

یک روش برنامه‌ریزی خطی تصادفی دومرحله‌ای جهت مدیریت انرژی منابع و ذخیره‌سازهای ریزشبکه با در نظر گرفتن برنامه قیمت‌گذاری واقعی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام سالپ

محسن صرامی، مجید معظمی و غضنفر شاهقلیان

۱- مقدمه

امروزه شبکه‌های برق در سراسر جهان با مشکلات زیادی روبه‌رو هستند که برای رفع آنها و مدیریت بهتر و کارآمدتر سیستم قدرت، شبکه هوشمند مطرح شده است [۱]. به منظور اجرای مناسب برنامه‌های پاسخ‌گویی بار باید تجهیزاتی تهیه شود تا مصرف‌کنندگان در هر لحظه از قیمت برق آگاه شوند و با توجه به قیمت برق در ساعت‌های مختلف، پاسخ مناسبی در جهت کاهش هزینه‌های خود به شبکه داشته باشند. شبکه هوشمند با استفاده از سیستم ارتباط دوطرفه و انتقال اطلاعات به مصرف‌کنندگان و همچنین استفاده از سیستم اندازه‌گیری پیشرفته (AMI)^۱، ساختار مناسبی برای اجرای کامل برنامه‌های پاسخ‌گویی بار فراهم کرده است [۲].

بارهای موجود در ریزشبکه‌ها^۲ را می‌توان به دو دسته تقسیم‌بندی کرد: (۱) بارهای کنترل‌ناپذیر یا غیر قابل زمان‌بندی که هیچ‌گونه تأخیری در کارکرد آنها قابل تحمل نیست؛ یعنی در هر ساعت از روز که مصرف‌کننده اراده کند، بتواند از آنها استفاده کند و (۲) بارهای کنترل‌پذیر یا قابل زمان‌بندی که می‌توان آنها را زمان‌بندی کرد؛ یعنی مصرف‌کننده آنها را در اختیار برنامه زمان‌بندی قرار می‌دهد [۳].

در بیشتر بازارهای برق، خرده‌فروش‌ها برق را از بازار عمده‌فروشی که قیمت در آن دارای نوسانات است خریداری می‌کنند، اما آن را با قیمت ثابت که انعکاس‌دهنده قیمت عمده‌فروشی نیست به مصرف‌کنندگان خود می‌فروشند [۴]. به عنوان راهکاری برای حل این مسئله، مدل‌های قیمت‌گذاری متغیر با زمان پیشنهاد شده‌اند: قیمت‌گذاری زمان حقیقی^۳ (RTP)، قیمت‌گذاری روز قبل^۴ (DAP)، قیمت‌گذاری زمان استفاده^۵ (TOUP)، قیمت‌گذاری پیک بحرانی^۶ (CPP) و غیره [۵] و [۶]. این قیمت‌گذاری‌ها از این نظر که شرکت برق تعرفه‌های قیمت‌گذاری خود را هر چند وقت تغییر می‌دهد، از هم متفاوت هستند. به طوری که ممکن است این تغییرات در تعرفه TOUP سالی یک یا دو بار و در تعرفه RTP به صورت ساعتی باشند. میزان موفقیت مدل‌های قیمت‌گذاری مختلف به عوامل متعددی از جمله میزان اطلاعات ارائه‌شده به هر مصرف‌کننده،

چکیده: یکپارچه‌سازی منابع تجدیدپذیر به منظور تأمین بار محلی باعث به وجود آمدن مفهومی به نام ریزشبکه شده است. با ورود گسترده ریزشبکه‌ها، مدیریت انرژی و بهره‌برداری از سیستم و منابع در شرایط بازار برق از وظایف مهم مدیریت بهره‌برداری ریزشبکه است. در این مقاله مسئله بهره‌برداری ریزشبکه با در نظر گرفتن مسایل اقتصادی، فنی و همچنین با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مربوط به بار مصرفی، سرعت باد و تابش خورشید در شرایط بازار برق مدل‌سازی شده است. یکی از مباحث مهم در شرایط بازار برق بحث مشارکت واحدها در شرایط قیمت واقعی است. بر این اساس چهارچوبی به منظور بهره‌برداری بهینه و مصرف انرژی بارهای کنترل‌پذیر در شرایط بهره‌برداری یکپارچه از منابع انرژی توزیع‌شده دارای عدم قطعیت، از دیدگاه مصرف‌کننده ارائه می‌شود. مسئله بهینه‌سازی مورد نظر به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی خطی تصادفی دومرحله‌ای، با هدف کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری ریزشبکه و هزینه مورد انتظار پرداختی مصرف‌کننده و با در نظر گرفتن نیاز مصرف‌کننده به برخی از بارهای کنترل‌پذیر خود در بازه‌های زمانی مورد نظر او و محدودیت‌های بارها و نیز محدودیت‌های اعمال‌شده از جانب شرکت برق مدل می‌شود که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام سالپ حل می‌گردد. برای مدل‌سازی بازار برق خرده‌فروشی، تعرفه‌های RTP و IBR مورد استفاده قرار می‌گیرد تا هم نوسانات قیمت عمده‌فروشی بهتر منعکس شود و هم از هم‌زمانی مصرف جلوگیری گردد. در این روش قیمت به جای مشخص بودن در کل دوره برنامه‌ریزی، تنها در تعداد محدودی از ساعات آینده، از جانب خرده‌فروش به مصرف‌کننده اعلام می‌شود. در این شرایط هر گونه زمان‌بندی بارهای کنترل‌پذیر نیازمند پیش‌بینی قیمت است و این در حالی است که پیش‌بینی قیمت، عدم قطعیت‌هایی را به همراه خواهد داشت. این عدم قطعیت با تولید سناریوهای برای متغیر تصادفی قیمت آینده با استفاده از روش مونت‌کارلو، مدل‌سازی می‌شود. روش پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی و توانایی آن نشان داده شده است.

کلیدواژه: الگوریتم سالپ، انرژی‌های تجدیدپذیر، بازار برق، بهره‌برداری بهینه، ریزشبکه، ذخیره‌سازی انرژی.

این مقاله در تاریخ ۲۳ خرداد ماه ۱۴۰۰ دریافت و در تاریخ ۳ دی ماه ۱۴۰۰ بازنگری شد.

