

# نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال دوازدهم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۰، (پیاپی ۴۷): صص ۳۷-۴۶

علمی- پژوهشی

## برنامه‌ریزی هماهنگ منابع انرژی نوظهور در جهت بهبود تاب‌آوری ریزشکته‌های جزیره‌ای تحت یک رویکرد تصمیم‌گیری دومرحله‌ای

رضا غفارپور<sup>۱\*</sup>، سعید زمانیان<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۳

### چکیده

عموماً جزایر به‌عنوان نقاطی راهبردی جهت حمله موشکی و پهپادی دشمن در نظر گرفته می‌شوند. از این رو با توجه به آسیب‌پذیری این جزایر در برابر حملات و نیاز به تأمین پایدار انرژی، مفهوم تاب‌آوری در برنامه‌ریزی روز-پیش منابع انرژی این جزایر اهمیت بسزایی پیدا می‌کند. از طرفی با افزایش نفوذ منابع نوظهوری همانند خودروهای الکتریکی، ذخایر انرژی و برنامه‌های پاسخگویی بار در ریزشکته‌ها نیاز به یک برنامه‌ریزی یکپارچه به‌منظور استفاده از ظرفیت این منابع در جهت بهبود تاب‌آوری این شبکه‌ها افزایش یافته است. بدین منظور در این مقاله، یک رویکرد برنامه‌ریزی دومرحله‌ای جهت کاهش هزینه بهره‌برداری روزانه و بهبود تاب‌آوری یک ریزشکته جزیره‌ای یکپارچه‌شده با توربین‌های بادی بررسی می‌شود. علاوه بر این، اثر برنامه‌ریزی هماهنگ منابع انرژی نوظهور شامل خودروهای الکتریکی متصل به شبکه، سامانه ذخیره‌کننده الکتریکی و تقاضاهای الکتریکی قابل برنامه‌ریزی در جهت بهبود کاهش هزینه بهره‌برداری روزانه و بهبود تاب‌آوری سامانه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. شاخص تاب‌آوری به‌صورت تجمیعی از هزینه قطع بار و هزینه افزایش تولید در شرایط حمله دشمن به توربین‌های بادی بیان می‌گردد. بنابراین، مدل پیشنهادی بهترین راهبرد بهره‌برداری را در شرایط نرمال به نحوی تعیین می‌کند که در شرایط حمله دشمن به توربین‌های بادی، کم‌ترین هزینه قطع بار و کم‌ترین هزینه افزایش تولید در حضور منابع انرژی نوظهور، متحمل ریزشکته جزیره‌ای شود.

**کلیدواژه‌ها:** ریزشکته جزیره‌ای، تاب‌آوری، برنامه‌ریزی دومرحله‌ای، منابع انرژی انعطاف‌پذیر، مدیریت انرژی، خودروهای الکتریکی

۱- استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع) - نویسنده مسئول: (rghaffarpour@ihu.ac.ir)

۲- پژوهشگر، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

## ۱- مقدمه

است [۶]. از این‌رو جایگزین کردن خودروهای بنزینی با خودروهای الکتریکی در سامانه حمل و نقل و بهره‌گیری از قابلیت‌های این خودروها نه تنها موجب کاهش نگرانی‌های زیست-محیطی می‌شود بلکه به بهبود شرایط عملکردی ریزش‌بکه نیز کمک می‌کند.

از دیگر راهکارها جهت بهبود بهره‌برداری ریزش‌بکه‌ها استفاده از سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی و اجرای بهینه‌ی پاسخگویی بار می‌باشد. این منابع گزینه‌ی مناسبی در ایجاد تعادل میان تولید و مصرف در بهره‌برداری از ریزش‌بکه‌ها می‌باشند. ذخایر الکتریکی همچون باتری قادر هستند با ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در باتری خود در ساعاتی که تقاضا کم است و بهره‌گیری از قابلیت دشارژ در ساعات مورد نیاز، به شبکه کمک بسزایی کنند [۷]. به‌طور مشابه مصرف‌کنندگان برق با مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی بار می‌توانند میزان مصرف خود را در ساعاتی که تقاضا بالا است کاهش دهند و آن را به ساعات دیگر انتقال دهند. بنابراین با توجه به پتانسیل بالقوه‌ی خودروهای الکتریکی، ذخایر انرژی و برنامه‌های پاسخگویی بار، به‌عنوان منابع انعطاف-پذیر نوظهور، برنامه‌ریزی هماهنگ این منابع می‌تواند نقش بسزایی در کاهش هزینه و افزایش تاب‌آوری ریزش‌بکه‌ها داشته باشند.

## ۲- پیشینه موضوع و نوآوری

در مرجع [۸] یک رویکرد دو هدفه/دو سطحی برای مسئله حفاظت اجزای شبکه برق با توجه به سامانه‌های دفاعی مختلف ارائه می‌شود که در آن، مدافع به‌عنوان یک رهبر سعی می‌کند دو هدف یعنی انتخاب انواع مختلف سامانه دفاعی برای محافظت از امکانات و همچنین کل هزینه برای تأمین خواسته‌های دفاعی را به‌طور هم‌زمان بهینه کند، و همچنین مهاجم به دنبال به حداکثر رساندن تخریب برای سامانه خدمات است. در مرجع [۲۶]، برنامه‌ریزی بهینه‌ی واحدهای تولید توان با در نظر گرفتن تاب‌آوری به‌صورت اعمال محدودیت‌های بهره‌برداری و قطع اجباری خطوط برق مورد مطالعه قرار گرفته است. در مرجع [۹]، یک مدل جدید برای برنامه‌ریزی توسعه سامانه‌های انتقال و ذخیره انرژی الکتریکی برای کاهش آسیب‌پذیری در برابر حملات تروریستی ارائه شده است که در آن، واحدهای تولید توان و مقدار بار در افق برنامه‌ریزی مشخص شده‌اند و تغییرات بار روزانه در فصول مختلف در نظر گرفته شده است. در مرجع [۱۰]، یک روش بهره‌برداری هماهنگ برای سامانه‌های انرژی منطقه ای-ناحیه ای

جزایر را می‌توان به‌صورت یک ریزش‌بکه الکتریکی شامل انواع بارها، منابع انرژی قابل کنترل و غیرقابل کنترل، سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی و مصرف‌کنندگان مختلف در نظر گرفت که تحت یک بهره‌بردار مرکزی مدیریت می‌شوند [۱]. جزایر عمدتاً به شبکه‌ی برق سراسری متصل نیستند و در حالت جزیره‌ای مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند که منجر به شباهت برنامه‌ریزی این شبکه‌ها به مدل برنامه‌ریزی ریزش‌بکه‌های جزیره‌ای شده است [۲]. مسئله تأمین انرژی جزایر به‌عنوان یکی از چالش‌های جدی مطرح است. از طرفی نقش کلیدی این جزایر در حفظ امنیت کشور، اهمیت تأمین پایدار انرژی این جزایر را چندین برابر می‌کند. جزایر ممکن است به‌عنوان نقاطی راهبردی جهت حمله دشمن در نظر گرفته شوند. از این‌رو با توجه به آسیب‌پذیری این جزایر در برابر حملات و نیاز به تأمین پایدار انرژی در چنین جزایری، مفهوم تاب‌آوری اهمیت بسزایی پیدا می‌کند [۳]. مفهوم تاب‌آوری به‌صورت "ظرفیت بازگشتن از دشواری پایدار و ادامه‌دار و توانایی ترمیم خود" تعریف می‌گردد [۴]. این عبارت به اختصار به تشریح مفهوم تازه‌ای در صنعت برق می‌پردازد و تاب‌آوری را شامل مجموعه‌ای از ظرفیت‌هایی می‌داند که در شرایط دشوار به سامانه کمک می‌کند تا بتواند با حداقل خسارت و آسیب از موقعیت‌های غیرمنتظره عبور کند و با نهایت توان با شرایط بسیار نامطلوب مقابله نماید. این مفهوم مطابق با این تعریف ارائه شده است که تاب‌آوری را توانایی شبکه و سامانه‌های موجود برای پیش‌بینی، انطباق یک حادثه و بازیابی سریع از آن رویداد معرفی می‌کند که در شبکه‌های قدرت می‌توان به میزان قطع بار در طی یک حادثه اشاره کرد.

