

فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی
سال سوم / شماره ۹ / زمستان ۱۳۹۶ / صفحات ۵۶-۲۹

برنامه‌ریزی تصادفی منابع انرژی تجدیدپذیر و پاسخگویی بار در ریزشکبه ایزوله با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها

محمدحسین امراللهی

دانشجوی دکتری مهندسی برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(نویسنده مسئول)

amrollahi_mh@yahoo.com

سید محمد تقی بطحائی

استاد مهندسی برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

bathae@kntu.ac.ir

با توجه به اهمیت تامین انرژی مناطق دورافتاده و بکارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر، این مقاله به برنامه‌ریزی ریزشکبه‌های ایزوله اختصاص داده شده است. عدم قطعیت سرعت باد، تابش خورشیدی و بار توسط توابع توزیع احتمال مربوطه مدل‌سازی شده است. سناریوهای متغیرهای تصادفی با استفاده از روش نمونه‌گیری مربع‌لاتین تولید شده و جهت اعمال به برنامه‌ریزی تصادفی خوشه‌بندی شده‌اند. از ذخیره‌ساز و پاسخگویی بارهای جابجاپذیر برای جبران انعطاف‌ناپذیری منابع تجدیدپذیر و ایجاد تعادل بین تولید و مصرف استفاده شده است. برنامه‌ریزی تصادفی با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های خالص فعلی کل با حفظ سطح مورد انتظار کفایت قابلیت اطمینان بر روی یک ریزشکبه نمونه به اجرا درآمده است. نتایج بهینه‌سازی برای وضعیت با و بدون اعمال پاسخگویی بار استخراج و نتایج حاصل تجزیه و تحلیل شده است. همچنین تاثیر بکارگیری برنامه پاسخگویی بار در تغییر اندازه اجزا و هزینه‌های خالص فعلی ریزشکبه بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی تصادفی، انرژی‌های تجدیدپذیر، منفصل از شبکه، پاسخگویی بار

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۸/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۷/۱۵

۱. مقدمه

افزایش روزافزون تقاضای انرژی، محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی، عدم ثبات بازار انرژی در کنار مخاطرات زیست‌محیطی از یک طرف و دسترس‌پذیری، پایان‌ناپذیری و رایگان بودن منابع انرژی تجدیدپذیر از طرف دیگر موجب افزایش علاقه استفاده از منابع تجدیدپذیر شده است. بویژه آنکه تامین انرژی مورد نیاز مناطق دورافتاده از شبکه‌های توزیع برق، اهمیت استفاده از سیستم تولید انرژی تجدیدپذیر در ریز شبکه‌های مستقل را چند برابر نموده است (مازندرانی و همکارانش، ۲۰۱۰). بهره‌گیری از منابع انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌ناپذیر، افزایش نیاز به ذخیره‌ساز را در پی داشته و عملاً بر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری ریز شبکه می‌افزاید (سنگا و همکارانش، ۲۰۱۶)، محمدی بوساری و همکارانش، ۲۰۱۶). عدم هماهنگی بین اوج تولید و اوج مصرف یکی از مشکلات اساسی بهره‌برداری از ریز شبکه‌های مجزا می‌باشد که این امر منجر به کمبود انرژی در ساعات‌های اوج مصرف و اضافه تولید در ساعات‌های غیر اوج می‌شود. برنامه پاسخگویی بار روشی مناسب برای مدیریت بار و انرژی است و امکان تطبیق الگوی مصرف و تولید را فراهم می‌کند.

بهینه‌سازی اندازه اجزای ریز شبکه‌ها توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است، زیرا چنین اقدامی از یک طرف باعث کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری شده و از طرف دیگر موجب افزایش قابلیت اطمینان ریز شبکه می‌شود (ملکی و فتح‌الهی، ۲۰۱۵). توسعه فناوری‌های بهره‌گیری از انرژی تجدیدپذیر، فرصت‌های بیشتری را برای بهره‌برداری از این منابع در مناطق دورافتاده فراهم می‌کند. پتروسکی و همکارانش (۲۰۱۴) بهینه‌سازی اندازه ریز شبکه‌های ایزوله با منابع تامین انرژی صرفاً تجدیدپذیر را بررسی و از ذخیره‌ساز برای افزایش قابلیت اطمینان در امر بهینه‌سازی اجزای ریز شبکه استفاده کرده‌اند. فدایی و همکارانش (۲۰۱۲) بررسی روش‌های مختلف جهت تعیین اندازه بهینه در سیستم‌های ترکیبی انرژی بر اساس منابع انرژی تجدیدپذیر ارائه کرده‌اند.

شانگ و همکارانش (۲۰۱۶) بهینه‌سازی ظرفیت ریزشبه منفصل (متشکل از فتوولتاییک، باد و بانک باتری) را با استفاده از روش‌های تکرارشونده انجام داده‌اند. بهینه‌سازی چندهدفه مذکور جهت حداکثرسازی قابلیت اطمینان تامین بار در کنار کمینه‌سازی هزینه نرمالیزه شده برق انجام شده است. مطالعات ارائه‌شده در فوق بدون استفاده از برنامه‌های پاسخگویی بار و عدم نظر گرفتن ماهیت تصادفی منابع تجدیدپذیر و بار صورت گرفته است.

برنامه‌های پاسخگویی بار به منظور کاهش هزینه‌های بهره‌برداری سیستم‌های قدرت استفاده می‌شود. این برنامه‌ها شامل تغییر در الگوی مصرف در پاسخ به تغییر در تعرفه برق در طول زمان و یا به مشوق‌های مالی با هدف کاهش مصرف و یا تغییر آن به زمان دیگری در طول ساعاتی است که قیمت بازار برق بالاست و یا قابلیت اطمینان سیستم در معرض خطر می‌باشد. (کران و همکارانش، ۲۰۱۷، بهبودی و همکارانش، ۲۰۱۷ و ونگ و همکارانش، ۲۰۱۷)

منابع انرژی تجدیدپذیر از قبیل بادی، خورشیدی و همچنین بارهای مصرفی دارای ماهیت تصادفی می‌باشند. در مطالعات فوق، مدیریت انرژی، بهره‌برداری ریزشبه‌ها و همچنین بهینه‌سازی اجزا بدون در نظر گرفتن ماهیت تصادفی این پارامترها صورت گرفته است. گرچه چشم‌پوشی از ماهیت تصادفی موجب سادگی روند محاسبات و بهینه‌سازی می‌شود، اما این امر می‌تواند موجب کاهش قابلیت اطمینان و حتی در برخی موارد، موجب کاهش سطح آسایش مشترکین شود. در ادامه، برخی از مطالعات صورت گرفته در مورد مدیریت بهره‌برداری انرژی و بهینه‌سازی اندازه اجزا با در نظر گرفتن ماهیت تصادفی منابع و بارهای مصرفی بررسی می‌گردد.

آقاجانی و همکارانش (۲۰۱۷) در برنامه‌ریزی تصادفی بهره‌برداری ریزشبه، از توابع چگالی احتمال برای پیش‌بینی سرعت باد و تابش خورشید استفاده کرده‌اند. مندلی و همکارانش (۲۰۱۶) تاثیر عدم قطعیت بار در بهینه‌سازی اندازه اجزای یک ریزشبه منفصل متشکل از فتوولتاییک و باتری را تجزیه و تحلیل نموده‌اند. در این مقاله، بار روزانه به صورت احتمالاتی مدل شده و بر اساس

هزینه خالص فعلی و احتمال از دست دادن بار بهینه‌سازی شده است. کایال و همکارانش (۲۰۱۵) برنامه‌ریزی تصادفی را برای تعیین اندازه منابع انرژی تجدیدپذیر برای بهبود عملکرد و قابلیت اطمینان شبکه‌های برق استفاده کرده‌اند. هادیان و همکارانش (۲۰۱۷) به بهبود کیفیت بهره‌برداری سیستم‌های توزیع فعال با ضریب نفوذ بالای منابع تجدیدپذیر پرداخته‌اند. در این قبیل مطالعات، از قابلیت‌های پاسخگویی بار برای بهینه‌سازی اندازه اجزای ریزشبکه استفاده نشده است.

