

## ارائه روش جدیدی برای تعیین ظرفیت بهینه ذخیره‌سازهای ترکیبی در ریزشبکه مستقل

سلیمان حاجی آقاسی<sup>۱</sup>، احمد سالم‌نیا<sup>۲\*</sup>، محسن حمزه<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

s\_hajiaghasi@sbu.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

a\_salemnia@sbu.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تهران، تهران، ایران

mohsenhamzeh@ut.ac.ir

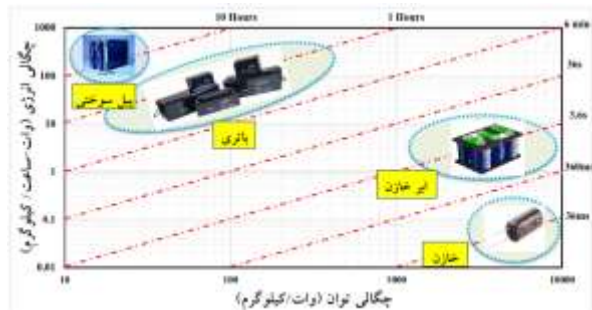
**چکیده:** در سال‌های اخیر، استفاده از ذخیره‌سازهای ترکیبی انرژی در سیستم‌های تجدیدپذیر به دلیل مواردی مانند افزایش طول عمر ذخیره‌سازها و بهبود قابلیت اطمینان مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله، روش جدیدی برای تعیین ظرفیت باتری و ابرخازن در یک ریزشبکه مستقل ارائه شده است. اختلاف توان‌های تولیدی و مصرفی با استفاده از تبدیل فوریه گسسته به حوزه فرکانس انتقال داده می‌شود و با تعیین فرکانس قطع تابع هزینه بهینه حاصل می‌شود. به طوری که فرکانس‌های سریع توان توسط ابرخازن و فرکانس‌های کند توسط باتری تأمین می‌شود. در روش ارائه شده، تعیین ظرفیت ذخیره‌سازها به گونه‌ای انجام شده است که ضمن پاسخ‌گویی مناسب به بارها طول عمر ذخیره‌سازها نیز حداکثر شود. استفاده از روش پیشنهادی به دلیل ترکیب ذخیره‌سازها دینامیک عملکردی سیستم را بهبود داده و با کاهش تعداد شارژ و دشارژ باتری، هزینه ذخیره‌سازی را کاهش می‌دهد. به دلیل ضرورت و اهمیت ذخیره‌سازها در سیستم‌های مستقل، ریزشبکه در نظر گرفته شده یک ریزشبکه مستقل از شبکه بوده که شامل تولیدکنندگان مختلف توان است. برای اعتبارسنجی روش، از داده‌های آماری واقعی استفاده شده و روش پیشنهادی روی یک ریزشبکه نمونه تست و نتایج حاصل مؤثر بودن روش را تأیید می‌کنند.

**واژه‌های کلیدی:** ریزشبکه، ذخیره‌ساز، باتری، ابرخازن، تبدیل فوریه گسسته، منابع تجدیدپذیر.

۱. مقدمه

امروزه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید انرژی الکتریکی به سرعت رو به افزایش است. با توجه به اینکه توان تولیدی انرژی‌های تجدیدپذیر با عدم قطعیت و ماهیت پیش‌بینی‌ناپذیر همراه‌اند، استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی همراه با این تولیدکننده‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است [۱]. در مواردی که سیستم‌های تجدیدپذیر مستقل از شبکه باشند، استفاده از ذخیره‌سازها اهمیت بیشتری می‌یابد [۲ و ۳]. ذخیره‌سازها در مواردی مانند پیک‌سایی، ذخیره انرژی در مواقع عدم نیاز، استفاده از انرژی در هنگام نیاز، بهبود کیفیت توان، کنترل ولتاژ و کنترل فرکانس مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴]. ذخیره‌سازهای مختلف قابلیت‌های منحصر به فرد عملکردی خود را دارند و معمولاً یک نوع ذخیره‌ساز نمی‌تواند قابلیت‌های مختلف را با هم داشته باشد. برای افزایش قابلیت‌های عملکردی سیستم‌های ذخیره‌سازی، معمولاً از ترکیب چند ذخیره‌ساز استفاده می‌شود [۵]. ذخیره‌سازهای با چگالی توان بالا با ذخیره‌سازهای با چگالی انرژی شکل (۱) منحنی مربوط به چگالی توان و انرژی را برای ذخیره‌سازهای مختلف انرژی را نشان می‌دهد.

در استفاده از ذخیره‌سازهای ترکیبی در ریزشبکه‌ها یکی از موارد مهم، تعیین مقدار ظرفیت هر یک از ذخیره‌سازهاست. در صورتی که ظرفیت ذخیره‌سازها کمتر از مقدار مناسب تعیین شود، مسائلی مانند قطع انرژی مصرف‌کننده به وجود می‌آید و اگر ظرفیت ذخیره‌ساز بیشتر از مقدار مناسب انتخاب شود، هزینه بالا خواهد رفت؛ از این رو تعاملی باید صورت گیرد که شرایط فوق به خوبی تضمین شود. به دلیل اهمیت موضوع ذخیره‌سازهای ترکیبی، محققان زیادی به تحقیق درباره این موضوع پرداخته‌اند. به دلیل موارد مختلف اعم از انتخاب تکنولوژی، اندازه مناسب و تعیین استراتژی مناسب شارژ و دشارژ، بحث انتخاب ظرفیت مناسب ذخیره‌سازها امری پیچیده است.



شکل (۱): مقایسه چگالی توان و انرژی در ذخیره‌سازهای انرژی

برای تعیین ظرفیت ذخیره‌سازها در مراجع مختلف از روش‌های متفاوتی استفاده شده است. در مرجع [۶] ظرفیت ذخیره‌سازها بر مبنای

مقدار استفاده از زمان مصرف<sup>۱</sup> تعیین شده است. سری زمانی شبکه عصبی پیشخور<sup>۲</sup> برای پیش‌بینی سرعت باد و تابش خورشید در نظر گرفته شده است. اجرای روش برای مورد مطالعاتی در نظر گرفته شده نشان می‌دهد که نتایج حاصل از انتخاب مناسب ظرفیت، به خوبی پاسخگوی بارها در ریزشبکه است. در مرجع [۷] از روش بهینه‌سازی مشترک عملکرد و ظرفیت مناسب استفاده شده است. این روش به جای یک جواب، دسته‌ای از جواب‌ها را شامل می‌شود که طراح می‌تواند مقادیر مختلفی از ذخیره‌سازها را با هم ترکیب کند. این روش برای دو مورد مطالعاتی پیاده شده و نتایج نشان می‌دهد که استفاد از روش پیشنهادی، زمان محاسباتی کمی داشته و انتخاب ظرفیت ذخیره‌ساز و عملکرد آن مناسب است. در مرجع [۸] به تعیین ابعاد ذخیره‌سازهای ترکیبی که شامل باتری و ابرخازن هستند در ریزشبکه پرداخته شده است. محققان این پژوهش معتقدند استفاده از روش آماری، انعطاف‌پذیری بیشتری برای انتخاب ظرفیت مناسب ذخیره‌سازها نسبت به روش‌های قطعی را فراهم می‌کند.

در مرجع [۹] تعیین اندازه بهینه باتری و ابرخازن برای یک سیستم شامل توربین بادی و سیستم فتوولتائیک انجام شده است. ابتدا داده‌های آماری برای اطلاعات ورودی باد، خورشید و بار تولید شده است. سپس این داده‌ها به محیط شبیه‌سازی انتقال داده شده و با توجه به فیلترهای قرار داده شده، مقدار ظرفیت لازم برای باتری و ابرخازن تعیین می‌شود. در مرجع [۱۰ و ۱۱] انتخاب ابعاد مناسب برای باتری و دیزل ژنراتور در یک ریزشبکه مستقل با استفاده از روش تبدیل فوریه گسسته انجام شده است. فرکانس‌های بالای توان توسط باتری و فرکانس‌های پایین توان توسط ژنراتور تأمین می‌شود. نتایج حاصل از ترکیب منابع نشان می‌دهد که هزینه سالانه سیستم با استفاده از این روش نسبت به روش‌های معمول کاهش می‌یابد.

تعیین ابعاد بهینه باتری، ابرخازن و سیستم فتوولتائیک با استفاده از نرم‌افزار مطلب در مرجع [۱۲] انجام شده است. در تابع هدف بهینه‌سازی موارد مختلفی اعم از هزینه‌های سرمایه‌گذاری فتوولتائیک، باتری و ابرخازن و همچنین هزینه جایگزینی باتری در نظر گرفته شده است.

در مرجع [۱۳] محققان از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای بهینه‌سازی یک سیستم ترکیبی در یک ریزشبکه خانگی استفاده کرده‌اند. از باتری به‌عنوان ذخیره‌سازی استفاده شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که اندازه مناسب اجزا تا حدودی با انعطاف‌پذیری تقاضا و به‌شدت با شرایط استفاده تحت تأثیر قرار می‌گیرند. در مرجع [۱۴] برای تخصیص توان بین ذخیره‌سازها از فیلتر بالاگذر استفاده شده

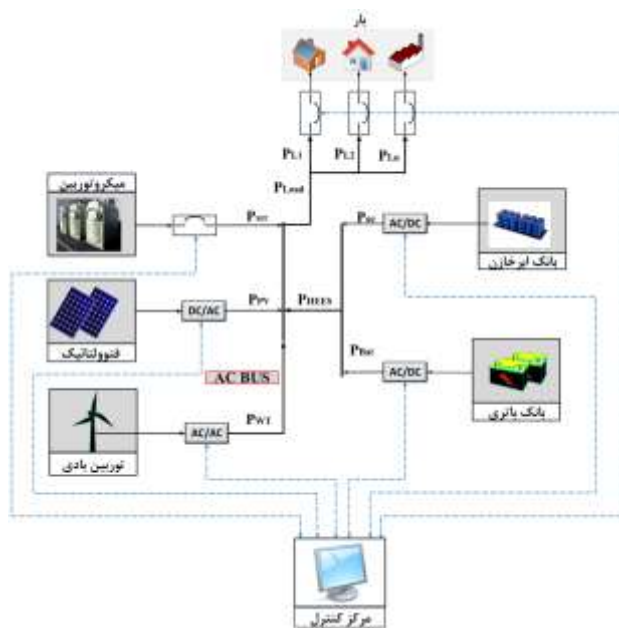
1. Time of Use  
2. Feed Forward

- استفاده از ترکیب ذخیره‌ساز با چگالی توان بالا و چگالی انرژی بالا برای بهبود ذخیره‌سازی؛
- ارائه روشی جدید برای تخصیص توان بین ذخیره‌سازهای ترکیبی با روش تبدیل فوریه؛
- کاهش هزینه ذخیره‌سازی انرژی و بهبود پاسخ‌دهی به بارهای مختلف؛
- افزایش طول عمر باتری.