از طرفی در سال‌های اخیر مشکلات مختلفی همچون مسائل زیست‌محیطی، کاهش مقدار سوخت‌های فسیلی، نوسانات قیمت آن‌ها و نیاز به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، سامانه قدرت را با چالش روبرو کرده است [۵]. مسئله گرم شدن کره زمین به دلیل تولید بیش از حد گازهای گلخانه‌ای، یکی از مهم-ترین چالش‌های پیشروی جوامع امروزی است. با توجه به آمارهای سازمان‌های بین‌المللی، عامل اصلی گرم شدن کره زمین، تولید بی‌رویه گازهای گلخانه‌ای است. بر اساس آمار منتشرشده توسط آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا در سال ۲۰۱۷، سامانه حمل و نقل، با تولید ۲۹ درصد از گازهای گلخانه‌ای اولین رتبه را در بین تولیدکنندگان این گازها دارد و بعد از آن، شبکه قدرت با تولید ۲۸ درصدی رتبه دوم را به خود اختصاص داده

مدل‌سازی می‌شود و در مرحله دوم، کاهش هزینه ناشی از حمله دشمن به توربین‌های بادی که شامل هزینه قطع بار و هزینه افزایش تولید توان می‌باشد تحت شاخص تاب‌آوری مدل‌سازی می‌شود. بعلاوه یک رویکرد برنامه‌ریزی هماهنگ شده جهت استفاده‌ی بهینه از پارکینگ خودروهای الکتریکی متصل به شبکه و استفاده از قابلیت خودرو به شبکه ( $V2G^1$ )، سامانه ذخیره‌کننده‌ی انرژی ( $ESS^2$ ) و برنامه‌ی پاسخگویی بار ( $DR^3$ ) مبتنی بر شیفت بار پیشنهاد می‌شود که سبب کاهش هزینه بهره‌برداری روزانه و بهبود تاب‌آوری ریزشکبه جزیره‌ای می‌شود. بر اساس مدل پیشنهادی، پارکینگ خودروهای الکتریکی هوشمند می‌تواند در ساعات مورد نیاز علاوه بر حالت شارژ، در حالت دشارژ نیز مورد بهره‌برداری قرار گیرد و از این طریق سبب کاهش هزینه بهره‌برداری روزانه و بهبود تاب‌آوری در ریزشکبه جزیره‌ای شود.

### ۳- فرمولاسیون مسئله

در این مقاله یک رویکرد دومرحله‌ای در جهت بهبود هزینه بهره‌برداری در شرایط نرمال و تحت شرایط حمله به توربین‌های بادی پیشنهاد می‌شود. فرمولاسیون و توابع هدف مربوط به رویکرد دومرحله‌ای در ادامه آورده شده‌اند.

#### ۳-۱- مرحله اول مدل پیشنهادی

در این مرحله هدف بهره‌بردار ریزشکبه کاهش هزینه بهره‌برداری روزانه تحت شرایط نرمال می‌باشد که به صورت (۱) نشان داده شده است. تابع هدف شامل چهار بخش است: بخش اول هزینه روشن و خاموش بودن، تولید توان و بی‌باری میکروتوربین‌های گازی را نشان می‌دهد. بخش دوم تابع هدف هزینه بهره‌برداری پارکینگ خودروهای الکتریکی در حالت دشارژ را نشان می‌دهد که شامل هزینه تشویقی به مالکین خودرو با در نظر گرفتن هزینه تخریب باتری است. بخش سوم و چهارم تابع هدف نیز به ترتیب هزینه تخریب باتری سامانه ذخیره‌ساز الکتریکی و هزینه تشویقی به مصرف‌کنندگان جهت مشارکت در برنامه‌ی پاسخگویی بار را نشان می‌دهند؛ که در آن،  $su_{i,t}$ ،  $sd_{i,t}$  و  $P_{i,t}$  به ترتیب هزینه روشن و خاموش بودن و توزیع بهینه‌ی توان میکروتوربین‌های گازی را نشان می‌دهند.  $P_{p,t}^{PG}$  توان دشارژ شده توسط پارکینگ هوشمند را نشان می‌دهد.  $P_{es,t}^{dis-es}$  توان دشارژ

جهت بهبود تاب‌آوری در شرایط بحرانی آب و هوایی پیشنهاد می‌شود که در آن اثر فناوری برق به گاز به‌عنوان یک منبع مناسب در جهت بهبود تاب‌آوری مطرح می‌شود. در مرجع [۱۱]، ارزیابی هماهنگ تاب‌آوری و بهبود بهره‌برداری ریزشکبه‌های هوشمند به صورت جزیره‌سازی مقاوم انجام گردیده است که در آن، الگوریتم جزیره‌سازی در جهت افزایش تاب‌آوری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

در مرجع [۱۲] اثر سامانه ذخیره‌ساز الکتریکی و اجرای بهینه‌ی پاسخگویی بار بر هزینه بهره‌برداری ریزشکبه متصل به شبکه تحت یک رویکرد مقاوم دومرحله‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مرجع [۱۳]، ارزیابی اقتصادی و زیست‌محیطی سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی و برنامه‌های پاسخگویی در یک ریزشکبه متصل به شبکه تحت رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۶]، نقش خودروهای الکتریکی به‌منظور کاهش هزینه بهره‌برداری روزانه تحت رویکرد برنامه‌ریزی مقاوم/تصادفی بررسی شده است که در آن خودروهای الکتریکی قادر به مشارکت در بازار توان راکتیو هستند. در مرجع [۱۴] نیز برنامه‌ریزی هماهنگ خودروهای الکتریکی، پاسخگویی بار و ذخایر انرژی در مسئله‌ی تسویه‌ی بازار انرژی مورد ارزیابی قرار گرفته است که در آن، عدم قطعیت مربوط به مالکین خودرو، تقاضا و توان تولیدی باد تحت رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای بررسی می‌شوند. برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر ریسک ریزشکبه قابل بازآرایی در حضور سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی در مرجع [۱۵] بررسی شده است که در آن اثر قابلیت بازآرایی بر کاهش تلفات و هزینه بهره‌برداری روزانه مطالعه شده است. در مرجع [۱۶]، یک رویکرد مناسب جهت رسیدگی به بهره‌برداری بهینه‌ی یک ریزشکبه با حضور واحدهای بادی، خورشیدی و میکرو توربین و همچنین باتری‌ها با توجه به عدم قطعیت‌های قیمت برق و تولید منابع انرژی تجدیدپذیر پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۷]، یک مدل بهره‌برداری بهینه برای مشارکت یک ریزشکبه در حال تعامل با اپراتور بازار ارائه شده است که در آن، مسئله برنامه‌ریزی ریزشکبه با هدف تعادل عرضه و تقاضای توان و با در نظر گرفتن اهداف مالی است.