محسن صرامی، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، (email: mohsen66sarami@yahoo.com).

مجید معظمی (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، (email: m_moazzami@pel.iaun.ac.ir).

غضنفر شاهقلیان، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، (email: shahgholian@iaun.ac.ir).

1. Advanced Metering Infrastructure
2. Microgrids
3. Real-Time Pricing
4. Day-Ahead Pricing
5. Time-of-Use Pricing
6. Critical-Peak Pricing

و عرضه شده تقاضا هستند. با معرفی منابع تجدیدپذیر، انحراف شدیدتری در تقاضای خالص نشان داده می‌شود که ریسک را در دوره خرید و فروش انرژی ایجاد می‌کند [۱۵]. نوسانات قیمت بازار، اثرات شدیدی در حالت بهره‌برداری سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی دارد. بر اساس پیش‌بینی دقیق، DISCO می‌تواند در هزینه خرید انرژی به طور قابل توجهی صرفه‌جویی کند و ریسک ناشی از بازار زمان واقعی را به وسیله تنظیم حالت‌های بهره‌برداری سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی کاهش دهد.

به دلیل مشکلات مختلف زیست‌محیطی و همچنین افزایش در هزینه‌های سوخت فسیلی، مقدار قابل توجهی از واحدهای تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع انرژی از نوع منابع تجدیدپذیر هستند. با توجه به این واقعیت که این منابع دارای طبیعت نامشخص بوده و با زمان تغییر می‌کنند، تولید آنها باید از نظر زمانی و عدم قطعیت مدل‌سازی شود. یکی دیگر از مهم‌ترین عدم قطعیت‌ها در سیستم توزیع عدم قطعیت بار است که به دلیل برآورد و پیش‌بینی غیر دقیق بار ایجاد می‌شود که باید در برنامه‌ریزی سیستم توزیع در نظر گرفته شود. از سوی دیگر، عملکرد سیستم‌های توزیع از لحاظ قابلیت اطمینان وابسته به بازار برق است، بنابراین پیش‌بینی مناسب قیمت برق در بازار باعث بهبود قابلیت اطمینان سیستم می‌شود. در نتیجه با فرض مقادیر بازار به صورت متغیر به جای تخمین دقیق این مقادیر، امکان ارزیابی ریسک مالی نیز به وجود می‌آید. روش‌های مختلفی برای مدل‌کردن انواع عدم قطعیت‌ها در سیستم‌های توزیع وجود دارد که در مقاله‌های مختلفی بررسی شده‌اند. در [۱۶]، اپراتورهای شبکه توزیع که مسئول تأمین امنیت عرضه انرژی متنوع و مناسب برای مشتریان خود هستند با عدم قطعیت‌های ناشی از منابع تولید پراکنده مواجه بوده که بعضی از آنها به صورت احتمالاتی و بعضی دیگر به صورت امکان‌پذیر مدل می‌شوند. در [۱۷]، بهره‌برداری بهینه یک ریزشبکه بررسی شده و منابع توربین بادی، فتوولتائیک، میکروتوربین، سلول سوختی و بارهای الکتریکی حرارتی مدل شده‌اند. عدم قطعیت موجود نیز مربوط به بارها و منابع تولید تجدیدپذیر است. تابع چگالی احتمال ویبول برای مدل‌کردن عدم قطعیت سرعت باد و در نتیجه محاسبه توان خروجی توربین بادی به کار رفته است. عدم قطعیت ناشی از تابش خورشید در منبع فتوولتائیک نیز به وسیله تابع توزیع بتا مدل می‌شود و با توجه به آن، توان خروجی فتوولتائیک محاسبه می‌گردد. عدم قطعیت بار مصرفی نیز با استفاده از توزیع نرمال مدل می‌شود.

در این مقاله چهارچوبی به منظور زمان‌بندی بهینه و خودکار مصرف انرژی بارهای کنترل‌پذیر در شرایط بهره‌برداری یکپارچه از منابع انرژی توزیع‌شده دارای عدم قطعیت، از دیدگاه مصرف‌کننده ارائه می‌شود. مسئله بهینه‌سازی مورد نظر به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی خطی تصادفی دومرحله‌ای، با هدف کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری ریزشبکه و هزینه مورد انتظار پرداختی مصرف‌کننده و با در نظر گرفتن نیاز مصرف‌کننده به برخی از بارهای کنترل‌پذیر خود در بازه‌های زمانی مورد نظر او و محدودیت‌های بارها و نیز محدودیت‌های اعمال‌شده از جانب شرکت برق مدل می‌شود که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام سالپ (SSA) حل می‌گردد. برای مدل‌سازی بازار برق خرده‌فروشی، تعرفه‌های RTP و IBR مورد استفاده قرار می‌گیرد تا هم نوسانات قیمت عمده‌فروشی بهتر منعکس شود و هم از هم‌زمانی مصرف جلوگیری شود. با آشکار شدن ضرورت اتوماسیون خودکار، از یک اتوماسیون تمام‌خودکار استفاده می‌شود که در آن، قیمت به جای مشخص‌بودن در کل دوره برنامه‌ریزی، تنها در

موفق‌بودن در تبدیل قیمت‌های عمده‌فروشی ساعتی به قیمت‌های خرده‌فروشی و توانایی مصرف‌کنندگان برای پاسخ به سیگنال‌های قیمت بستگی دارد [۷] و [۸]. در این مدل‌ها، دو هدف اصلی دنبال می‌شود که عبارت هستند از: (۱) به قیمت‌های خرده‌فروشی اجازه دهند انعکاس‌دهنده نوسانات قیمت‌های عمده‌فروشی به مصرف‌کنندگان نهایی باشند، به گونه‌ای که قیمت واقعی برق در زمان‌های مختلف روز را بپردازند. (۲) مصرف‌کنندگان را تشویق کنند تا لوازم خانگی پرمصرف را به ساعت‌های غیر پیک جابه‌جا کنند. با این کار، هم مصرف‌کنندگان (با کاهش هزینه پرداختی) و هم شرکت برق با کاهش نسبت پیک به متوسط بار (PAR)، یا کاهش پیک بار و نیز کاهش هزینه تولید سود خواهند برد.