در ادامه این مقاله در بخش دوم به مدل‌سازی سیستم مورد مطالعه پرداخته می‌شود. در بخش ۳ روش پیشنهادی ارائه و مورد مطالعه قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی و تحلیل نتایج در قسمت ۴ ارائه شده است. نتیجه‌گیری در بخش ۵ مقاله آورده شده است. ریزشبه‌کده در نظر گرفته شده برای تعیین ابعاد ذخیره‌سازهای ترکیبی یک ریزشبه‌کده مستقل است.

## ۲. مدل‌سازی سیستم مورد مطالعه

سیستم در نظر گرفته شده در این مطالعه، یک ریزشبه‌کده AC ولتاژ پایین مستقل از شبکه اصلی است. ریزشبه‌کده پیشنهادی در شکل (۲) ارائه شده است. ریزشبه‌کده از سیستم فتوولتائیک، توربین بادی، میکروتوربین و ذخیره‌سازهای ترکیبی (باتری و ابرخازن) تشکیل شده است. سیستم فتوولتائیک و ذخیره‌سازها با استفاده از مبدل DC/AC به باس اصلی متصل شده‌اند و بار AC نیز به باس اصلی متصل شده است. مبدل‌های الکترونیک قدرت با استفاده از سیستم کنترل مرکزی کنترل می‌شوند. اطلاعات همه تولیدکننده‌ها و ذخیره‌سازها به سیستم کنترل مرکزی ارسال شده و متناسب با نوع کنترل اعمالی مبدل‌ها توسط سیستم کنترل مرکزی کنترل می‌شوند [۲۶].



شکل (۲): ریزشبه‌کده مورد مطالعه

است. عملکرد ریزشبه‌کده با اعمال یک سناریوی واقعی مورد ارزیابی قرار گرفته است؛ نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از این سیستم، بازدهی نسبت به حالتی که فقط از پیل سوختی استفاده شود، حدود ۸/۵ درصد افزایش یافته است.

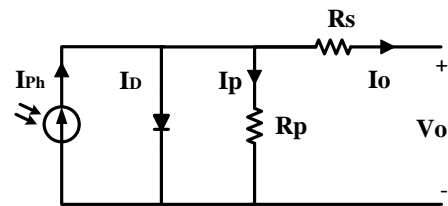
در مرجع [۱۵] از باتری و ابرخازن برای مسطح نمودن توان خروجی توربین بادی استفاده شده است. در مرجع [۱۶] به تعیین ابعاد ابرخازن و پیل سوختی در خودرو هیبریدی پرداخته شده است. در این مرجع، ۳ سناریو برای خودرو در نظر گرفته شده و با توجه به میزان توان درخواستی در سناریوها مقدار توان پیل سوختی و ابرخازن تعیین شده است. در مرجع [۱۷]، از کنترل انرژی ابرخازن به جای کنترل ولتاژ برای غلبه بر غیرخطی‌های ایجادشده در کنترل استفاده شده است. ترکیب ذخیره‌سازها به خصوص در بارهای با تغییرات سریع تأثیر زیادی روی بازدهی و طول عمر باتری دارد. در مرجع [۱۸] تأثیر به‌کارگیری استفاده از سیستم ذخیره‌ساز ترکیبی با حالتی که فقط باتری استفاده شده مقایسه شده است. تعداد سیکل‌های طول عمر باتری و هزینه سیستم در هنگام استفاده ترکیبی به ترتیب ۷۰ و ۱۷/۶ درصد افزایش یافته است. در مرجع [۱۹]، انتخاب ابعاد مناسب برای باتری و ابرخازن انجام شده و از تبدیل فوریه و انتخاب فرکانس مناسب برای ابعاد ذخیره‌سازها استفاده شده است. در مرجع [۲۰] از یک رویکرد آماری برای طراحی یک سیستم باتری- ابرخازن به منظور استفاده در مزرعه بادی استفاده شده است. برخی از محققان، از الگوریتم‌های فراابتکاری برای تعیین ابعاد ذخیره‌سازها استفاده کرده‌اند [۲۱-۲۲]. استفاده از ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی ذرات<sup>۱</sup> و آبکاری فولاد<sup>۲</sup> برای تعیین ظرفیت باتری و ابرخازن در سیستم شامل توربین بادی و پیل خورشیدی در مرجع [۲۳] انجام شده است. در مرجع [۲۴] از باتری و چرخ طیار<sup>۳</sup> برای ذخیره‌سازی استفاده شده است. استفاده از چرخ طیار از شارژ و دشارژ زیاد باتری جلوگیری کرده و باعث بهبود طول عمر آن می‌شود.

محققان زیادی با رویکردهای متفاوتی به انتخاب ابعاد ذخیره‌سازها پرداخته‌اند. با این حال مطالعات در زمینه انتخاب مناسب ذخیره‌سازهای ترکیبی محدود است [۲۵]. یکی از مزیت‌های ترکیب ذخیره‌سازها بهبود طول عمر ذخیره‌سازهاست، با وجود این در مطالعات بررسی شده، به تعیین ظرفیت ذخیره‌سازهای ترکیبی با در نظر گرفتن همزمان طول عمر و تخصیص توان بین ذخیره‌سازها پرداخته نشده است. لذا در این مقاله روشی برای انتخاب بهینه ابعاد ذخیره‌سازهای ترکیبی انرژی ارائه می‌شود. جنبه‌های نوآوری‌های این مقاله را می‌توان بدین صورت بیان کرد:

1. Particle Swarm Optimization
2. Simulated Annealing
3. Flywheel

## ۱.۲. مدل‌سازی سیستم فتوولتائیک

میزان توان تولیدی سلول‌های خورشیدی به عوامل مختلفی اعم از دما و تابش زاویه نصب بستگی دارد که در هنگام مدل‌سازی این نوع سیستم‌ها باید مد نظر قرار گیرد. مدل در نظر گرفته شده در این مطالعه، مطابق مدار معادل شکل (۳) است. مدار معادل از یک منبع جریان تشکیل شده است که جریان  $I_{ph}$  را تولید می‌کند. دیود اتصال بین p-n سل‌ها را نشان می‌دهد. مقاومت سری و موازی  $R_p$  و  $R_s$  به ترتیب مقاومت داخلی سل‌ها و مقاومت موازی مقدار جریان نشتی پیوند p-n را نشان می‌دهند [۲۷].



شکل (۳): مدار معادل مدل [۲۷ PV]

دمای سلول را می‌توان از رابطه (۱) محاسبه کرد:

$$T_{cell} = T_a + (NOCT - T_{aNOCT}) \frac{G}{G_{NOCT}} \quad (1)$$

به طوری که  $T_a$  دمای محیط برحسب سانتی‌گراد،  $NOCT$  دمای سلول در شرایط بهره‌برداری نامی از سلول برحسب سانتی‌گراد،  $T_{aNOCT}$  دمای محیطی که  $NOCT$  در آن تعریف شده است،  $G$  تابش خورشید و  $G_{NOCT}$  میزان تابش خورشید که  $NOCT$  در آن تعریف شده است که برحسب وات بر مترمربع هستند.

جریان نوری را می‌توان به صورت رابطه (۲) نوشت:

$$I_{ph} = I_{scref} \frac{G}{G_{ref}} (1 + \alpha_{isc} (T_{cell} - T_{ref})) \quad (2)$$

$I_{scref}$  جریان اتصال کوتاه در دمای مرجع (آمپر)،  $G_{ref}$  تابش مرجع نور،  $\alpha_{isc}$  ضریب دمای جریان اتصال کوتاه،  $T_{ref}$  دمای مرجع سلول خورشیدی است.

ولتاژ مدار باز پنل از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$V_{oc} = V_{ocref} + \alpha_{voc} (T_{cell} - T_{ref}) \quad (3)$$

$V_{ocref}$  ولتاژ مدار باز در شرایط استاندارد (ولت)،  $\alpha_{voc}$  ضریب دمای ولتاژ مدار باز (ولت) هستند.

جریان خروجی پنل که برای مشخصه ولتاژ - جریان مورد استفاده

قرار می‌گیرد، از رابطه (۴) قابل استحصال است [۲۷].

$$I_o = I_{ph} - I_{sat} \left( \exp\left(\frac{q}{nkT_{cell}} \frac{V_o + R_s I_o}{N_s}\right) - 1 \right) - \left[ \frac{V_o + R_s I_o}{R_p} \right] \quad (4)$$

$q$  بار الکترون (کولن)،  $n$  فاکتور دیود،  $k$  ثابت بولتزمن ( $J/K^0$ ).

$N_s$  تعداد سل‌های متصل شده به صورت سری است.

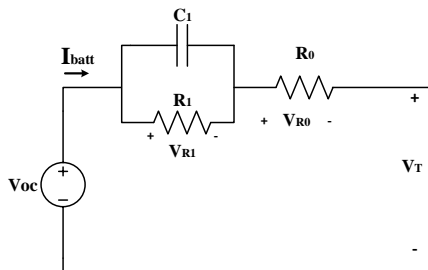
توان خروجی سلول خورشیدی از حاصلضرب ولتاژ در جریان حاصل می‌شود. از آنجا که مقدار توان تولیدی توسط سیستم در ولتاژها و جریان‌های متفاوت غیرخطی است، در این سیستم از روش MPPT برای استفاده حداکثر از انرژی تولیدی توسط سیستم خورشیدی استفاده شده است [۲۸].

## ۲.۲. مدل‌سازی ذخیره‌سازهای انرژی

ترکیب باتری و ابرخازن به عنوان ذخیره‌سازهای انرژی استفاده شده است. علت ترکیب این دو نوع ذخیره‌ساز پاسخ‌گویی مناسب به دینامیک‌ها، قیمت مناسب این ذخیره‌سازها، بلوغ نسبی تکنولوژی و تعمیر و نگهداری راحت‌تر آن‌هاست.