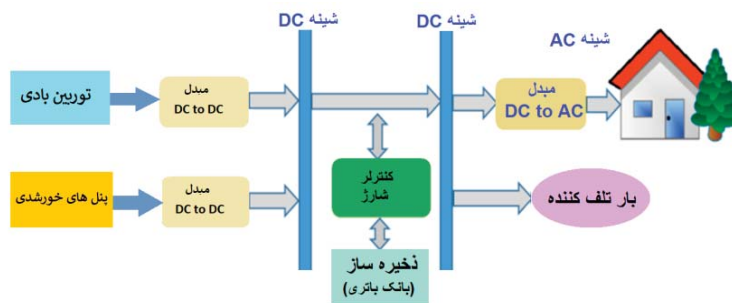
با توجه به اهمیت تامین انرژی مناطق دورافتاده و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی، در این مقاله با بکارگیری صرفاً منابع انرژی تجدیدپذیر، به مدل‌سازی و برنامه‌ریزی ریزشبکه‌های متصل با استفاده از برنامه پاسخگویی بار^۱ (DR) پرداخته می‌شود. در روش پیشنهادی، از ذخیره‌سازی انرژی و پاسخگویی بارهای جابجایی‌پذیر برای جبران انعطاف‌ناپذیری منابع تجدیدپذیر و ایجاد تعادل بین تولید و مصرف استفاده شده است. در این مطالعه، برای مدل‌سازی واقع‌بینانه، عدم قطعیت سرعت باد، تابش خورشیدی و بار مصرفی توسط توابع توزیع احتمال مربوطه مدل‌سازی شده است. سناریوهای مربوط به متغیرهای تصادفی مربوط با استفاده از روش نمونه‌گیری مربع‌لاتین^۲ (LHS) تولید شده و جهت اعمال به برنامه‌ریزی تصادفی توسط روش K-means خوشه‌بندی شده‌اند. در این مطالعه، از برنامه DR جهت امکان‌سنجی نزدیک کردن و یا منطبق‌سازی پروفیل‌های تولید و مصرف استفاده شده است. همچنین اثرات بکارگیری این برنامه در کمینه‌سازی اندازه اجزای ریزشبکه (از قبیل ظرفیت مبدل، ذخیره‌ساز، پنل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی) و کاهش هدررفت انرژی تولیدی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. مدل‌سازی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی اجرا شده در ریزشبکه مورد نظر با استفاده از نرم‌افزارهای GAMS و MATLAB صورت گرفته است.

-
1. Demand Response
 2. Latin Hypercube Sampling

پس از مقدمه، در بخش دوم، مدل ریاضی اجزای ریزشبکه، در بخش سوم، برنامه‌ریزی تصادفی ریزشبکه، در بخش چهارم، پیاده‌سازی مساله و تحلیل نتایج شبیه‌سازی ریزشبکه ارائه می‌شود و بخش پنجم به نتیجه‌گیری اختصاص خواهد یافت.

۲. مدل ریاضی اجزای ریزشبکه

در ریزشبکه جزیره‌ای مورد مطالعه، تولید انرژی صرفاً توسط منابع انعطاف‌ناپذیر توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی صورت می‌گیرد و از ذخیره‌ساز انرژی (باتک باتری) برای ایجاد تعادل بین تولید و مصرف استفاده می‌شود. بارها به دو دسته قابل‌برنامه‌ریزی و غیرقابل‌برنامه‌ریزی تقسیم می‌شوند. از بارهای قابل‌برنامه‌ریزی جهت مشارکت در برنامه پاسخگویی بار برای کاهش هزینه و مدیریت انرژی استفاده می‌گردد. همچنین بار تلف‌کننده^۱ برای آزاد کردن توان تولیدی مازاد بر مصرف و ذخیره، در نظر گرفته شده است. (شکل ۱)



شکل ۱. شماتیک ریزشبکه ترکیبی توربین بادی، سلول‌های خورشیدی و سیستم ذخیره‌ساز انرژی

مساله تعیین اندازه اجزای ریزشبکه مذکور به صورت مدل خطی عدد صحیح مختلط^۲ (MILP) فرموله شده و با توجه به ماهیت تصادفی منابع انرژی و عدم قطعیت بارهای مصرفی از مدل تصادفی برای این اجزا استفاده می‌شود. مشخصات و روابط هر کدام از اجزا مذکور در ادامه ارائه می‌شود.

1. Damp Load
2. Mixed Integer Linear Programming

مدل سیستم فتوولتائیک

توان خروجی پانل خورشیدی^۱ (PV)، به شدت تابش خورشیدی، ظرفیت جذب، سطح پنل و درجه حرارت سلول بستگی دارد. شدت تابش خورشید ماهیت احتمالی دارد، لذا توان خروجی مربوطه متناوب می‌باشد. در بسیاری از مطالعات (کولی و همکارانش، ۲۰۱۴ و تنگ و همکارانش، ۲۰۱۳) تابع چگالی احتمالی^۲ (PDF) بتا برای توصیف رفتار PV استفاده شده است، به

$$f_{pv}^t(sit) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha^t + \beta^t)}{\Gamma(\alpha^t)\Gamma(\beta^t)} (sit)^{\alpha^t-1} (1-sit)^{\beta^t-1} & \text{for } \alpha^t > 0, \beta^t > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

طوری که sit ($\frac{kWh}{m^2}$) متغیر تصادفی شدت تابش، Γ تابع گاما، α^t و β^t پارامترهای تابع توزیع بتا هستند. مقادیر α^t و β^t وابسته به میانگین (μ_s^t) و انحراف معیار (σ_s^t) داده‌های تابش هستند و برای هر بازه زمانی به صورت زیر تعیین می‌شوند.

$$\beta^t = (1 - \mu_s^t) \left(\frac{\mu_s^t (1 - \mu_s^t)}{(\sigma_s^t)^2} - 1 \right) \quad (2)$$

$$\alpha^t = \frac{\mu_s^t \beta^t}{1 - \mu_s^t} \quad (3)$$

توان خروجی سلول‌های خورشیدی $P_{pv}(sit)$ در هر بازه زمانی از رابطه زیر محاسبه می‌گردد. (تیتو و همکارانش، ۲۰۱۶)

$$P_{pv}(sit) = \eta_{pv} \cdot A_{pv} \cdot sit \quad (4)$$

به طوری که η_{pv} و $A_{pv}(m^2)$ به ترتیب بازده و سطح پنل خورشیدی می‌باشند.

-
1. Photovoltaic
 2. Probability Density Function

مدل سیستم توربین بادی

توان تولیدی WT وابسته به سرعت باد است. ماهیت سرعت باد احتمالاتی است که قابل توصیف به وسیله تابع توزیع احتمال ویبول زیر می‌باشد. (کایال و همکارانش، ۲۰۱۵، فان و همکارانش، ۲۰۱۷، و زیو و همکارانش، ۲۰۱۷)

$$f_W^t(v) = \left(\frac{k^t}{c^t}\right) \left(\frac{v^t}{c^t}\right)^{k^t-1} \exp\left(-\left(\frac{v^t}{c^t}\right)^{k^t}\right) \text{ for } c^t > 1, k^t > 0 \quad (5)$$

که $f_W^t(v)$ تابع توزیع ویبول، v^t متغیر تصادفی سرعت باد، k^t شاخص شکل و c^t شاخص مقیاس توزیع ویبول برای هر بازه زمانی است. برای این شاخص‌ها داریم:

$$k^t = \left(\frac{\sigma_v^t}{\mu_v^t}\right)^{-1.086} \quad (6)$$

$$c^t = \frac{\mu_v^t}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k^t}\right)} \quad (7)$$

μ_v^t و σ_v^t به ترتیب میانگین و انحراف معیار سرعت باد هستند که بر اساس داده‌های تاریخی برای هر دوره زمانی تعیین شده‌اند.

توان خروجی یک توربین بادی ($P_{WT}(t)$) تابعی از سرعت باد است که توسط رابطه (۸) توصیف می‌شود.