با توجه مطالعات ذکرشده، این مقاله یک رویکرد دومرحله‌ای برای بهره‌برداری بهینه‌ی یک ریزشکبه جزیره‌ای در حضور توربین‌های بادی و با در نظر گرفتن مفهوم تاب‌آوری پیشنهاد می‌دهد. در مرحله اول، بهره‌برداری بهینه‌ی ریزشکبه پیشنهادی با هدف کاهش هزینه بهره‌برداری روزانه در شرایط نرمال

<sup>1</sup> Vehicle to grid

<sup>2</sup> Electrical energy storage

<sup>3</sup> Demand response

$P_{es,t}^{ch}$  توان شارژ شده توسط سامانه ذخیره‌ساز باتری را نشان می‌دهد.

$$P_{es,t}^{dis,min} x_{es,t}^{dis} \leq P_{es,t}^{dis} \leq P_{es,t}^{dis,max} x_{es,t}^{dis} \quad (10)$$

$$P_{es,t}^{ch,min} x_{es,t}^{ch} \leq P_{es,t}^{ch} \leq P_{es,t}^{ch,max} x_{es,t}^{ch} \quad (11)$$

$$x_{es,t}^{ch} + x_{es,t}^{dis} \leq 1 \quad (12)$$

$$SC_{es,t} = SC_{es,t-1} + \eta_{es}^{ch} P_{es,t}^{ch} - P_{es,t}^{dis} / \eta_{es}^{dis} \quad (13)$$

$$SC_{es,t=24} = SC_{es,int} \quad (14)$$

$$SC_{es,t}^{min} \leq SC_{es,t} \leq SC_{es,t}^{max} \quad (15)$$

**پارکینگ خودروهای الکتریکی:** محدودیت شارژ و دشارژ پارکینگ توسط روابط (۱۶) و (۱۷) بیان می‌شود که به تعداد خودروهای در پارکینگ وابسته است. پارکینگ هوشمند تنها می‌تواند در حالت شارژ ( $U_{p,t}^{sp}$ ) یا دشارژ ( $U_{p,t}^{pg}$ ) یا بی باری مورد بهره‌برداری قرار گیرد که توسط رابطه (۱۸) بیان شده است. سطح انرژی خودرو در هر ساعت ( $SE_{p,t}$ ) توسط رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود که به سطح انرژی خودروها در هنگام ورود به پارکینگ ( $SE_{p,t}^{arv}$ ) یا خروج از پارکینگ ( $SE_{p,t}^{dep}$ ) وابسته است. محدودیت سطح انرژی پارکینگ توسط رابطه (۲۰) بیان شده است.  $P_{p,t}^{sp}$  توان شارژ شده توسط سامانه ذخیره‌ساز باتری را نشان می‌دهد.

$$P_{p,t}^{pg} \leq \gamma^{dis} N_{p,t} U_{p,t}^{pg} \quad (16)$$

$$P_{p,t}^{sp} \leq \gamma^{ch} N_{p,t} U_{p,t}^{sp} \quad (17)$$

$$U_{p,t}^{pg} + U_{p,t}^{sp} \leq 1 \quad (18)$$

$$SE_{p,t} = SE_{p,t-1} + SE_{p,t}^{arv} - SE_{p,t}^{dep} \quad (19)$$

$$+ \eta_{ch} P_{p,t}^{sp} - P_{p,t}^{pg} / \eta_{dis}$$

$$SC_{p,t}^{min} Cap_{p,t} \leq SE_{p,t} \leq SC_{p,t}^{max} Cap_{p,t} \quad (20)$$

**پاسخگویی بار مبتنی بر شیفیت بار:** در این مقاله مدل برنامه‌ی پاسخگویی بار مبتنی بر شیفیت بار توسط اپراتور ریزشبه‌عمل می‌شود. تقاضای الکتریکی شبکه پس از اجرای برنامه‌ی پاسخگویی بار ( $d_{el,t}^{DR}$ ) توسط رابطه (۲۱) بیان شده است. مقدار بار قطع شده ( $DR_{el,t}^{dn}$ ) در هر ساعت برابر مقدار بار افزایشی ( $DR_{el,t}^{up}$ ) در دیگر ساعات است که توسط رابطه (۲۲) بیان شده است. مقدار بار قابل شیفیت در هر ساعت دارای

شده توسط سامانه ذخیره‌ساز باتری را نشان می‌دهد.  $DR_{el,t}^{dn}$  نیز مقدار بار شیفیت یافته از هر ساعت را نشان می‌دهد.  $I_{i,t}$  وضعیت قرارگیری میکروتوربین‌ها در شبکه را نشان می‌دهد که به صورت یک متغیر باینری تعریف می‌شود.

$$of_1 = \min \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NI} (su_{i,t} + sd_{i,t} + \beta_i P_{i,t} + c_i I_{i,t}) \quad (1)$$

$$+ \sum_{t=1}^{NT} \sum_{p=1}^{NP} C_{pl}^{evpl} P_{p,t}^{pg} + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{es=1}^{NES} C_{es}^{bes} P_{es,t}^{dis-es}$$

$$+ \sum_{t=1}^{NT} \sum_{el=1}^{NEL} C_{el}^{edr} DR_{el,t}^{dn}$$

**میکروتوربین‌های گازی:** محدودیت‌های مربوط به میکروتوربین‌های گازی در روابط (۲) تا (۹) بیان شده‌اند. محدودیت توان اکتیو و راکتیو میکروتوربین‌های گازی توسط روابط (۲) و (۳) بیان می‌شوند. محدودیت نرخ تغییرات توان توسط روابط (۴) و (۵) بیان می‌شوند. حداقل زمان روشن و خاموش بودن مربوط به میکروتوربین‌های گازی توسط روابط (۶) و (۷) آورده شده است. هزینه روشن و خاموش بودن واحدها نیز وابسته به وضعیت روشن و خاموش بودن میکروتوربین‌ها می‌باشد که توسط روابط (۸) تا (۹) بیان می‌شوند.  $Q_{i,t}$  توان راکتیو تولیدی توسط میکروتوربین‌های گازی را نشان می‌دهد.

$$P_i^{min} I_{i,t} \leq P_{i,t} \leq P_i^{max} I_{i,t} \quad (2)$$

$$Q_i^{min} I_{i,t} \leq Q_{i,t} \leq Q_i^{max} I_{i,t} \quad (3)$$

$$P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq RU_i \quad (4)$$

$$P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq RD_i \quad (5)$$

$$I_{i,t} - I_{i,t-1} \leq I_{i,t+UT_{i,u}} \quad (6)$$

$$I_{i,t-1} - I_{i,t} \leq 1 - I_{i,t+DT_{i,u}} \quad (7)$$

$$0 \leq su_{i,t} \geq Cu_i (I_{i,t} - I_{i,t-1}) \quad (8)$$

$$0 \leq sd_{i,t} \geq Cd_i (I_{i,t-1} - I_{i,t}) \quad (9)$$

**سامانه ذخیره‌ساز باتری:** محدودیت شارژ و دشارژ باتری توسط روابط (۱۰) و (۱۱) بیان می‌شود. باتری در هر لحظه تنها می‌تواند در حالت شارژ ( $x_{es,t}^{ch}$ ) یا دشارژ ( $x_{es,t}^{dis}$ ) یا بی باری باشد که توسط رابطه (۱۲) بیان شده است. سطح انرژی ذخیره‌ساز در هر ساعت ( $SC_{es,t}$ ) توسط رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود. سطح انرژی ابتدایی و انتهایی باتری توسط رابطه (۱۴) بیان شده است. محدودیت سطح انرژی باتری توسط رابطه (۱۵) بیان شده است.

