشن/خاموش بودن نیروگاه‌ها و نیز توزیع اقتصادی بار میان واحدها را نشان می‌دهد (Sun et al., 2006).

ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی با توجه به ظرفیت و مدت زمان پاسخ‌گویی خود تحت عنوان ذخیره‌سازهای فرکانسی و بهره‌برداری مورد استفاده قرار می‌گیرند. در سیستم‌های قدرت ذخیره‌ساز انرژی با ظرفیت بالا (نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای، ذخیره‌ساز هوا فشرده) جهت ذخیره بهره‌برداری سیستم و به منظور ترازسازی منحنی مصرف و افزایش ضریب بار مورد استفاده قرار می‌گیرند. ذخیره‌سازهای با ظرفیت پایین‌تر که توانایی پاسخ‌گویی سریع دارند (باتری، ابرخازن، چرخ طیار و...)

معمولًاً جهت ذخیره فرکانسی سیستم و جبران سریع بار و جلوگیری از افت فرکانس و ولتاژ مورد استفاده قرار می‌گیرند. از مهم‌ترین مزایای همگی این ذخیره‌سازهای انرژی در سیستم قدرت می‌توان به بهره‌برداری اقتصادی‌تر از سیستم اشاره کرد (Shahinzadeh et al., 2016).

تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه بهره‌برداری از ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی در سیستم‌های قدرت سنتی یا تجدید ساختاریافته انجام شده است. همگی این تحقیقات نشان می‌دهند، که استفاده از ذخیره‌سازها از نظر بهره‌برداری منافعی را برای بهره‌بردار، تولیدکنندگان و مصرفکنندگان در بر خواهد داشت. ماهلیا و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۴، اقدام به بررسی مشخصات و ویژگی‌های انواع مختلف ذخیره‌ساز پرداخته است. این مقاله طبقه‌بندی برای کاربرد انواع ذخیره‌ساز در زمینه‌های مدیریت انرژی، کیفیت توان و کاربرد در وسایل حمل و نقل انجام داده است.

پرز دیاز و همکاران^۲ در سال ۲۰۱۵، به بررسی این موضوع پرداخته‌اند که وجود واحدهای تلمبه ذخیره‌ای به بهبود وضعیت سطح رزرو سیستم به منظور پشتیبانی و جبران عدم قطعیت‌ها و ماهیت متغیر منابع انرژی تجدیدپذیر از جمله باد و خورشیدی کمک می‌کند. همچنین واحدهای تلمبه ذخیره‌ای شرایط قیمت را در بازارهای لحظه‌ای و خدمات جانبی تحت تأثیر قرار می‌دهند [۶]. خدایار و همکاران در سال ۲۰۱۳، بهره‌برداری یکپارچه از انرژی بادی و واحدهای تلمبه ذخیره‌ای را با در نظر گرفتن محدودیت‌های انتقال و قیود امنیتی سیستم در یک برنامه‌ریزی بهینه‌سازی با مقیاس کسری از ساعت برای برنامه‌ریزی روز پیش رو بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد تعداد واحدهای حرارتی مشارکت کننده برای تأمین بار، هزینه بهره‌برداری و قطع یا کاهش واحدهای بادی مشارکت کننده در تأمین بار کاهش می‌یابد.

بادت و همکاران^۳ در سال ۲۰۱۶، نگاه اجمالی به روش‌های کنونی و گذشته در طبقه‌بندی نحوه عملکرد ذخیره‌سازهای هوافشرده و مقایسه آن‌ها با یکدیگر داشته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که برخلاف

1. Mahlia et al.

2. Pérez-Díaz et al.

3. Budt et al.

آن چیزی که از CAES^۱ انتظار می‌رود فناوری هوای فشرده در رقابت با فناوری تلمبه ذخیره‌ای نتوانسته است که فراگیر گردد.

لو و همکاران^۲ در سال ۲۰۱۴، اقدام به بررسی آخرین فناوری‌های ذخیره‌ساز هوافشرده نموده‌اند. نتایج حاصل از این مقاله نشان می‌دهد CAES در مقایسه کوچک عملکرد بهتر، طول عمر بیشتر و اثرات آلایندگی کمتر و قیمت معقول‌تر در مقایسه با ذخیره‌ساز باتری دارا می‌باشد. ونکاتارامانی و همکاران^۳ در سال ۲۰۱۶، به این موضوع اشاره کرده‌اند که استفاده از باتری برای پوشش دادن عدم تعادل‌های ناشی از ماهیت متغیر باد از لحاظ فنی و اقتصادی کاربردی نیست. این مقاله آینده خوش‌بینانه‌ای را برای ذخیره‌سازهای هوافشرده متصور است و بیان می‌کند که استفاده از ذخیره‌سازهای هوافشرده کوچک نه تنها از لحاظ اقتصادی بهینه هستند، بلکه خطر فروپاشی شبکه را نیز کاهش می‌دهند.

کولر و همکاران^۴ در سال ۲۰۱۵، به بررسی استفاده از یک نیروگاه ذخیره‌ساز از نوع Li-ion در شهر زوریخ سوئیس پرداخته‌اند. این مقاله فناوری باتری را در مقایسه با سایر گزینه‌های ذخیره‌سازی گران دانسته ولی مزایایی را برای آن از جمله کاربرد در رزرو فرکانسی و پیک‌سایی، کنترل ولتاژ و بهبود عملکرد جزیره‌ای شدن شبکه برشمرده است. چو و همکاران^۵ در سال ۲۰۱۵، به بررسی انواع فناوری‌های به کار گرفته شده در ذخیره‌سازی باطری و مقایسه آن با سایر ذخیره‌سازها پرداخته‌اند. نتایج این مقاله نشان می‌دهد، مشکل عمدۀ در بحث استفاده از باتری‌ها به محدودیت‌های اقتصادی و هزینه بالای سرمایه‌گذاری اولیه و تعمیرات و نگهداری باتری‌ها در مقایسه یکسان با سایر گزینه‌ها می‌باشد. در تمامی منع مورد مطالعه تا کنون به بهره‌برداری از یک مدل ذخیره‌ساز خاص توجه شده است و مقایسه‌ای بین ذخیره‌سازهای بهره‌برداری و فرکانسی موجود جهت بهره‌برداری اقتصادی‌تر از

1. Compressed Air Energy Storage

2. Luo et al.

3. Venkataramani et al.

4. Koller et al.

5. Cho et al.

سیستم نشده است. لذا در این مقاله جهت بررسی این امر اقدام به بررسی نقش ذخیره‌سازهای تلمبه ذخیره‌ای، هوای فشرده و باتری جهت بهره‌برداری یکپارچه و اقتصادی از یک شبکه تست ۱۱۸ باس استاندارد IEEE ۵۴ (واحد حرارتی) با استفاده از نرم‌افزار GAMS شده است. در بخش ۲ واحدهای مشارکت‌کننده در سیستم قدرت و قیود بهره‌برداری بیان و در بخش ۳ تابع هدف مسئله ارائه شده است. در بخش ۴ سیستم تست معرفی و نتایج حاصل از اعمال روش پیشنهادی بر روی سیستم نمونه نمایش داده شده است. در نهایت بخش ۵ به نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

۲. واحدهای مشارکت‌کننده و قیود بهره‌برداری

۲-۱. قیود واحد حرارتی

هر واحد حرارتی دارای یک بازه توانی است که فقط می‌تواند مقدار محدودی از ذخیره را که به توانایی نرخ شیب افزایشی آن واحد بستگی دارد، تأمین کند.

$$U_i(t) \times P_i^{\min}(t) \leq P_i(t) \leq U_i(t) \times P_i^{\max}(t) \quad (1)$$

