

فصلنامه پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی

سال دوم / شماره ۴ / پاییز ۱۳۹۵ / صفحات ۳۲-۷

## 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 مکترونیک، گروه برق

mh.abbasi@gmail.com

رضا عفت نژاد

استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، دانشکده مهندسی مکترونیک، گروه برق (نویسنده مسئول)

reza.efatnejad@kiau.ac.ir

کامبیز رضا پور

استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، دانشکده مهندسی مکترونیک، گروه مکانیک

rezapour@kiau.ac.ir

یکی از مسائلی که در سیستم‌های قدرت بسیار مورد توجه بهره‌برداران سیستم قرار دارد، تغییرات زیاد و عدم یکنواختی منحنی بار در ساعات مختلف شبانه‌روز 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 اقتصادی‌تر از سیستم قدرت انجام پذیرفته، 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) (۵۴ 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 راه‌اندازی 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.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۷/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۹/۱۵

## ۱. مقدمه

تا قبل از سال ۱۹۶۰ میلادی مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدها فقط به بحث توزیع اقتصادی بار محدود می‌شد. در آن زمان، روش شناخته‌شده کوهن-تاکر وضعیت اقتصادی بهینه را مشخص می‌کرد. هنگامی که این شرایط برآورده می‌شد، کلیه نیروگاه‌هایی که در مدار بودند، به‌غیر از نیروگاه‌هایی که به‌صورت مؤثر با حداکثر توان در شبکه بودند، با توجه به میزان سوختشان بارگذاری می‌شدند. بر مبنای روش کوهن-تاکر چندین راه‌حل 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 دربرگیرنده برنامه روزانه کار نیروگاه‌ها است که در آن باید هزینه‌های بهره‌برداری و روشن/خاموش کردن نیروگاه‌ها کمینه شوند، درحالی‌که مجموعه محدودیت‌های حاکم رعایت شوند. این مسئله حاوی متغیرهای گسسته 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 به‌منظور ترازسازی منحنی مصرف و افزایش ضریب بار مورد استفاده قرار می‌گیرند. ذخیره‌سازهای با ظرفیت پایین‌تر که توانایی پاسخ‌گویی سریع دارند (باتری، ابرخازن، چرخ‌طیار و...)

معمولاً 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 اقتصادی تر از سیستم اشاره کرد (Shahinzadeh et al., 2016).

تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه بهره‌برداری از ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی در سیستم‌های قدرت سنتی یا تجدید ساختار یافته انجام شده است. همگی این تحقیقات نشان می‌دهند، که استفاده از ذخیره‌سازها از نظر بهره‌برداری منافی را برای بهره‌بردار، تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان در بر خواهد داشت. ماهلیا و همکاران<sup>۱</sup> 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 حمل‌ونقل انجام داده است.

پرز دیاز و همکاران<sup>۲</sup> 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 مشارکت‌کننده برای تأمین بار، هزینه بهره‌برداری و قطع یا کاهش واحدهای بادی مشارکت‌کننده در تأمین بار کاهش می‌یابد.

بادت و همکاران<sup>۳</sup> در سال ۲۰۱۶، نگاه اجمالی به روش‌های کنونی و گذشته در طبقه‌بندی نحوه عملکرد ذخیره‌سازهای هوافشارده 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<sup>۱</sup> انتظار می‌رود فناوری هوای فشرده در رقابت با فناوری تلمبه ذخیره‌ای نتوانسته است که فراگیر گردد.

لو و همکاران<sup>۲</sup> در سال ۲۰۱۴، اقدام به بررسی آخرین فناوری‌های ذخیره‌ساز هوافشرده نموده‌اند. نتایج حاصل از این مقاله نشان می‌دهد CAES در مقیاس کوچک عملکرد بهتر، طول عمر بیشتر و اثرات آلاینده‌گی کمتر و قیمت معقولانه‌تر در مقایسه با ذخیره‌ساز باتری دارا می‌باشد. ونکاتارامانی و همکاران<sup>۳</sup> 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<sup>۴</sup> 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<sup>۵</sup> در سال ۲۰۱۵، به بررسی انواع فناوری‌های به کار گرفته‌شده در ذخیره‌سازی باتری و مقایسه آن با سایر ذخیره‌سازها پرداخته‌اند. نتایج این مقاله نشان می‌دهد، مشکل عمده در بحث استفاده از باتری‌ها به محدودیت‌های اقتصادی و هزینه بالای سرمایه‌گذاری اولیه و تعمیرات و نگهداری باتری‌ها در مقیاس یکسان با سایر گزینه‌ها می‌باشد.