### الف. باتری

باتری‌ها یکی از متداول‌ترین تجهیزات ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی هستند. در این مطالعه، به دلیل ویژگی‌های مناسب باتری‌های سرب اسید<sup>۱</sup> از این نوع باتری‌ها استفاده شده است. شکل (۴) مدل باتری سرب-اسیدی را نشان می‌دهد.  $R_0$  مقاومت اهمی است که به دلیل مقاومت الکتروود و دیگر تجهیزات وجود دارد. مقاومت  $R_1$  تلفات انرژی انتقال بار در هنگام شارژ را نشان می‌دهد.  $C_1$  شیفیت بین دو لایه و الکتروود را نشان می‌دهد. این مقاومت باعث افت ولتاژ در هنگام عملکرد و همچنین تلف شدن قسمتی از انرژی می‌شود [۲۸]. طبق مدار معادل روابط را می‌توان به صورت رابطه (۵) نشان داد.



شکل (۴): مدار معادل باتری [۲۷]

$$V_1 = V_{1,-1} + \frac{dV_1}{dt_{1,-1}} (t - t_{1,-1}) \quad (5)$$

$$I_2 = \frac{V_{oc} - V_1}{R_1}$$

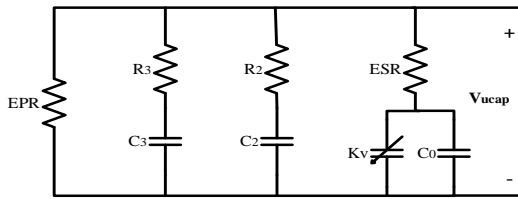
$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{1}{C_1} (I_2 - I_{batt})$$

$$V_T = V_1 - (I_{batt} R_0)$$

$$SOC = SOC_{init} - \frac{1}{Ah} \int I_{batt} dt$$

$$V_{oc} = V_{oc_{min}} + K_e SOC$$

### 1. Lead acid Battery



شکل (۵): مدار معادل ابرخازن [۲۹]

معادلات مربوط به ابرخازن را می‌توان به صورت رابطه (۸)

نوشت:

$$ESR = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (۸)$$

$$C_o = \left( \frac{t_1}{V_1} - \frac{V_1 t_2 - t_1 V_2}{V_2^2 - V_1 V_2} \right) I_C$$

$$K_v = 2 \left( \frac{V_1 t_2 - t_1 V_2}{V_2^2 - V_1 V_2} \right) I_C$$

$$C_2 = \frac{I_C t_c}{V_{2f}} - \left( C_o + \frac{K_v V_{2f}}{2} \right) V_{2f}$$

$$R_2 = \frac{t_{c2}}{C_2}$$

$$EPR = \frac{t_4 - t_3}{\ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) C_{ucapR}}$$

که  $\Delta V$  تغییرات ولتاژ ابرخازن هنگام قطع و وصل بار،  $\Delta I$  تغییرات جریان ابرخازن هنگام قطع و وصل بار،  $t_1$  یک مرحله شارژ ولتاژ ابرخازن،  $V_1$  ولتاژ ابرخازن در  $t_1$  و  $t_2$  دو مرحله شارژ ولتاژ ابرخازن،  $V_2$  ولتاژ ابرخازن در  $t_2$ ،  $I_C$  جریان شارژ ابرخازن،  $t_c$  زمان شارژ ابرخازن،  $V_{2f}$  ولتاژ ابرخازن در  $t_{c2}$  و  $V_3$  ولتاژ دشارژ خودی در  $t_3$  زمان شروع دشارژ ابرخازن،  $V_4$  ولتاژ دشارژ نهایی ابرخازن در  $t_4$  ظرفیت نامی ابرخازن است.

### ۳.۲. مدل سازی توربین بادی

توربین‌های بادی با تبدیل انرژی باد به انرژی مکانیکی انرژی لازم برای تولید توان ژنراتور را فراهم می‌کنند. مدل ریاضی توربین بادی را می‌توان به صورت رابطه (۹) نشان داد [۳۰].

$$P_w = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \\ P_r \left( \frac{v^3 - v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{ci}^3} \right) & v_{ci} < v < v_r \\ P_r & v_r < v < v_{co} \\ 0 & v > v_{co} \end{cases} \quad (۹)$$

$P_w$  توان خروجی توربین بادی (وات)،  $P_r$  توان نامی توربین (وات)،  $v_r$  سرعت نامی توربین،  $v_{co}$  سرعت حد بالای توربین،  $v_{ci}$  حد پایین سرعت توربین،  $v$  سرعت باد (متر بر ثانیه) است. و توان خروجی ژنراتور به صورت رابطه (۱۰) خواهد بود:

$$P_{WT} = P_w \times A_w \times \eta_g \quad (۱۰)$$

در این رابطه،  $V_T$  ولتاژ ترمینال باتری (ولت)،  $V_{OC}$  ولتاژ در حالت بدون بار باتری (ولت)،  $Ah$  ظرفیت نامی باتری (آمپر-ساعت)،  $I_{Batt}$  جریان باتری،  $SOC$  میزان شارژ باتری،  $SOC_{init}$  میزان شارژ اولیه باتری،  $K_e$  ولتاژ ضد محرکه بر  $SOC$ ،  $I_2$  جریان عبوری از مقاومت  $R_1$  از آنجایی که بسته به شرایط باتری می‌تواند شارژ یا دشارژ شود، ولتاژ باتری پس از گذشت مدت زمان  $t$  تغییر می‌کند لذا  $t-I$  فاصله بین این تغییرات است.

### محدودیت‌های شارژ و دشارژ باتری

یکی از موارد مهمی که هنگام استفاده از باتری‌ها به خصوص در ریزشکبه‌ها باید مد نظر قرار گیرد، میزان شارژ و دشارژ باتری است. در طی زمان دشارژ باتری مقدار  $P_{Batt} > 0$  و در هنگام شارژ باتری مقدار  $P_{Batt} < 0$  است. مقدار انرژی ذخیره شده در طول مدت شارژ و دشارژ باتری را می‌توان از رابطه (۶) به دست آورد.

$$E(t) = E(t-1) - P_{Batt} \cdot \Delta T / \eta_{disch} \quad P_{Batt} > 0 \quad (۶)$$

$$E(t) = E(t-1) - P_{Batt} \cdot \Delta T \cdot \eta_{char} \quad P_{Batt} < 0$$

که  $t$  بازه زمانی به ساعت،  $E(t)$  مقدار انرژی ذخیره شده در باتری پس از گذشت هر بازه زمانی،  $\eta_{disch}$  راندمان دشارژ و  $\eta_{char}$  راندمان شارژ است.

برای جلوگیری از شارژ و دشارژ بیش از حد باتری، محدودیت‌های شارژ و دشارژ مطابق رابطه (۷) لحاظ می‌شود:

$$P_{char}^{max} \leq P_{Batt}(t) \leq P_{disch}^{max} \quad (۷)$$

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max}$$

که  $P_{disch}^{max}$  حداکثر توان دشارژ،  $P_{char}^{max}$  حداکثر توان شارژ،  $SOC_{min}$  حد پایین شارژ و  $SOC_{max}$  حد بالای شارژ باتری است.

### ب. ابرخازن

مزیت مهم ابرخازن‌ها داشتن چگالی توان بالاست؛ بنابراین برای کاربردهایی با توان بالا و مدت زمان کوتاه مناسب‌اند. از مزایای دیگر ابرخازن می‌توان به عدم داشتن فعل و انفعالات شیمیایی، عدم نیاز به خنک‌کننده، عدم تولید حرارت بالا، طول عمر بالا، شارژ و دشارژ سریع و نصب و راه‌اندازی ساده اشاره کرد.

مدل ابرخازن در شکل (۵) آورده شده است. این مدل از چند شاخه  $RC$  موازی تشکیل شده است که ثابت زمانی‌های متفاوتی دارند. شاخه اول که شامل  $ESR$  است، رفتار ابرخازن در بازه ثانیه را نشان می‌دهد [۲۹]. شاخه دوم که حاوی  $R_2$  است، رفتار ابرخازن در بازه زمانی دقیقه را نشان می‌دهد. شاخه نهایی نیز رفتار ابرخازن پس از ۱۰ ثانیه را نشان می‌دهد.

سیکل‌های کاری از شکل (۷) به دست می‌آید. این شکل بیانگر این مفهوم است که هرچه عمق دشارژ بیشتر شود، طول عمر باتری کاهش می‌یابد. برای مثال باتری تا عمق ۵۰ درصد ظرفیت نامی دشارژ و دوباره شارژ می‌شود آنگاه پس از ۲۰۰۰ بار دشارژ شدن طول عمر باتری پایان می‌یابد. طول عمر باتری در سال با استفاده از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود. در این حالت، از منحنی دشارژ برحسب تعداد سیکل‌های خرابی مطابق رابطه (۱۲) استفاده می‌شود.