در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای در زمینه بهره‌برداری از منابع انرژی توزیع‌شده انجام گردیده که در هر یک از آنها با توجه به تابع هدف مورد نظر و شرایط مسئله، برنامه‌ریزی صورت گرفته است.

در [۹]، بهره‌برداری بهینه شبکه توزیع با در نظر گرفتن وسایل ذخیره‌ساز انرژی بررسی شده که هدف آن مینیمم‌کردن تلفات و هزینه خرید انرژی به وسیله تعیین مقادیر بهینه برای مجموعه‌ای از متغیرها می‌باشد. در [۱۰]، بهره‌برداری بهینه سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی برای بهبود بار شبکه توزیع و قابلیت میزبانی منابع تولید پراکنده مورد بحث قرار گرفته و مسایل مربوط به مدیریت بهینه و اندازه منابع ذخیره‌ساز برای سیستم توزیع در حالت نفوذ بالای منابع تولید پراکنده ارائه شده است. تابع هدف در آن، مینیمم‌کردن هزینه ناشی از تلفات، هزینه بار اوج و هزینه بهره‌برداری و نگهداری باتری و تنظیم ولتاژ است. در [۱۱]، برنامه‌ریزی شارژ و تخلیه بهینه سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی برای سیستم‌های توزیع متصل به منابع تولید پراکنده فتوولتائیک ارائه شده که هدف، مینیمم‌کردن تلفات سیستم با توجه به شرایط شارژ و تخلیه باتری است. در [۱۲] از باتری‌ها برای مینیمم‌کردن هزینه‌های مربوط به قیود فنی استفاده شده و طراحی بلندمدت در این تحقیق، بر اساس یک پخش بار کوتاه‌مدت و با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها انجام گرفته است. همچنین باتری‌ها برای چندین هدف به طور بهینه برنامه‌ریزی می‌شوند و با استفاده از یک الگوریتم PSO برای مینیمم‌سازی هزینه و تعیین نرخ توان و ظرفیت و مکان بهینه باتری تحت قیود فنی استفاده شده است. مرجع [۱۳] به برنامه‌ریزی بهینه احتمالی یک شبکه توزیع فعال می‌پردازد که شامل منابع ذخیره‌ساز توزیع‌یافته و منابع تجدیدپذیر است و هدف، مینیمم‌کردن تلفات ناشی از ذخیره‌سازها، هزینه انرژی داده‌شده از شبکه خارجی و مینیمم‌کردن میزان انحراف پخش توان برنامه‌ریزی شده با مقدار شبکه خارجی است. در [۱۴] یک روش مناسب برای بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر، باتری‌ها و خودروهای برقی ارائه شده و نتایج به دست آمده از پروسه بهره‌برداری با روش الگوریتم جستجوی ممنوع، نشانگر کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و افزایش قابلیت اطمینان سیستم به وسیله برنامه‌ریزی بهینه شارژ و تخلیه باتری‌ها و خودروی برقی است.

به طور معمول در DISCOها انرژی از طریق قراردادهای دوجانبه خریداری می‌شود تا تقاضای مصارف نهایی را برآورده کند. چنانچه DISCOها دارای امکانات منابع انرژی تجدیدپذیر باشند، آن گاه دارای انتخاب‌های زیادی برای به دست آوردن انرژی هستند. با توجه به خطاهای پیش‌بینی شده، DISCOها مسئول جبران فاصله بین مقدار واقعی

1. Peak-to-Average-Rate

2. Distribution Company

قیمت از جمله پله اول، ضریب پله دوم قیمت و آستانه مصرف انرژی در هر ساعت (ch, n, ah) و نیز محدودیت انرژی در هر ساعت (Eh_{max}) می‌شود. اطلاعات ارائه‌شده از جانب مصرف‌کننده تعداد بارهای کنترل‌پذیر و کنترل‌ناپذیر ریزشبهه (NC, NM)، بازه زمانی که بارهای کنترل‌پذیر در اختیار برنامه زمان‌بندی قرار می‌گیرند ($ac, \beta c$) و افق زمان‌بندی (NH) را شامل می‌شود. اطلاعات بار کنترل‌ناپذیر شامل توان نامی هر وسیله کنترل‌ناپذیر (γm) و اطلاعات گذشته هر وسیله کنترل‌ناپذیر مانند زمان روشن‌شدن و مدت زمان روشن‌ماندن هر وسیله کنترل‌ناپذیر می‌گردد. اطلاعات بار کنترل‌پذیر، بیشینه و کمینه توان مصرفی هر وسیله کنترل‌پذیر ($\gamma c_{max}, \gamma c_{min}$) و همین‌طور کل انرژی مورد نیاز برای عملکرد هر وسیله کنترل‌پذیر (Ec) را شامل می‌شود.

در روش پیشنهادی یک واحد شبیه‌ساز قیمت خرده‌فروشی به‌منظور پیش‌بینی قیمت برق خرده‌فروشی در ساعت‌هایی که قیمت واقعی برق در اختیار مصرف‌کننده قرار ندارد و سپس تولید سناریوهای قیمت به کمک روش مونت‌کارلو و کاهش آن به کمک الگوریتم پسرورد استفاده قرار گرفته است. در این ساختار یک واحد شبیه‌ساز بار کنترل‌ناپذیر به‌منظور تولید سناریوهای بار کنترل‌ناپذیر از روی اطلاعات گذشته‌ی این بارها و محاسبه پروفیل بار کنترل‌ناپذیر استفاده شده است. این روش، یک مدل بهینه‌سازی خطی تصادفی دومرحله‌ای باهدف کمینه‌سازی هزینه‌ی مورد انتظار پرداختی مصرف‌کننده با محدودیت‌های بارها، نیاز مصرف‌کننده به انرژی و محدودیت اعمال‌شده از جانب خرده‌فروش شرکت برق می‌باشد. متغیر تصمیم مرحله اول و دوم این مدل نیز میزان مصرف انرژی بارهای کنترل‌پذیر در ساعت‌های پیش از NP و پس از NP است.