در تمامی منبع مورد مطالعه تا کنون به بهره‌برداری از یک مدل ذخیره‌ساز خاص توجه شده‌است 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.

$$U_i(t) \times P_i^{\min}(t) \leq P_i(t) \leq U_i(t) \times P_i^{\max}(t) \quad (۱)$$

به طوری که:

$$P_i^{\max}(t) = \begin{cases} \left[ \min \left[ P_i^{\max}, P_i(t-1) + RUR_i^{\max} \right] \right. \\ \left. \text{if } U_i(t) = U_i(t-1) = 1 \right. \\ \left[ \min \left[ P_i^{\max}, P_i(t-1) + SR_i \right] \right. \\ \left. \text{if } U_i(t) = 1, U_i(t-1) = 0 \right. \end{cases} \quad (۲)$$

$$P_i^{\min}(t) = \begin{cases} \left[ \max \left[ P_i^{\min}, P_i(t-1) - RDR_i^{\max} \right] \right. \\ \left. \text{if } U_i(t) = U_i(t-1) = 1 \right. \\ P_i^{\min} \\ \left. \text{if } U_i(t) = 1, U_i(t-1) = 0 \right. \end{cases} \quad (۳)$$

که در معادلات فوق  $RUR_i^{\max}$  <sup>۱</sup> حداکثر نرخ افزایشی واحد حرارتی  $i$  ام،  $SR_i$  <sup>۲</sup> نرخ افزایشی راه‌اندازی واحد حرارتی  $i$  ام و  $RDR_i^{\max}$  <sup>۳</sup> 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 ( $MUT_i^4$ ) نام دارد.

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

که در این رابطه  $U_i^0$  مدت‌زمان روشن ماندن تا ساعت صفر،  $Y_i(t)$  وضعیت راه‌اندازی واحد  $i$  ام در ساعت  $t$  ام و  $L_i$  مدت‌زمانی که در ابتدای دوره واحد بایستی روشن بماند را نمایش می‌دهد. همچنین پس از خاموش شدن واحد، نیروگاه بایستی مدت‌زمان مشخصی را خاموش بماند تا از خدمات مکانیکی به ادوات نیروگاه جلوگیری گردد که این مدت‌زمان حداقل زمان خاموش بودن ( $MDT_i^5$ ) نام دارد.

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

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

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.

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

که در این رابطه  $\eta$  بازده توربین آبی،  $\rho_{\text{water}}$  وزن خالص آب برحسب  $\text{Kg/m}^3$ ،  $g$  شتاب جاذبه زمین،  $H$  ارتفاع مؤثر توربین از مخزن فوقانی و  $q$  دبی خروجی برحسب  $\text{m}^3/\text{h}$  هستند. واحدهای تلمبه ذخیره‌ای در هر ساعت دارای یکی از سه حالت عملکرد Idle ( $I_g=I_p=0$ )، پمپاژ ( $I_g=1, I_p=0$ ) و تولید توان ( $I_g=1, I_p=1$ ) 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 برازش منحنی نیز به دست آید و با یک تابع درجه دو یا سه تقریب زده شود.