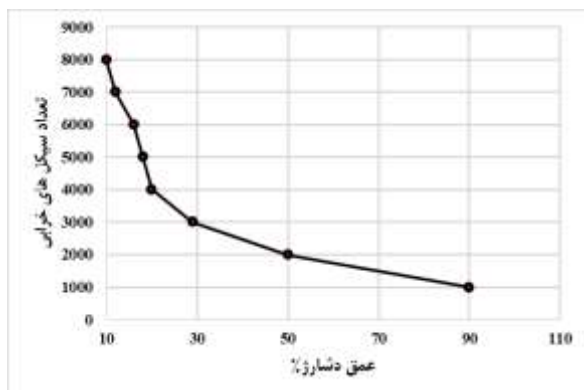
$$Life_{bat} = \frac{I}{\sum_{i=1}^m \frac{Z_i}{CF_i}} \lim_{x \rightarrow \infty} \quad (12)$$

که  $Life_{bat}$  مدت طول عمر باتری،  $Z_i$  تعداد سیکل شارژ و دشارژ و  $CF_i$  تعداد شارژ و دشارژی است که طول عمر باتری تمام می‌شود؛ به عبارتی به ازای هر عمق دشارژ تعداد سیکل‌های کاری مرتبط با این عمق دشارژ از شکل استخراج می‌شود. حال با توجه به بازه مورد مطالعه و طول عمر در نظر گرفته شده برای سیستم یک ضریب جایگزینی به صورت رابطه (۱۳) برای باتری‌ها استخراج می‌گردد.

$$K_{Life} = CF_i * DoD * N_{Bat} * Ah_{Bat} * V_{Bat} / (E_{Disch}) \quad (13)$$

$$C_{rep} = S_{life} / K_{Life}$$

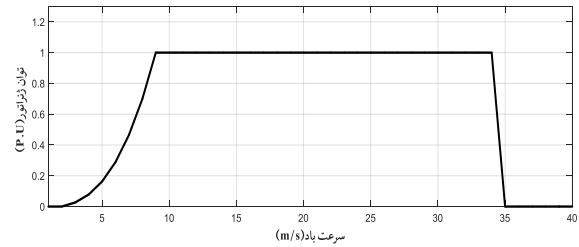
$Ah_{Bat}$  ظرفیت نامی باتری،  $E_{Disch}$  مقدار انرژی دشارژ شده در یک بازه زمانی برای نمونه یک سال،  $V_{Bat}$  ولتاژ باتری،  $S_{life}$  طول عمر سیستم،  $K_{Life}$  ضریب طول عمر و  $C_{rep}$  ضریب جایگزینی است. برای نمونه، اگر طول عمر مؤثر باتری ۵ سال در نظر گرفته شود و عمق دشارژ ۵۰ درصد باشد و مقدار انرژی دشارژ باتری در طول یک سال به صورت ۱۰۰ کیلووات ساعت و ظرفیت نامی باتری ۱۰۰ آمپر ساعت و تعداد باتری‌ها را ۲ عدد در نظر گرفته شود، ضریب طول عمر ۲۴ به دست می‌آید و اگر با همین شرایط عمق دشارژ را ۸۰ درصد در نظر بگیریم، ضریب عمر ۱۹/۲ حاصل می‌شود؛ یعنی با عمق دشارژ بیشتر، باتری باید زودتر جایگزین شود.



شکل (۷): منحنی طول عمر باتری برحسب دشارژ باتری [۱۰]

که  $A_w$  مجموع سطح جاروب توربین و  $\eta_g$  بازدهی قسمت‌های الکتریکی شامل مبدل‌ها و تجهیزات مختلف متصل به آن است.

منحنی توان خروجی ژنراتور برای سرعت‌های مختلف در شکل (۶) آمده است. در سرعت‌های پایین باد، ژنراتور توانی را تولید نمی‌کند. با افزایش سرعت باد و رسیدن به سرعت نامی، ژنراتور توان ثابتی را تولید می‌کند و با افزایش سرعت باد به بیش از محدوده تعیین شده، برای جلوگیری از صدمه به توربین بادی، آن را از مدار خارج نموده لذا توان خروجی ژنراتور صفر خواهد شد.



شکل (۶): منحنی توان خروجی توربین بادی برحسب سرعت [۱۳]

#### ۴.۲. مدل سازی میکروتوربین

میکروتوربین یک توربین تک مرحله‌ای ترکیبی است که توان آن در حدود چند کیلووات تا چندصد کیلووات است. سوخت میکروتوربین غالباً گاز طبیعی است. با در نظر گرفتن هزینه نصب و هزینه سوخت، مجموع هزینه میکروتوربین را می‌توان به صورت رابطه (۱۱) تعیین کرد که  $a$  و  $b$  ضرایب هزینه هستند [۶]. گفتنی است میکروتوربین در مواقعی که مقدار تولید سیستم‌های تجدیدپذیر (در این مطالعه توربین بادی و سیستم خورشیدی) بیش از مقدار بار مصرفی است، از مدار خارج می‌شود.

$$C(P) = a + bP \quad (11)$$

#### ۵.۲. مدل طول عمر باتری

استرس‌های مکانیکی که به علت تبدیل مواد فعال در طول شارژ و دشارژ تولید می‌شوند، دلیل اصلی وابستگی طول عمر باتری به عمق دشارژ ( $DoD$ ) در باتری‌ها هستند. در طول پروسه دشارژ، سرب و دی اکسید سرب به سولفات تبدیل می‌شوند و برعکس. حجم مخصوص مواد به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کنند.  $DoD$  کوچک تغییرات کمتری روی حجم ایجاد می‌کند [۳۱]. عوامل مختلفی بر طول عمر باتری تأثیرگذارند که می‌توان به چگالی جریان، دما، فرسایش، تخریب و پتانسیل اشاره کرد [۳۲]. برای تخمین طول عمر باتری، تعداد سیکل شارژ و دشارژ ( $Z_i$ ) بر اساس مقادیر مختلف  $DoD$  محاسبه شده و با هم جمع می‌شوند. بسته به عمق دشارژ باتری، تعداد

### ۳. روش پیشنهادی برای تعیین ابعاد بهینه ذخیره‌سازهای

#### ترکیبی

روش کار در الگوریتم پیشنهادی بدین صورت است که ابتدا قسمت‌های مختلف در نظر گرفته شده در ریزشکبه (سیستم فتولتائیک، توربین بادی میکروتوربین، باتری، ابرخازن) مدل‌سازی می‌شوند. مقدار توان تولیدی توسط تولیدکنندگان مشخص شده و پروفایل بار نیز با توجه به میزان مصرف تعیین می‌شود. مقادیر در نظر گرفته شده برای تولیدکنندگان و مشخصات ذخیره‌سازها در بخش ضمیمه آورده شده است.

اختلاف بین توان بار و توان تولیدی باید توسط ذخیره‌سازها تأمین یا ذخیره شود. در صورتی که مقدار توان تولیدی از توان بار بیشتر باشد این توان در ذخیره‌سازهای انرژی ذخیره می‌شود. پروفایل بار می‌تواند (به صورت روزانه- ماهانه یا سالانه) با استفاده از داده‌های واقعی یا با استفاده از الگوریتم‌های کامپیوتری تولید شود. در این مطالعه داده‌های تولید و مصرف برای بازه یک‌ساله در نظر گرفته شده‌اند. توان مورد نیاز تأمین توسط ذخیره‌سازهای ترکیبی از اختلاف توان تولیدی و توان بار حاصل می‌شود. در صورتی که علامت توان تأمین توسط ذخیره‌سازها منفی باشد، به معنی دشارژ ذخیره‌سازها و در غیر این صورت به معنی شارژ ذخیره‌سازهای انرژی است؛ یعنی کمبود توان توسط ذخیره‌سازها تأمین شده و مازاد توان ذخیره می‌شود. رابطه (۱۴) ارتباط توان‌های تولیدی و ذخیره‌سازی را نشان می‌دهد.

$$P_{HESS} = P_G - P_{Load} \quad (14)$$

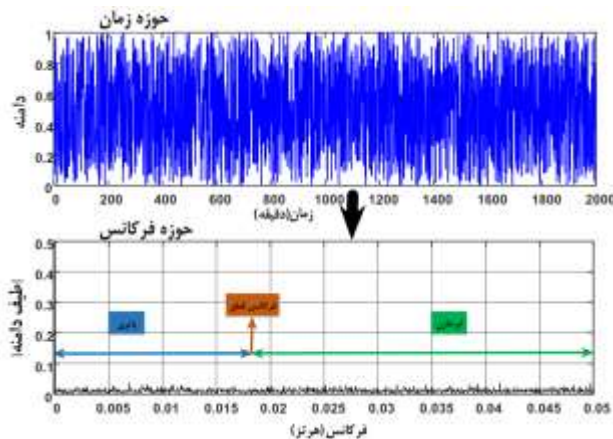
$$P_G = P_{PV} + P_{WT} + P_{MT}$$

$$P_{HESS} = P_{Bat} + P_{SC}$$

$P_{Load}$  مقدار توان بار،  $P_G$  مقدار توان تولید توسط تولیدات پراکنده،  $P_{HESS}$  توان ذخیره‌سازها،  $P_{PV}$  توان تولیدی سیستم فتولتائیک،  $P_{WT}$  توان تولید توربین بادی،  $P_{MT}$  توان تولید میکروتوربین،  $P_{Bat}$  توان تولیدی یا ذخیره باتری و  $P_{SC}$  توان تولید یا ذخیره ابرخازن است.

از روش تبدیل فوریه گسسته برای تخصیص توان بین ذخیره‌ساز استفاده شده است؛ یعنی توان خالص مورد نیاز توسط ذخیره‌سازها به حوزه فرکانس منتقل و تخصیص توان بین ذخیره‌سازها در این حوزه صورت گرفته و مقدار فرکانس قطع تعیین می‌شود. تبدیل‌هایی مانند تبدیل موجک با انتخاب مقادیر مختلف بایاس تحت تأثیر قرار می‌گیرند اما تبدیل فوریه گسسته به‌عنوان یک فیلتر دقیق عمل می‌کند. برای افزایش طول عمر باتری و پاسخ دینامیکی مناسب به بارهای با دینامیک سریع و پاسخ‌گویی مناسب سیستم در مواردی مانند کنترل فرکانس، ابرخازن برای تأمین و ذخیره فرکانس‌های سریع و باتری

برای تأمین و ذخیره‌سازی فرکانس‌های کند استفاده شده است. همچنین با توجه به اینکه میزان توان تولیدی توسط سیستم‌های تجدیدپذیر با تغییر پارامترهای باد، تابش و دما به‌طور مداوم تغییر می‌کند، ترکیب ذخیره‌سازهای انرژی موجب بهبود عملکرد در سیستم می‌شود. هرچه میزان فرکانس قطع کمتر باشد، میزان توان تأمین توسط ابرخازن بیشتر بوده و با زیاد شدن فرکانس قطع مقدار توان تأمین توسط باتری افزایش خواهد یافت. نحوه تخصیص توان بین ذخیره‌ساز در حوزه فرکانس در شکل (۸) آورده شده است.



شکل (۸): تخصیص انرژی با تبدیل حوزه زمان به حوزه فرکانس

تبدیل فوریه گسسته یکی از مناسب‌ترین تبدیلات برای تحلیل سیگنال‌هاست. تبدیل فوریه یک سیگنال در حوزه زمان را می‌توان به صورت رابطه (۱۵) به دست آورد.

$$X(k) = DFT(x(n)) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi nk/N} \quad (15)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

$$A(k) = |X(k)|$$

$$f(k) = \sum_{n=0}^{N-1} k \cdot f / N$$

که  $N$  تعداد نمونه‌ها،  $A(k)$  دامنه سیگنال،  $f(k)$  مقدار فرکانس است. ابتدا توان ذخیره‌سازی در حوزه زمان به دست می‌آید سپس این توان به حوزه فرکانس انتقال داده شده و در این بخش میزان فرکانس قطع تعیین می‌شود. پس از تعیین فرکانس، اطلاعات دوباره به حوزه زمان انتقال داده می‌شود تا انرژی و تعداد هر یک از ذخیره‌سازها تعیین شده و تابع هزینه محاسبه شود. رابطه (۱۶) تبدیل فوریه معکوس برای انتقال از حوزه فرکانس به حوزه زمان را ارائه می‌دهد.