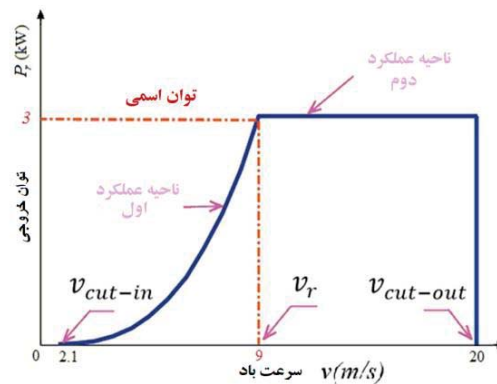
$$P_{WT}(t) = \begin{cases} 0, & v^t \leq v_{cut-in} \text{ or } v^t \geq v_{cut-out} \\ P_r \left(\frac{v^{t3} - v_{cut-in}^3}{v_r^3 - v_{cut-in}^3}\right), & v_{cut-in} < v^t \leq v_r \\ P_r, & v_r < v^t \leq v_{cut-out} \end{cases} \quad (8)$$

که v_r ، v_{cut-in} و $v_{cut-out}$ به ترتیب بیانگر سرعت نامی، سرعت قطع پایین و سرعت قطع بالا می‌باشند. P_r نیز بیانگر توان خروجی در سرعت نامی (v_r) است. (شکل ۲)

برای تعیین سرعت باد در ارتفاع هاب توربین بر حسب سرعت ثبت شده از رابطه (۹) استفاده می‌شود. (شایقی و هاشمی، ۱۳۹۴)

$$v_h^t = v_{ref}^t \times \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^\gamma \quad (۹)$$

که h بیانگر ارتفاع هاب توربین، v_w^{ref} بیانگر سرعت ثابت شده در ارتفاع h_{ref} می‌باشد. γ عددی بین ۰/۱ (برای محیط‌های مسطح) تا ۰/۲۵ (برای محیط‌های جنگلی و پوشیده از درخت) می‌باشد. (حسین‌زاده و همکارانش، ۲۰۱۶)



شکل ۲. منحنی مشخصه توان توربین بادی

بر حسب سرعت باد

مدل‌سازی عدم قطعیت در بارهای مصرفی

الگوهای رفتاری متفاوت مصرف‌کنندگان انرژی باعث تغییرات بارها مصرفی در هر ریزش‌بکه می‌گردد. بارهای مصرفی دارای عدم قطعیت قابل توجه می‌باشند که تغییرات آنها را می‌توان با تجزیه و تحلیل آماری به دست آورد. در این مقاله برای مدل‌سازی عدم قطعیت بار مصرفی از توزیع احتمال نرمال استفاده می‌گردد:

$$f(P_t^t) = \frac{1}{\sigma_t^t \sqrt{2\pi}} \times \exp\left(-\frac{(P_t^t - \mu_t^t)^2}{2\sigma_t^t{}^2}\right) \quad (۱۰)$$

که $f(P_t^t)$ تابع توزیع بارهای مصرفی و مقادیر μ_t^t و σ_t^t ، به ترتیب بیانگر میانگین و انحراف معیار بارهای مصرفی در هر بازه زمانی است.

مدل‌سازی سیستم ذخیره‌ساز انرژی (باتک باتری)

با توجه به میزان توان تولیدی و توان مصرفی بار می‌توان بانک باتری‌ها را شارژ و یا دشارژ نمود. در این قسمت، رابطه بین ظرفیت باتری و توان شارژ و دشارژ ارائه می‌شود.

توان ورودی باتری‌ها با توجه به عملکرد شارژ یا دشارژ می‌تواند مثبت یا منفی باشد. (رابطه ۱۱)

$$P_B(t) = P_{WT}(t) + P_{PV}(t) - P_L(t)/\eta_{inv} \quad (11)$$

در این رابطه، $P_L(t)$ بیانگر کل بار مصرفی در لحظه t و η_{inv} بازده مبدل می‌باشند. اگر $P_B(t) = 0$ باشد، آنگاه ظرفیت بانک باتری‌ها بدون تغییر باقی می‌ماند.

برای $P_B > 0$ ، مازاد توان تولیدی به منظور شارژ بانک باتری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و ظرفیت جدید بانک باتری‌ها از رابطه زیر قابل تعیین می‌باشد. (عباسی سنجدری و همکارانش، ۱۳۹۵)

$$SOC_B(t) = SOC_B(t-1) \times (1 - \sigma) + P_B(t) \times \eta_b \quad (12)$$

برای $P_B < 0$ ، برای جبران کمبود توان تولیدی، باتری در وضعیت دشارژ قرار می‌گیرد. ظرفیت جدید باتری‌ها در این حالت از رابطه (۱۳) به دست می‌آید:

$$SOC_B(t) = SOC_B(t-1) \times (1 - \sigma) - P_B(t) \times \eta_b \quad (13)$$

در روابط فوق، $SOC_B(t)$ و $SOC_B(t-1)$ وضعیت شارژ باتری‌ها به ترتیب در زمان t و $t-1$ ، ضریب تخلیه خودی باتری‌ها، η_{inv} و η_b نیز به ترتیب بازده مبدل و بازده باتری‌ها هستند. برای جلوگیری از تجمع انرژی در ذخیره‌ساز انرژی، وضعیت انرژی اولیه ذخیره‌ساز باید در آغاز و پایان دوره برنامه‌ریزی با هم برابر باشند. (رابطه ۱۴)

$$SOC(t=0) = SOC(t=T) \quad (14)$$

به منظور اطمینان از عملکرد مناسب باتری‌ها و استفاده از عمر مفید آنها، دو محدودیت برای فرآیندهای شارژ و تخلیه در نظر گرفته می‌شوند. در زمان رسیدن به حداکثر ظرفیت (SOC_{max})، شارژ باتری‌ها و در زمان رسیدن به حداقل ظرفیت (SOC_{min})، تخلیه باتری‌ها بایستی متوقف شوند.

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \quad (۱۵)$$

برای جلوگیری از کاهش طول عمر مفید هر باتری، محدودیت‌های ارائه شده در روابط (۱۶-۱۸) در فرآیند شارژ و تخلیه هر باتری در نظر گرفته شده است.

$$E_{batmin} \leq E_{bat}(t) \leq E_{batmax} \quad (۱۶)$$

$$SOC_{min} = N_{bat} \times E_{batmin} \quad (۱۷)$$

$$SOC_{max} = N_{bat} \times E_{batmax} \quad (۱۸)$$

در این روابط، $E_{bat}(t)$ نشان‌دهنده انرژی ذخیره‌شده در هر باتری و E_{batmin} و E_{batmax} به ترتیب بیانگر حدود بالا و پایین مجاز برای ذخیره انرژی هر باتری و N_{bat} نشانگر تعداد باتری‌ها می‌باشند و از طریق رابطه (۱۹) با هم مرتبط می‌شوند. (ناریان و همکارانش، ۲۰۱۷)

$$E_{batmin} = (1 - DOD) \times E_{batmax} \quad (۱۹)$$

در اینجا، DOD^1 بیانگر عمق دشارژ مجاز هر باتری است.

با توجه به اینکه شارژ و دشارژ همزمان بانک باتری‌ها امکان‌پذیر نیست، محدودیتی به صورت زیر در مدل‌سازی خطی در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned} PEES_{ch}(t) &\leq M \times IEES_{ch}(t), & \forall t \\ PEES_{dis}(t) &\leq M \times IEES_{dis}(t), & \forall t \\ IEES_{ch}(t) + IEES_{dis}(t) &\leq 1, & \forall t \end{aligned} \quad (۲۰)$$

در روابط فوق، متغیرهای دودویی $IEES_{ch}(t)$ و $IEES_{dis}(t)$ به ترتیب نشانگر وضعیت شارژ و دشارژ بانک باتری‌ها در زمان t بوده و $PEES_{ch}(t)$ و $PEES_{dis}(t)$ نیز به ترتیب بیانگر مقدار توان شارژ و دشارژ بانک باتری‌ها در زمان t است. M عدد ثابت بدون دیمان است که برای خطی کردن روابط (۲۰) استفاده شده است (جهان‌شهو و همکارانش، ۲۰۰۴). در این رابطه، M به عنوان یک عدد مثبت بزرگ بدون دیمانسیون است، به طوری که وقتی به $IEES_{ch}(t)$ یا $IEES_{dis}(t)$ ضرب می‌شود، نتیجه بیشتر از $PEES_{ch}$ و $PEES_{dis}(t)$ گردد. با توجه به اینکه متغیرهای $IEES_{ch}(t)$ یا $IEES_{dis}$

دودویی هستند، لذا M باید از توان شارژ و دشارژ باتری‌ها بیشتر گردد. در این مقاله، مقدار M برابر ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است، اما می‌تواند هر عدد صحیح بیشتر از توان شارژ و دشارژ باتری‌ها نیز انتخاب گردد.