$$P_{\text{min}_g}(l) \times I_g(l, t) \leq P_g(l, t) \leq P_{\text{max}_g}(l) \times I_g(l, t) \quad (7)$$

$$P_{\text{min}_p}(l) \times I_p(l, t) \leq P_p(l, t) \leq P_{\text{max}_p}(l) \times I_p(l, t) \quad (8)$$

$$Q_{\text{min}_g}(l) \times I_g(l, t) \leq Q_g(l, t) \leq Q_{\text{max}_g}(l) \times I_g(l, t) \quad (9)$$

$$Q_{\min\_p}(1) \times I_p(1, t) \leq Q_p(1, t) \leq Q_{\max\_p}(1) \times I_p(1, t) \quad (10)$$

$$V_{\min\_up}(1) \leq V_{up}(1, t) \leq V_{\max\_up}(1) \quad (11)$$

$$V_{\min\_low}(1) \leq V_{low}(1, t) \leq V_{\max\_low}(1) \quad (12)$$

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

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

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

$$I_g(1, t) \text{ and } I_p(1, t) = 0 \quad (16)$$

$$Q_g(1, t) \text{ and } Q_p(1, t) = 0 \quad (17)$$

$$P_g(1, t) \text{ and } P_p(1, t) = 0 \quad (18)$$

که در روابط فوق  $Q_{g/p}(1, t)$  دبی آب در حالت ژنراتوری و پمپی بر حسب  $m^3$  و  $V_{up/low}(1, t)$  حجم مخزن بالایی و پایینی بر حسب  $m^3$  و  $P_{g/p}(1, t)$  توان تولیدی و مصرفی در حالت ژنراتوری و پمپی می‌باشند.  $I_{g/p}(1, t)$  بیانگر وضعیت واحد ذخیره‌ساز در ساعت  $t$  است که در صورتی که  $I_g$  و  $I_p$  هر دو صفر باشند یعنی واحد در حالت عدم فعالیت یا Idle قرار دارد. رابطه (۱۰) تا (۱۳) باعث می‌شود واحد به صورت هم‌زمان در یک ساعت در وضعیت پمپاژ و تولید قرار نگیرد (Kanakasabapathy Swarup, 2010; Nazari et al., 2010)

۲-۳. ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده

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

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

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 تزریق‌شده به ذخیره‌ساز می‌باشد که با واحد مگاوات بر ساعت بیان شده است. معادله (۲۱) مقدار انرژی تولیدشده 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 هوا در داخل ذخیره‌ساز) قرار گیرد و یا در حالت پمپاژ (پمپاژ هوا از مخزن ذخیره‌سازی به محفظه احتراق) قرار گیرد که معادله (۲۴) به همین دلیل ارائه شده تا از وقوع دو حالت فوق یعنی ذخیره و پمپاژ به‌طور هم‌زمان جلوگیری کند. مقدار هوای ذخیره‌شده در داخل ذخیره‌ساز در هر ساعت به‌روزرسانی می‌شود و جهت اطلاع از مقدار هوای ذخیره‌شده در داخل ذخیره‌ساز، مقدار هوای فعلی ذخیره‌ساز را به‌اضافه یا منهای مقدار هوای ذخیره‌شده و یا پمپاژ شده می‌شود که مدل ریاضی این جمله در معادله (۲۵) بیان شده است. در نهایت باید به این نکته توجه کرد که مخزن ذخیره‌ساز نیز جهت ذخیره هوا دارای محدودیت‌هایی می‌باشد که در معادله (۲۶) این محدودیت در نظر گرفته شده است (Ghalelou et al., 2016).

## ۴-۲. 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 باتری 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 باتری جهت شرکت در این بازارها را نشان می‌دهند. رابطه (۳۲) بیانگر میزان تولید ساعتی مورد انتظار باتری در بازارهای انرژی روز بعد و ذخیره چرخان می‌باشد. رابطه (۳۳) مشخصه دشارژ باتری NaS را نشان می‌دهد که توسط یک تابع درجه سه برازش می‌شود. رابطه (۳۴) بیانگر تلفات دشارژ باتری NaS به ازای نقطه کار می‌باشد. رابطه (۳۵) بدیهی است که در یک ساعت خاص باتری نمی‌تواند در هر دو حالت شارژ و دشارژ باشد که جهت اجتناب از آن، این رابطه اعمال شده است. رابطه (۳۶) میزان انرژی ذخیره‌شده در باتری را در هر ساعت برحسب میزان انرژی ذخیره‌شده در ساعت قبل و انرژی شارژ یا دشارژ شده در ساعت جاری محاسبه می‌کند. رابطه (۳۷) بیانگر بیشینه انرژی قابل ذخیره در باتری می‌باشد.