به طوری که:

$$P_i^{\max}(t) = \begin{cases} \min[P_i^{\max}, P_i(t-1) + RUR_i^{\max}] \\ \text{if } U_i(t) = U_i(t-1) = 1 \\ \min[P_i^{\max}, P_i(t-1) + SR_i] \\ \text{if } U_i(t) = 1, U_i(t-1) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$P_i^{\min}(t) = \begin{cases} \max[P_i^{\min}, P_i(t-1) - RDR_i^{\max}] \\ \text{if } U_i(t) = U_i(t-1) = 1 \\ P_i^{\min} \\ \text{if } U_i(t) = 1, U_i(t-1) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

که در معادلات فوق RUR_i^{\max} ^۱ حداکثر نرخ افزایشی واحد حرارتی i ام، SR_i ^۲ نرخ افزایشی راهاندازی واحد حرارتی i ام و RDR_i^{\max} ^۳ حداکثر نرخ کاهشی واحد حرارتی i ام هستند.
(Shahinzadeh et al., 2016)

در برنامه‌ریزی مشارکت واحدها چنانچه یک نیروگاه وارد مدار گردد نمی‌توان آن را فوراً از مدار خارج کرد بلکه باید حداقل زمانی را در شبکه باقی بماند که این مدت حداقل زمان در مدار بودن (MUT^۴) نام دارد.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{t=1}^{L_i} [1 - U_i(t)] = 0 \\ \sum_{t=MTU_i+1}^{T} U_i(t) \geq MUT_i \times Y_i(t), \quad \forall t = L_i + 1, \dots, T - MUT_i + 1 \\ \sum_{t}^T [U_i(t) - Y_i(t)] \geq 0, \quad \forall t = T - MUT_i + 2, \dots, T \\ L_i = \text{Min} \left\{ T, (MUT_i - U_i^0) \times U_i(0) \right\} \end{array} \right. \quad (4)$$

که در این رابطه U_i^0 مدت زمان روشن ماندن تا ساعت صفر، $Y_i(t)$ وضعیت راهاندازی واحد i در ساعت t ام و L_i مدت زمانی که در ابتدای دوره واحد باقی روشن بماند را نمایش می‌دهد. همچنین پس از خاموش شدن واحد، نیروگاه باقیتی مدت زمان مشخصی را خاموش بماند تا از خدمات مکانیکی به ادوات نیروگاه جلوگیری گردد که این مدت زمان حداقل زمان خاموش بودن (MDT^۵) نام دارد.

-
1. Ramp Up Rate
 2. Start-Up Ramp
 3. Ramp Down Rate
 4. Minimum Up Time
 5. Minimum Down Time

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{t=1}^{B_i} U_i(t) = 0 \\ \sum_t^{t+MDT_i-1} [1 - U_i(t)] \geq MDT_i \times Z_i(t), "t = B_i + 1, \dots, T - MDT_i + 1 \\ \sum_t^T [1 - U_i(t) - Z_i(t)] \geq 0, "t = T - MDT_i + 2, \dots, T \\ B_i = \text{Min} \left\{ T, (MDT_i - S_i^0) \times (1 - U_i(0)) \right\} \end{array} \right. \quad (5)$$

که در این رابطه S_i^0 مدت زمان خاموش بودن تا لحظه صفر، $Z_i(t)$ وضعیت خاموشی واحد i ام در ساعت t ام و B_i مدت زمانی که در ابتدای دوره واحد بایستی خاموش بماند را نشان می‌دهد.(Shahinzadeh et al., 2016)

۲-۲. قیود واحدهای تلمبه ذخیره‌ای

در واحدهای تلمبه ذخیره‌ای انرژی پتانسیل آب قرار گرفته در ارتفاع را طبق رابطه زیر به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند.

$$P_{ps} = \eta \times \rho_{water} \times g \times H \times q \quad (6)$$

که در این رابطه η بازده توربین آبی، ρ_{water} وزن خالص آب بر حسب Kg/m^3 ، g شتاب جاذبه زمین، H ارتفاع مؤثر توربین از مخزن فوقانی و q دبی آب خروجی بر حسب m^3/h هستند. واحدهای تلمبه ذخیره‌ای در هر ساعت دارای یکی از سه حالت عملکرد Idle، $(I_g=I_p=0)$ ، پمپاژ $(I_p=1, I_g=0)$ و تولید توان $(I_g=1, I_p=0)$ هستند. این واحدها همچنین دارای قیود حداقل و حداکثر دبی خروجی و ورودی آب، توان تولیدی و قیود حجم مخزن فوقانی و پایینی هستند. رابطه تولید توان می‌تواند از طریق برآش منحنی نیز به دست آید و با یکتابع درجه دو یا سه تقریب زده شود.

$$P_{min_g}(l) \times I_g(l, t) \leq P_g(l, t) \leq P_{max_g}(l) \times I_g(l, t) \quad (7)$$

$$P_{min_p}(l) \times I_p(l, t) \leq P_p(l, t) \leq P_{max_p}(l) \times I_p(l, t) \quad (8)$$

$$Q_{min_g}(l) \times I_g(l, t) \leq Q_g(l, t) \leq Q_{max_g}(l) \times I_g(l, t) \quad (9)$$

$$Q_{\min_p}(l) \times I_p(l, t) \leq Q_p(l, t) \leq Q_{\max_p}(l) \times I_p(l, t) \quad (10)$$

$$V_{\min_up}(l) \leq V_{up}(l, t) \leq V_{\max_up}(l) \quad (11)$$

$$V_{\min_low}(l) \leq V_{low}(l, t) \leq V_{\max_low}(l) \quad (12)$$

$$V_{up}(l, t+1) = V_{up}(l, t) - Q_g(l, t) \times I_g(l, t) + Q_p(l, t) \times I_p(l, t) \quad (13)$$

$$V_{low}(l, t+1) = V_{low}(l, t) + Q_g(l, t) \times I_g(l, t) - Q_p(l, t) \times I_p(l, t) \quad (14)$$

$$I_g(l, t) + I_p(l, t) \leq 1 \quad (15)$$

$$I_g(l, t) \text{ and } I_p(l, t) = 0 \quad (16)$$

$$Q_g(l, t) \text{ and } Q_p(l, t) = 0 \quad (17)$$

$$P_g(l, t) \text{ and } P_p(l, t) = 0 \quad (18)$$

که در روابط فوق $Q_{g/p}(l, t)$ دبی آب در حالت ژنراتوری و پمپی بر حسب m^3 و $P_{g/p}(l, t)$ توان تولیدی و مصرفی در حالت ژنراتوری حجم مخزن بالایی و پایینی بر حسب m^3 و $I_{g/p}(l, t)$ بیانگر وضعیت واحد ذخیره‌ساز در ساعت t است که در صورتی که I_g و پمپی می‌باشدند. $I_{g/p}(l, t)$ بیانگر وضعیت واحد ذخیره‌ساز در ساعت t است که در صورتی که I_p هر دو صفر باشدند یعنی واحد در حالت عدم فعالیت یا Idle قرار دارد. رابطه (۱۰) تا (۱۸) باعث می‌شود واحد به صورت هم زمان در یک ساعت در وضعیت پمپاژ و تولید قرار نگیرد

(Kanakasabapathy Swarup, 2010; Nazari et al., 2010)

۳-۲. ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده

هزینه بهره‌برداری مربوط به سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده در معادله (۱۹) به صورت زیر بیان شده است.

$$\text{Cost}_c(t) = \sum_{j=1}^{N_c} P_{c,p}(j, t) \lambda_e(t) \quad (19)$$

قیود فنی مربوط به سیستم ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده در معادلات (۲۰) تا (۲۶) بیان شده است.