خروجی روش پیشنهادی مبین نتایج بهینه‌سازی تصادفی شامل زمان‌بندی بارهای کنترل‌پذیر، میزان بار، هزینه و PAR سیستم است. در این مقاله فرض می‌شود که دوره زمانی مورد مطالعه ۲۴ ساعت می‌باشد و مصرف‌کننده به یک کنترلر هوشمند مجهز است که در یک زیرساخت مخابراتی دیجیتال دوطرفه از طریق شبکه‌های رایانه‌ای به سیستم توزیع هوشمند متصل شده و قیمت واقعی برق را در تعداد معینی از ساعات آینده دریافت می‌کند. همچنین مصرف‌کننده به صورت حساب برق خود اهمیت می‌دهد و خواهان کمینه‌سازی هزینه پرداختی خود است. بنابراین نسبت به قیمت‌های متغیر با زمان برق حساس می‌باشد. بازه زمانی که هر بار کنترل‌پذیر جهت زمان‌بندی در اختیار برنامه قرار می‌گیرد توسط مصرف‌کننده تعیین می‌شود و بارهای کنترل‌ناپذیر در ساعت‌هایی که قیمت‌های واقعی برق در اختیار قرار دارد، روشن نمی‌شوند و تنها یک بار در ساعت‌هایی که قیمت غیر قطعی است، روشن می‌شوند. به عبارت دیگر، میزان مصرف انرژی بارهای کنترل‌ناپذیر در ساعت‌هایی که قیمت قطعی است، صفر است و عدم قطعیت در میزان مصرف این بارها در ساعت‌هایی که قیمت نیز با عدم قطعیت همراه است، به طور هم‌زمان در قالب متغیرهای تصادفی با احتمالات مربوط به آنها در نظر گرفته می‌شود.

۲-۲ مدل‌سازی عدم قطعیت‌های مسئله

در این قسمت به مدل‌سازی عدم قطعیت‌های موجود در مسئله یعنی عدم قطعیت در قیمت خرده‌فروشی و عدم قطعیت در بار کنترل‌ناپذیر پرداخته می‌شود. این مدل‌سازی‌ها می‌کوشند تا مجموعه‌ای از سناریوها را تولید کنند که نشان‌دهنده تحقق‌های قابل قبول فرایندهای تصادفی در افق تصمیم‌گیری باشند. ذکر این نکته حایز اهمیت است که تعداد سناریوهایی که لازم است تا نماینده درستی از فرایندهای تصادفی موجود در مسئله باشند، بسیار زیاد است و این مشکل ممکن است مسئله

تعداد محدودی از ساعات آینده، از جانب خرده‌فروش به مصرف‌کننده اعلام می‌شود. در این شرایط هر گونه زمان‌بندی بارهای کنترل‌پذیر نیازمند پیش‌بینی قیمت است و این در حالی است که پیش‌بینی قیمت عدم قطعیت‌هایی را به همراه خواهد داشت. این عدم قطعیت با تولید سناریوهایی برای متغیر تصادفی قیمت آینده با استفاده از روش مونت‌کارلو مدل‌سازی می‌شود. علاوه بر این به کمک جمع‌آوری اطلاعات در خصوص زمان استفاده از بارهای کنترل‌ناپذیر در گذشته، عدم قطعیت در میزان مصرف انرژی این دسته از بارها در ساعت‌هایی که قیمت نیز غیر قطعی است، به صورت تصادفی در قالب سناریوهایی برای هر بار کنترل‌ناپذیر مدل‌سازی می‌شود. پس از مدل‌سازی عدم قطعیت‌های موجود در منابع انرژی توزیع‌شده، قیمت و بار کنترل‌ناپذیر با لحاظ کردن محدودیت‌های مسئله به زمان‌بندی بارهای کنترل‌پذیر پرداخته می‌شود. نوآوری این مقاله، ملاحظه هم‌زمان بهره‌برداری از منابع انرژی توزیع‌شده با عدم قطعیت‌های بار و قیمت برق خرده‌فروشی در زمان‌بندی بارهای کنترل‌پذیر است، ضمن این که قیمت برق تابعی از میزان مصرف انرژی مصرف‌کننده در نظر گرفته می‌شود.

در ادامه، ابتدا در بخش ۲ مدل پیشنهادی زمان‌بندی بار ریزشبهه در شرایط عدم قطعیت ارائه شده است. روش پیشنهادی در بخش ۳ و در نهایت نتیجه‌گیری این مقاله در بخش ۴ آمده است.

۲-۲ مدل پیشنهادی زمان‌بندی بار ریزشبهه در شرایط عدم قطعیت

در مسئله زمان‌بندی بار یک ریزشبهه، میزان مصرف انرژی لوازم کنترل‌ناپذیر مصرف‌کننده که بر حسب زمان استفاده از این وسایل متغیر است و نیز قیمت خرده‌فروشی برق در ساعت‌های آینده، تحت تأثیر عدم قطعیت هستند. در این قسمت مدل پیشنهادی جهت زمان‌بندی مصرف انرژی بارهای کنترل‌پذیر ریزشبهه با در نظر گرفتن عدم قطعیت در قیمت خرده‌فروشی و بار کنترل‌ناپذیر صورت می‌گیرد. برای مدل‌سازی بازار برق خرده‌فروشی از ترکیب تعرفه‌های RTP و IBR استفاده می‌شود تا هم نوسانات قیمت برق عمده‌فروشی بهتر انعکاس یابد و هم از هم‌زمانی مصرف جلوگیری شود. مسئله زمان‌بندی پژوهش حاضر، یک مسئله بهینه‌سازی خطی تصادفی دومرحله‌ای است که تصمیم‌های مرحله اول آن شامل میزان مصرف ساعتی بارهای کنترل‌پذیر، بار ساعتی و هزینه ساعتی در ساعت‌هایی است که قیمت بار کنترل‌ناپذیر قطعی هستند. تصمیم‌های مرحله دوم نیز شامل میزان مصرف ساعتی بارهای کنترل‌ناپذیر، بار ساعتی و هزینه ساعتی در ساعت‌هایی است که قیمت و بار کنترل‌ناپذیر غیر قطعی‌اند. این مسئله با رویکردی سناریومحور به کمینه‌سازی هزینه مورد انتظار پرداختی مصرف‌کننده در پاسخ به قیمت‌های برق زمان واقعی می‌پردازد. پیش از رفتن به سراغ راه حل مسئله برنامه‌ریزی تصادفی، عدم قطعیت پارامترهای ورودی مسئله به صورت متغیرهای تصادفی مدل‌سازی می‌شوند. در مسئله زمان‌بندی بار ریزشبهه، می‌توان بار کنترل‌ناپذیر مصرف‌کننده و نیز قیمت متغیر با زمان خرده‌فروشی را به صورت یک متغیر تصادفی بیان کرد. محدودیت‌های مسئله زمان‌بندی نیز شامل محدودیت‌های بارها، محدودیت اعمال‌شده از جانب خرده‌فروش شرکت برق و محدودیت اعمال‌شده از جانب مصرف‌کننده است.