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

رابطه (۳۹) انرژی موجود در باتری 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 تصمیم‌گیری کند. تصمیم شرکت تولید از طریق انتخابی مناسب برای پارامتر  $\tau$  به مسئله اعمال می‌شود. رابطه (۴۰) بیانگر این است که باتری 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  $SRR(t)$  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).

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

$$\text{SDC}_i \times z(i, t)$$

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

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

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

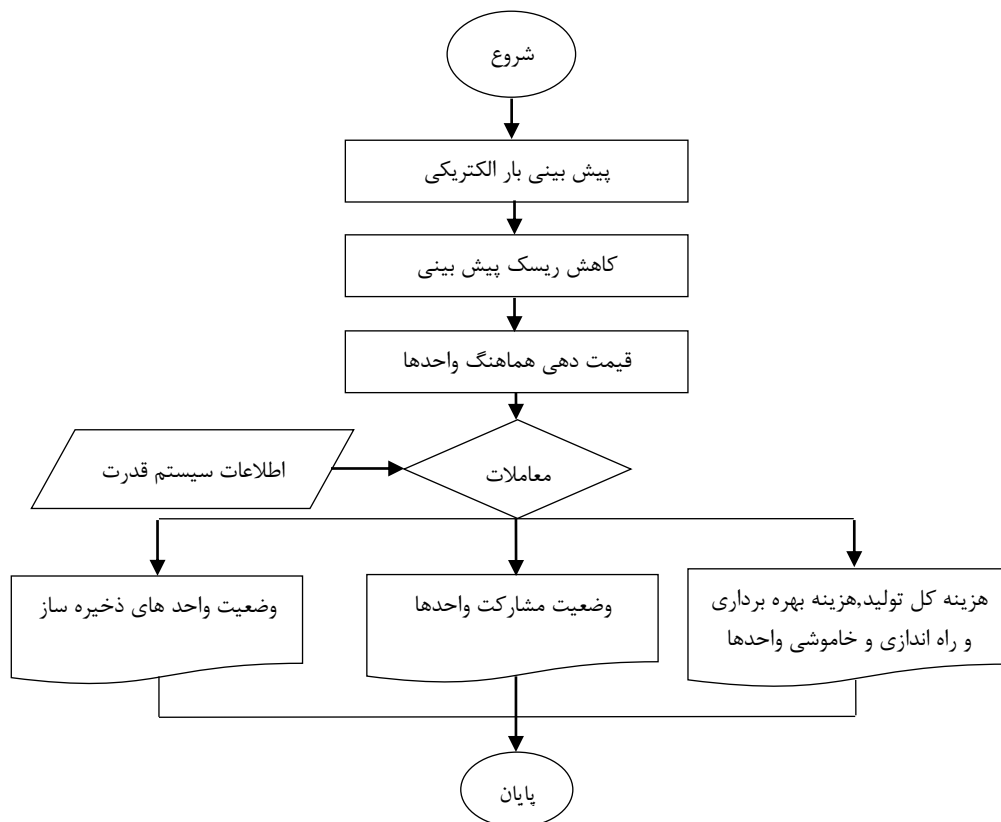
$$\sum_{i=1}^L (P_{\text{Discharge}}(i, t) I_{\text{Discharge}}(l, t) - \quad (45)$$

$$P_{\text{Charge}}(i, t) I_{\text{Charge}}(l, t)) - P_D(t) \geq \text{SRR}(t)$$

از لحاظ ریاضی حل مسئله در مدار قرار گرفتن واحدهای نیروگاهی یک مسئله غیرخطی آمیخته با عدد صحیح<sup>۱</sup> 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 حل‌کننده‌های مختلفی برای حل انواع مسائل بهینه‌سازی دارد که با توجه به ویژگی‌های آن مسئله حل‌کننده مناسب را باید انتخاب کرد.

## 1. Mixed Integer Non-linear programming

در این مقاله از حل‌کننده SBB برای مسئله MINLP و از حل‌کننده CPLEX برای مسئله<sup>۱</sup> MIP استفاده شده است. حل‌کننده 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.