$$V_{inj}(j, t) = \alpha_j^{inj} P_{c,p}(j, t) \quad (20)$$

$$P_{c,s}(j, t) = \alpha_j^p V^p(j, t) \quad (21)$$

$$V_{min}^{inj}(j) u^{inj}(j, t) \leq V^{inj}(j, t) \leq V_{max}^{inj}(j) u^{inj}(j, t) \quad (22)$$

$$V_{min}^p(j) u^p(j, t) \leq V^p(j, t) \leq V_{max}^p(j) u^p(j, t) \quad (23)$$

$$u^p(j, t) + u^{inj}(j, t) \leq 1 \quad (24)$$

$$A(j, t+1) = A(j, t) + V^{inj}(j, t) - V^p(j, t) \quad (25)$$

$$A^{min}(j) \leq A(j, t) \leq A^{max}(j) \quad (26)$$

قید (۲۰) مدل ریاضی مقدار هوای تزریق شده به ذخیره‌ساز می‌باشد که با واحد مگاوات‌بر ساعت بیان شده است. معادله (۲۱) مقدار انرژی تولید شده توسط واحد ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده می‌باشد. مدل ریاضی مقدار هوایی که در داخل ذخیره‌ساز، ذخیره می‌گردد و سپس از ذخیره‌ساز به محفظه احتراق پمپاژ می‌شود (البته باید به این نکته که ظرفیت محفظه احتراق بسته به اندازه شیر و فشار داخل محفظه محدود می‌باشد توجه کرد) در معادلات (۲۲) و (۲۳) ارائه شده است.

واحد ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده یا می‌تواند در حالت ذخیره (ذخیره هوای در داخل ذخیره‌ساز) قرار گیرد و یا در حالت پمپاژ (پمپاژ هوای ذخیره‌ساز در هر ساعت به روزرسانی هم‌زمان جلوگیری کند. مقدار هوای ذخیره شده در داخل ذخیره‌ساز در هر ساعت به طور می‌شود و جهت اطلاع از مقدار هوای ذخیره شده در داخل ذخیره‌ساز، مقدار هوای فعلی ذخیره‌ساز را به اضافه یا منهای مقدار هوای ذخیره شده و یا پمپاژ شده می‌شود که مدل ریاضی این جمله در معادله (۲۵) بیان شده است. درنهایت باید به این نکته توجه کرد که مخزن ذخیره‌ساز نیز جهت ذخیره هوای محدودیت‌هایی می‌باشد که در معادله (۲۶) این محدودیت در نظر گرفته شده است .(Ghalelou et al., 2016)

۴-۴. ذخیره‌ساز باتری

قیود فنی مربوط به سیستم ذخیره‌ساز انرژی باتری در معادلات (۲۷) تا (۴۰) بیان شده است.

$$0 \leq pb_es(t) \leq Pn_{max} \cdot N_{pulse}(t) \quad (27)$$

$$0 \leq pb_sp(t) \leq pb_ep(t) \cdot u_p(t) \quad (28)$$

$$0 \leq pb_ep(t) + pb_sp(t) \leq Pn_{max} \cdot u_p(t) \quad (29)$$

$$0 \leq pb_ss(t) \leq Pn_{max} \cdot N_{pulse}(t) \quad (30)$$

$$pb_es(t) + pb_ss(t) \leq Pn_{max} \cdot N_{pulse}(t) \quad (31)$$

$$Pb_{exp}(t) = pb_es(t) + \rho_{del} \cdot pb_ss(t) \quad (32)$$

$$d(t) = -3.4497 \cdot N_{pulse}(t)^3 + 21.5962 \cdot N_{pulse}(t)^2 - 45.7961 \cdot N_{pulse}(t) + 34.7117 \quad (33)$$

$$P_{loss}(t) = \frac{[7 - (N_{pulse}(t) \cdot d(t))] \cdot u_s(t)}{d(t)} \quad (34)$$

$$u_s(t) + u_p(t) \leq 1 \quad (35)$$

$$E(t) = E(t-1) + Pb_{exp}(t) \cdot (1 + P_{loss}(t)) + \eta \cdot (\rho_{del} \cdot pb_sp(t) + pb_ep(t)) \quad (36)$$

$$E(t) \leq E_{max} \quad (37)$$

$$u_s(t) \leq N_{pulse}(t) \leq 2.6u_s(t) \quad (38)$$

$$E_{end} = \tau \cdot E_1 \quad (39)$$

$$pb_{ss}(t) \leq E(t) \cdot N_{pulse}(t+1) \quad (40)$$

روابط (۲۷) تا (۳۱) محدوده‌های مجاز مشارکت با تری در بازارهای انرژی و ذخیره چرخان در حالت‌های مختلف را نشان می‌دهند. بر این اساس روابط (۲۷)، (۳۰) و (۳۱) محدودیت دشارژ و روابط (۲۸) و (۲۹) محدودیت شارژ با تری جهت شرکت در این بازارها را نشان می‌دهند. رابطه (۳۲) بیانگر میزان تولید ساعتی مورد انتظار با تری در بازارهای انرژی روز بعد و ذخیره چرخان می‌باشد. رابطه (۳۳) مشخصه دشارژ با تری NaS را نشان می‌دهد که توسط یک تابع درجه سه بازش می‌شود. رابطه (۳۴) بیانگر تلفات دشارژ با تری NaS به ازای نقطه کار می‌باشد. رابطه (۳۵) بدیهی است که در یک ساعت خاص با تری نمی‌تواند در هر دو حالت شارژ و دشارژ باشد که جهت اجتناب از آن، این رابطه اعمال شده است. رابطه (۳۶) میزان انرژی ذخیره شده در با تری را در هر ساعت بر حسب میزان انرژی ذخیره شده در ساعت قبل و انرژی شارژ یا دشارژ شده در ساعت جاری محاسبه می‌کند. رابطه (۳۷) بیانگر بیشینه انرژی قابل ذخیره در با تری می‌باشد.

رابطه (۳۸) بیان می‌کند که مدت زمان دشارژ با تری NaS این با تری متناسب با نقطه کار آن می‌تواند از سی ثانیه ($N_{pulse} = 500\%$) تا هفت ساعت ($N_{pulse} = 100\%$) تغییر کند. از آنجاکه بازارهای انرژی و ذخیره چرخان، ساعتی در نظر گرفته شده‌اند، مدت زمان دشارژ با تری بایستی حداقل یک ساعت باشد. لذا با توجه به مشخصه دشارژ با تری، نقطه کار با تری بین ($N_{pulse} = 100\%$) تا ($N_{pulse} = 260\%$) محدود می‌شود.

رابطه (۳۹) انرژی موجود در با تری در انتهای بازه زمانی روزانه، پارامتری بسیار مؤثر در مسئله خود برنامه‌ریزی است که شرکت تولید بایستی با توجه به پیش‌بینی‌های خود از پتانسیل سود در همان روز و روز بعد درباره آن تصمیم گیری کند. تصمیم شرکت تولید از طریق انتخابی مناسب برای پارامتر Δ به مسئله اعمال می‌شود. رابطه (۴۰) بیانگر این است که با تری بایستی همواره از پتانسیل لازم برای تولید آنچه در بازار ذخیره چرخان برای ساعت بعد شرکت کرده است، برخوردار باشد .(Kazempour et al., 2009)

۲-۵. قیود سیستم

بهره‌بردار باید نیازهای سیستم از جمله ذخیره چرخان را برای سطح مطمئنی از امنیت و قابلیت اعتماد در نظر بگیرد. در اینجا با قید ذخیره چرخان بالا و پایین این نیازها تأمین شده‌اند؛ که قیود سیستم عبارت‌اند از:

۲-۵-۱. قید تعال توان

$$\sum_{i=1}^N U_i(t) \times P_i(t) \pm P_{ES}(t) = P_L(t) \quad (41)$$

که در آن $P_L(t)$ بار مصرفی در ساعت t ام و $P_{ES}(t)$ میزان توان واحدهای ذخیره‌سازی در ساعت t ام است (Shahinzadeh et al., 2014).