میکروتوربین‌ها نسبت به شرایط نرمال را نشان می‌دهد. بخش دوم هزینه تغییرات تخریب باتری نسبت به شرایط نرمال را نشان می‌دهد. بخش سوم تغییرات هزینه دشارژ پارکینگ نسبت به شرایط نرمال را بیان می‌کند. بخش چهارم تابع هدف نیز شامل هزینه تغییرات شیف‌ت بار و هزینه قطع بار اجباری ( $IS_{el,t}$ ) می‌باشد.

$$\begin{aligned} of_2 = & \min \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NI} \beta_i (P_{i,t}^{rt} - P_{i,t}) \\ & + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{p=1}^{NP} C_{pl}^{evpl} (P_{p,t}^{rt,pg} - P_{p,t}^{pg}) \\ & + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{es=1}^{NES} C_{es}^{bes} (P_{es,t}^{rt,dis\_es} - P_{es,t}^{rt,dis\_es}) \\ & + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{el=1}^{NEL} C_{el}^{edr} (DR_{el,t}^{rt,dn} - DR_{el,t}^{dn}) + C_{el}^{ls} IS_{el,t} \end{aligned} \quad (32)$$

معادلات (۳۳) و (۳۴) توان اکتیو و راکتیو تولیدی بعد از شرایط حمله را نشان می‌دهند که باید توسط معادلات (۳۵) و (۳۶) محدود شوند.

$$P_{i,t}^{rt} = P_{i,t} + pu_{i,t}^{rt} - pd_{i,t}^{rt} \quad (33)$$

$$Q_{i,t}^{rt} = Q_{i,t} + qu_{i,t}^{rt} - qd_{i,t}^{rt} \quad (34)$$

$$P_i^{\min} I_{i,t} \leq P_{i,t}^{rt} \leq P_i^{\max} I_{i,t} \quad (35)$$

$$Q_i^{\min} I_{i,t} \leq Q_{i,t}^{rt} \leq Q_i^{\max} I_{i,t} \quad (36)$$

معادلات (۳۷) و (۳۸) توان دشارژ و شارژ باتری پس از شرایط حمله را نشان می‌دهند که دیگر محدودیت‌های آن مشابه با شرایط نرمال باید در نظر گرفته شوند که توسط معادلات (۳۹) تا (۴۳) بیان می‌شوند.

$$P_{i,t}^{rt,dis} = P_{es,t}^{dis} + pu_{es,t}^{rt,dis} - pd_{es,t}^{rt,dis} \quad (37)$$

$$P_{es,t}^{rt,ch} = P_{es,t}^{ch} + pu_{es,t}^{rt,ch} - pd_{es,t}^{rt,ch} \quad (38)$$

$$P_{es}^{dis,\min} x_{es,t}^{dis} \leq P_{es,t}^{rt,dis} \leq P_{es}^{dis,\max} x_{es,t}^{dis} \quad (39)$$

$$P_{es}^{ch,\min} x_{es,t}^{ch} \leq P_{es,t}^{rt,ch} \leq P_{es}^{ch,\max} x_{es,t}^{ch} \quad (40)$$

$$SC_{es,t+1}^{rt} = SC_{es,t}^{rt} + \eta_{es}^{ch} P_{es,t}^{rt,ch} - P_{es,t}^{rt,dis} / \eta_{es}^{dis} \quad (41)$$

$$SC_{es,t=24}^{rt} = SC_{es,int}^{rt} \quad (42)$$

$$SC_{es}^{\min} \leq SC_{es,t}^{rt} \leq SC_{es}^{\max} \quad (43)$$

معادلات (۴۴) و (۴۵) توان دشارژ و شارژ پارکینگ هوشمند پس

محدودیت است که توسط رابطه‌های (۲۲) و (۲۳) بیان شده‌اند.

$$d_{el,t}^{DR} = d_{el,t} - DR_{el,t}^{dn} + DR_{el,t}^{up} \quad (21)$$

$$\sum_{t=1}^{NT} DR_{el,t}^{up} = \sum_{t=1}^{NT} DR_{el,t}^{dn} \quad (22)$$

$$0 \leq DR_{el,t}^{up} \leq DR_{el,t}^{up,\max} \quad (23)$$

$$0 \leq DR_{el,t}^{dn} \leq DR_{el,t}^{dn,\max} \quad (24)$$

تعداد توان و محدودیت‌های شبکه: قیود تعادل توان اکتیو و راکتیو و پخش توان منابع مختلف در روابط (۲۵) و (۲۶) بیان شده است. روابط پخش بار جریان متناوب برای توان اکتیو و راکتیو به ترتیب در روابط (۲۷) و (۲۸) داده شده است. محدودیت انتقال توان اکتیو و راکتیو در خطوط در روابط (۲۹) و (۳۰) آورده شده است. محدودیت ولتاژ برای هر شین الکتریکی در رابطه (۳۱) آمده است.  $P_{wp,t}$  و  $Q_{wp,t}$  توان اکتیو و راکتیو تولیدشده توسط توربین بادی را نشان می‌دهد.  $PF_{b,b',t}$  و  $QF_{b,b',t}$  توان اکتیو و راکتیو عبوری از خطوط انتقال را نشان می‌دهد.  $V_{b,t}$  ولتاژ در هر شین و هر ساعت را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned} & \sum_i^{I_b} P_{i,t} + \sum_{wp}^{WP_b} P_{wp,t} + \sum_{es}^{ES_b} (P_{es,t}^{es\_dis} - P_{es,t}^{es\_ch}) \\ & + \sum_p^{PL_b} (P_{p,t}^{pg} - P_{p,t}^{sp}) - \sum_{el}^{EL_b} d_{el,t}^{dr} \end{aligned} \quad (25)$$

$$= \sum_b PF_{b,b',t}$$

$$\sum_i^{I_b} Q_{i,t} + \sum_{wp}^{WP_b} Q_{wp,t} - \sum_{el}^{EL_b} Q_{el,t}^{dr} = \sum_b QF_{b,b',t} \quad (26)$$

$$PF_{b,b',t} = B_{b,b'} (\delta_{b,t} - \delta_{b',t}) - G_{b,b'} (V_{b,t} - V_{b',t}) \quad (27)$$

$$QF_{b,b',t} = G_{b,b'} (\delta_{b,t} - \delta_{b',t}) + B_{b,b'} (V_{b,t} - V_{b',t}) \quad (28)$$

$$0 \leq PF_{b,b',t} \leq PF_{b,b'}^{\max} \quad (29)$$

$$0 \leq QF_{b,b',t} \leq QF_{b,b'}^{\max} \quad (30)$$

$$V_b^{\min} \leq V_{b,t} \leq V_b^{\max} \quad (31)$$

**۳-۲- مرحله دوم مدل پیشنهادی:** در این مرحله هدف اپراتور ریزشبکه حداقل کردن هزینه بهره‌برداری تحت شرایط حمله می‌باشد که به صورت (۳۲) قابل مشاهده است که شامل چهار بخش است. بخش اول تغییرات هزینه بهره‌برداری

$$PF_{b,b',t}^{rt} = B_{b,b'} \left( \delta_{b,t} - \delta_{b',t} \right) - G_{b,b'} \left( V_{b,t}^{rt} - V_{b',t}^{rt} \right) \quad (58)$$

$$QF_{b,b',t}^{rt} = G_{b,b'} \left( \delta_{b,t} - \delta_{b',t} \right) + B_{b,b'} \left( V_{b,t}^{rt} - V_{b',t}^{rt} \right) \quad (59)$$

$$0 \leq PF_{b,b',t}^{rt} \leq PF_{b,b'}^{\max} \quad (60)$$

$$0 \leq QF_{b,b',t}^{rt} \leq QF_{b,b'}^{\max} \quad (61)$$

$$V_b^{\min} \leq V_{b,t}^{rt} \leq V_b^{\max} \quad (62)$$

### ۳-۳-۳ مدل جامع رویکرد دومرحله‌ای:

تابع هدف نهایی مدل پیشنهادی به صورت (۶۳) با محدودیت‌های مربوطه در نظر گرفته می‌شود که شامل هر دو تابع هدف مرحله اول و دوم می‌باشد. بنابراین مسئله‌ی پیشنهادی به صورت یک رویکرد برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح مدل می‌شود که به راحتی توسط حل‌کننده‌های تجاری قابل حل است و می‌توان به جواب بهینه سراسری دست یافت.