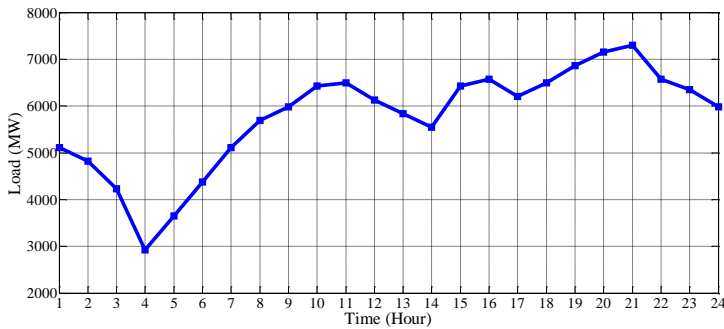


شکل ۱. فلوچارت عملکرد در این مقاله

1. Mixed integer programming

#### 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).

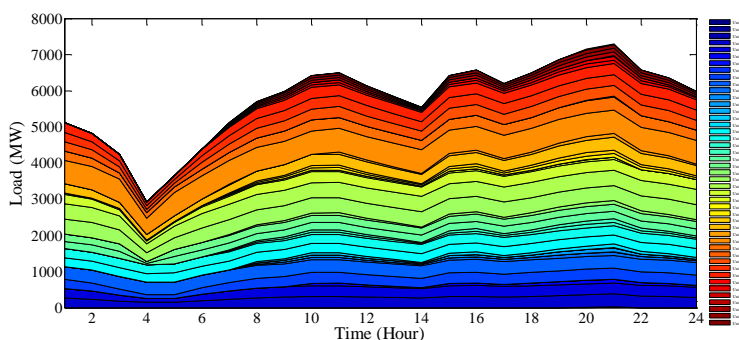
سناریو ۲: بهره‌برداری هماهنگ اقتصادی واحدهای حرارتی و ذخیره‌ساز تلمبه ذخیره‌ای.

سناریو ۳: بهره‌برداری هماهنگ اقتصادی واحدهای حرارتی و ذخیره‌ساز هوافشارده.

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.



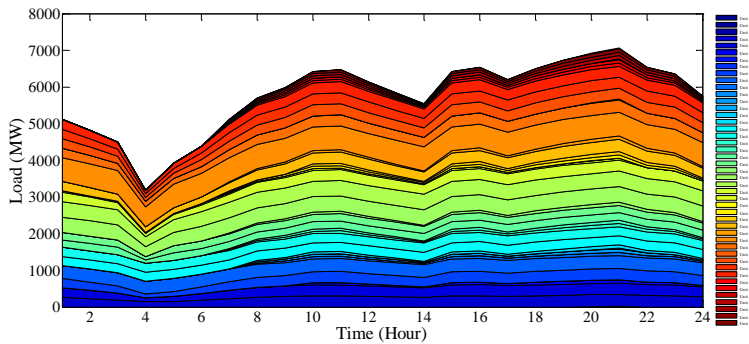
شکل ۳. نحوه توزیع توان بین واحدهای حرارتی در سیستم ۱۱۸ باس ۵۴ واحد IEEE (سناریو ۱)

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  $\$/MW 15/2833$  را نشان می‌دهد و بایستی از مصرف‌کنندگان گرفته شود. در این حالت هزینه راه‌اندازی و خاموش شدن واحدها برابر  $\$52089$  است.

#### ۲-۴. 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 ساعات غیرپیک به ساعات پیک می‌توانند هزینه کل بهره‌برداری را کاهش دهند. به عبارت دیگر، یک واحد تلمبه ذخیره‌ای توان را در ساعات غیر پیک باقیمت پایین‌تری نسبت به ساعات اوج بار خریداری و ذخیره می‌کند و همین مقدار توان را در ساعات پیک به شبکه تحویل می‌دهد و آن را باقیمت بالاتری می‌فروشد. در ضمن این واحدها از روشن شدن و بهره‌برداری از واحدهای حرارتی گران‌قیمت در ساعات پیک جلوگیری می‌کنند که باعث کاهش قیمت تسویه بازار می‌گردد. این واحدها از بروز جهش قیمتی در محیط تجدید ساختار یافته تا حد امکان جلوگیری کرده و در پیک‌سای از بار به بهره‌بردار کمک می‌کنند. جدول (۱) مشخصات واحد تلمبه ذخیره‌ای استفاده‌شده در این شبیه‌سازی را نمایش می‌دهد. شکل (۴) نیز نحوه توزیع توان بین واحدهای حرارتی تعیین شده را نمایش می‌دهد.