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k)e^{-j2\pi nk/N} \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (16)$$

شکل (۹) طرح واره کلی الگوریتم تعیین ظرفیت ذخیره‌سازها را نشان می‌دهد.

$$E_{SC}[n] = \sum_0^m (P_{SC}[n](t) \cdot \Delta t) \quad , n = 0, \dots, N \quad (20)$$

$$E_{SC} = \max(E_{SC}) - \min(E_{SC})$$

$$E_{SC-\min} = \frac{E_{SC}}{DOD}$$

عمق دشارژ ابرخازن نیز ۰/۸۵ در نظر گرفته می‌شود.

### ۱.۳. تعیین فرکانس قطع

برای انتخاب ظرفیت مناسب بین ابرخازن و باتری ابتدا توان مورد نیاز ذخیره‌سازها به حوزه فرکانس انتقال داده شده و در این حوزه مقدار فرکانس قطع محاسبه می‌شود. با توجه به طبیعت باتری و ابرخازن فرکانس‌های بالا با استفاده از ابرخازن و فرکانس‌های پایین با استفاده از باتری تأمین می‌شود. علت این امر این است که پاسخ ابرخازن نسبت به باتری بسیار سریع‌تر بوده و همچنین تعداد شارژ و دشارژ باتری نیز کاهش یافته و طول عمر باتری افزایش یافته و پاسخ‌دهی به بار بهبود می‌یابد. با تغییر فرکانس قطع میزان توان تأمینی توسط ذخیره‌سازها تغییر می‌کند. اگر فرکانس قطع صفر شود، یعنی کل توان توسط ابرخازن تأمین می‌شود. در این قسمت یک تابع هزینه برای ذخیره‌سازها (شامل هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه تعمیر و نگهداری و هزینه جایگزینی است) در نظر گرفته شده است. بحث طول عمر باتری در تابع هزینه مربوط به جایگزینی لحاظ شده است؛ یعنی با توجه به تعداد شارژ و دشارژ و با توجه به منحنی شکل (۷) طول عمر باتری محاسبه می‌شود. هرچه میزان شارژ و دشارژ بیشتر باشد، تعداد سیکل کاری باتری کاهش خواهد یافت و باتری زودتر باید جایگزین شود. در این حالت با تخصیص شارژ و دشارژهای سریع به ابرخازن، مقدار شارژ و دشارژهای با زمان سریع و تعداد زیاد، از باتری به ابرخازن انتقال داده می‌شود.

هزینه سرمایه‌گذاری اولیه تجهیزات ذخیره‌سازی را می‌توان

به صورت رابطه (۲۱) تعیین کرد:

$$C_{Cap} = C_{Cap}(SC) + C_{Cap}(Bat) + C_{Cap}(Conv) \quad (21)$$

$$C_{Cap}(Bat) = N_{SC} * CA_{SC}$$

$$C_{Cap}(SC) = N_{Bat} * CA_{Bat}$$

$C_{Cap}(Bat)$  هزینه سرمایه‌گذاری ذخیره‌سازها، هزینه

سرمایه‌گذاری باتری،  $C_{Cap}(SC)$  هزینه سرمایه‌گذاری ابرخازن،

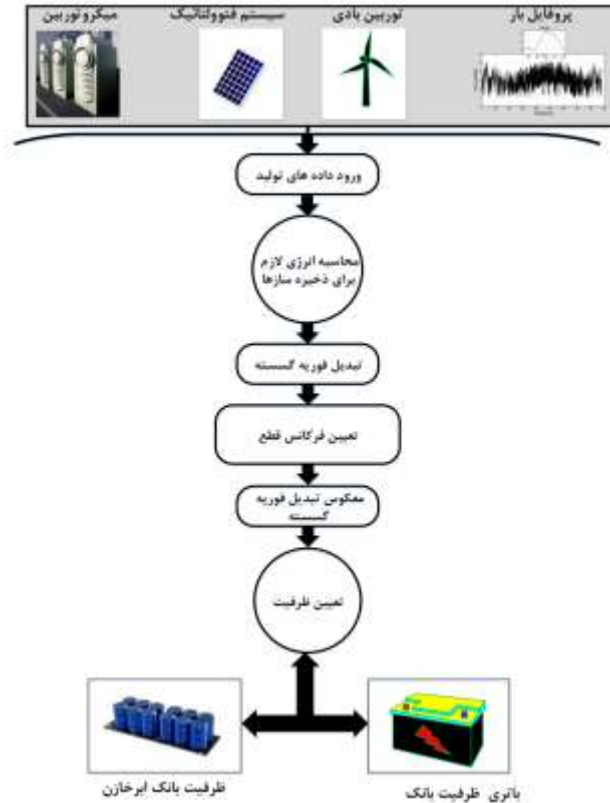
$C_{Cap}(Conv)$  هزینه‌های مبدل‌های الکترونیک قدرت،  $N_{Bat}$  تعداد

باتری،  $N_{SC}$  تعداد ابرخازن،  $CA_{Bat}$  هزینه هر واحد باتری،  $CA_{SC}$

هزینه هر واحد ابرخازن است.

هزینه تعمیر و نگهداری را می‌توان به صورت رابطه (۲۲) نشان

داد:



شکل (۹): طرح‌واره کلی تعیین ابعاد ذخیره‌سازها

برای تعیین میزان ظرفیت ذخیره‌سازها باید مقدار توان به انرژی لازم برای ذخیره‌سازی تبدیل شود تا امکان محاسبه تعداد و ظرفیت ذخیره‌سازها میسر گردد. مقدار انرژی‌ای که باید توسط باتری تأمین شود به صورت رابطه (۱۷) قابل بیان است.

$$E_{Bat}[n] = \sum_0^m (P_{Bat}[n](t) \cdot \Delta t) \quad , n = 0, \dots, N \quad (17)$$

$$E_{Bat} = \max(E_{Bat}) - \min(E_{Bat})$$

همچنین برای جلوگیری از شارژ و دشارژ بیش از حد باتری،

محدودیت توان و حالت شارژ را هم باید لحاظ کرد [۲۹]. مقدار

ظرفیت باتری را می‌توان از رابطه (۱۸) به دست آورد.

$$E_{Bat-\min} = \frac{E_{Bat}}{DOD} \quad (18)$$

$$DOD = SOC_{\max} - SOC_{\min}$$

تلفات ناشی از شارژ و دشارژ باتری نیز به صورت رابطه (۱۹) در

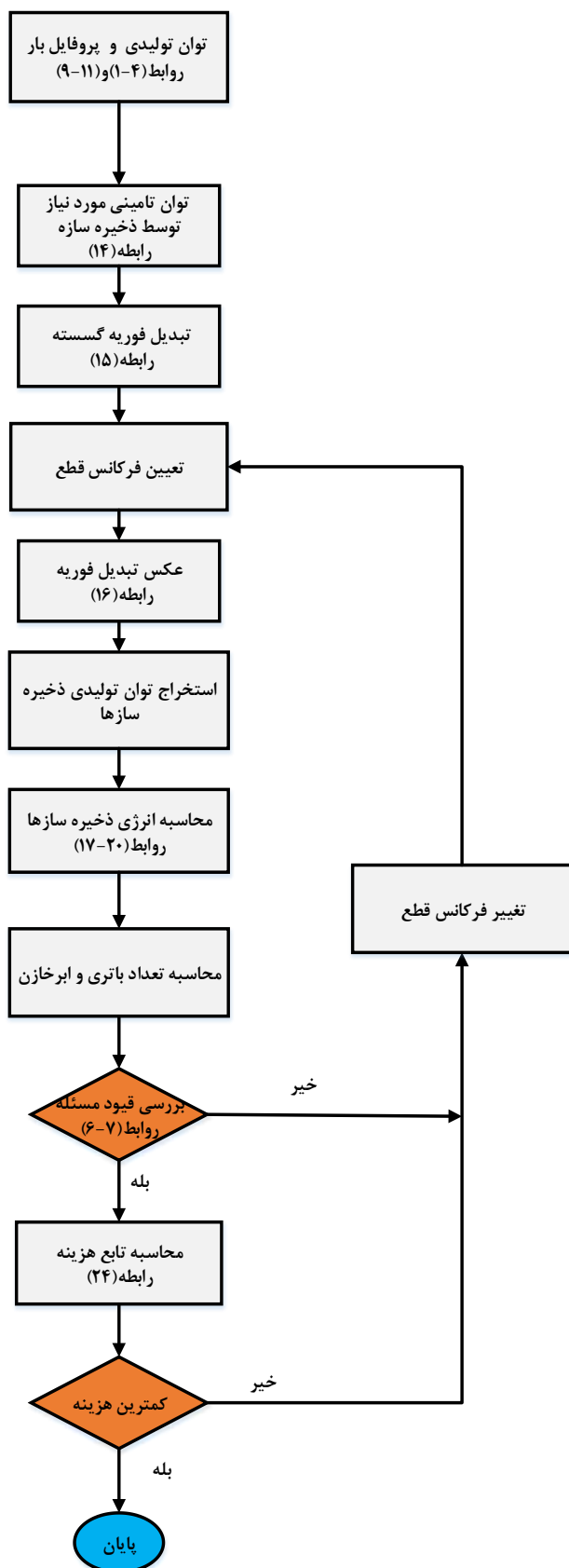
نظر گرفته می‌شود.

$$E_{BESS}^{\min} = \max\left(\frac{E_{Bat-\min}(\text{for\_ch arg})}{\eta_d}, \eta_c E_{Bat-\min}(\text{for\_disch arg})\right) \quad (19)$$

در رابطه (۱۹)،  $\eta_d$  راندمان دشارژ و  $\eta_c$  راندمان شارژ است.

برای تعیین ظرفیت ابرخازن از رابطه (۲۰) استفاده می‌شود.