$$\begin{aligned} of_T = \min & \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NI} (su_{i,t} + sd_{i,t} + \beta_i P_{i,t} + c_i I_{i,t}) \\ & + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{p=1}^{NP} C_{pl}^{evpl} P_{p,t}^{pg} + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{es=1}^{NES} C_{es}^{bes} P_{es,t}^{dis\_es} \\ & + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{el=1}^{NEL} C_{el}^{edr} DR_{el,t}^{dn} \\ & + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NI} \beta_i (P_{i,t}^{rt} - P_{i,t}) \\ & + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{p=1}^{NP} C_{pl}^{evpl} (P_{p,t}^{rt,pg} - P_{p,t}^{pg}) \\ & + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{es=1}^{NES} C_{es}^{bes} (P_{es,t}^{rt,dis\_es} - P_{es,t}^{dis\_es}) \\ & + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{el=1}^{NEL} C_{el}^{edr} (DR_{el,t}^{rt,dn} - DR_{el,t}^{dn}) + C_{el}^{ls} I_{s_{el,t}} \end{aligned} \quad (63)$$

Eqs. (2) – (31) and (33) – (62)

### ۴- نتایج و بحث

به منظور نشان دادن مزایای رویکرد پیشنهادی، یک ریزشکه جزیره‌ای با حضور منابع انرژی نوظهور تحت شرایط مختلف مورد مطالعه قرار می‌گیرد. ریزشکه مورد مطالعه با در نظر گرفتن منابع تولید توان و منابع نوظهور در شکل (۱) قابل مشاهده است. اطلاعات مربوط به ریزشکه در مرجع [۷] آورده شده است. اطلاعات مربوط به واحدهای تولید توان در مرجع [۱۸] قابل مشاهده است. تقاضای الکتریکی و توان باد پیش‌بینی شده در شکل (۲) قابل نمایش است. هزینه قطع بار اجباری ۳۰۰۰ سنت

از شرایط حمله را نشان می‌دهند که دیگر محدودیت‌های آن مشابه با شرایط نرمال باید در نظر گرفته شوند که توسط معادلات (۴۶) تا (۴۹) بیان می‌شوند.

$$P_{p,t}^{tr,pg} = P_{p,t}^{pg} + pu_{p,t}^{tr,pg} - Pd_{p,t}^{tr,pg} \quad (44)$$

$$P_{es,t}^{tr,gp} = P_{es,t}^{gp} + pu_{es,t}^{tr,gp} - Pd_{es,t}^{tr,gp} \quad (45)$$

$$P_{p,t}^{tr,pg} \leq \gamma^{dis} N_{p,t} U_{p,t}^{pg} \quad (46)$$

$$P_{p,t}^{tr,gp} \leq \gamma^{ch} N_{p,t} U_{p,t}^{G2PL} \quad (47)$$

$$SE_{p,t}^{tr} = SE_{p,t-1}^{tr} + SE_{p,t}^{arv} - SE_{p,t}^{dep} \quad (48)$$

$$+ \eta_{ch} P_{p,t}^{gp} - P_{p,t}^{pg} / \eta_{dis}$$

$$SC_{P,t}^{\min} Cap_{P,t} \leq SE_{P,t} \leq SC_{P,t}^{\max} Cap_{P,t} \quad (49)$$

رابطه (۵۰) بار شبکه بعد از شرایط حمله تحت اجرای برنامه‌ی پاسخگویی بار را نشان می‌دهد. رابطه (۵۱-۵۳) روابط مشابه با مرحله اول بعد از شرایط حمله را نشان می‌دهند. روابط (۵۴) و (۵۵) نیز تغییرات بار قطع شده یا افزایش یافته بعد از شرایط حمله را بیان می‌کنند.

$$d_{el,t}^{tr,dr} = d_{el,t} - DR_{el,t}^{tr,dn} + DR_{el,t}^{tr,up} \quad (50)$$

$$\sum_{t=1}^{NT} DR_{el,t}^{tr,up} = \sum_{t=1}^{NT} DR_{el,t}^{tr,dn} \quad (51)$$

$$0 \leq DR_{el,t}^{tr,up} \leq DR_{el,t}^{up\_max} \quad (52)$$

$$0 \leq DR_{el,t}^{tr,dn} \leq DR_{el,t}^{dn\_max} \quad (53)$$

$$DR_{el,t}^{tr,up} = DR_{el,t}^{up} + ru_{p,t}^{tr,up} - rd_{p,t}^{tr,up} \quad (54)$$

$$DR_{el,t}^{tr,dn} = DR_{el,t}^{dn} + ru_{el,t}^{tr,dn} - rd_{el,t}^{tr,dn} \quad (55)$$

روابط (۵۵-۶۲) نیز با توضیحات مشابه با مرحله اول، قیود مربوطه به شبکه بعد از شرایط حمله را نشان می‌دهند.

$$\begin{aligned} & \sum_i^{I_b} P_{i,t}^{rt} + \sum_{wp}^{WP_b} P_{wp,t} + \sum_{es}^{ES_b} (P_{es,t}^{rt,es\_dis} - P_{es,t}^{rt,es\_ch}) \\ & + \sum_p^{PL_b} (P_{p,t}^{rt,pg} - P_{p,t}^{rt,gp}) - \sum_{el}^{EL_b} (d_{el,t}^{tr,dr} - I_{s_{el,t}}) \end{aligned} \quad (56)$$

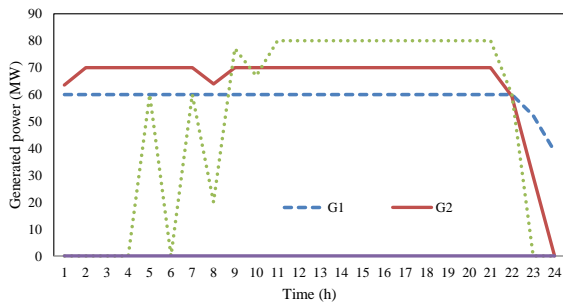
$$= \sum_b PF_{b,b',t}^{rt}$$

$$\sum_i^{I_b} Q_{i,t}^{rt} + \sum_{wp}^{WP_b} Q_{wp,t}^{rt} - \sum_{el}^{EL_b} Q_{el,t}^{rt,dr} = \sum_b QF_{b,b',t}^{rt} \quad (57)$$