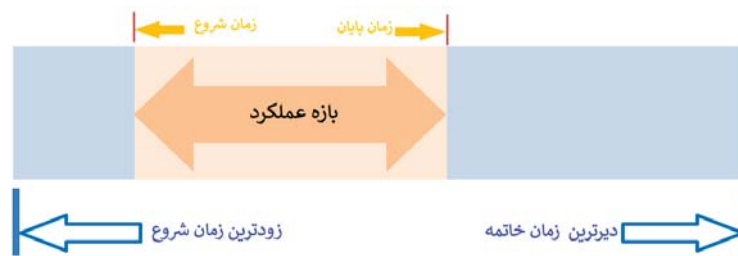
به منظور جلوگیری از آسیب دیدن باتری، نرخ شارژ و دشارژ هر باتری نباید از مقدار پیش تعیین شده توسط سازنده تجاوز کند. یعنی:

$$\begin{aligned} E_{bat}(t) - E_{bat}(t-1) &\leq IESS_{ch}(t) \times RESS_{ch}, \quad \forall t \\ E_{bat}(t-1) - E_{bat}(t) &\leq IESS_{dis}(t) \times RESS_{dis}, \quad \forall t \end{aligned} \quad (21)$$

در این روابط، $RESS_{ch}$ و $RESS_{dis}$ به ترتیب نرخ شارژ و دشارژ هر باتری است. برای دشارژ باتری در بازه t ، باید باتری را در بازه‌های پیشین به اندازه کافی شارژ کرد.

مدل‌سازی برنامه پاسخگویی بار

در این مقاله، کاربرد جدیدی از پاسخگویی بار برای نزدیک کردن (و در صورت امکان منطبق‌سازی) پروفیل‌های بارهای مصرفی و تولیدی از طریق زمان‌بندی بکارگیری بارهای برنامه‌ریزپذیر ارائه می‌گردد. برای هر وسیله قابل برنامه‌ریز، محدوده زمانی جهت شروع و پایان کار بر حسب رضایت استفاده‌کننده تعریف می‌شود، سپس زمان بهینه عملکرد بارهای قابل جابجایی در پنجره زمانی داده‌شده تعیین می‌گردد. (رستگار و همکارانش، ۲۰۱۲)



شکل ۳. بازه عملکرد هر وسیله قابل جابجایی

هر وسیله کنترل‌پذیر k برای عملکرد بهینه باید مدت زمان مشخصی (به تعداد $span_k$) در بازه مجاز تعریف‌شده خود روشن باشد. (رابطه ۲۲)

$$\sum_{t=EST_k}^{LFT_k} flag_k(t) = span_k \quad \forall k \quad (22)$$

$flag_k$ متغیر دودویی نشانگر وضعیت روشن و خاموش بودن وسیله k است که $flag_k = 1$ (نشانگر روشن) (خاموش) بودن وسیله پاسخگو در آن بازه است. EST_k زودترین زمان شروع و LFT_k دیرترین زمان خاتمه می‌باشد. برای عملکرد پیوسته هر وسیله کنترل‌پذیر در بازه‌های زمانی متوالی محدودیتی مطابق رابطه (۲۳) اعمال می‌شود.

$$\sum_{t=rang}^{rang+span_k-1} flag_k(t) \geq span_k \times ON_k(t), \quad \forall rang \quad (23)$$

$$\leq 96 - span_k + 1, \quad \forall k$$

متغیر دودویی $ON_k(t)$ نشانگر روشن شدن وسیله k در بازه زمانی t است به طوری که $ON_k(t) = 1$ نمایانگر روشن شدن وسیله k می‌باشد. همچنین $OFF_k(t)$ یک متغیر دودویی است که نشانگر خاموش شدن وسیله k در بازه t است که $OFF_k(t) = 1$ نشانگر خاموش شدن وسیله است. رابطه (۲۴) ارتباط بین این دو نشانگر را با وضعیت عملکرد وسیله نشان می‌دهد.

$$ON_k(t) - OFF_k(t) = flag_k(t) - flag_k(t-1), \quad \forall t, \forall k \quad (24)$$

عدم امکان روشن و خاموش شدن همزمان یک وسیله، محدودیت (۲۵) در نظر گرفته می‌شود.

$$ON_k(t) + OFF_k(t) \leq 1, \quad \forall t, \forall k \quad (25)$$

۳. برنامه‌ریزی تصادفی ریز شبکه

تابع هدف برنامه‌ریزی بهینه، کمینه‌سازی هزینه خالص کل فعلی ریز شبکه در طول عمر مفید آن است. طول عمر سیستم ۲۵ سال فرض شده که برابر با طولانی‌ترین طول عمر قطعات است. مجموع هزینه خالص فعلی سیستم به شرح رابطه (۲۶) است:

$$\begin{aligned} \text{Minimizing } TUC = \\ NPCU_{PV} \times N_{PV} + NPCU_{WT} \times N_{WT} + NPCU_{Batt} \times N_{Batt} \\ + NPCU_{Inv} \times N_{Inv} \end{aligned} \quad (26)$$

به طوری که $NPCU_k$ هزینه فعلی خالص جزء کام و N_k تعداد / ظرفیت مولفه کام است و همچنین N_{Batt} و N_{WT} متغیرهای تصمیم عدد صحیح و N_{PV} و N_{INVER} متغیرهای تصمیم حقیقی غیر منفی هستند.

متغیرهای تصمیم‌گیری عبارتند از ظرفیت منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی، ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز انرژی (باتری)، برنامه زمان‌بندی شارژ و دشارژ ذخیره‌سازها، زمان عملکرد بارهای قابل برنامه‌ریزی در بازه زمانی تعریف شده. محدودیت‌های مساله شامل محدودیت‌های بهره‌برداری و فیزیکی اجزا، موازنه انرژی، محدودیت منابع تولید، ظرفیت تجهیزات، محدودیت‌های ذخیره‌ساز انرژی و حصول قابلیت اطمینان مناسب تامین بار مصرفی می‌باشد.

هزینه‌های اجزای سیستم

در این مطالعه، هزینه خالص فعلی کل سیستم به عنوان معیار برای ارزیابی اقتصادی در نظر گرفته شده است. هزینه کل جزء کام یک سیستم شامل مولفه‌های هزینه اولیه (IC_k) (خرید، نصب و راه‌اندازی)، هزینه تعویض و جایگزینی (Rep_k)، هزینه تعمیر و نگهداری ($O\&M_k$) و ارزش اسقاطی (RV_k) است. هزینه کل صرف شده برای هر جزء کام (TUC_k) با رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$TUC_k = IC_k + Rep_k + O\&M_k - RV_k \quad (27)$$

برای تبدیل هزینه اولیه به هزینه سالانه از ضریب بازگشت سرمایه (CRF) استفاده می‌شود.

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (28)$$

که i نرخ بهره و n طول عمر سیستم است و n_k طول عمر جزء کام است.

هزینه سالانه اولیه جزء کام از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$AIC_k = IC_k \times CRF \quad (29)$$

هزینه تعویض و جایگزینی سالانه جزء کام نیز به صورت رابطه (۳۰) می‌باشد:

$$ARep_k = Rep_k \times \sum_{m=0}^{\left[\frac{n}{n_k}\right]-1} \frac{1}{(1+i)^{m \times n_k}} \quad (30)$$

ارزش اسقاطی جزء کام در رابطه (۳۱) ارائه شده است.

$$ARV_k = RV_k \times \sum_{m=1}^{\left[\frac{n}{n_k}\right]} \frac{1}{(1+i)^{m \times n_k}} \quad (31)$$

بنابراین، هزینه کل سالانه جزء کام برابر خواهد بود با:

$$ATUC_k = AIC_k + ARep_k + OM_k - ARV_k \quad (32)$$

برای محاسبه هزینه کل خالص فعلی جزء کام از معادله (۳۳) استفاده می‌شود:

$$NPCU_k = ATUC_k / CRF(i, k) \quad (33)$$

مدل‌سازی تعادل انرژی

برای حفظ پایداری سیستم قدرت، ایجاد تعادل بین تولید و مصرف برای هر بازه زمانی ضروری است. با توجه به محدودیت نرخ شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز، محدودیت در ظرفیت بارهای قابل برنامه‌ریزی و ماهیت انعطاف‌ناپذیر بودن منابع انرژی تجدیدپذیر، موازنه کامل در تمام بازه‌های زمانی امکان‌پذیر نخواهد بود، لذا به طرفین معادله (۲۶) دو متغیر مصرف و تولید مازاد اضافه می‌گردد. با توجه به اینکه کمبود تولید ممکن است منجر به کاهش شاخص کفایت قابلیت اطمینان می‌گردد، برای اجتناب از این امر، مقدار مجاز متغیر مربوط به قطعی بار به عنوان یک محدودیت لحاظ می‌شود.