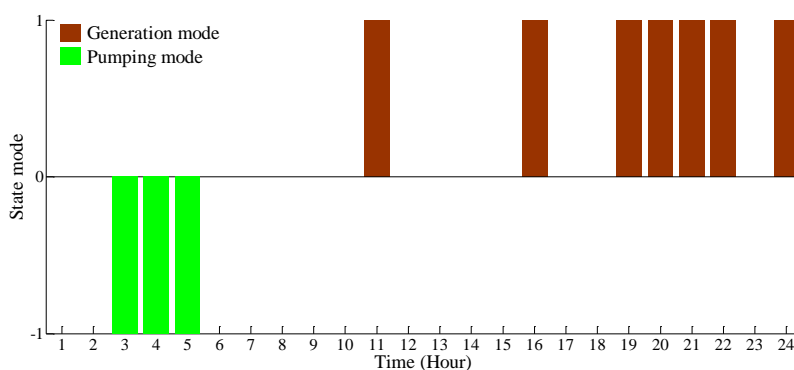
شکل ۴. نحوه توزیع توان بین واحدهای حرارتی در سیستم ۱۱۸ باس ۵۴ واحد IEEE (سناریو ۲) جدول ۱. مشخصات واحد تلمبه ذخیره‌ای (Ardehali, 2012).

نام واحد تلمبه ذخیره‌ای	پانجیاکو	
حجم آب هر مخزن (m3)	۶۵۰۰۰۰	
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 (m3/s)	حداکثر	۳۵۷/۵
	حداقل	۴۸
توان حالت ژنراتوری (MW)	حداکثر	۲۳۳/۶
	حداقل	۲۹/۵۸
توان حالت پمپی (MW)	حداکثر	۲۶۵/۲۲
	حداقل	۳۷/۳
* مقدار حجم مخزن در ابتدا و انتهای زمان مورد مطالعه مقدار ۲۰۰۰۰۰۰ m3 است.		

مأخذ: نتایج تحقیق

در این حالت اضافه شدن واحد تلمبه ذخیره‌ای از مشارکت واحدهای گران‌قیمت در تأمین پیک بار جلوگیری کرده و هزینه کل تولید واحدهای حرارتی با کاهش نسبت به سناریو (۱) برابر  $\$521300/54733$  شده است. مشارکت واحدهای تلمبه ذخیره‌ای میانگین هزینه بهره‌برداری شامل هزینه زرزو را به  $\$15/2389/MW$  کاهش می‌دهد. در این حالت واحد تلمبه ذخیره‌ای برق را از

شبکه خریداری می‌کند و در پیک بار دوباره به شبکه می‌فروشد. از آنجا که قیمت برق در پیک بار بالاتر رفته این مابه‌التفاوت 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  $52089\$$  است. شکل (۵) نحوه برنامه زمان‌بندی عملکرد واحد تلمبه ذخیره‌ای را نمایش می‌دهد.