۲-۵-۲. قید ذخیره چرخان

$$\sum_{i=1}^N U_i(t) \times P_i(t) \geq SRR + P_{ES}(t) \quad (42)$$

که در آن SRR^1 نیاز ذخیره چرخان می‌باشد.

۳. تابع هدف

تابع هدف در این مقاله به حداقل رساندن هزینه‌های بهره‌برداری شامل هزینه تولید برق و هزینه راه‌اندازی و خاموش کردن می‌باشد.

می‌توان هزینه تغییر وضعیت ذخیره‌سازها و هزینه‌ای ثابت بهمنظور در نظر گرفتن استهلاک واحد را نیز به تابع هدف اضافه کرد تا بهینه‌سازی با در نظر گرفتن تعداد تغییر وضعیت واحد ذخیره‌ساز نیز صورت پذیرد. در روابط زیر (t) SRR رزرو موردنیاز در ساعت t است. اگر واحدهای ذخیره‌ساز در حالت تولید باشند می‌تواند در صورت نیاز تولید خود را به تا P_{g_max} افزایش دهند. چنانچه در حالت Idle باشد

1. Spinning Reserve Requirement

می‌توانند تولیدش را به P_{g_max} برسانند و اگر در حالت ذخیره‌سازی باشند ابتدا ذخیره‌سازی را قطع و سپس به اندازه P_{g_max} اقدام به تولید می‌نمایند (Moradi et al., 2016).

$$\min : \text{Total cost} = \sum_{t=1}^T \sum_i C_T + SUC_i \times y(i, t) + \quad (43)$$

$$SDC_i \times z(i, t)$$

$$\sum_{i=1}^N P(i, t) u(i, t) + \sum_{i=1}^L (P_{\text{Discharge}}(i, t) I_{\text{Discharge}}(1, t) - \quad (44)$$

$$P_{\text{Charge}}(i, t) I_{\text{Charge}}(1, t)) = P_D(t)$$

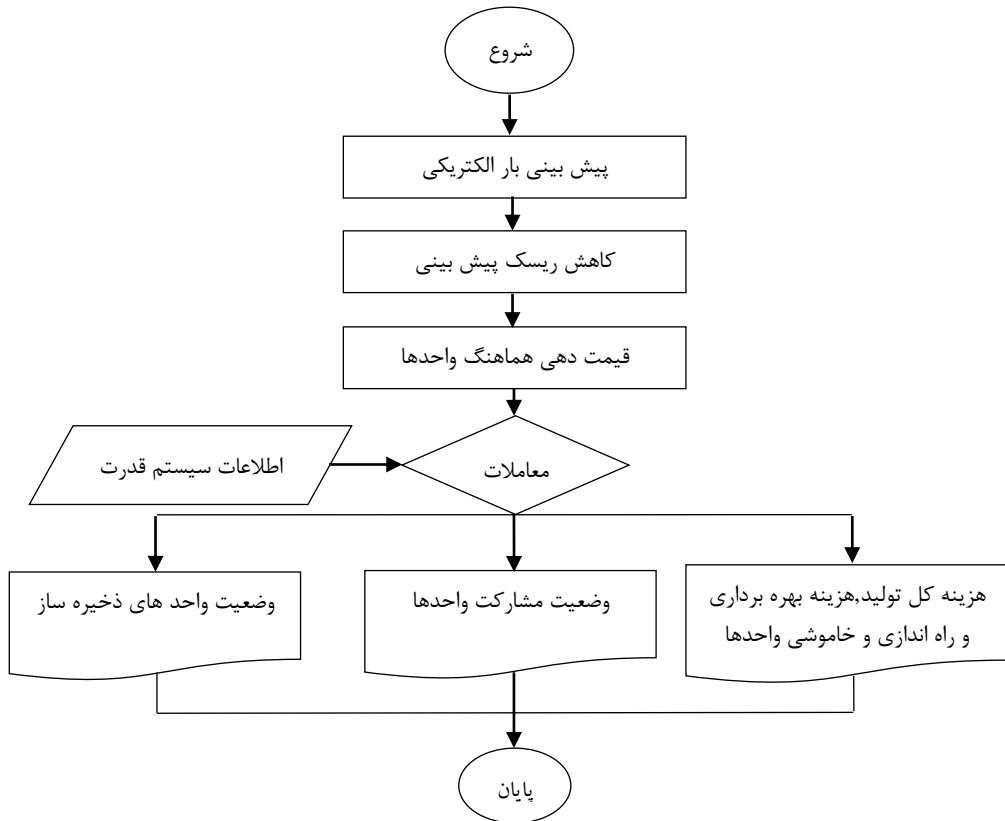
$$\sum_{i=1}^N P_{\text{max}}(i, t) u(i, t) + \sum_{i=1}^L P_{\text{max_g}}(1, t) - \quad (45)$$

$$\sum_{i=1}^L (P_{\text{Discharge}}(i, t) I_{\text{Discharge}}(1, t) - P_{\text{Charge}}(i, t) I_{\text{Charge}}(1, t)) - P_D(t) \geq SRR(t)$$

از لحاظ ریاضی حل مسئله در مدار قرار گرفتن واحدهای نیروگاهی یک مسئله غیرخطی آمیخته با عدد صحیح^۱ MINLP با چندین متغیر و قید هست که حل آن یکی از پیچیده‌ترین مسائل مهندسی محسوب می‌شود. از لحاظ روش حل روش‌های لیست حق تقدم، برنامه‌ریزی پویا، برنامه‌ریزی آمیخته با عدد صحیح معرفی گردیده‌اند که با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و یا نرم‌افزارهای بهینه‌سازی همچون نرم‌افزار GAMS قابل حل هستند. این نرم‌افزار حل کننده‌های مختلفی برای حل انواع مسائل بهینه‌سازی دارد که با توجه به ویژگی‌های آن مسئله حل کننده مناسب را باید انتخاب کرد.

1. Mixed Integer Non-linear programing

در این مقاله از حل کننده SBB برای مسئله MINLP و از حل کننده CPLEX برای مسئله^۱ استفاده شده است. حل کننده SBB قابلیت حل متغیرهای شبه پیوسته را دارد که این ویژگی برنامه‌ریزی را با سهولت همراه می‌سازد. شکل (۱) فلوچارت عملکرد در این مقاله را نمایش می‌دهد.