۲-۱ ساختار روش پیشنهادی

اطلاعات ارائه‌شده از جانب شرکت برق یا خرده‌فروش شامل افق زمانی اعلام قیمت (NP)، قیمت واقعی NP ساعت آینده، پارامترهای

این بارها عدم قطعیت وجود دارد. از این رو در اینجا به مدل‌سازی این عدم قطعیت در قالب سناریوها پرداخته می‌شود. با مدل‌سازی و تخمین میزان مصرف این دسته از بارها می‌توان بارهای کنترل‌پذیر را بهتر زمان‌بندی نمود.

الف) تولید سناریو برای هر بار کنترل‌ناپذیر: بارهای کنترل‌ناپذیر با اندیس m نشان داده می‌شوند به طوری که $m \in M \triangleq \{m_1, \dots, m_{NM}\}$ که در آن M مجموعه بار کنترل‌ناپذیر موجود در این ریزشبهه و NM تعداد این بارها را نشان می‌دهند. پارامتر γ_m بیانگر توان نامی هر بار کنترل‌ناپذیر m است. به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت و تخمین میزان مصرف هر بار کنترل‌ناپذیر m ، برای هر وسیله به طور جداگانه سناریو با اندیس w تولید می‌شود، به طوری که $w \in \Omega_w = \{w_1, \dots, w_{N_w}\}$ که در آن Ω_w مجموعه سناریوهای تولیدشده برای هر وسیله کنترل‌ناپذیر را نشان می‌دهد. پارامترهای T_m^w و D_m^w به ترتیب ساعت روشن شدن و تعداد ساعت‌های روشن ماندن هر وسیله m را به ازای سناریوی w نشان می‌دهند. پارامتر π_m^w نیز نشان‌دهنده احتمال متناظر با وقوع سناریوی w برای وسیله m است. در این مقاله فرض شده که بارهای کنترل‌ناپذیر در ساعت‌هایی که قیمت قطعی است، روشن نمی‌شوند و تنها یک بار در ساعت‌هایی که قیمت غیر قطعی است، روشن می‌شوند. مقادیر پارامترهای نام برده شده در ساعت‌های $h > NP$ انتخاب می‌شوند.

ب) تشکیل احتمالات توأم برای سناریوهای تولیدشده: پس از توصیف سناریوی Nw برای هر وسیله m ، به منظور محاسبه پروفیل بار کنترل‌ناپذیر نیاز است تا توابع توزیع توأم برای پارامترهای T_m^w و D_m^w تعیین شوند. بنابراین سناریوهای توأم با اندیس و تعداد این سناریوها با $jw \in \Omega_{jw} = \{jw_1, \dots, jw_{N_{jw}}\}$ نشان داده می‌شوند، به طوری که در آن Ω_{jw} نشان‌دهنده مجموعه سناریوهای احتمالات توأم برای بار کنترل‌ناپذیر است. آن گاه به ازای هر سناریوی توأم برای هر وسیله، توابع توزیع توأم پارامترهای T_m^w و D_m^w یعنی jT_m^w و jD_m^w محاسبه می‌شوند. همچنین احتمال وقوع هر سناریوی احتمالات توأم jw ، یعنی π_{jw} از حاصل ضرب احتمالات سناریوهای تولیدشده π_m^w به دست می‌آید. تعداد این سناریوهای توأم نیز برابر با Nw^{NM} است.

ج) محاسبه پروفیل بار کنترل‌ناپذیر: پس از تشکیل توابع توزیع توأم مرتبط با زمان روشن شدن و مدت زمان استفاده از هر وسیله کنترل‌ناپذیر و احتمال متناظر وقوع آنها، محاسبه میزان مصرف انرژی هر یک از این بارها انجام می‌شود. همان طور که پیش‌تر نیز گفته شد، در این مقاله فرض شده که بارهای کنترل‌ناپذیر در ساعت‌هایی که قیمت قطعی است روشن نمی‌شوند و بنابراین میزان مصرف انرژی این بارها در هر ساعت از $h \leq NP$ صفر است. میزان مصرف انرژی هر بار کنترل‌ناپذیر در هر ساعت از $h > NP$ و به ازای هر سناریوی توأم jw ، با $\gamma m_{h,m}^{jw}$ نشان داده می‌شود و از (۱) به دست می‌آید. این رابطه نشان می‌دهد که هر وسیله کنترل‌ناپذیر در ساعت‌هایی که روشن می‌شود، به اندازه توان نامی‌اش مصرف انرژی دارد و در ساعت‌هایی که خاموش می‌باشد، انرژی مصرفی آن صفر است. با تعیین میزان مصرف انرژی هر بار کنترل‌ناپذیر، شرایط برای محاسبه پروفیل بار کنترل‌ناپذیر فراهم می‌شود. بار کنترل‌ناپذیر در هر ساعت از $h > NP$ و به ازای هر سناریوی توأم jw ، با $Im_{h,m}^{jw}$ نشان داده می‌شود و از (۲) حاصل می‌گردد. بنابراین رابطه، بار کنترل‌ناپذیر برابر با مجموع مصرف انرژی تمامی بارهای کنترل‌ناپذیر ریزشبهه موجود است. احتمال متناظر با وقوع هر سناریوی بار کنترل‌ناپذیر نیز با احتمال وقوع هر سناریوی احتمالات توأم jw ، یعنی π_{jw} ، برابر است

بهینه‌سازی اصلی را از نظر محاسباتی با دشواری‌هایی مواجه سازد. به همین دلیل از روش کاهش سناریو استفاده می‌شود و تا حد ممکن سعی می‌گردد اطلاعات آماری جاگرفته در آن سناریوها حفظ شوند.