## حالت ۲: برنامه‌ریزی بهینه منابع تولید توان با در نظر گرفتن

شرایط حمله تحت رویکرد دومرحله‌ای

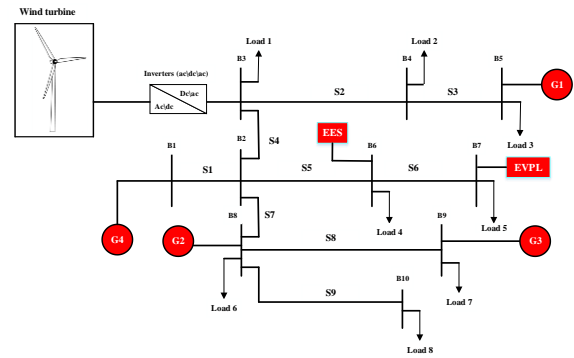
**حالت ۱:** شکل (۳) برنامه‌ریزی بهینه میکروتوربین‌ها تحت شرایط نرمال بدون در نظر گرفتن شرایط حمله را نشان می‌دهد. قابل مشاهده است که در ساعاتی که بار الکتریکی شبکه افزایش یافته است، میزان توان تولیدی واحدهای گران قیمت‌تر افزایش یافته است که نتیجه‌ی آن افزایش مشارکت نیروگاه‌های گران قیمت‌تر در ساعات پر باری و افزایش هزینه بهره‌برداری روزانه می‌باشد. در این شرایط، واحد G4 به‌عنوان گران‌ترین نیروگاه مشارکت داده نمی‌شود. واحد G1 به‌عنوان ارزان‌ترین نیروگاه در تمامی ساعات مشارکت یافته است. واحد G2 به‌عنوان دومین نیروگاه ارزان قیمت در ساعات ۱ تا ۲۳ مشارکت داده می‌شود. واحد G3 نیز در اکثر ساعات مشارکت داده می‌شود.



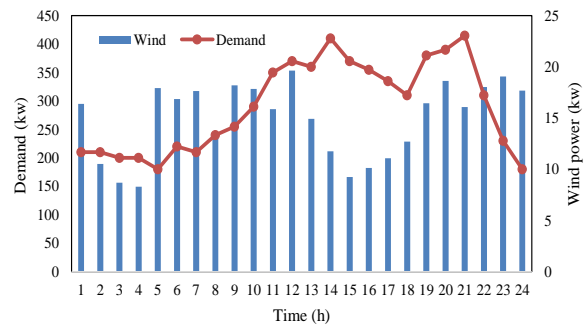
شکل (۳): توان تولیدشده توسط میکروتوربین‌ها

شکل (۴) نیز برنامه‌ریزی بهینه سامانه ذخیره‌ساز باتری را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که سامانه ذخیره‌ساز در ساعات کم‌باری در حالت شارژ مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. سپس انرژی ذخیره‌شده در باتری در ساعات با تقاضای برق بالاتر مورد استفاده قرار می‌گیرد که نتیجه آن کاهش مشارکت نیروگاه‌های گران قیمت در ساعات پر باری می‌باشد. شکل (۵) نیز سطح انرژی ساعتی پارکینگ هوشمند را در ساعات مختلف بهره‌برداری نشان می‌دهد. دیده می‌شود که تا ساعت ۵ سطح انرژی پارکینگ صفر است که ناشی از نبودن خودروها در پارکینگ می‌باشد. سپس با ورود خودروها به پارکینگ و نیاز به تأمین تقاضایشان، سطح انرژی ساعتی پارکینگ افزایش یافته است. سپس ناشی از خروج خودروها از پارکینگ و دشارژ شدن در بعضی از ساعات سطح انرژی پارکینگ کاهش یافته است. از ساعت ۲۰ به بعد نیز سطح انرژی پارکینگ به مقدار نزدیک صفر رسیده است که ناشی از خروج عمده‌ی خودروها از پارکینگ است.

بر کیلووات ساعت فرض می‌شود. بعلاوه، زمان ورود خودروها به پارکینگ، زمان خروجشان و سطح انرژی‌شان در هنگام ورود و خروج از پارکینگ بر اساس شبیه‌سازی مونت کارلو تعیین گردیده است که میانگین زمان ورود به پارکینگ، خروج از پارکینگ، سطح انرژی اولیه و نهایی به ترتیب ۸، ۱۶، ۰/۴ و ۰/۸ فرض می‌شود. تعداد خودروهای الکتریکی ۵۰ در نظر گرفته شده است. بیشینه توان شارژ و دشارژ سامانه ذخیره‌ساز نیز ۴۰ کیلووات فرض می‌شود. ظرفیت ذخیره‌ساز نیز ۲۰۰ کیلووات ساعت در نظر گرفته می‌شود. بازده شارژ و دشارژ سامانه ذخیره‌ساز و خودروهای الکتریکی نیز ۰/۹۵ فرض می‌شود. میزان مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه‌های پاسخگویی بار نیز ۱۰ درصد فرض می‌شود و هزینه اجرای برنامه‌ی پاسخگویی بار نیز ۲/۵ سنت بر کیلووات ساعت در نظر گرفته می‌شود. مسئله‌ی پیشنهادی به صورت یک مسئله‌ی خطی آمیخته با اعداد صحیح مدل می‌شود که توسط حل‌کننده‌ی CPLEX در نرم‌افزار GAMS حل می‌شود.



شکل (۱): ریزشکبه ۱۰ شینه مورد مطالعه

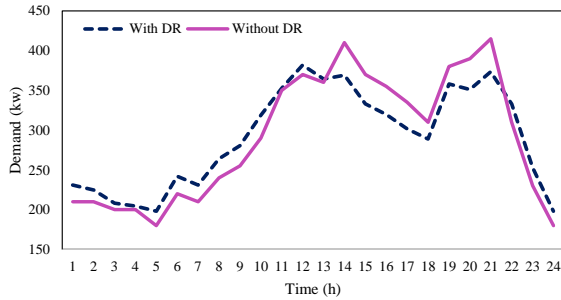


شکل (۲): تقاضا و توان باد پیش‌بینی‌شده [۱۷]

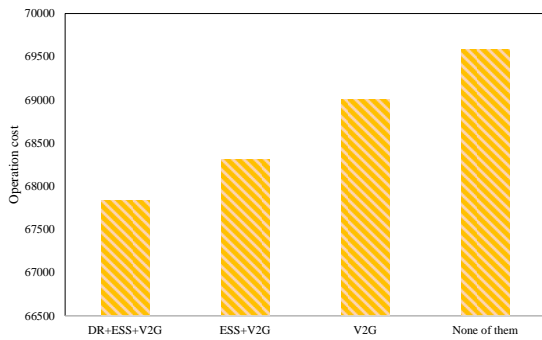
دو حالت زیر به منظور ارزیابی رویکرد مدل پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد:

**حالت ۱:** برنامه‌ریزی بهینه منابع تولید توان بدون در نظر گرفتن شرایط حمله

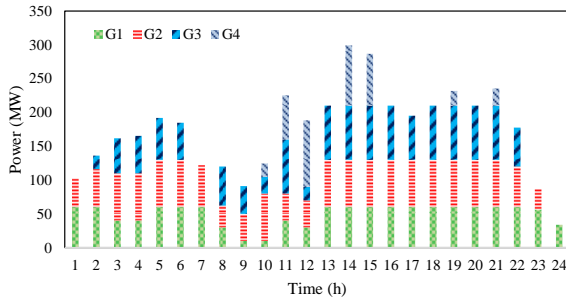
به‌عنوان گران‌ترین نیروگاه در حالت ۲ مشارکت داده می‌شود درحالی‌که در حالت ۱ از این واحد در هیچ ساعتی استفاده نشده است. همچنین شکل (۹) نیز برنامه‌ریزی بهینه پارکینگ هوشمند در مقایسه با حالت ۱ را نشان می‌دهد. قابل مشاهده است که سطح انرژی پارکینگ در مقایسه با حالت تغییر کرده است و پارکینگ در ساعتی که ممکن است حمله صورت گیرد کمتر در مقایسه با حالت ۱ شارژ شده است.