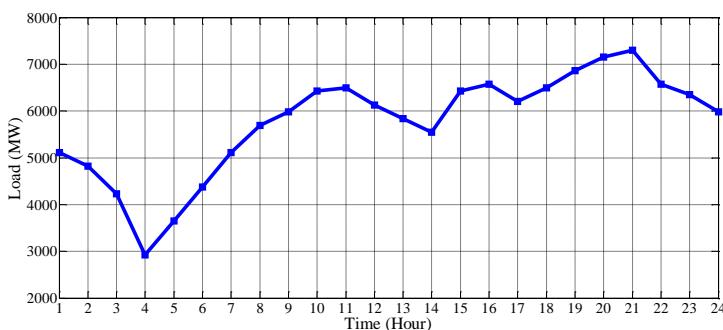


شکل ۱. فلوچارت عملکرد در این مقاله

1. Mixed integer programing

۴. مطالعه عددی و شبیه‌سازی

در این مقاله یک سیستم ۱۱۸ باس استاندارد IEEE که دارای ۵۴ واحد حرارتی است مورد استفاده قرار گرفته است. منحنی بار روزانه پیش‌بینی شده نیز به ترتیب در شکل (۲) نمایش داده شده است .(Shahidehpour et al., 2012)



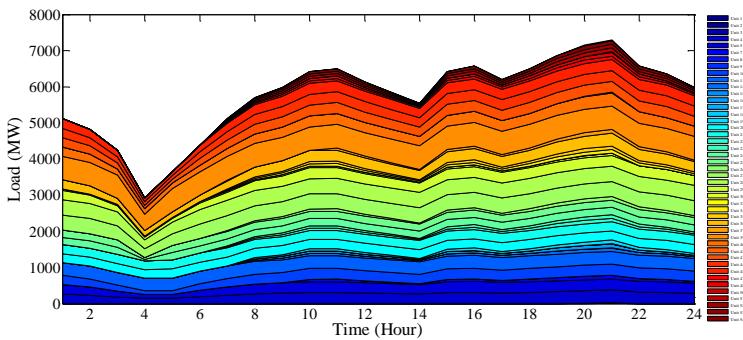
شکل ۲. منحنی بار روزانه پیش‌بینی شده

هدف ما در مقاله هماهنگی اقتصادی واحدهای حرارتی و ذخیره‌ساز انرژی به منظور به حداقل رساندن هزینه بهره‌برداری است. برای بررسی این موضوع چند سناریو به شرح زیر در نظر گرفته شد:

- سناریو ۱: بهره‌برداری اقتصادی واحدهای حرارتی (بدون حضور واحدهای ذخیره‌ساز انرژی).
- سناریو ۲: بهره‌برداری هماهنگ اقتصادی واحدهای حرارتی و ذخیره‌ساز تلمبه ذخیره‌ای.
- سناریو ۳: بهره‌برداری هماهنگ اقتصادی واحدهای حرارتی و ذخیره‌ساز هواشرده.
- سناریو ۴: بهره‌برداری هماهنگ اقتصادی واحدهای حرارتی و ذخیره‌ساز باتری.

۴-۱. سناریو ۱: بهره‌برداری اقتصادی واحدهای حرارتی (بدون حضور واحدهای ذخیره‌ساز انرژی)

در سناریوی (۱) فقط واحدهای حرارتی برای تأمین بار فراخوانی می‌شوند. بر این اساس شکل (۳) نیز نحوه توزیع توان بین واحدهای حرارتی تعیین شده در برنامه مشارکت واحدها را نمایش می‌دهد.

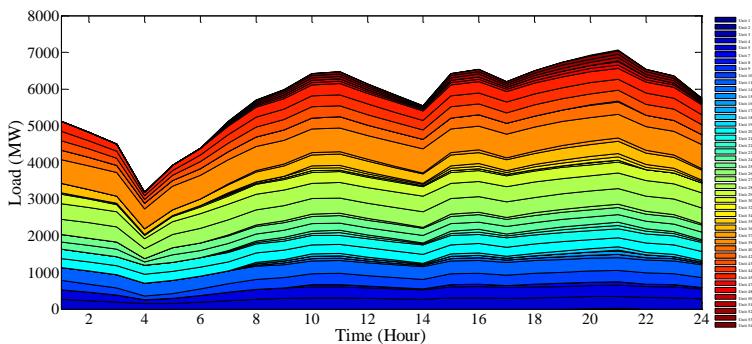


شکل ۳. نحوه توزیع توان بین واحدهای حرارتی در سیستم ۱۱۸ باس ۵۴ واحد (سناریو ۱)

مطابق انتظار هر چه بار افزایش می‌یابد واحدهای گران‌قیمت‌تری وارد مدار می‌شوند. هزینه کل تولید واحدهای حرارتی $527315/9016\$$ است. میانگین هزینه بهره‌برداری شامل هزینه رزرو $15/2833\$/\text{MW}$ را نشان می‌دهد و بایستی از مصرف کنندگان گرفته شود. در این حالت هزینه راهاندازی و خاموش شدن واحدها برابر $52089\$$ است.

۴-۲. سناریو ۲: بهره‌برداری هماهنگ اقتصادی واحدهای حرارتی و ذخیره‌ساز تلمبه ذخیره‌ای

در سناریوی (۲) واحدهای تلمبه ذخیره‌ای به‌طور مستقل در راستای کاهش هزینه کل بهره‌برداری عمل می‌کند. واحدهای تلمبه ذخیره‌ای با جابجایی توان تولیدی از ساعت‌های غیرپیک به ساعت‌های پیک می‌توانند هزینه کل بهره‌برداری را کاهش دهند. به عبارت دیگر، یک واحد تلمبه ذخیره‌ای توان را در ساعت‌های غیرپیک با قیمت پایین‌تری نسبت به ساعت‌های اوج بار خریداری و ذخیره می‌کند و همین مقدار توان را در ساعت‌های پیک به شبکه تحویل می‌دهد و آن را با قیمت بالاتری می‌فروشد. در ضمن این واحدها از روش‌شن شدن و بهره‌برداری از واحدهای حرارتی گران‌قیمت در ساعت‌های پیک جلوگیری می‌کنند که باعث کاهش قیمت تسویه بازار می‌گردد. این واحدها از بروز جهش قیمتی در محیط تجدید ساختاریافته تا حد امکان جلوگیری کرده و در پیک‌سایی از بار به بهره‌بردار کمک می‌کنند. جدول (۱) مشخصات واحد تلمبه ذخیره‌ای استفاده شده در این شیوه‌سازی را نمایش می‌دهد. شکل (۴) نیز نحوه توزیع توان بین واحدهای حرارتی تعیین شده را نمایش می‌دهد.



شکل ۴. نحوه توزیع توان بین واحدهای حرارتی در سیستم ۱۱۸ باس ۵۴ واحد IEEE (سناریو ۲)

جدول ۱. مشخصات واحد تلمبه ذخیره‌ای (Ardehali, 2012).

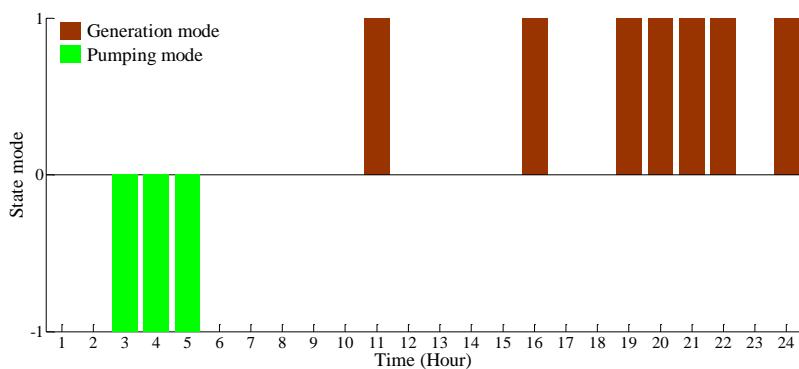
نام واحد تلمبه ذخیره‌ای	پانچیاکو
حجم آب هر مخزن (m ³)	۶۵۰۰۰
تابع توان	$P_g = -1.3036 + 0.6538Q_g - 0.0945e - 5Q_g^2$ $P_p = +1.1046 + 0.7383Q_p + 0.1680e - 5Q_p^2$
شار آب (m ³ /s)	۳۵۷/۵
حداقل	۴۸
توان حالت ژنراتوری (MW)	$\begin{array}{ll} \text{حداکثر} & ۲۳۳/۶ \\ \text{حداقل} & ۲۹/۵۸ \end{array}$
توان حالت پمپی (MW)	$\begin{array}{ll} \text{حداکثر} & ۲۶۵/۲۲ \\ \text{حداقل} & ۳۷/۳ \end{array}$

* مقدار حجم مخزن در ابتدا و انتهای زمان مورد مطالعه مقدار ۲۰۰۰۰۰ m³ است.