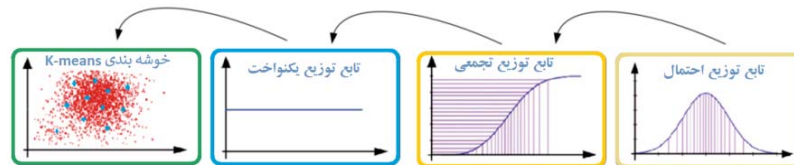
$$\begin{aligned} & Pload_{ncl}(t) + Pload_{cl}(t) + PEES_{ch}(t) + Pload_{dump}(t) \\ & - Pload_{shortage}(t) \end{aligned} \quad (34)$$

$$= P_{PV}(t) + P_{WT}(t) + PEES_{dis}(t), \quad \forall t$$

به ترتیب نشانگر بارهای غیر قابل برنامه‌ریزی، بارهای قابل برنامه‌ریزی، توان شارژ باتری‌ها، بارهای تلف‌کننده، بارهای تامین‌نشده و توان تخلیه باتری‌ها می‌باشند.

تولید سناریو و خوشه‌بندی سناریوها

برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت‌های ناشی از توان تولیدی پنل‌های فتوولتایی، توربین‌های بادی و بار مصرفی از روش نمونه‌برداری مکعب لاتین (LHS) استفاده شده است. این روش به دو مرحله نمونه‌برداری و ترکیب تقسیم شده است. در مرحله نمونه‌برداری برای هر متغیر تصادفی (سرعت باد، تابش خورشیدی و بار مصرفی) گام‌های زیر اعمال می‌شود. (شکل ۴)



شکل ۴. فرآیند روش‌های نمونه‌برداری LHS و خوشه‌بندی K-means (مزیدی و همکارانش، ۲۰۱۴)

۱. تابع توزیع تجمعی سرعت باد، تابش خورشیدی و بار مصرفی به ۱۰۰۰ بازه با احتمال برابر ۱/۱۰۰۰ تقسیم می‌شود.

۲. برای هر بازه یک عدد تصادفی با استفاده از توزیع احتمال یکنواخت انتخاب شود. $U_i \in (0,1)$

۳. احتمال تجمعی نمونه مرحله ۲ برای هر بازه برابر است با:

$$Prob_i = \left(\frac{1}{1000}\right)U_i + \left(\frac{i-1}{1000}\right) \quad (35)$$

۴. با استفاده از معکوس تابع توزیع تجمعی مقدار متغیر تصادفی X_i را از احتمال تجمعی نمونه $Prob_i$ محاسبه شود.

$$x_i = F^{-1}(Prob_i) \quad (36)$$

۵. مراحل ۲ تا ۴ برای هر متغیر تصادفی ۱۰۰۰ بار تکرار شود.

در برنامه‌ریزی تصادفی، با افزایش تعداد سناریو، بار محاسباتی و زمان اجرای شبیه‌سازی نیز زیاد خواهد شد. بدین منظور از الگوریتم خوشه‌بندی K-means برای کاهش تعداد سناریوها استفاده خواهد شد. روش خوشه‌بندی K-means بر اساس کمترین فاصله‌های هر داده از مراکز یک خوشه

(میانگین) خوشه‌بندی را انجام می‌دهد تا آنها را در K خوشه گنجانده شود به طوری که مجموع مربعات فاصله‌ی داده‌ها از مرکز خوشه خود حداقل گردد. یعنی

$$J = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \|x_i^{(j)} - c_j\|^2 \quad (37)$$

که $\| \cdot \|$ نرم فاصله بین نقاط $x_i^{(j)}$ و c_j مرکز خوشه j ام است.

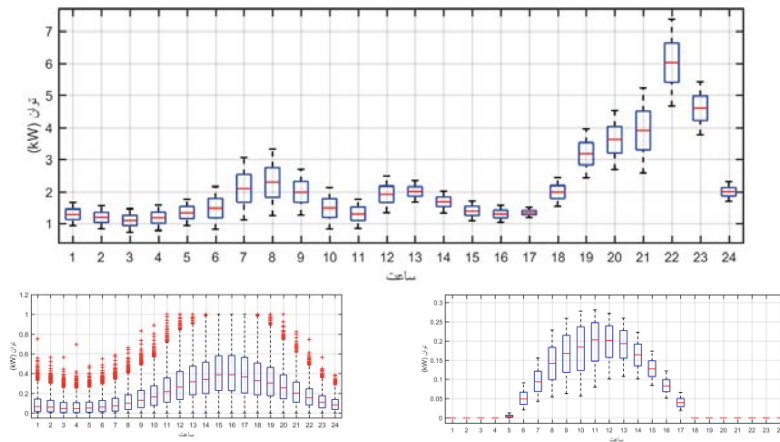
۴. پیاده‌سازی مساله و تحلیل نتایج شبیه‌سازی

در مطالعه حاضر، مساله به صورت برنامه‌ریزی تصادفی خطی عدد صحیح تصادفی (MILP) مدل‌سازی شده است. برای اجرای بهینه‌سازی از نرم‌افزار GAMS 24.8.3 با حلال CPLEX و نرم‌افزار Matlab 15b برای انجام بهینه‌سازی استفاده شده است. در این بخش، نتایج بدست آمده از جمله اندازه بهینه اجزای ریز شبکه، وضعیت شارژ و د شارژ باتری‌ها و برنامه‌ریزی مشارکت بارهای قابل جابجایی در موارد با و بدون اجرای DR و عدم قطعیت ارائه شده است.

جدول ۱. میانگین و انحراف معیار سرعت باد، تابش خورشید و بارهای مصرفی (حسینی، ۲۰۱۳ و سیروستیوا، ۲۰۱۶)

	تابش خورشید (kW/m^2)		سرعت باد (m/s)		بار مصرفی (kW)		تابش خورشید (kW/m^2)		سرعت باد (m/s)		بار مصرفی (kW)		
	μ_s	σ_s	μ_v	σ_v	μ_l	σ_l	μ_s	σ_s	μ_v	σ_v	μ_l	σ_l	
1	0.000	0.0000	4.16	1.2268	1.30	0.1042	13	0.674	0.1194	6.21	1.2676	2.00	0.0950
2	0.000	0.0000	4.07	1.1675	1.20	0.1028	14	0.561	0.0946	6.35	1.3301	1.69	0.0968
3	0.000	0.0000	3.88	1.1279	1.10	0.1021	15	0.426	0.0660	6.60	1.3625	1.40	0.0875
4	0.000	0.0000	3.87	1.1079	1.20	0.1091	16	0.267	0.0492	6.60	1.3817	1.30	0.0758
5	0.038	0.0054	3.93	1.1042	1.35	0.1172	17	0.124	0.0331	6.48	1.4402	1.35	0.0447
6	0.153	0.0487	4.08	1.1313	1.50	0.1846	18	0.000	0.0000	6.28	1.3787	2.00	0.1269
7	0.305	0.0857	4.25	1.1901	2.13	0.2729	19	0.000	0.0000	6.14	1.2893	3.20	0.2129
8	0.459	0.1427	4.54	1.2096	2.30	0.2929	20	0.000	0.0000	5.82	1.2073	3.60	0.2611
9	0.589	0.1666	4.85	1.2373	2.00	0.2037	21	0.000	0.0000	5.45	1.1567	3.90	0.3747
10	0.682	0.1991	5.15	1.2519	1.50	0.1802	22	0.000	0.0000	5.07	1.0742	6.00	0.3872
11	0.740	0.1734	5.57	1.3251	1.30	0.1291	23	0.000	0.0000	4.62	0.9751	4.60	0.2355
12	0.719	0.1410	5.88	1.3732	1.92	0.1612	24	0.000	0.0000	4.33	0.9105	2.00	0.0866

ریز شبکه مورد مطالعه یک ساختمان واقع در شمال غرب ایران به طول جغرافیای ۴۵ درجه و ۵ دقیقه و عرض جغرافیای ۳۷ درجه و ۲ دقیقه با ارتفاع ۱۶۵۰ متری از سطح دریای آزاد می‌باشد. میانگین و انحراف معیار سرعت باد، تابش خورشید و بارهای مصرفی، با استفاده از داده‌های تاریخی استخراج شده و در جدول (۱) ارائه شده است. نمودار جعبه‌ای شکل (۵) نمونه‌های تصادفی تولید شده برای هر ساعت را نشان می‌دهد.