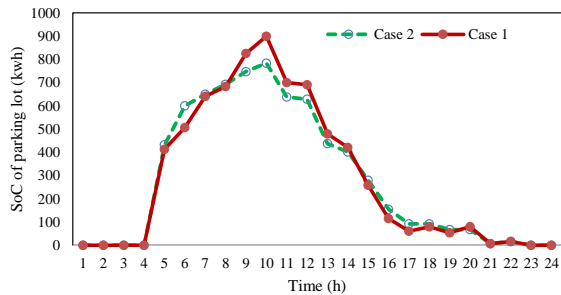
شکل (۶): اثر پاسخگویی بار بر تقاضای ساعتی



شکل (۷): اثر منابع انعطاف‌پذیر بر هزینه بهره‌برداری روز-پیش

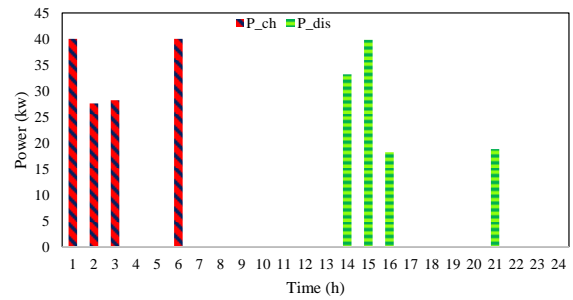


شکل (۸): برنامه‌ریزی میکروتوربین‌ها در حالت ۲

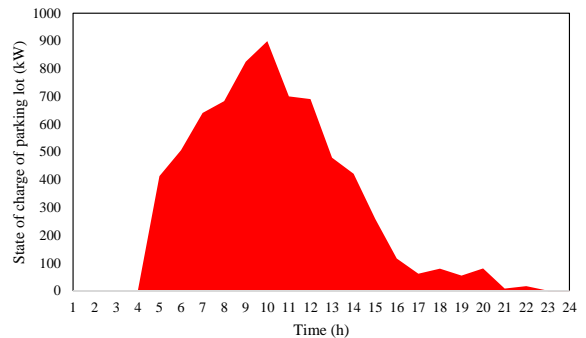


شکل (۹): مقایسه بین سطح انرژی ساعتی پارکینگ هوشمند در حالت

های ۱ و ۲



شکل (۴): برنامه‌ریزی سامانه ذخیره‌ساز باتری



شکل (۵): سطح انرژی ساعتی پارکینگ خودروهای الکتریکی

شکل (۶) نیز اثر اجرای برنامه پاسخگویی بار مبتنی بر شیفت بار بر الگوی مصرف بار را نشان می‌دهد. قابل مشاهده است که تقاضای الکتریکی به‌طور عمده از ساعات پر مصرف به ساعات کم مصرف شیفت یافته است. با شیفت یافتن بار از نیروگاه‌های گران قیمت کاهش می‌یابد که نتیجه‌ی آن کاهش هزینه بهره‌برداری روزانه است. شکل (۷) نیز اثر منابع نوظهور بر هزینه بهره‌برداری روزانه را نشان می‌دهد قابل مشاهده است که هزینه بهره‌برداری از ۶۹۵۸۲ سنت بدون این منابع به ۶۷۸۲۸ سنت با حضور این منابع کاهش یافته است. این کاهش هزینه اثر قابل توجه برنامه‌ریزی هماهنگ منابع انرژی نوظهور بر کاهش هزینه بهره‌برداری روزانه را نشان می‌دهد.

**حالت ۲:** در این حالت، برنامه‌ریزی بهینه روز پیش منابع انرژی در دسترس به نحوی تعیین می‌شود که علاوه کاهش هزینه بهره‌برداری روزانه، سبب افزایش تاب‌آوری در شرایط حمله دشمن به توربین‌های بادی شود. فرض می‌شود که توربین بادی در ساعات بین ۸ تا ۱۲ از شبکه خارج شود. شکل (۸) برنامه‌ریزی بهینه منابع تولید توان را نشان می‌دهد. قابل مشاهده است که نحوه‌ی برنامه‌ریزی تمامی منابع تولید توان در مقایسه با حالت ۱ تغییر کرده است که ناشی از در نظر گرفتن شرایط حمله به توربین‌های بادی و اعمال کم‌ترین خسارت به سامانه توزیع مورد نظر است. همچنین دیده می‌شود که واحد G4



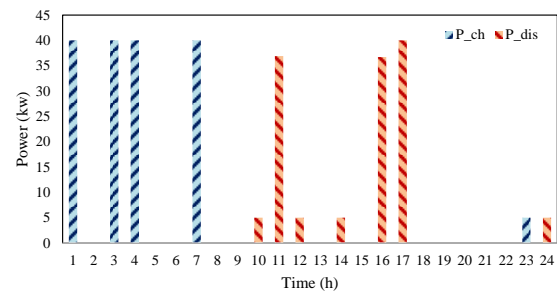
## ۵- نتیجه‌گیری

این مقاله یک رویکرد برنامه‌ریزی دو مرحله‌ای به منظور کاهش هزینه بهره‌برداری روزانه و بهبود تاب‌آوری یک ریزشکبه جزیره‌ای در حضور توربین‌های بادی را پیشنهاد داد. همچنین، اثر برنامه‌ریزی هماهنگ منابع انرژی نوظهور همانند خودروهای الکتریکی متصل به شبکه، سامانه ذخیره‌کننده‌ی باتری و تقاضاهای الکتریکی قابل شیفت به منظور بهبود کاهش هزینه بهره‌برداری روزانه و بهبود تاب‌آوری سامانه مورد ارزیابی قرار گرفت. شاخص تاب‌آوری شامل هزینه قطع بار و هزینه افزایش تولید در طی حمله دشمن به توربین‌های بادی مطرح شد. نتایج بهره‌برداری نشان داد که منابع انرژی نوظهور سبب کاهش هزینه بهره‌برداری در شرایط نرمال بدون در نظر گرفتن شاخص تاب‌آوری تا ۲/۵ درصد شد. بعلاوه نتایج نشان داد که استفاده از منابع انرژی نوظهور تحت مدل برنامه‌ریزی هماهنگ، سبب افزایش تاب‌آوری تا ۸۳ درصد شد که این مسئله اهمیت برنامه‌ریزی هماهنگ را در جهت کاهش هزینه بهره‌برداری و افزایش تاب‌آوری را به خوبی نشان داد.

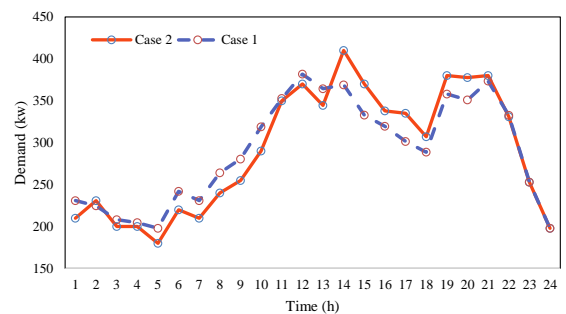
## ۶- مراجع

- [1] A. Majzoubi and A. Khodaei, "Application of microgrids in providing ancillary services to the utility grid", *Energy*, vol. 123, pp. 555-563, 2017.
- [2] M. Vahedipour-Dahraie, H. Reza Najafi, A. Anvari-Moghaddam, and J. M. Guerrero, "Optimal scheduling of distributed energy resources and responsive loads in islanded microgrids considering voltage and frequency security constraints," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 10, pp. 1-24, 2018.
- [3] R. Ghaffarpour, S. Zamanian, "Increasing Energy Security by Using the Concept of Resiliency in Multi-Energy Infrastructures", *Iran's Passive Defense Forum*, vol. 10, pp. 419-432, 2020. (In persion)
- [4] R. Ghaffarpour, "A multi-objective stochastic tri-level programming for highlighting the role of the pumped-storage power plant on electric grid defense budget", *Journal of Energy Management and Technology*, vol. 5, pp. 45-52, 2021.
- [5] M. Nazari-Heris, M. A. Mirzaei, B. Mohammadi-Ivatloo, M. Marzband, and S. Asadi, "Economic-environmental effect of power to gas technology in coupled electricity and gas systems with price-responsive shiftable loads", *Journal of Cleaner Production*, vol. 244, pp. 118769, 2020.
- [6] M. Ahrabi, M. Abedi, H. Nafisi, M. A. Mirzaei, B. Mohammadi-Ivatloo, and M. Marzband, "Evaluating the effect of electric vehicle parking lots in transmission-constrained AC unit commitment under a hybrid IGDT-stochastic approach", *International*