شکل ۵. نحوه عملکرد واحد تلمبه‌ذخیره‌ای در ۲۴ ساعت

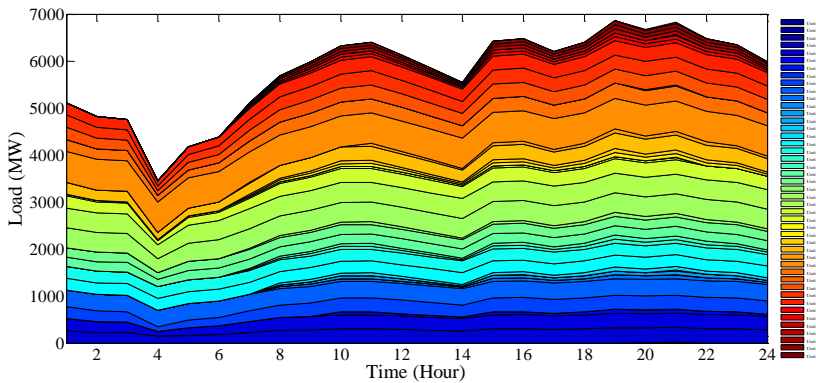
#### ۳-۴. سناریو ۳: بهره‌برداری هماهنگ اقتصادی واحدهای حرارتی و ذخیره‌ساز هوافشارده

در سناریو (۳) به‌منظور کاهش هزینه بهره‌برداری از ذخیره‌ساز هوافشارده استفاده شده است. واحدهای هوافشارده نیز همانند سایر ذخیره‌سازها در ساعات غیر پیک برق را باقیمت 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 باقیمت بالاتری می‌فروشد. جدول (۲) مشخصات واحد ذخیره‌ساز هوافشارده استفاده‌شده 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 ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز هوافشرده (MWh)
۴۰۰	حداقل ظرفیت انرژی ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز هوافشرده (MWh)
۵۰۰	حداکثر سطح هوای تزریق‌شده داخل ذخیره‌ساز (MWh)
۱۰۰	حداقل سطح هوای تزریق‌شده 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

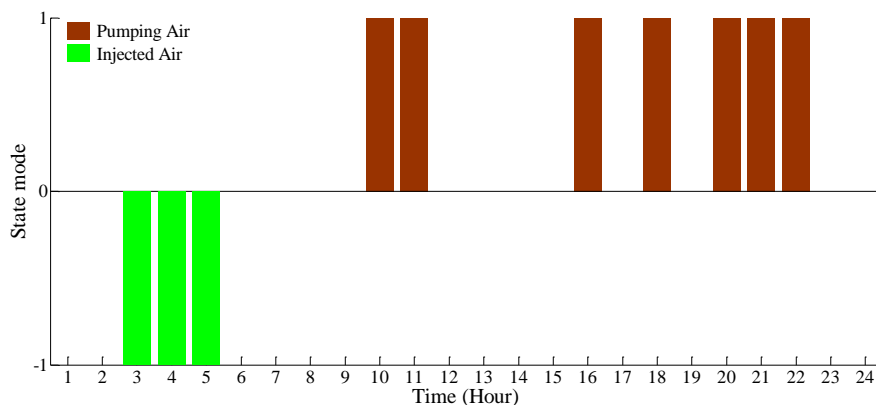
مأخذ: نتایج تحقیق



شکل ۶. نحوه توزیع توان بین واحدهای حرارتی در سیستم ۱۱۸ باس ۵۴ واحد IEEE (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  $523361/466\$$  گردیده که به تبع 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 بهره‌برداری‌اش به عهده می‌گیرد. در این سناریو همانند سناریو (۱) هزینه راه‌اندازی و خاموش شدن واحدها برابر  $52089\$$  است. شکل (۷) نحوه برنامه زمان‌بندی عملکرد واحد هوای فشرده را نمایش می‌دهد.



شکل ۷. نحوه عملکرد واحد هوای فشرده در ۲۴ ساعت

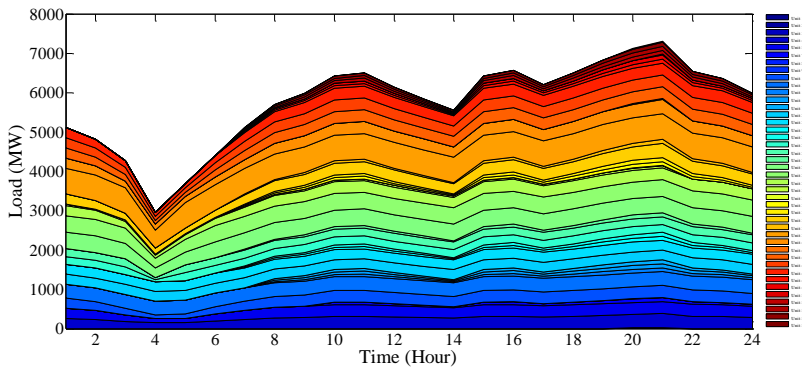
#### ۴-۴. سناریو ۴: بهره‌برداری هماهنگ اقتصادی واحدهای حرارتی و ذخیره‌ساز باتری