مأخذ: نتایج تحقیق

در این حالت اضافه شدن واحد تلمبه ذخیره‌ای از مشارکت واحدهای گران‌قیمت در تأمین پیک‌بار جلوگیری کرده و هزینه کل تولید واحدهای حرارتی با کاهش نسبت به سناریو (۱) برابر ۵۲۱۳۰۰/۵۴۷۳\$ شده است. مشارکت واحدهای تلمبه ذخیره‌ای میانگین هزینه بهره‌برداری شامل هزینه رزرو را به ۱۵/۲۳۸۹\$/MW کاهش می‌دهد. در این حالت واحد تلمبه ذخیره‌ای برق را از

شبکه خریداری می‌کند و در پیک‌بار دوباره به شبکه می‌فروشد. از آنجاکه قیمت برق در پیک‌بار بالاتر رفته این مابه التفاوت سود واحد تلمبه ذخیره‌ای است. در این حالت هزینه رزرو کمی کمتر شده چراکه واحد تلمبه ذخیره‌ای بخشی از رزرو سیستم را در حالت‌های مختلف بهره‌برداری اش به عهده می‌گیرد. در این سناریو همانند سناریو (۱) هزینه راهاندازی و خاموش شدن واحدها برابر \$520.89 است. شکل (۵) نحوه برنامه زمان‌بندی عملکرد واحد تلمبه ذخیره‌ای را نمایش می‌دهد.



شکل ۵. نحوه عملکرد واحد تلمبه ذخیره‌ای در ۲۴ ساعت

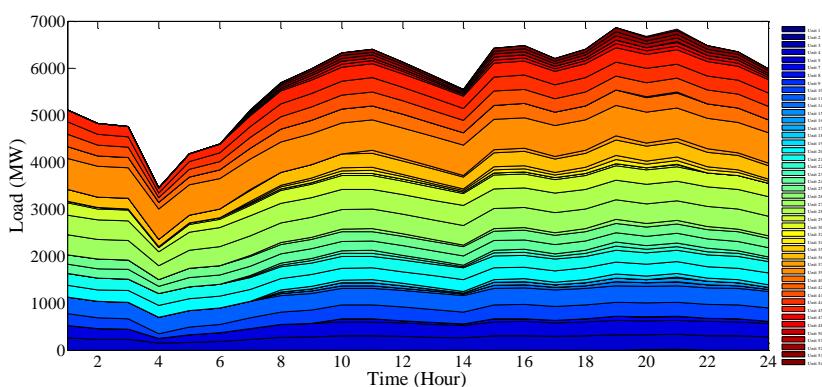
۴-۳. سناریو ۳: بهره‌برداری هماهنگ اقتصادی واحدهای حرارتی و ذخیره‌ساز هوافشrede

در سناریو (۳) به منظور کاهش هزینه بهره‌برداری از ذخیره‌ساز هوافشredه استفاده شده است. واحدهای هوافشredه نیز همانند سایر ذخیره‌سازها در ساعات غیر پیک برق را با قیمت پایین‌تری نسبت به ساعات اوج بار خریداری و در قالب فشرده‌سازی هوا ذخیره می‌کند و در ساعات پیک انرژی ذخیره‌شده را به شبکه تحویل می‌دهد و آن را با قیمت بالاتری می‌فروشد. جدول (۲) مشخصات واحد ذخیره‌ساز هوافشredه استفاده شده در این شبیه‌سازی را نمایش می‌دهد. شکل (۶) نیز نحوه توزیع توان بین واحدهای حرارتی تعیین شده را نمایش می‌دهد.

جدول ۲ . مشخصات واحد ذخیره‌ساز هوافشرده (Shahinzadeh et al., 2016)

۲۰۰۰	حداکثر ظرفیت انرژی ذخیره شده در ذخیره‌ساز هوافشرده (MWh)
۴۰۰	حداقل ظرفیت انرژی ذخیره شده در ذخیره‌ساز هوافشرده (MWh)
۵۰۰	حداکثر سطح هوای تزریق شده داخل ذخیره‌ساز (MWh)
۱۰۰	حداقل سطح هوای تزریق شده داخل ذخیره‌ساز (MWh)
۵۰۰	حداکثر سطح هوای پمپاژ شده از ذخیره‌ساز به محفظه احتراق (MWh)
۱۰۰	حداقل سطح هوای پمپاژ شده از ذخیره‌ساز به محفظه احتراق (MWh)
۰/۹۵	بازده توان تزریقی سیستم ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده
۰/۹۵	بازده توان تولیدی سیستم ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده

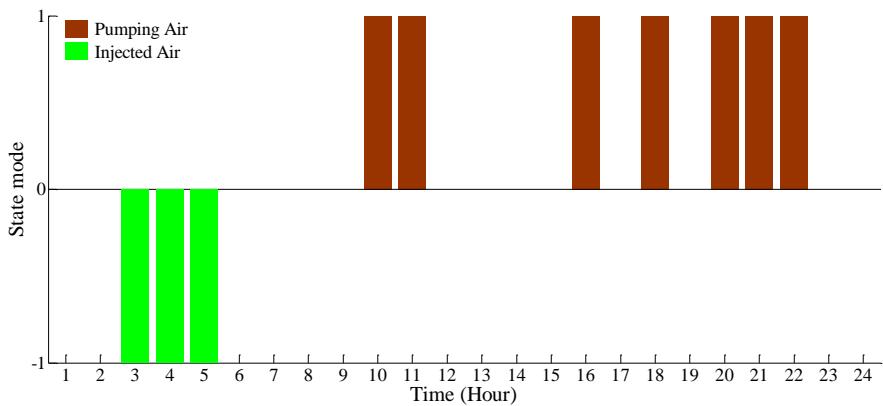
مأخذ: نتایج تحقیق



شکل ۶ . نحوه توزیع توان بین واحدهای حرارتی در سیستم IEEE ۱۱۸ باس ۵۴ واحد (سناریو ۳)

در این سناریو اضافه شدن واحد هوای فشرده مانع از مشارکت واحدهای گران‌قیمت و کاهش هزینه کل تولید واحدهای حرارتی نسبت به سناریو (۱) شده است. در این سناریو هزینه کل تولید واحدهای حرارتی برابر $523361/4666\$$ گردیده که به تع آن میانگین هزینه بهره‌برداری شامل هزینه رزرو را به $15/2574\$/MW$ کاهش داده است. در این حالت هزینه رزرو کمی کمتر شده چرا که

واحد هوای فشرده بخشی از رزرو سیستم را در حالت‌های مختلف بهره‌برداری اش به عهده می‌گیرد. در این سناریو همانند سناریو (۱) هزینه راهاندازی و خاموش شدن واحدها برابر \$۵۲۰۸۹ است. شکل (۷) نحوه برنامه زمان‌بندی عملکرد واحد هوای فشرده را نمایش می‌دهد.