شکل (۱۰): طرح‌واره تعیین ظرفیت ذخیره‌سازهای ترکیبی

$$C_{O\&M} = C_{O\&M}(SC) + C_{O\&M}(Bat) + C_{O\&M}(Conv) \quad (22)$$

$C_{O\&M}$  هزینه تعمیر و نگهداری سیستم ذخیره‌سازی،  $C_{O\&M}(Bat)$  هزینه نگهداری باتری،  $C_{O\&M}(SC)$  هزینه نگهداری ابرخازن،  $C_{O\&M}(Conv)$  هزینه‌های مبدل الکترونیک قدرت است.

هزینه جایگزینی را می‌توان به صورت رابطه (۲۳) تعیین کرد:

$$C_{Rep} = C_{Rep}(SC) + C_{Rep}(Bat) + C_{Rep}(Conv) \quad (23)$$

$C_{Rep}$  هزینه جایگزینی سیستم ذخیره‌سازی،  $C_{Rep}(Bat)$  هزینه جایگزینی باتری،  $C_{Rep}(SC)$  هزینه جایگزینی ابرخازن و  $C_{Rep}(Conv)$  هزینه‌های مبدل الکترونیک قدرت است. به دلیل اینکه طول عمر ابرخازن نسبت به باتری و مبدل بسیار بیشتر است، از هزینه جایگزینی ابرخازن صرف‌نظر شده است.

در نتیجه تابع هدف کلی به صورت رابطه (۲۴) است:

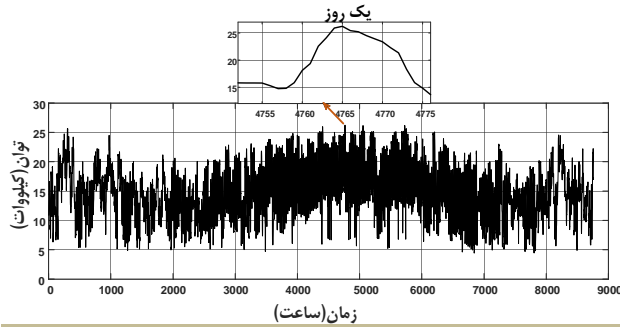
$$C_{Cost-Function} = C_{cap} + C_{rep} + C_{O\&M} \quad (24)$$

هدف حل مسئله تعیین فرکانس قطع به نحوی است که میزان هزینه ذخیره‌سازی انرژی حداقل گردد. از روش‌های مختلفی می‌توان برای حل مسئله بهره گرفت. روش گرادیان نزولی و روش‌های مبتنی بر الگوریتم‌ها تکاملی از جمله این روش‌ها هستند. محدوده فرکانس قطع بین  $[0, 1/2 * T_s]$  است به طوری که  $T_s$  زمان نمونه‌برداری است. با توجه به مشخص بودن بازه فرکانس قطع از روش گرادیان نزولی برای حل مسئله استفاده شده است. به طور خلاصه، اگر میزان هزینه با انتخاب میزان فرکانس قطع جدید نسبت به فرکانس قطع قبلی کاهش یابد و  $dC_{Cost-Function} = df_c$  نیز کمتر شود، این روند ادامه می‌یابد تا تابع هدف به مقدار کمینه برسد. مقدار فرکانس قطع توسط الگوریتم تغییر داده شده و تابع هزینه در هر مرحله محاسبه شده و مقدار تابع هزینه حداقل به دست می‌آید. در پروسه الگوریتم موارد مختلف مانند مقدار شارژ و دشارژ و حد مجاز توان و شارژ و دشارژ چک می‌شود. طرح‌واره در شکل (۱۰) ارائه شده است.

به دلیل اینکه سیستم باید قابلیت پاسخ‌گویی به بار در کل شبانه‌روز را داشته باشد، محاسبه انرژی ذخیره‌سازها برای یک شبانه‌روز در نظر گرفته شده و بازه کلی نیز یک سال در نظر گرفته شده است بدین صورت که برای هر روز سال، مقدار انرژی و تعداد ذخیره‌سازها استخراج شده و در نهایت تعداد ذخیره‌سازها برابر خواهد بود با بیشترین تعداد به دست آمده در سال. از انرژی خالص تبدیل فوریه گرفته شده و مقدار انرژی تأمین توسط هر ذخیره‌ساز با محاسبه تابع هزینه و مقدار کمینه تابع هزینه تعیین می‌شود.

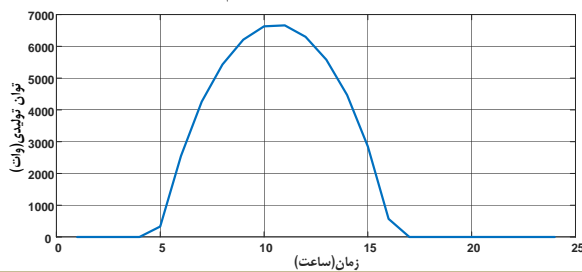
#### ۴. شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

مدل در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی مطابق شکل (۲) است. برای مدل‌سازی توربین بادی از روابط بخش ۳.۲ استفاده شده و اطلاعات باد با فاصله زمانی ۱ دقیقه استفاده شده است. همچنین مدل‌سازی سیستم فتولتائیک با استفاده از روابط بیان شده و اطلاعات تابش و دما با فاصله زمانی ۱ دقیقه استفاده شده است. اطلاعات مربوط به باد و تابش از یکی از ایستگاه‌های استان تهران تهیه شده است. از اطلاعات هواشناسی یک سال برای شبیه‌سازی استفاده شده است. همچنین برای مدل‌سازی سیستم از اطلاعات مربوط به کاتالوگ شرکت‌های سازنده استفاده شده است. مشخصات مربوط به پارامترهای مختلف شبیه‌سازی در قسمت ضمیمه آورده شده است. منحنی مربوط به تابش خورشید برحسب ساعت در شکل (۱۱) ارائه شده است. شکل (۱۲) میزان وزش باد برحسب متر بر ثانیه در طول یک سال را نشان می‌دهد. بازه زمانی تعیین ابعاد ذخیره‌سازها برای مدت یک سال در نظر گرفته شده است.



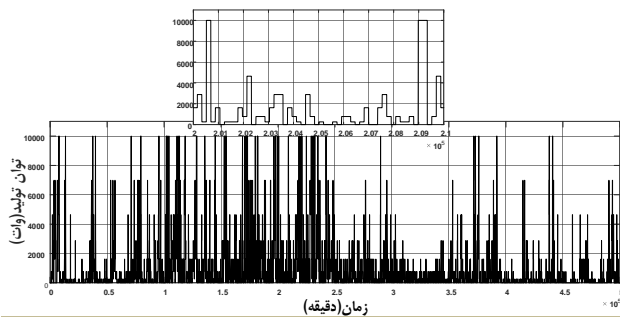
شکل (۱۳): منحنی بار سالانه

توان تولید حاصل از سیستم فتولتائیک برای یک روز نوعی در شکل (۱۴) آمده است. با تابش خورشید رفته‌رفته مقدار توان تولیدی افزایش یافته و به مقدار ماکزیمم رسیده و با کاهش مقدار تابش دوباره توان تولید توسط سیستم کاهش یافته است. از سیستم استخراج حداکثر توان برای استفاده حداکثر از خروجی سیستم استفاده شده است.



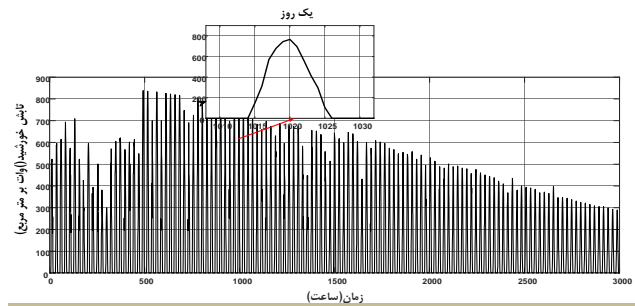
شکل (۱۴): توان تولیدی سیستم فتولتائیک برای یک روز

توان تولیدی به وسیله ژنراتور بادی در شکل (۱۵) ارائه شده است. با توجه به اینکه توربین بادی دارای توان نامی ۱۰ کیلووات است، در مواردی که سرعت باد به اندازه کافی افزایش یابد توان به مقدار نامی می‌رسد.



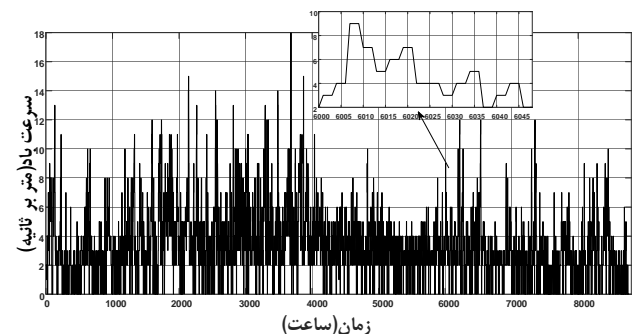
شکل (۱۵): توان تولیدی توربین بادی

مقدار توان مورد نیاز که توسط ذخیره‌سازها باید تأمین شود به حوزه فرکانس منتقل می‌شود. بازه فرکانسی برابر  $1/2 * T_s$  است که  $T_s$  فاصله نمونه‌برداری می‌باشد. همچنین در هنگام نمونه‌برداری باید به نرخ نایکوئیست توجه کرد. طیف فرکانسی برای یک بازه در شکل (۱۶) ارائه شده است. در این حوزه، تخصیص فرکانسی مختلف بین ذخیره‌کنندگان با تعیین فرکانس قطع انجام شده و با توجه به تابع هزینه، یک فرکانس قطع انتخاب شده و انتخاب انرژی و تعداد ذخیره‌سازها انجام می‌شود.