شکل ۵. نمودار جعبه‌ای پروفیل بار مصرفی، توان WT و توان PV

جدول ۲. مشخصات وسایل تنظیم‌پذیر

وسایل تنظیم‌پذیر	مصرف انرژی روزانه وسيله (kWh/d)	مدت کارکرد روزانه (بازه زمانی)	زودترین زمان شروع (بازه زمانی)	دیرترین زمان پایان (بازه زمانی)
الکتروپمپ منبع آب	۲,۲۰	۸	۱۰	۹۰
خشک کن	۱,۲۵	۵	۱	۹۶
ماشین لباس‌شویی	۰,۹۰	۶	۲۵	۷۰
ماشین ظرف‌شویی	۰,۶۰	۳	۳۵	۸۷

بارهای مصرفی به دو دسته بارهای قابل جابجایی و غیر قابل جابجایی به ترتیب با ۴/۹۵ کیلووات ساعت در روز (حدود ۹/۴ درصد کل مصرف) و ۴۷/۹ کیلووات ساعت در روز تقسیم می‌شوند. با توجه با اینکه مدت عملکرد برخی از وسایل خانگی کسری از یک ساعت هستند، لذا بازه زمانی برنامه‌ریزی بارهای قابل جابجایی ۱۵ دقیقه در نظر گرفته شده است. یک شبانه‌روز شامل ۹۶ بازه می‌باشد. مشخصات مصرفی و اطلاعات ورودی و وسایل کنترل پذیر در جدول (۲) ارائه شده و مشخصات فنی و اقتصادی اجزای ریز شبکه مطابق جدول (۳) می‌باشد.

جدول ۳. مشخصات فنی و اقتصادی اجزای ریز شبکه و شاخص‌های اقتصادی

(احتمالی و همکارانش، ۲۰۱۶ و تبار و همکارانش، ۲۰۱۷)

مشخصات ماژول فتوولتائیک		مشخصات بانک باتری		
ظرفیت نامی	320W	ظرفیت نامی	1.2kWh	
هزینه اولیه	600\$/unit	هزینه اولیه	150\$/unit	
هزینه تعمیر و نگهداری	6\$/year	هزینه جایگزینی	130\$/unit	
عمر مفید (سال)	25	بازده	85%	
مشخصات توربین بادی		هزینه تعمیر و نگهداری	2\$/year	
ظرفیت نامی	1kW	عمر مفید (سال)	5	
هزینه اولیه	2500\$/unit	مشخصات مبدل (اینورتر)		
هزینه تعمیر و نگهداری	70\$/year	ظرفیت نامی	1.0 kW	
عمر مفید (سال)	20	هزینه اولیه	600\$/unit	
v_{cut-in}	3(m/s)	هزینه تعمیر و نگهداری	500\$/unit	
$v_{cut-out}$	20 (m/s)	بازده	90%	
v_p	9 (m/s)	عمر مفید (سال)	15	
(نرخ بهره) i			6%	
ارزش اسقاطی (RV)		هزینه اولیه	10%	
عمر مفید ریز شبکه (سال)			25	
اجزای ریز شبکه	ماژول فتوولتائیک	توربین بادی	بانک باتری	مبدل (اینورتر)
هزینه خالص فعلی واحد (\$)	668.9	3532.1	429.1	740.4

بهینه‌سازی تصادفی برای دو حالت بدون اعمال و با اعمال DR انجام شده و نتایج حاصل در جدول (۴) ارائه شده است. همانطور که در این جدول نشان داده شده است، بکارگیری برنامه DR موجب صرفه جویی ۱۹/۱۹ درصد کل هزینه خالص فعلی (TNPC) و باعث کاهش ظرفیت باتری و اندازه اینورتر به ترتیب ۲۲/۲۲ درصد و ۴۰ درصد شده است.

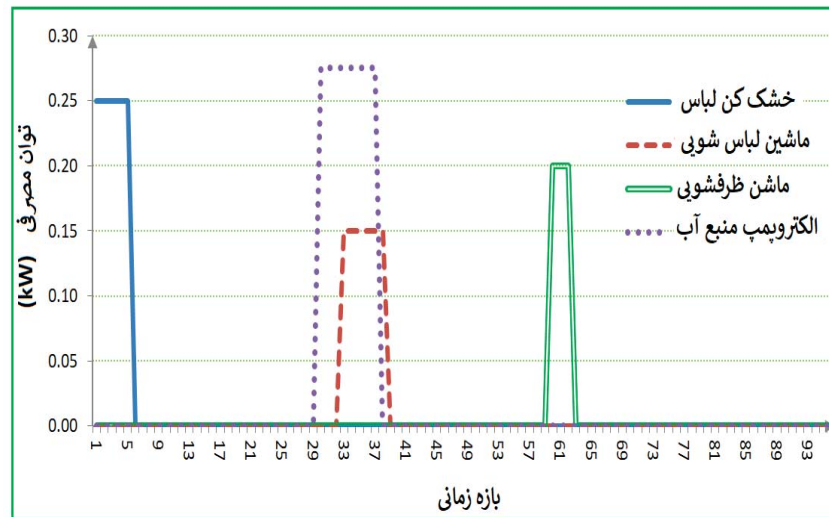
انرژی مصرفی در دو وضعیت مذکور یکسان بوده و بخشی از انرژی تولیدی در فرآیند شارژ و دشارژ باتری‌ها تلف می‌شود، لذا تفاوت جزئی در تعداد پنل‌های فتوولتاییک (حدود ۰/۳ درصد) در دو وضعیت به این دلیل است. استفاده از برنامه DR موجب کاهش قابل توجه ظرفیت باتری‌های ذخیره‌ساز و ظرفیت مبدل (AC/DC) می‌شود. این کاهش اولاً، به دلیل نزدیک شدن پروفیل‌های بار مصرفی و انرژی تولیدی و ثانیاً، به دلیل کاهش اوج بار مصرفی می‌باشد و نتایج مربوط به این موارد در ادامه ارائه شده است.

جدول ۴. مقایسه نتایج بهینه‌سازی ریزشبه

ردیف	پارامتر	واحد	بدون اعمال استرژي DR	با اعمال استرژي DR
۱	هزینه خالص فعلی کل	\$	34451.9	30596.4
۲	هزینه سالانه کل	\$	2695.1	2393.5
۳	ظرفیت سیستم فتوولتاییک	kW	5.91	5.89
۴	ظرفیت توربین بادی	kW	3	3
۵	ظرفیت بانک باتری	kWh	10.8	8.4
۶	ظرفیت مبدل (اینورتر)	kW	10	6

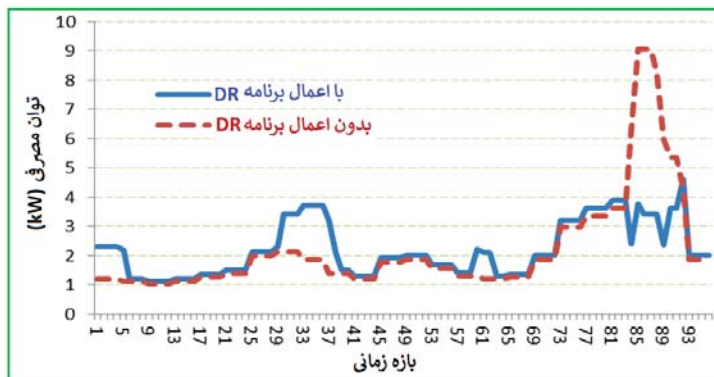
انتظار می‌رود انجام برنامه‌ریزی DR موجب انتقال بارهای کنترل‌پذیر از بازه‌هایی با کمبود تولید به بازه‌های با تولید مازاد بر مصرف، موجب کاهش فاصله پروفیل تولید و مصرف گردد. زمان‌بندی

بهینه کارکرد وسایل با مصرف قابل‌جابجایی از حل مساله برنامه‌ریزی تصادفی بدست آمده در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶. برنامه‌زمان‌بندی بهینه وسایل با مصرف قابل‌جابجایی در ریزشکه

پروفیل بارهای مصرفی بدون در نظر گرفتن DR و با اعمال DR (براساس برنامه‌ریزی بهینه برای وسایل با مصرف قابل‌جابجایی، پروفیل بارهای مصرفی) نیز تعیین و در شکل (۷) نشان داده شده است. همانگونه که از شکل مشخص است، مقدار اوج برای حالت بدون اعمال برنامه DR و با اعمال DR به ترتیب $9/05 \text{ Kw}$ و $4/61 \text{ Kw}$ است. به عبارت دیگر، اعمال برنامه DR موجب کاهش محسوس در اوج بار (۴۹/۰۶ درصد) می‌گردد.