۲-۲-۱ عدم قطعیت در قیمت خرده‌فروشی برق

در این مطالعه، یک بازار عمده‌فروشی که از تعدادی ژنراتور و چندین شرکت خرده‌فروش منطقه‌ای تشکیل شده است، مورد استفاده قرار گرفته است. هر خرده‌فروش، برق تعدادی از مصرف‌کنندگان را تأمین می‌کند. خرده‌فروش‌ها از طریق شبکه محلی به مصرف‌کنندگان متصل شده‌اند و قیمت‌های برق زمان واقعی را به مصرف‌کنندگان اعلام می‌کنند. اطلاعات RTP که انعکاس‌دهنده قیمت‌های عمده‌فروشی هستند، توسط خرده‌فروش از طریق یک زیرساخت مخابراتی دیجیتال، مثلاً یک شبکه محلی (LAN)، اعلام می‌شوند. در این مقاله، NH افق تصمیم‌گیری یا افق زمان‌بندی تعریف شده است که تعداد ساعت‌های پیش رو است که برای تصمیم‌گیری در مورد زمان‌بندی مصرف انرژی در نظر گرفته می‌شوند (برای مثال $NH = 24$ یا $NH = 48$). همچنین فرض شده است که تنها قیمت واقعی ساعت آینده از جانب خرده‌فروش به مصرف‌کننده اعلام می‌شود ($1 \leq NP \ll NH$). در اینجا NP نشان‌دهنده افق اعلام قیمت است. در این شرایط، هر گونه زمان‌بندی نیازمند پیش‌بینی قیمت می‌باشد و این در حالی است که پیش‌بینی قیمت، عدم قطعیت‌هایی را به همراه خواهد داشت. این عدم قطعیت در قیمت‌های بلادرنگ به کمک تولید سناریوهایی با استفاده از روش مونت‌کارلو مدل‌سازی می‌شود، سپس با استفاده از الگوریتم کاهش سناریوی پسر و تعداد سناریوها کاهش می‌یابد.

الف) دریافت اطلاعات قیمت واقعی برق از خرده‌فروش در ساعت‌های $h \leq NP$: مصرف‌کننده‌ای را فرض کنید که در یک برنامه پاسخ‌گویی بار بلادرنگ شرکت کرده و این مصرف‌کننده برای زمان‌بندی بارها در NH ساعت آینده، قیمت واقعی برق در هر ساعت $h \in P \triangleq \{1, 2, \dots, NP\}$ را از شرکت برق دریافت می‌کند. P مجموعه ساعت‌هایی است که در آن قیمت واقعی از پیش اعلام شده است. از آنجایی که مصرف‌کننده، قیمت واقعی در بقیه ساعت‌های افق زمان‌بندی را در اختیار ندارد، باید به پیش‌بینی قیمت بپردازد.

ب) پیش‌بینی قیمت در ساعت‌های $h > NP$: برای پیش‌بینی قیمت در هر ساعت $h \in H/P \triangleq \{NP+1, \dots, NH\}$ از روش به کار گرفته شده در [۱۸] استفاده می‌شود. این مرجع با مطالعه روی اطلاعات گذشته قیمت، به وجود همبستگی بین قیمت آن روز با قیمت یک روز پیش، دو روز پیش و هفت روز پیش پی می‌برد. سپس با انتخاب بهینه ضرایب برای هر یک از روزهای هفته، قیمت آن روز را می‌توان با توجه به میزان تأثیر هر یک از روزهای پیشین در قیمت آن روز، پیش‌بینی کرد. قیمت پیش‌بینی شده به علت وجود خطای ذاتی در پیش‌بینی، با عدم قطعیت مواجه است. بنابراین این عدم قطعیت در قالب سناریوها توصیف می‌شود.

۲-۲-۲ عدم قطعیت در بار کنترل‌ناپذیر

همان طور که پیشتر اشاره گردید در این ریزشبهه دو دسته بار در نظر گرفته شده است. دسته اول بارهای کنترل‌ناپذیر هستند که هیچ گونه تأخیری در کارکرد آنها پذیرفته شده نیست و مصرف‌کننده هر زمان که بخواهد می‌تواند مورد نیاز خود را از شبکه اخذ نماید. دسته دوم بارهای کنترل‌پذیر که می‌توان آنها را زمان‌بندی کرد. از آنجایی که زمان روشن شدن و مدت زمان استفاده از بارهای کنترل‌ناپذیر را می‌توان به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفت، بنابراین در میزان مصرف انرژی

که $\| \cdot \|$ نشانگر عملگر نرم است.

گام ۲: محاسبه کمترین فاصله احتمال سناریوی $S \in \Omega_s$ از سایر سناریوها (پیدا کردن نزدیک‌ترین سناریو به سناریوی S)

$$MD_{s,r} = \min_{s',s''} \forall s, s' \in \Omega_s, S \neq S' \quad (4)$$

که r بیانگر شماره سناریویی است که کمترین فاصله را از سناریوی S دارد.

گام ۳: محاسبه فاصله احتمال سناریوی $S \in \Omega_s$

$$\pi D_s = \pi_{s'} MD_{s,r}, \forall S, S' \in \Omega_s \quad (5)$$

از ضرب احتمال وقوع هر سناریو در اندازه کمترین فاصله این سناریو تا سایر سناریوها، فاصله احتمال سناریوی مربوط به دست می‌آید.

گام ۴: حذف سناریوی S_m

$$\pi D_m = \min \pi D_s \quad (6)$$

که m شماره سناریویی است که کمترین فاصله احتمال تا سناریوی مربوط را دارد و بنابراین این سناریو باید حذف شود. احتمال این سناریو نیز باید به احتمال نزدیک‌ترین سناریو اضافه شود

$$\Omega_s = \Omega_s \setminus S_m \quad (7)$$

$$\Omega_{s'} = \Omega_{s'} \cup S_m \quad (8)$$

$$\pi_r = \pi_r + \pi_m \quad (9)$$

گام ۵: تکرار گام‌های ۲ تا ۴ تا آنجایی که تعداد سناریوهای کاهش یافته به تعداد مورد نظر برسد.