شکل ۷. نحوه عملکرد واحد هوای فشرده در ۲۴ ساعت

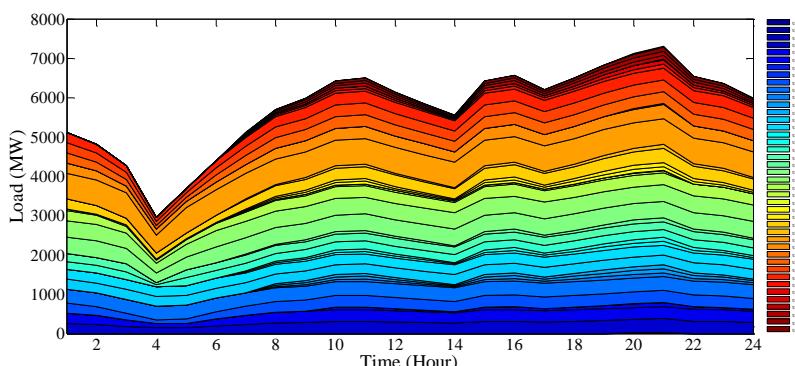
۴-۴. سناریو ۴؛ بهره‌برداری هماهنگ اقتصادی واحدهای حرارتی و ذخیره‌ساز بااتری

در سناریو (۴) بهمنظور کاهش هزینه بهره‌برداری از ذخیره‌ساز بااتری استفاده شده است. ذخیره انرژی در بااتری از جمله تکنولوژی‌های است که انواع واحدهای نیروگاهی آن در فاز امتحان یا پیاده‌سازی است. جدول (۳) مشخصات واحد ذخیره‌ساز بااتری استفاده شده در این شبیه‌سازی را نمایش می‌دهد. شکل (۸) نیز نحوه توزیع توان بین واحدهای حرارتی تعیین شده را نمایش می‌دهد.

جدول ۳. مشخصات واحد ذخیره‌ساز باتری (Kazempour et al., 2009)

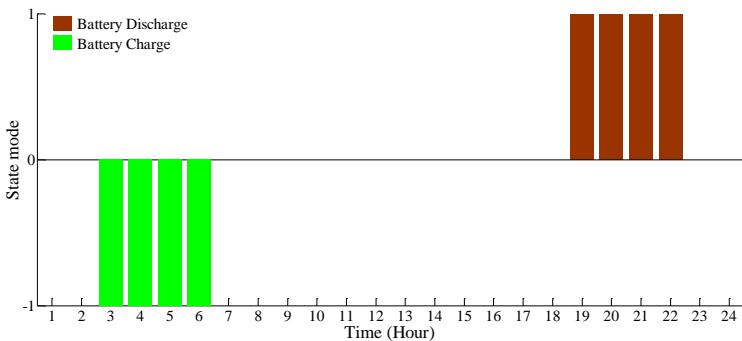
احتمال فراخوانی برای تولید در بازار ذخیره چرخان (درصد)	۰/۰۳
توان نامی باتری NaS (مگاوات)	۳۳
راندمان باتری NaS (درصد)	۰/۹
بیشینه انرژی قابل ذخیره در باتری NaS (مگاوات ساعت)	۳۴۰
ثابت تنظیم‌کننده میزان انرژی ذخیره شده در باتری NaS برای روز بعد	۱
میزان انرژی ذخیره شده در باتری NaS در ابتدای بازه زمانی تعیین شده (مگاوات ساعت)	۲۰

مأخذ: نتایج تحقیق



شکل ۸. نحوه توزیع توان بین واحدهای حرارتی در سیستم IEEE ۱۱۸ باس واحد ۵۴ (سناریو ۴)

در این سناریو اضافه شدن واحد ذخیره‌ساز باتری هزینه کل تولید واحدهای حرارتی برابر \$ ۵۲۸۰۸۷/۷۳۳ شده است. مشارکت واحد ذخیره‌ساز باتری میانگین هزینه بهره‌برداری شامل هزینه رزرو را به \$ ۱۵/۲۴۷۱/MW کاهش می‌دهد. در این سناریو هزینه راه اندازه‌ای و خاموش شدن واحدها با کاهش نسبت به سناریوهای گذشته برابر \$ ۴۷۵۱۹ شده است. شکل (۹) نحوه برنامه زمان‌بندی عملکرد واحد تلمبه ذخیره‌ای را نمایش می‌دهد.



شکل ۹. نحوه عملکرد واحد ذخیره‌ساز باتری در ۲۴ ساعت

۴-۵. جمع‌بندی و تجزیه و تحلیل سناریوها

نتایج سناریوهای مختلف موجود در جدول (۴) نشان می‌دهد که در تمام سناریوهای استفاده شده از ذخیره‌سازهای انرژی (تلمبه ذخیره‌ای، هوافشرده و باتری) میانگین هزینه بهره‌برداری نسبت به سناریو (۱) کاهش یافته است. در سناریو (۲ و ۳) ذخیره‌سازهای تلمبه ذخیره‌ای و هوافشرده سبب شده‌اند که هزینه کل تولید واحدهای حرارتی کاهش یابد. این امر به دلیل آن است که این نیروگاه‌ها در زمان‌های غیرپیک که هزینه انرژی کم است اقدام به ذخیره انرژی و در زمان‌های پیک که هزینه انرژی بالاست اقدام به فروش انرژی ذخیره شده خود می‌نمایند. این امر سبب خواهد شد تا در ساعات اوچ مصرف نیاز به حضور واحدهای حرارتی باقیمت بالا نباشد. در این دو سناریو (۲ و ۳) هزینه راه‌اندازی و خاموشی ما نسبت به سناریو (۱) تغییر نخواهد کرد. ولی در سناریو (۴) ذخیره‌ساز باتری به دلیل ابعاد کوچک خود نتوانسته هزینه تولید واحدهای حرارتی‌های حرارتی را کاهش دهد ولی از طریق عملکرد سریع توانسته با کاهش نیاز به حضور تعدادی از واحدها (واحدهای ۱۵، ۱۷ و ۱۸) هزینه راه‌اندازی و خاموشی سیستم را کاهش دهد و به تبع آن میانگین هزینه بهره‌برداری خود را کاهش دهد.

جدول ۴ . نتایج سناریوهای شبیه‌سازی شده

سناریو ۴	سناریو ۳	سناریو ۲	سناریو ۱	
۵۲۸۰.۸۷/۷۳	۵۲۳۳۶۱/۴۶	۵۲۱۳۰۰/۵۴	۵۲۷۳۱۵/۹۰	هزینه کل تولید واحدهای حرارتی (\$)
۱۵/۲۴۷۱	۱۵/۲۵۷۴	۱۵/۲۳۸۹	۱۵/۲۸۳۳	میانگین هزینه بهره‌برداری (\$/MW)
۴۷۵۱۹	۵۲۰.۸۹	۵۲۰.۸۹	۵۲۰.۸۹	هزینه راهاندازی و خاموشی (\$)

مأخذ: نتایج تحقیق

همان‌گونه که که در جدول (۴) مشاهده می‌گردد، ذخیره‌ساز تلمبه ذخیره‌ای توانسته است نسبت به دو ذخیره‌ساز دیگر عملکرد بهتری در بهره‌برداری از سیستم داشته و هزینه بهره‌برداری سیستم را بیشتر کاهش دهد. اما ذخیره‌ساز باتری به عنوان یک ذخیره‌ساز فرکانسی و با توجه به ظرفیت پایین در بهره‌برداری از سیستم توانسته است از طریق کاهش هزینه راه اندازی و خاموشی واحدها عملکرد بهتری نسبت به ذخیره‌ساز هوا فشرده که یک ذخیره‌ساز بهره‌برداری و ظرفیت بالاتری از خود نشان دهد و هزینه بهره‌برداری را به مقدار قابل قبولی کاهش دهد.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله بهره‌برداری هماهنگ و اقتصادی واحدهای حرارتی و ذخیره‌سازهای مطرح شده به منظور به حداقل رساندن هزینه بهره‌برداری بر روی یک شبکه تست (سیستم ۱۱۸ باس ۵۴ واحد IEEE) مورد ارزیابی قرار گرفت. شبیه سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که در سناریو (۱) (فقط واحدهای حرارتی برای تأمین بار مشارکت دارند) میانگین هزینه بهره‌برداری برابر $15/2833 \$/MW$ گردید است. میانگین هزینه بهره‌برداری در سناریو ۲ (واحدهای حرارتی و ذخیره‌ساز تلمبه ذخیره‌ای)، سناریو (۳) (واحدهای حرارتی و ذخیره‌ساز هوا فشرده) و سناریو (۴) (واحدهای حرارتی و ذخیره‌ساز باتری) به ترتیب برابر $15/2389 \$/MW$ ، $15/2574 \$/MW$ و $15/2471 \$/MW$ گردیده است. با توجه به شبیه سازی‌های انجام شده می‌توان نتیجه‌گیری کرد که ذخیره‌ساز تلمبه ذخیره‌ای نسبت به دو ذخیره‌ساز دیگر عملکرد بهتری در بهره‌برداری یکپارچه و