شکل ۷. پروفیل تقاضای انرژی ریزشبه در دو وضعیت بدون و با اعمال DR

همانطور که از شکل (۷) ملاحظه می‌شود، میزان بار مصرفی (با DR) در بازه ۱-۵، ۳۰-۳۵ و ۶۰-۶۲ به طور قابل توجهی افزایش یافته است که به دلیل میزان انرژی بالای تولیدشده در این موقع از روز می‌باشد. اما در بازه ۸۴-۹۳ میزان بارهای مصرفی به علت کمبود میزان انرژی تولیدی به طور محسوسی کاهش یافته است. در واقع، استفاده از DR این امکان را فراهم می‌کند که با شیفت بخشی از بارهای مصرفی به سمت زمان‌هایی با میزان انرژی تولیدی مازاد بر مصرف، پروفیل بارهای مصرفی و تولیدی به هم نزدیکتر شوند. توجه شود که مساحت زیر منحنی دیاگرام‌های ارائه شده در شکل (۸) با هم یکسان می‌باشد، یعنی اعمال DR موجب حذف هیچ بار مصرفی نمی‌شود و تنها موجب تغییر زمان مصرف می‌گردد. در حالت کلی برای دیاگرام‌های بارهای مصرفی با و بدون اعمال DR می‌توان رابطه زیر را ارائه کرد.

$$\int_{t=0}^{t=T} P_{demand}(with DR) dt = \int_{t=0}^{t=T} P_{demand}(without DR) dt \quad (38)$$

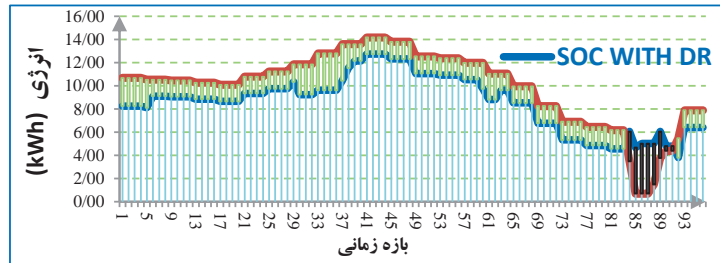
ضریب بار (LF) شاخص صاف بودن منحنی بار مصرفی است و به صورت رابطه (۳۹) بیان می‌شود. این پارامتر در محدوده $0 \leq LF \leq 1$ تعریف می‌شود و در ایده‌آل‌ترین حالت، مقدار آن یک است که بیانگر ثابت بودن بار مصرفی در طول دوره بهره‌برداری می‌باشد. برای انرژی مصرفی ثابت در دوره زمانی مشخص هر اندازه میزان اوج منحنی بار مصرفی زیاد باشد، LF به سمت صفر میل می‌کند و متقابلاً با کاهش LF، اوج بار مصرفی افزایش یافته که این مستلزم افزایش ظرفیت اجزا تامین‌کننده انرژی می‌باشد و در نتیجه، با افزایش ظرفیت اجزای شبکه هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و بهره‌برداری نیز افزایش می‌یابد.

$$Load\ Factor = \left[\frac{\sum_{t=1}^T P_{Demand}(t)}{T \times \max(P_{Demand}(t))} \right] \quad (39)$$

مقدار اوج و ضریب بار مصرفی برای سناریو ۱ (بدون DR) به ترتیب ۹/۰۵ Kw و ۰/۲۴۴ و برای سناریو دوم (با DR) به ترتیب ۴/۶۱ Kw و ۰/۴۷۸ است. بنابراین، اعمال برنامه DR موجب کاهش محسوس در اوج بار (۴۹/۱ درصد) و افزایش ضریب بار (۹۶/۳ درصد) می‌شود و متعاقباً موجب افزایش صافی منحنی بار و کاهش اجزای موردنیاز ریزشکه می‌شود. چنین کاهش هزینه‌ای نمونه‌ای از مزایای اعمال DR می‌باشد هر چند که هدف اصلی بکارگیری این برنامه نزدیک‌سازی و در صورت امکان منطبق‌سازی پروفیل بار مصرفی و انرژی تولیدی می‌باشد.

پروفیل انرژی ذخیره‌شده در حالت‌های بدون در نظر گرفتن DR و با در نظر گرفتن DR در شکل (۸) ارائه شده است. همانگونه که از این شکل مشخص است، اعمال برنامه DR میزان بار ذخیره‌شده را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد که این امر می‌تواند موجب کاهش هزینه‌های صرف‌شده برای خرید و نگهداری سیستم ذخیره‌ساز شود. توجه شود که انرژی ذخیره‌شده در حالت اعمال DR همواره کمتر یا مساوی با انرژی ذخیره‌شده بدون برنامه‌ریزی DR می‌باشد. یعنی:

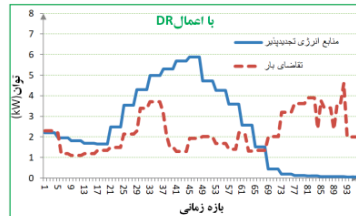
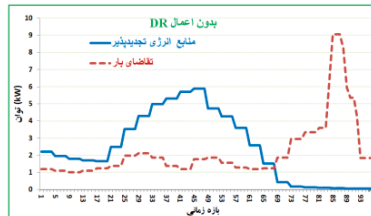
$$\int_{t=0}^{t=T} P_{storage}(with DR) dt \leq \int_{t=0}^{t=T} P_{storage}(without DR) dt \quad (40)$$



شکل ۸. وضعیت شارژ و دشارژ باتری‌ها

شکل (۹) پروفیل توان تولیدی و مصرفی ریز شبکه مورد مطالعه برای دو وضعیت بدون DR و با

اعمال DR را نشان می‌دهد.



شکل ۹. پروفیل توان تولیدی و مصرفی ریز شبکه در دو وضعیت بدون و با اعمال DR

شاخص ضریب اختلاف نسبی برای ارزیابی پروفیل‌های توان تولیدی و بار مصرف شده به صورت

معادله (۴۱) تعریف شده است.

$$DF = \frac{\sum_{t=1}^T |P_{Demand}(t) - (P_{PV}(t) + P_{WT}(t))|}{\sum_{t=1}^T P_{Demand}(t)} \quad (41)$$

مقدار شاخص DF در حالت بدون اعمال DR برابر ۱/۱۵۳۶ و با DR برابر ۰/۸۹۴۱۲ بوده (علت بیش از یک شاخص DF تولید مازاد به دلیل عدم کنترل‌پذیر بودن منابع تجدیدپذیر است) که ۲۲/۴۹ درصد با اعمال برنامه پاسخگویی بار منحنی مصرف و تولید به هم نزدیک شده‌اند. علاوه بر این، ضریب همبستگی انرژی تولیدی و بارهای مصرفی برای وضعیت‌های با و بدون DR به ترتیب ۰/۲۷۳ و ۰/۴۶۶- است. بکارگیری DR باعث افزایش این ضریب به میزان ۴۱/۵ درصد می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، برنامه‌ریزی بهینه یک ریز شبکه نمونه، صرفاً از منابع انرژی تجدیدپذیر مورد مطالعه قرار گرفته و طرح‌های پیشنهادی با هدف کاهش ارزش کنونی هزینه ریز شبکه با اعمال محدودیت‌های تعادل انرژی، قابلیت اطمینان و محدودیت اجزای ریز شبکه با استفاده از پتانسیل‌های موجود همچون بارهای منعطف و منابع ذخیره‌ساز انرژی در واکنش به عدم قطعیت‌های موجود در منابع و مصرف ارائه گردیده است. ساختار پیشنهادی روی یک ریز شبکه منفصل از سیستم‌های قدرت (شبکه اصلی) به اجرا درآمده و نتایج شبیه‌سازی حاکی از کاهش اندازه اجزای ریز شبکه و هزینه‌های مربوط و پوشش مناسب عدم قطعیت‌های ناشی از نفوذ ۱۰۰ درصد منابع تجدیدپذیر و متعاقب آن تداوم برق‌رسانی در ریز شبکه و تاثیر مستقیم در برقراری کفایت قابلیت اطمینان ریز شبکه می‌باشد.

برای مدل‌سازی واقع‌بینانه، برنامه‌ریزی تصادفی کارآمد برای بررسی تاثیر عدم قطعیت پیشنهاد شده است. چارچوب تصادفی پیشنهاد شده به طور همزمان عدم قطعیت خطای پیش‌بینی بار مصرفی، توربین بادی و تولید فتوولتاییک را در نظر می‌گیرد. سناریوهای مربوط به متغیرهای تصادفی با استفاده از روش LHS تولید شده و سناریوهای حاصل با استفاده از الگوریتم K-means به منظور برنامه‌ریزی تصادفی، خوشه‌بندی شدند. اجزای ریز شبکه به صورت ریاضی در چارچوب روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مدل‌سازی و توسط نرم افزار GAMS از طریق حل‌کننده CPLEX بهینه‌سازی شده است.