۲-۴ مدل بازار خرده‌فروشی

تعرفه‌های RTP و IBR به عنوان دو مدل قیمت‌گذاری غیر ثابت، جایگزین تعرفه قیمت ثابت می‌شوند. تعرفه RTP به قیمت خرده‌فروشی اجازه می‌دهد تا انعکاس‌دهنده نوسانات قیمت عمده‌فروشی به مصرف‌کننده باشد بدین صورت که مصرف‌کننده، قیمت واقعی برق در ساعت‌های مختلف روز را می‌پردازد. همچنین این تعرفه با تشویق مصرف‌کننده به جابه‌جایی زمان استفاده از بارهای کنترل‌پذیر به ساعت‌های غیر اوج بار از طریق اعلام قیمت‌های زمان واقعی، هم به مصرف‌کننده با کاهش هزینه پرداختی و هم به شرکت برق با کاهش PAR و هزینه تولید، سود می‌رساند. به همین دلیل تعرفه RTP به عنوان یکی از اقتصادی‌ترین و مؤثرترین تعرفه‌های زمان متغیر مطرح است. تعرفه IBR نیز از تمرکز بخش بزرگی از بار در ساعت‌های قیمت پایین و ایجاد پیک بار جدید جلوگیری می‌کند. در این تعرفه، قیمت حدی در هر ساعت همراه با افزایش کل توان مصرف‌شده در آن ساعت بالا می‌رود. در ادامه توابع قیمت‌گذاری استفاده‌شده در مسئله که نمایانگر مدل بازار خرده‌فروشی مورد نظر می‌باشند به طور جداگانه، در ساعت‌هایی که قیمت واقعی (قیمت قطعی) در اختیار قرار دارد و همین طور در ساعت‌هایی که قیمت غیر قطعی است، نشان داده می‌شوند.

۲-۴-۱ تابع قیمت‌گذاری در ساعت‌هایی که قیمت قطعی است
($\forall h \in P$)

کل انرژی مصرفی ساعتی (کل بار ساعتی) در ساعت ($\forall h \in P$) به صورت $l_h \triangleq \sum_{c \in C} x_{h,c}$ تعریف می‌شود. به منظور نمایش ریاضی مدل قیمت‌گذاری مسئله از تابع قیمت‌گذاری عمومی $\lambda_h(l_h)$ در ساعت‌های ($\forall h \in P$) با پارامترهای a_h ، b_h و c_h استفاده می‌شود که به صورت

$$ym_{h,m}^{jw} = \begin{cases} \gamma_m & ; \forall h \in P, h \in [jT_m^{jw}, jT_m^{jw} + jD_m^{jw}] \\ 0 & ; \forall h \in P, h \notin [jT_m^{jw}, jT_m^{jw} + jD_m^{jw}] \end{cases} \quad (1)$$

$$\forall m \in M, \forall jw \in \Omega_{jw}$$

$$lm_h^{jw} = \sum_{m \in M} ym_{h,m}^{jw} \quad (2)$$

د) کاهش سناریوی بار کنترل‌ناپذیر: پس از تولید سناریوهای بار کنترل‌ناپذیر با تعداد NW^{NM} ، ضروری است تا تعداد این سناریوها کاهش یابد. برای انجام این کار از الگوریتم کاهش پسروی مبتنی بر مفهوم فاصله احتمال استفاده می‌شود.

۲-۳ تولید سناریوی قیمت با روش مونت کارلو

روش مونت کارلو یکی از روش‌های متداول در تولید سناریو است. در این روش با استفاده از دنباله‌ای از اعداد تصادفی با توزیع احتمال مشخص، به تولید نمونه‌های تجربی پرداخته می‌شود. با توجه به این که توزیع احتمال نرمال برای مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت استفاده می‌شود، بنابراین فرض شده قیمت هر ساعت $h \in H/P \triangleq \{NP+1, \dots, NH\}$ از توزیع نرمال با میانگین قیمت پیش‌بینی شده در آن ساعت و انحراف معیار پنج درصد میانگین در آن ساعت، پیروی می‌کند. سپس NS عدد تصادفی با میانگین و انحراف معیار ذکرشده، از ساعت $NP+1$ تا NH تولید می‌شود. به عبارت دیگر به کمک این روش، NS سناریوی $[NH - NP + 1]$ ساعته قیمت در افق زمان‌بندی ایجاد می‌گردد و به این ترتیب \tilde{a}_h^s که قیمت غیر قطعی به ازای سناریوی $h \in H/P \triangleq \{NP+1, \dots, NH\}$ در ساعت $s \in \Omega_s = \{s_1, \dots, s_{NS}\}$ است، تولید می‌شود. همچنین احتمال متناظر با هر سناریو با π_s نشان داده می‌شود.

۲-۳-۱ کاهش سناریو با استفاده از الگوریتم کاهش سناریوی پسرو

با افزایش تعداد سناریوها، بار محاسباتی مسئله برنامه‌ریزی تصادفی به سرعت افزایش می‌یابد. ضرورت تطابق تولید سناریو و انعطاف محاسباتی، وجود روش کاهش سناریو را توجیه می‌کند. روش کاهش سناریو به دنبال کوچک‌سازی مجموعه سناریوها است، به گونه‌ای که هنوز هم آن قدر کامل بماند که حفظ اطلاعات تصادفی در آن امکان‌پذیر باشد. یک فرایند کاهش خوب، منجر به یک مجموعه سناریوی کاهش‌یافته می‌شود که به اندازه کافی به مجموعه اصلی نزدیک باشد. بر اساس این که مجموعه سناریوی کاهش‌یافته با حذف یا انتخاب سناریو از مجموعه سناریوی اصلی تولیدشده باشد، دو مدل الگوریتم ابتکاری به نام‌های کاهش پسرو یا انتخاب پیشرو را می‌توان ایجاد کرد [۱۹]. در ادامه، الگوریتم مراحل کاهش سناریوی پسرو مبتنی بر فاصله احتمال، جهت کاهش تعداد سناریوهای قیمت توضیح داده می‌شود. در این الگوریتم مجموعه $\Omega_s = \{s_1, \dots, s_{NS}\}$ شامل تمامی سناریوهای قیمت است و $\Omega_{s'}$ مجموعه‌ای شامل تمامی سناریوهایی است که باید حذف شوند. این الگوریتم با مجموعه $\Omega_{s'} = \emptyset$ آغاز می‌شود و زمانی متوقف می‌گردد که تعداد مشخصی از سناریوها به دست آید [۲۰]. الگوریتم کاهش سناریوی پسرو در ادامه آمده است.