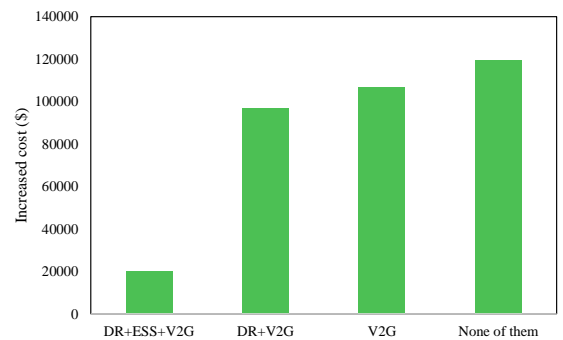
شکل (۱۰) نیز برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ سامانه ذخیره‌ساز الکتریکی را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که سامانه ذخیره‌ساز نیز در مقایسه با حالت ۱ نحوه شارژ و دشارژش تغییر کرده است. شکل (۱۱) تغییرات الگوی مصرف بار در حالت‌های ۱ و ۲ را با یکدیگر مقایسه می‌کند. قابل مشاهده است در حالت دوم، میزان افزایش بار در ساعات کم باری کمتر شده است که ناشی از توجه به کمبود تولید توان در طی خروج توربین بادی از شبکه می‌باشد. هزینه بهره‌برداری در این حالت برابر با ۷۱۶۲۱ سنت است که در مقایسه با حالت ۱ (۶۷۸۲۸ سنت) افزایش داشته است که این افزایش ناشی از در نظر گرفتن امکان حمله به توربین بادی در شرایط زمان واقعی می‌باشد. اثر منابع انرژی نوظهور بر میزان خسارت وارد شده در طی خروج توربین بادی از شبکه در شکل (۱۲) قابل مشاهده است. دیده می‌شود که میزان خسارت وارد شده از ۱۱۹۲۲۱ سنت به ۲۰۲۳۶ سنت کاهش یافته است که اثر برنامه‌ریزی هماهنگ منابع نوظهور را بر افزایش تاب‌آوری ریزشکبه را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ سامانه ذخیره‌ساز در حالت ۲



شکل (۱۱): تقاضای مصرف در حالت‌های ۱ و ۲



شکل (۱۲): اثر منابع انرژی نوظهور بر شاخص تاب‌آوری (هزینه افزایشی بعد از حمله)

- [13] M. Hemmati, M. A. Mirzaei, M. Abapour, K. Zare, B. Mohammadi-ivatloo, H. Mehrjerdi, et al., "Economic-environmental analysis of combined heat and power-based reconfigurable microgrid integrated with multiple energy storage and demand response program", *Sustainable Cities and Society*, vol. 69, pp. 102790, 2021.
- [14] E. Heydarian-Forushani, M. Golshan, and P. Siano, "Evaluating the benefits of coordinated emerging flexible resources in electricity markets", *Applied energy*, vol. 199, pp. 142-154, 2017.
- [15] M. Hemmati, B. Mohammadi-Ivatloo, M. Abapour, and A. Anvari-Moghaddam, "Day-ahead profit-based reconfigurable microgrid scheduling considering uncertain renewable generation and load demand in the presence of energy storage", *Journal of Energy Storage*, vol. 28, pp. 101161, 2020.
- [16] M. R. Ebrahimi and N. Amjady, "Adaptive robust optimization framework for day-ahead microgrid scheduling", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 107, pp. 213-223, 2019.
- [17] S. Parhizi, A. Khodaei, and M. Shahidehpour, "Market-based versus price-based microgrid optimal scheduling", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, pp. 615-623, 2016.
- [18] M. Hemmati, B. Mohammadi-Ivatloo, M. Abapour, and A. Anvari-Moghaddam, "Optimal chance-constrained scheduling of reconfigurable microgrids considering islanding operation constraints", *IEEE Systems Journal*, vol. 14, pp. 5340-5349, 2020.
- [7] M. Hemmati, B. Mohammadi-Ivatloo, S. Ghasemzadeh, and E. Reihani, "Risk-based optimal scheduling of reconfigurable smart renewable energy based microgrids," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 10, pp. 415-428, 2018.
- [8] A. M. F. Fard and M. Hajiaghahi-Keshteli, "A bi-objective partial interdiction problem considering different defensive systems with capacity expansion of facilities under imminent attacks", *Applied Soft Computing*, vol. 68, pp. 334-359, 2018.
- [9] H. Davarikia and M. Barati, "A tri-level programming model for attack-resilient control of power grids", *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 6, pp. 918-929, 2018.
- [10] M. Yan, Y. He, M. Shahidehpour, X. Ai, Z. Li, and J. Wen, "Coordinated regional-district operation of integrated energy systems for resilience enhancement in natural disasters", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, pp. 4881-4892, 2018.
- [11] M. Panteli, D. N. Trakas, P. Mancarella, and N. D. Hatziargyriou, "Power systems resilience assessment: Hardening and smart operational enhancement strategies", *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, pp. 1202-1213, 2017.
- [12] M. A. Mirzaei, M. Hemmati, K. Zare, M. Abapour, B. Mohammadi-Ivatloo, M. Marzband, et al., "A novel hybrid two-stage framework for flexible bidding strategy of reconfigurable micro-grid in day-ahead and real-time markets", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 123, pp. 106293, 2020.

# The Coordinated Scheduling of Emerging Energy Resources to Improve the Resilience of Island Microgrids with a Two-Stage Decision-Making Approach

R. Ghaffarpour\*, S. Zamanian

## Abstract

Islands are generally considered strategic points for enemy missile and drone strikes. Therefore, due to the vulnerability of these islands to such attacks and the need for sustainable energy supply, the concept of resilience is very important in the day-ahead scheduling of energy resources on the islands. On the other hand, with the increasing prevalence of emerging resources such as electric vehicles, electrical storage, and demand response programs in microgrids, the need for integrated scheduling to use the capacity of these resources to improve the resilience of these networks has increased. To this end, this paper examines a two-stage scheduling approach to reduce the daily operating costs and improve the resilience of an island microgrid integrated with wind turbines. In addition, the effects of coordinated scheduling of emerging energy sources, including grid-connected electric vehicles, an electrical storage system, and shiftable electrical demands are evaluated to improve the daily operating costs and system resilience. The resilience index is considered as the sum of the cost of load shedding and the cost of increased power production in the event of an enemy attack on the wind turbines. Therefore, the proposed model determines the best operation strategy under normal conditions in such a way that, in the event of an enemy attack on the wind turbines, the lowest cost of load shedding and the lowest cost of increasing production in the presence of emerging energy sources will be tolerated by the islanding microgrid.

**Key Words:** *Islanding Microgrid, Resiliency, Two-Stage Scheduling, Energy Management, Flexible Energy Resources, Electric Vehicles*