اقتصادی از سیستم داشته است. البته ذخیره‌ساز با تری با توجه به ظرفیت خود توانسته عملکردی قابل قبولی از خود نشان دهد و از طریق کاهش هزینه راه اندازی و خاموشی واحدها هزینه بهره‌برداری سیستم را بیشتر از ذخیره‌ساز هوا فشرده کاهش دهد. لذا با توجه به پیشرفت سریع تکنولوژی مربوط به ذخیره‌سازهای با پاسخ‌گویی سریع همچون با تری در آینده نزدیک شاهد رقابت این ذخیره‌سازها با ذخیره‌سازهای همچون تلمبه ذخیره‌ای و هوا فشرده جهت بهره‌برداری اقتصادی از سیستم خواهیم بود. در مجموع استفاده از ذخیره‌ساز در سیستم قدرت می‌تواند زمینه بهبود شرایط زیست‌محیطی، کاهش هزینه‌ها، افزایش بهره‌وری، ایجاد فرصت‌های شغلی و... را فراهم نماید.

منابع

- Amirnekoeei, K.; Ardehali, M. M. and A. Sadri** (2012). "Integrated Resource Planning for Iran: Development of Reference Energy System, Forecast, and long-term Energy-environment plan", *Energy*, 46(1), pp. 374-385.
- Budt, M.; Wolf, D.; Span, R. and J. Yan** (2016). "A Review on Compressed Air Energy Storage: Basic Principles, Past Milestones & Recent Developments", *Applied Energy*, No.170, pp. 250-268.
- Cho, J.; Jeong, S. and Y. Kim** (2015). "Commercial and Research Battery Technologies for Electrical Energy Storage Applications", *Progress in Energy & Combustion Science*, No.48, pp. 84-101.
- Ghalelou, A. N.; Fakhri, A. P.; Nojavan, S.; Majidi, M. and H. Hatami** (2016). "A Stochastic Self-scheduling Program for Compressed Air Energy Storage (CAES) of Renewable Energy Sources (RESs) Based on a Demand Response Mechanism", *Energy Conversion and Management*, NO. 120, pp. 388-396.
- Kanakasabapathy, P. and K.S. Swarup** (2010). "Bidding Strategy for Pumped-Storage Plant in Pool-Based Electricity Market", *Energy Conversion & Management*, 51(3), pp. 572-579.
- Kazempour, S. J.; Hosseinpour, M.; Moghaddam, M. P. and G. R. Yousefi** (2009). "Coupling fuel-constrained power plant and NaS battery system for profit increment in a competitive electricity market", *In Power Systems Conference & Exposition, PSCE'09*. IEEE/PES, pp. 1-9.
- Khodayar, M. E.; Abreu, L. and M. Shahidehpour** (2013). "Transmission-Constrained Intrahour Coordination of Wind and Pumped-Storage Hydro Units, IET Generation", *Transmission & Distribution*, 7(7), pp. 755-765.
- Koller, M.; Borsche, T.; Ulbig, A. and G. Andersson** (2015). Review of Grid Applications With the Zurich 1MW Battery Energy Storage System", *Electric Power Systems Research*, No.120, pp.128-135.
- Luo, X.; Wang, J.; Dooner, M.; Clarke, J. and C. Krupke** (2014). Overview of Current Development in Compressed Air Energy Storage Technology", *Energy Procedia*, No.62, pp. 603-611.
- Mahlia, T. M. I.; Saktisahdan, T. J.; Jannifar, A.; Hasan, M. H. and H. S. C. Matseelar** (2014). "A Review of Available Methods and Development on Energy Storage; Technology Update", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No.33, pp.532-545.
- Moradi, Jalal; Shahinzadeh Hossein; Mohammadreza Matin; Ehsan Aghajani-Back and Amirsalar Khandan** (2016) "Coordination of Wind and Underwater Compressed Air Energy Storage (UWCAES) in Spot Power Market", *In Conference on New Research Achievements in Electrical and Computer Engineering (ICNRAECE)*, First International Conference on. IEEE.
- Nazari, M. E.; Ardehali, M. M. and S. Jafari** (2010). A Novel Optimization Methodology for Multi-Constraint Unit Commitment of Thermal Generating Units with Considerations for Hydro Pumped Energy Storage", *International Review of Automatic Control*, 3(2), pp. 209-218.

- Padhy, N. P.** (2001). "Unit Commitment Using Hybrid Models: a Comparative Study for Dynamic Programming, Expert System, Fuzzy System and Genetic Algorithms". *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 23(8), pp. 827-836.
- Pérez-Díaz, J. I.; Chazarra, M.; García-González, J.; Cavazzini, G. and A. Stoppato** (2015). "Trends and Challenges in The Operation of Pumped-Storage Hydropower Plants", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No.44, pp.767-784.
- Shahidehpour, M. and M. Marwali** (2012). "Maintenance Scheduling in Restructured Power Systems, *Springer Science and Business Media*.
- Shahinzadeh, H.; Gheiratmand, A.; Fathi, S. H. and J. Moradi** (2016). *Optimal Design and Management of Isolated Hybrid Renewable Energy System (WT/PV/ORES) In Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC)*, 21st Conference on, pp. 208-215, IEEE.
- Shahinzadeh, H.; Gheiratmand, A.; Moradi, J. and S. H. Fathi** (2016). *Simultaneous Operation of Near-To-Sea and Off-Shore Wind Farms With Ocean Renewable Energy Storage*. In *Renewable Energy & Distributed Generation (ICREDG)*, 2016 Iranian Conference on, pp. 38-44, IEEE.
- Shahinzadeh, H.; Moazzami, M.; Abbasi, M.; Masoudi, H. and V. Sheigani** (2016). *Smart Design and Management of Hybrid Energy Structures for Isolated Systems Using Biogeography-Based Optimization Algorithm*. In *Smart Grids Conference (SGC)*, pp. 1-7, IEEE.
- Shahinzadeh, H.; Moazzami, M.; Fathi, S. H. and G. B. Gharehpetian** (2016). *Optimal Sizing and Energy Management of A Grid-Connected Microgrid Using HOMER Software*, In *Smart Grids Conference (SGC)*, pp. 1-6, IEEE.
- Shahinzadeh, H.; Nasr-Azadani, S. M. and N. Jannesari** (2014). *Applications of Particle Swarm Optimization Algorithm to Solving the Economic load Dispatch of Units in Power Systems with Valve-Point Effects*. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 4(6), p. 858.
- Sun, L.; Zhang, Y. and C. Jiang** (2006). "A Matrix Real-Coded Genetic Algorithm to The Unit Commitment Problem", *Electric Power Systems Research*, 76(9), pp. 716-728.
- Ting, T. O.; Rao, M. V. C. and C. K. Loo** (2006). "A Novel Approach for Unit Commitment Problem Via an Effective Hybrid Particle Swarm Optimization", *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(1), pp. 411-418.
- Venkataramani, G.; Parankusam, P.; Ramalingam, V. and J. Wang** (2016). "A Review on Compressed Air Energy Storage—A Pathway for Smart Grid and Polygeneration", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, NO. 62, pp. 895-907.