در سناریو (۴) به‌منظور کاهش هزینه بهره‌برداری از ذخیره‌ساز باتری استفاده شده است. ذخیره انرژی در باتری از جمله تکنولوژی‌های است که انواع واحدهای نیروگاهی آن در فاز امتحان یا پیاده‌سازی است. جدول (۳) مشخصات واحد ذخیره‌ساز باتری 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).

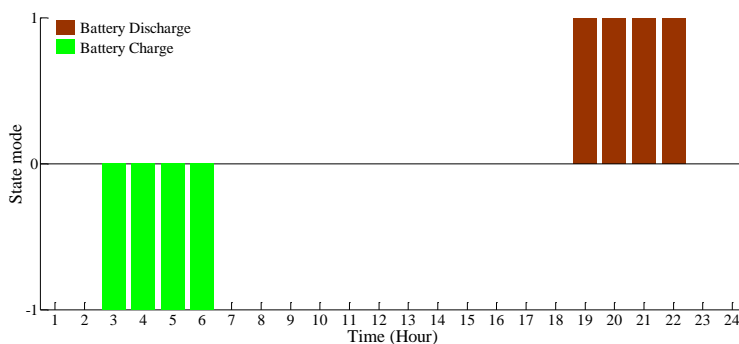
۰/۰۳	احتمال فراخوانی برای تولید در بازار ذخیره چرخان (درصد)
۳۳	توان نامی باتری NaS (مگاوات)
۰/۹	راندمان باتری NaS (درصد)
۳۴۰	بیشینه انرژی قابل ذخیره در باتری NaS (مگاوات ساعت)
۱	ثابت تنظیم‌کننده میزان انرژی ذخیره‌شده در باتری NaS برای روز بعد
۲۰	میزان انرژی ذخیره‌شده در باتری NaS در ابتدای بازه زمانی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

مأخذ: نتایج تحقیق



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

در این سناریو اضافه شدن واحد ذخیره‌ساز باتری هزینه کل تولید واحدهای حرارتی برابر  $\$ 528087/333$  شده است. مشارکت واحد ذخیره‌ساز باتری میانگین هزینه بهره‌برداری شامل هزینه رزرو را به  $\$ 15/2471/MW$  کاهش می‌دهد. در این سناریو هزینه راه‌اندازه‌ای و خاموش شدن واحدها با کاهش نسبت به سناریوهای گذشته برابر  $\$ 47519$  شده است. شکل (۹) نحوه برنامه‌ریزی 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 استفاده‌شده 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 ذخیره‌شده خود می‌نمایند. این امر سبب خواهد شد تا در ساعات اوج 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 توانسته 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	
۵۲۸۰۸۷/۷۳	۵۲۳۳۶۱/۴۶	۵۲۱۳۰۰/۵۴	۵۲۷۳۱۵/۹۰	هزینه کل تولید واحدهای حرارتی (\$)
۱۵/۲۴۷۱	۱۵/۲۵۷۴	۱۵/۲۳۸۹	۱۵/۲۸۳۳	میانگین هزینه بهره‌برداری (\$/MW)
۴۷۵۱۹	۵۲۰۸۹	۵۲۰۸۹	۵۲۰۸۹	هزینه راه‌اندازی و خاموشی (\$)

مأخذ: نتایج تحقیق

همان‌گونه 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 راه‌اندازی 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 مطرح‌شده به منظور به حداقل رساندن هزینه بهره‌برداری بر روی یک شبکه تست (سیستم ۱۱۸ باس ۵۴ واحد IEEE) مورد ارزیابی قرار گرفت. شبیه‌سازی‌های 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 شبیه‌سازی‌های 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 باتری 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 باتری 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 Amirshalar 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.