نتایج بهینه‌سازی برای دو گزینه با و بدون اعمال برنامه پاسخگویی بار استخراج و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج بدست آمده نشان داد استفاده از برنامه DR به میزان قابل توجهی ظرفیت بانک باتری موردنیاز به میزان ۲۲/۲۲ درصد، ظرفیت اینورتر ۴۰ درصد، سیستم فتوولتاییک ۰/۳ درصد و در نتیجه TNPC را ۱۱/۱۹ درصد کاهش می‌دهد. علاوه بر این، اجرای DR باعث شد حداکثر بار مصرفی و شاخص DF به ترتیب ۴۹/۱ درصد و ۲۲/۴۹ درصد کاهش یابد. همچنین شاخص ضریب بار و ضریب همبستگی بین پروفیل تولید و مصرف به ترتیب به ترتیب ۹۶/۳ و ۴۱/۵ درصد افزایش یافت.

منابع

- شایقی، حسین و یاشار هاشمی (۱۳۹۴)، "آنالیز فنی-اقتصادی اندازه سیستم‌های ترکیبی بادی-خورشیدی برای تغذیه ساختمان‌های اداری نمونه"، فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی، صص ۱۰۷-۶۹.
- محمدی بوساری، اعظم؛ قادری، سید فرید؛ فکری، رکسانا و محمود نعیمی (۱۳۹۶)، "ارائه یک مدل ریاضی تامین انرژی الکتریکی پایدار در ریزشبکه متصل به شبکه"، فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی، صص ۴۲-۷.
- عباسی سنجدری، محمدحسین؛ عفت نژاد، رضا و کامبیز رضاپور (۱۳۹۵)، "مدل سازی اقتصادی و فنی بکارگیری بهینه از ذخیره سازه‌های انرژی در برنامه‌ریزی سیستم‌های انرژی"، فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی، صص ۳۲-۷.

- Aghajani, G. R; Shayanfar H. A. and H. Shayeghi (2017), "Demand Side Management in a Smart Micro-grid in the Presence of Renewable Generation and Demand Response", *Energy*, 126, pp. 622-637.
- Behboodi, Sahand; Chassin, David P; Djilali, Ned and Curran Crawford (2017), "Interconnection-wide Hour-ahead Scheduling in the Presence of Intermittent Renewables and Demand Response: A Surplus Maximizing Approach", *Applied Energy*, 189, pp. 336-351.
- Eltamaly, Ali M; Mohamed, Mohamed A. and Abdulrahman I Alolah (2016), "A Novel Smart Grid Theory for Optimal Sizing of Hybrid Renewable Energy Systems", *Solar Energy*, 124, pp. 26-38.
- Fadaee, M. and MAM Radzi (2012), "Multi-objective Optimization of a Stand-alone Hybrid Renewable Energy System by Using Evolutionary Algorithms: A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, pp. 3364-3369.
- Fan, Xiao-chao; Wang, Wei-qing; Shi, Rui-jing and Zhi-jiang Chen (2017), "Hybrid Pluripotent Coupling System with Wind and Photovoltaic-hydrogen Energy Storage and the Coal Chemical Industry in Hami, Xinjiang", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, pp. 950-960.
- Haddadian, Hossein and Reza Noroozian (2017), "Optimal Operation of Active Distribution Systems Based on Microgrid Structure", *Renewable Energy*, 104, pp. 197-210.
- Hosseinizadeh, Ramin; Shakouri, Hamed; Sadegh Amalnick, Mohsen and Peyman Taghipour (2016), "Economic Sizing of a Hybrid (PV-WT-FC) Renewable Energy System (HRES) for Stand-alone Usages by an Optimization-simulation Model: Case Study of Iran", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, pp. 139-150.

Hosseini, Seyed Ehsan; Mahmoudzadeh Andwari, Amin; Abdul Wahid, Mazlan and Ghobad Bagheri (2013), "A Review on Green Energy Potentials in Iran", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, pp. 533-545.

Jahanshahloo, GR; Hossienzadeh Lotfi, F; Shoja, N. and G. Tohidi (2004), "A Method for Solving 0-1 Multiple Objective Programming Problem Using Data Envelopment Analysis Technique", *Mathematical and Computational Applications*, 9, pp. 147-156.

Kayal, Partha and C.K. Chanda (2015), "Optimal Mix of Solar and Wind Distributed Generations Considering Performance Improvement of Electrical Distribution Network", *Renewable Energy*, 75, pp. 173-186.

Kernan, R; Liu, X; McLoone, S. and B. Fox (2017), "Demand Side Management of an Urban Water Supply Using Wholesale Electricity Price", *Applied Energy*, 189, pp. 395-402.

Koochi-Kamali, Sam; Rahim, N. A. and H. Mokhlis (2014), "Smart Power Management Algorithm in Microgrid Consisting of Photovoltaic, Diesel, and Battery Storage Plants Considering Variations in Sunlight, Temperature, and Load", *Energy Conversion and Management*, 84, pp. 562-582.

Maleki, Akbar and Fathollah Pourfayaz (2015), "Optimal Sizing of Autonomous Hybrid Photovoltaic/Wind/Battery Power System with LPSP Technology by Using Evolutionary Algorithms", *Solar Energy*, 115, pp. 471-483.

Mandelli, Stefano; Brivio, Claudio; Colombo, Emanuela and Marco Merlo (2016), "Effect of Load Profile Uncertainty on the Optimum Sizing of Off-grid PV Systems for Rural Electrification", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 18, pp. 34-47.

Mazandarani, A; Mahlia, TMI; Chong, W. T. and M. Moghavvemi (2010), "A Review on the Pattern of Electricity Generation and Emission in Iran from 1967 to 2008", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp. 1814-1829.

Mazidi, Mohammadreza; Zakariazadeh, Alireza; Jadid, Shahram and Pierluigi Siano (2014), "Integrated Scheduling of Renewable Generation and Demand Response Programs in a Microgrid", *Energy Conversion and Management*, 86, pp. 1118-1127.

Narayan, Apurva and Kumaraswamy Ponnambala (2017), "Risk-averse Stochastic Programming Approach for Microgrid Planning under Uncertainty", *Renewable Energy*, 101, pp. 399-408.

Petruschke, Philipp; Gasparovic, Goran; Voll, Philip; Krajačić, Goran; Duić, Neven and André Bardow (2014), "A Hybrid Approach for the Efficient Synthesis of Renewable Energy Systems", *Applied Energy*, 135, pp. 625-633.

- Rastegar, Mohammad; Fotuhi-Firuzabad, Mahmud and Farrokh Aminifar** (2012), "Load Commitment in a Smart Home", *Applied Energy*, 96, pp. 45-54.
- Shang, Ce; Srinivasan, Dipti and Thomas Reindl** (2016), "Generation-scheduling-coupled Battery Sizing of Stand-alone Hybrid Power Systems", *Energy*, 114, pp. 671-682.
- Singh, Shakti; Singh, Mukesh and Subhash Chandra Kaushik** (2016), "Optimal Power Scheduling of Renewable Energy Systems in Microgrids Using Distributed Energy Storage System", *IET Renewable Power Generation*, 10, pp. 1328-1839.
- Srivastava, Rachit and Vinod Kumar Giri** (2016), "Optimization of Hybrid Renewable Resources Using HOMER", *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 6, pp. 157-163.
- Tabar, Vahid Sohrabi; Ahmadi Jirdehi, Mehdi and Reza Hemmati** (2017), "Energy Management in Microgrid Based on the Multi Objective Stochastic Programming Incorporating Portable Renewable Energy Resource as Demand Response Option", *Energy*, 118, pp. 827-839.
- Teng, Jen-Hao; Luan, Shang-Wen; Lee, Dong-Jing and Yong-Qing Huang** (2013), "Optimal Charging/Discharging Scheduling of Battery Storage Systems for Distribution Systems Interconnected with Sizeable PV Generation Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, 28, pp. 1425-1433.
- Tito, SR; Lie, T. T. and T. N. Anderson** (2016), "Optimal Sizing of a Wind-photovoltaic-battery Hybrid Renewable Energy System Considering Socio-demographic Factors", *Solar Energy*, 136, pp. 525-532.
- Wang, Ge; Zhang, Qi; Li, Hailong; McLellan, Benjamin C; Chen, Siyuan; Li, Yan and Yulu Tian** (2017), "Study on the Promotion Impact of Demand Response on Distributed PV Penetration by Using Non-cooperative Game Theoretical Analysis", *Applied Energy*, 185, pp. 1869-1878.
- Zhou, Bin; Xu, Da; Wing Chan, Ka; Li, Canbing; Cao, Yijia and Siqi Bu** (2017), "A Two-stage Framework for Multiobjective Energy Management in Distribution Networks with a High Penetration of Wind Energy", *Energy*, 135, pp. 754-766.