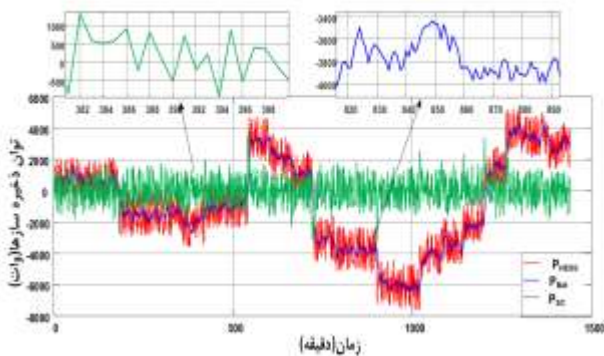


شکل (۱۱): منحنی تابش خورشید

منحنی مربوط به بار در طول یک سال در شکل (۱۳) آورده شده است. منحنی بار نیز مربوط به یک بار واقعی با حدود میانگین مصرف ۱۵ کیلووات در نظر گرفته شده است. پروفایل بار برای مناطق مسکونی بوده و پیک بار در ساعات غروب آفتاب رخ می‌دهد که در این ساعات میزان تابش خورشید بسیار پایین بوده و عملاً تولید انرژی توسط سیستم فتولتائیک صورت نگرفته و در این ساعات میکروتوربین، در صورت وجود باد توربین بادی و ذخیره‌سازها تأمین‌کننده بار خواهند بود.



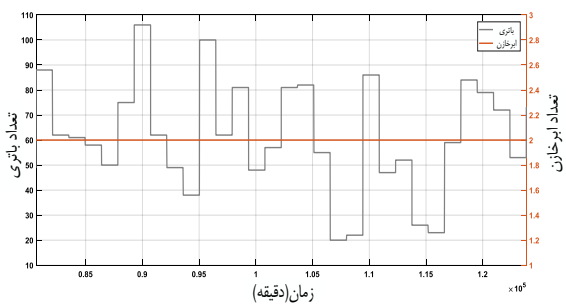
شکل (۱۲): میزان وزش باد در طول سال



شکل (۱۸): توان ذخیره سازها

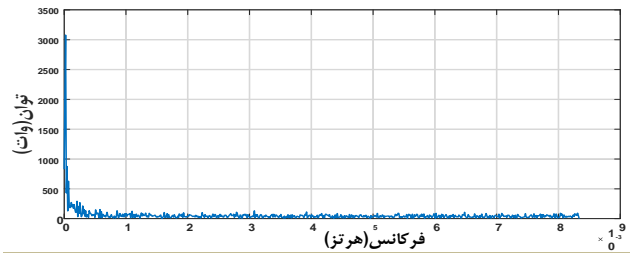
شکل (۱۹) تعداد باتری و ابرخازن برای طول یک ماه از شبیه سازی را نشان می دهد. تعداد ابرخازن ها به مقدار فرکانس قطع وابسته است و با توجه به اینکه میزان نوسانات توان تقریباً ثابت بوده، تعداد آن ها ثابت است. البته تعیین تعداد ابرخازن بسته به وضعیت بار و تولید و فرکانس های آن ها بستگی خواهد داشت. با کاهش میزان تابش خورشید و یا وزش باد در برخی از فصول مقدار توان تولید توسط این سیستم ها تغییر کرده و به میزان بیشتر یا کمتری ذخیره ساز نیاز خواهیم داشت. همچنین تغییرات بار نیز بر ظرفیت ذخیره سازی تأثیرگذار است. این روش ممکن است هزینه را بالاتر ببرد اما به دلیل افزایش قابلیت اطمینان سیستم با توجه به ماهیت پیش بینی ناپذیر انرژی های تجدیدپذیر، امری اجتناب ناپذیر است.

تعداد باتری ها با توجه به مقدار تولید و میزان بار تغییر می کند. تعداد کل باتری و ابرخازن برای طول یک سال برابر با بیشترین تعداد به دست آمده برای مدت یک سال خواهد بود. از آنجایی که تعیین تعداد ذخیره سازها برای بدترین شرایط در طول سال تعیین می شود، پاسخ دهی مناسب برای کل شرایط را دارا خواهد بود.



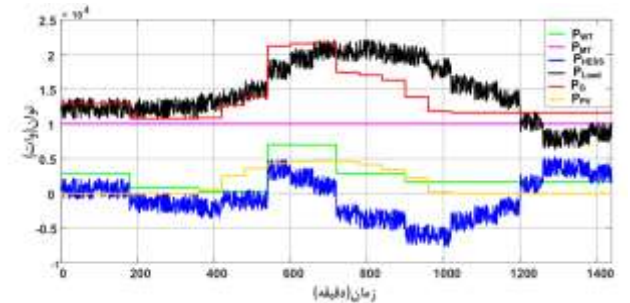
شکل (۱۹): تعداد باتری و ابرخازن برای دوره یک ماهه

هزینه مربوط به ذخیره سازی باتری و ابرخازن در شکل (۲۰) آورده شده است. مقدار هزینه احداث برای هر واحد باتری و ابرخازن در جداول ضمیمه آمده است.



شکل (۱۶): مقدار توان ذخیره سازها در حوزه فرکانس

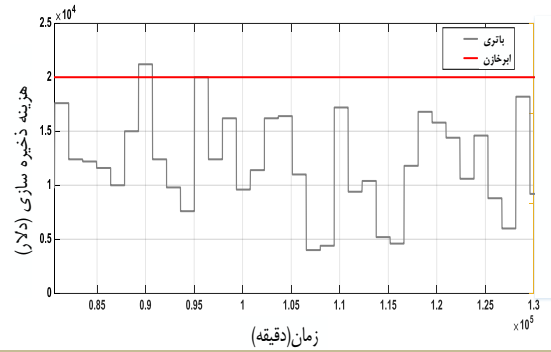
شکل (۱۷) توان تولیدی توسط تولیدکنندگان و توان بار را برای یک روز نشان می دهد. اختلاف توان نشان داده شده باید توسط ذخیره کنندگان تأمین یا ذخیره شود. با توجه به مقدار تولید توان و میزان بار مصرفی توانی که ذخیره سازها باید تأمین یا ذخیره کنند تعیین می شود و سپس این توان به انرژی تبدیل شده و مقدار ظرفیت ذخیره سازها بر اساس روابط بیان شده در بخش های قبل به دست می آید.



شکل (۱۷): توان تولیدی منابع و توان ذخیره سازها در طول یک روز

مقدار توان مورد نیاز برای تأمین و ذخیره سازی و تخصیص توان بین باتری و ابرخازن در شکل (۱۸) ارائه شده است. با توجه به شکل مشخص است که بازه زمانی شارژ و دشارژ برای ابرخازن کوچک و در حد ثانیه بوده و زمان لازم برای شارژ و دشارژ باتری در حد دقیقه بوده و نسبت به ابرخازن بزرگ تر است. ابرخازن به دلیل داشتن چگالی توان بالا مقدار توان زیادی را در لحظه کوتاه شارژ و دشارژ می کند. استفاده از ابرخازن موجب کاهش شارژ و دشارژ روی باتری شده و با توجه به در نظر گرفتن طول عمر باتری در تابع هزینه، طول عمر باتری افزایش یافته و هزینه جایگزینی باتری کاهش می یابد. از آنجایی که تعداد شارژ و دشارژ در ابرخازن بسیار زیاد است، تأثیر شارژ و دشارژ در طول عمر ابرخازن ناچیز بوده و در طی چند دوره جایگزینی باتری، نیازی به جایگزینی ابرخازن نخواهد بود. همچنین ترکیب ذخیره سازی موجب بهبود عملکرد در کل سیستم خواهد شد؛ زیرا هم تغییرات بار و هم تغییرات در تولیدکنندگان تجدیدپذیر (که دارای تغییرات در تولید متناسب با تغییر باد و خورشید) را می توان به خوبی با استفاده از ذخیره سازهای ترکیبی کنترل کرد.

ذخیره‌ساز ترکیبی نسبت به زمانی که فقط از باتری استفاده می‌شود، کمی افزایش داشته اما با در نظر گرفتن هزینه جایگزینی مقدار کل هزینه برای یک سال کاهش یافته است. همچنین باید توجه داشت که بازه طول عمر برای باتری‌ها در حدود ۳ تا ۵ سال است، در صورتی که این بازه برای ابرخازن بسیار بالاتر است؛ بنابراین با در نظر گرفتن بازه زمانی برای طول عمر باتری، هزینه جایگزینی به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین پاسخ‌دهی مناسب به بار و تولیدکنندگان برای تأمین و ذخیره انرژی توسط ذخیره‌سازها بهبود می‌یابد؛ زیرا ابرخازن پاسخ سریع در شارژ و دشارژ را تأمین می‌کند. با توجه به نتایج مشخص است که استفاده از روش پیشنهادی برای تعیین ظرفیت ذخیره‌کنندگان ترکیبی موجب کاهش هزینه‌های ذخیره‌سازی و بهبود عملکرد سیستم می‌شود.



شکل (۲۰): هزینه ذخیره‌سازی

تعداد باتری و ابرخازن مورد نیاز برای بازه یک‌ساله در جدول (۱) آمده است. با توجه به جدول مشخص است که میزان هزینه اولیه

جدول (۱): تعداد ذخیره‌کنندگان و هزینه

نوع سیستم ذخیره‌سازی	تعداد باتری	تعداد ابرخازن	هزینه ذخیره‌سازی (\$)	هزینه جایگزینی (\$)	هزینه کل (\$)
باتری	۱۱۰	۰	۲۲۰۰۰	۵۰۰۰	۲۷۰۰۰
باتری-ابرخازن	۱۰۶	۲	۲۲۴۰۰	۲۵۰۰	۲۴۹۰۰

گذاشتن اطلاعات جوی تشکر می‌کنند.

### ضمیمه

مشخصات تولیدکنندگان و ذخیره‌سازها

جدول (۲): مشخصات ابرخازن

پارامترهای ابرخازن (شرکت Maxwell)	
مقدار ظرفیت	۵۰۰ فاراد
ولتاژ نامی	۱۶ ولت
مقاومت سری (ESR)	۲/۱ اهم
مقدار انرژی در هر سلول	۳ وات ساعت
حداکثر ولتاژ سری	۷۵۰ ولت

جدول (۳): مشخصات باتری

پارامترهای باتری شرکت (صبا باتری)	
مقدار ولتاژ	۱۲ ولت
میزان ظرفیت	۱۰۰ آمپر ساعت
حداکثر جریان دشارژ	۹۰۰ آمپر برای ۵ ثانیه

جدول (۴): مشخصات توربین بادی

توربین بادی شرکت (AEOLOS)	
توان نامی	۱۰ کیلووات
$v_{ci}$	۲ متر/ثانیه
$v_r$	۹ متر/ثانیه
$v_{co}$	۳۵ متر/ثانیه
$A_w$	۱/۴۴ متر

### ۵. نتیجه گیری

در این مقاله، تعیین ظرفیت بهینه باتری و ابرخازن برای کاربرد در ریزشبکه مستقل شامل انرژی‌های تجدیدپذیر با ماهیت نسبتاً غیرقابل پیش‌بینی انجام شد. با توجه به اینکه یکی از پارامترهای مهم تأثیرگذار بر طول عمر باتری، تعداد شارژ و دشارژ و استرس‌های فرکانس بالای توان روی باتری است، از ترکیب باتری و ابرخازن استفاده شد و برای تخصیص فرکانس روش تبدیل فوریه گسسته انتخاب شد. نتایج نشان می‌دهد که با ترکیب باتری و ابرخازن میزان هزینه مورد نیاز ذخیره‌سازها به دلیل کاهش زمان جایگزینی باتری کاهش یافته و عملکرد سیستم بهبود می‌یابد. استفاده از ابرخازن موجب کاهش شارژ و دشارژ روی باتری شده و با توجه به در نظر گرفتن طول عمر باتری در تابع هزینه، طول عمر باتری افزایش یافته و هزینه جایگزینی باتری کاهش می‌یابد. از آنجایی که تعداد شارژ و دشارژ در ابرخازن بسیار زیاد است، تأثیر شارژ و دشارژ در طول عمر ابرخازن ناچیز بوده و در طی چند دوره جایگزینی باتری، نیازی به جایگزینی ابرخازن نخواهد بود. همچنین استفاده از روش ارائه‌شده برای تعیین ظرفیت پاسخ‌گویی به بارهای با دینامیک سریع را بهبود می‌دهد. استفاده از روش ترکیبی ارائه‌شده موجب بهبود ذخیره‌سازی در هنگام تغییرات سریع تولیدات پراکنده می‌شود و ذخیره‌سازی مطمئن و با دینامیک مناسب را فراهم می‌کند.

### سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از سازمان هواشناسی استان تهران برای در اختیار

جدول (۶): هزینه‌های سیستم

هزینه ذخیره‌سازی	
هزینه هر واحد ابرخازن	\$ ۶۰۰
هزینه هر واحد باتری	\$ ۲۰۰
هزینه جایگزینی هر واحد باتری	\$ ۲۵۰
هزینه جایگزینی هر واحد ابرخازن	\$ ۶۵۰

جدول (۵): مشخصات PV

پنل خورشیدی شرکت (Yingli Solar)	
توان نامی کل سیستم	۱۰ کیلووات
توان نامی هر پنل	۲۵۰ وات
ولتاژ نامی	۳۰/۴ ولت
جریان اتصال کوتاه	۸/۷۹ آمپر
ولتاژ مدار باز	۳۸/۴ ولت
بازده	۱۵/۳

## مراجع

- [1] Pflaum, P., M., Alamir, M.Y., Lamoudi., "Battery Sizing for PV Power Plants Under Regulations Using Randomized Algorithms", Renewable Energy, Vol. 113, pp. 596-607, 2017.
- [2] غفارپور، رضا، مظفری، بابک، رنجبر، علی محمد، «طراحی و بهینه‌سازی یک سیستم ترکیبی فتوولتائیک-باتری-دیزل ژنراتور به منظور تغذیه یک شبکه دورافتاده جزیره‌ای»، نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، سال هفتم، شماره ۲، صفحه ۱۴-۲۵، تابستان ۱۳۹۶.
- [3] کیا، محسن، ستایش نظر، مهرداد، سپاسیان، محمدصادق، «برنامه‌ریزی بهینه مدیریت بارهای کنترل‌پذیر و مشارکت واحدهای تولید همزمان برق و حرارت در حضور ذخیره‌ساز الکتریکی»، نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، سال هفتم، شماره ۲، صفحه ۲-۱۳، تابستان ۱۳۹۶.
- [4] David Wenzhong, Gao., "Energy Storage for Sustainable Microgrid", Academic Press, Oxford, 2015.
- [5] Vladimir S. Bagotsky, Alexander M. Skundin, Yuriy M. Volfkovich "Electrochemical Power Sources: Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors", Wiley, February 2015.
- [6] Chen, S. X., Gooi, H. B., Wang, M. Q., "Sizing of Energy Storage for Microgrids", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 3, No. 1, pp. 142-151, 2012.
- [7] Ghiassi-Farrokhfal, Y., Rosenberg, C., Keshav, Adjaho, S. M. B., "Joint Optimal Design and Operation of Hybrid Energy Storage Systems", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 34, No. 3, pp. 639-650, 2016.
- [8] Hongjie, Jia., Yunfei, M., Yan, Qi., "A statistical Model to Determine the Capacity of Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System in Autonomous Microgrid", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 54, pp. 516-524, 2014.
- [9] Abbassi, A., Dami, M.A., Jemli, M., "A Statistical Approach for Hybrid Energy Storage System Sizing Based on Capacity Distributions in an Autonomous PV/Wind Power Generation System", Renewable Energy, Vol. 103, pp. 81-93, 2017.
- [10] Xiao, J., Bai, L. F., Liang, H., Wang, C., "Sizing of Energy Storage and Diesel Generators in an Isolated Microgrid Using Discrete Fourier Transform (DFT)", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 5, No. 3, pp. 907-916, 2014.
- [11] Dufo-Lopez, R., Bernal-Agustin, J.L., "Design and Control Strategies of PV-Diesel Systems Using Genetic Algorithms", Solar Energy, Vol. 97, pp. 33-46, 2005.
- [12] Galvin, M.E., Hurley, W.G., "Optimisation of a Photovoltaic Battery Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System", Solar Energy, Vol. 86, pp. 3009-3020, 2012.
- [13] Atia, R., Yamada, N., "Sizing and Analysis of Renewable Energy and Battery Systems in Residential Microgrids", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 7, No. 3, pp. 1204-1213, 2016.
- [14] Martín, I.S., Ursúa, A., Sanchis, P., "Integration of Fuel Cells and Supercapacitors in Electrical Microgrids: Analysis, Modelling and Experimental Validation", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 38, No.2 pp. 11655-11671, 2013.
- [15] Yuan, Y., Sun, C., Li, M., Cho, S., Li, Q., "Determination of Optimal Supercapacitor-Lead-Acid Battery Energy Storage Capacity for Smoothing Wind Power Using Empirical Mode Decomposition and Neural Network", Electric Power Systems Research, Vol. 127, pp. 323-331, 2015.
- [16] Feroldi, D., Carignano, M., "Sizing for Fuel Cell/Supercapacitor Hybrid Vehicles Based on Stochastic Driving Cycles", Applied Energy, Vol. 183, pp. 645-658, 2016.
- [17] Abeywardana, B.D.W., Hredzak, B., Agelidis, V.G., Demetriades, D.G., "Supercapacitor Sizing Method for Energy-Controlled Filter-Based Hybrid Energy Storage Systems", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 32, No. 2, pp. 1626-1637, 2017.
- [18] Lahyani, A., Sari, A., Lahbib, I., Venet, P., "Optimal Hybridization and Amortized Cost Study of Battery/Supercapacitors System Under Pulsed Loads", Journal of Energy Storage, Vol. 6, pp. 222-231, 2016.
- [19] Liu, Y., Du, W., Xiao, L., Wang, H., Bu, S., Cao, J., "Sizing a Hybrid Energy Storage System for Maintaining Power Balance of an Isolated System With High Penetration of Wind Generation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 31, No. 4, pp. 3267-3275, 2016.
- [20] Wee, K.W., Choi, S., Vilathgamuwa, D.M., "Design of a Least-Cost Battery-Supercapacitor Energy Storage System for Realizing Dispatchable Wind Power", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 4, No. 3, pp. 786-796, July 2013.
- [21] Sharma, S., Bhattacharjee, S., Bhattacharya, A., "Grey Wolf Optimisation for Optimal Sizing of Battery Energy Storage Device to Minimise Operation Cost of Microgrid", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 10, No. 3, pp. 625-637, 2016.
- [22] Bahmani-Firouzi, B., Azizpanah-Abarghoee, R.,

- "Optimal Sizing of Battery Energy Storage for Micro-grid Operation Management Using a New Improved Bat Algorithm", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 56, pp. 42-54, 2014.
- [23] Zhua, T., Sun, W., "Optimization of Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage Station in Wind/Solar Generation System", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 5, No. 2, pp. 408-415, 2014.
- [24] Sudha, G.N, Senroy, N., "A Unified Approach to the Sizing and Control of Energy Storage Systems", Electric Power Components and Systems, Vol. 45, No.7, pp. 693-704, 2017.
- [25] Wang, X., Yue, M., Muljadi, E., Gao, W., "Probabilistic Approach for Power Capacity Specification of Wind Energy Storage Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 50, No. 2, pp. 1215-1224, 2014.
- [26] Unamuno, E., Andoni, J., "Hybrid ac/dc Microgrids—Part II: Review and Classification of Control Strategies", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 52, pp. 1123-1134, 2015.
- [27] Rekioua, D., Matagne, E., "Modeling of Solar Irradiance and Cells. In: Optimization of Photovoltaic Power Systems", Green Energy and Technology, Vol. 5, No. 2, 2012.
- [28] Kim, Y.H, Ha, H.D., "Design of Interface Circuits with Electrical Battery Models", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 44, No. 1, pp. 81- 86, 1997.
- [29] Zubieta, L., Bonert, R., "Characterization of Double Layer Capacitors for Power Electronics Applications", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No. 1, 2000.
- [30] Ogunjuyigbe, A.S.O., Ayodele, T.R., Akinola, O.A., "Optimal Allocation and Sizing of PV/Wind/Split-Diesel/Battery Hybrid Energy System for Minimizing Life Cycle Cost, Carbon Emission and Dump Energy of Remote Residential Building", Applied Energy, Vol. 171, pp. 153-171, 2016.
- [31] Dufo, R., Rojas, L., Bernal, L., "Comparison of Different Lead-Acid Battery Lifetime Prediction Models for Use in Simulation of Stand-Alone Photovoltaic Systems", Applied Energy, Vol. 115, No. 15, pp. 242-253, 2014.
- [32] Fossati, J., Galarza, A., Villate, A., Fontán, L., "A Method for Optimal Sizing Energy Storage Systems for Microgrids", Solar Energy, Vol. 80, No.2 pp. 578-588, 2006. Renewable Energy, Vol. 77, pp. 539-549, 2015.