۲-۳-۲ الگوریتم کاهش سناریوی پسرو

گام ۱: محاسبه فاصله بین دو سناریوی قیمت S و S'

$$V_{S,S'} = \|\tilde{a}_h^s - \tilde{a}_h^{s'}\|, \forall S, S' \in \Omega_s, S \neq S' \quad (3)$$

(۱۰) فرمول بندی شده است

$$\lambda_h(I_h) = \begin{cases} a_h, & \forall h \in P, 0 \leq l_h \leq c_h \\ b_h, & \forall h \in P, l_h \leq c_h \end{cases} \quad (10)$$

در این تابع، پارامتر a_h قیمت‌های واقعی دریافتی از خرده‌فروش است که به عنوان پله اول قیمت در نظر گرفته می‌شود. پارامتر b_h نیز پله دوم قیمت یا قیمت حدی در پله دوم است که ضریبی از پله اول قیمت در نظر گرفته می‌شود و در (۱۱) نشان داده شده است

$$b_h = n \times a_h, \quad \forall h \in P \quad (11)$$

رابطه (۱۱) آستانه مصرف انرژی در هر ساعت را مشخص می‌کند. همان طور که در (۱۰) مشخص است این مدل قیمت‌گذاری به گونه‌ای است که مقادیر قیمت در ساعت‌هایی که قیمت واقعی در اختیار مصرف‌کننده قرار دارد، به صورت تابعی از کل بار آن ساعت است. در واقع مدل قیمت‌گذاری ارائه‌شده از ترکیب تعرفه‌های RTP و IBR تشکیل شده است. این مدل‌های قیمت‌گذاری در حال حاضر به ترتیب در شرکت برق ایلینویز (IPC) در ایالات متحده آمریکا و شرکت برق استان بریتیش کلمبیا (BC Hydro) در کانادا اجرا می‌شوند [۷]. این نمونه‌ها موارد خاصی از مدل‌های قیمت‌گذاری (۱) هستند. در مدل RTP که در IPC از آن استفاده می‌شود، رابطه بین پارامترهای قیمت بدین صورت است

$$a_h = b_h, \quad \forall h \in P \quad (12)$$

یعنی با وجود این که قیمت‌ها به صورت ساعتی تغییر می‌کنند اما در طول هر ساعت ثابت هستند. از سوی دیگر در مدل IBR که BC Hydro از آن استفاده می‌کند رابطه بین پارامترهای قیمت بدین صورت است

$$a_1 = a_2 = \dots = a_{NH-1} = a_{NH} \quad (13)$$

$$b_1 = b_2 = \dots = b_{NH-1} = b_{NH} \quad (14)$$

$$c_1 = c_2 = \dots = c_{NH-1} = c_{NH} \quad (15)$$

یعنی هر چند که قیمت‌ها به میزان مصرف وابسته هستند اما در طول زمان تغییر نمی‌کنند و بنابراین نمی‌توانند انعکاس‌دهنده نوسانات قیمت عمده‌فروشی باشند. با ترکیب دو مدل RTP و IBR در (۱۰)، هم قیمت‌های عمده‌فروشی و هم میزان مصرف در نظر گرفته می‌شوند [۲۱].

۲-۴-۲ تابع قیمت‌گذاری در ساعت‌هایی که قیمت غیر قطعی است ($\forall h \in H/p$)

در ساعت‌هایی که قیمت غیر قطعی است نیز از مدل قیمت‌گذاری عمومی استفاده می‌شود اما نکته حایز اهمیت این است که بار در این ساعت‌ها، مجموع بار کنترل‌پذیر و کنترل‌ناپذیر است. بنابراین کل انرژی مصرفی ساعتی (یا به عبارتی کل بار ساعتی) در $\forall h \in H/p$ با پارامترهای $\tilde{a}_h^s, \tilde{b}_h^s$ و \tilde{c}_h^s به صورت (۱۶) فرمول بندی می‌شود

$$\tilde{\lambda}_h^{s,jw}(\tilde{l}_h^{s,jw}) = \begin{cases} \tilde{a}_h^s; & \forall h \in H \setminus P, 0 \leq \tilde{l}_h^{s,jw} \leq \tilde{c}_h^s \\ & , \forall s \in \Omega_s, \forall jw \in \Omega_{jw} \\ b_h; & \forall h \in P \\ \tilde{b}_h^s; & \forall h \in H \setminus P, 0 \leq \tilde{l}_h^{s,jw} \leq \tilde{c}_h^s \\ & , \forall s \in \Omega_s, \forall jw \in \Omega_{jw}, l_h \leq c_h \end{cases} \quad (16)$$

$$\tilde{b}_h^s = n \times \tilde{a}_h^s, \quad \forall h \in H \setminus P, \forall s \in \Omega_s \quad (17)$$

فرمول بندی ریاضی ارائه‌شده در این مقاله با در نظر گرفتن عدم قطعیت در قیمت خرده‌فروشی و بار کنترل‌ناپذیر در قالب برنامه‌ریزی تصادفی

سناریومحور نوشته می‌شود. این در حالی است که در فرمول بندی [۲۲] نه تنها عدم قطعیتی برای قیمت خرده‌فروشی لحاظ نشده است، بلکه پروفیل بار ثابتی نیز برای بار کنترل‌ناپذیر فرض گردیده است. از ایده [۲۳] برای مدل‌سازی پروفیل بار کنترل‌ناپذیر استفاده می‌شود تا مدل‌سازی بهتری برای زمان بندی بار کنترل‌پذیر صورت گیرد. البته در [۲۴] بار کنترل‌ناپذیر تنها به صورت تصادفی به کمک توابع ریاضی تخمین زده شده است اما نهایتاً یک سناریو برای بار کنترل‌ناپذیر انتخاب گردیده است. به عبارت دیگر، بار کنترل‌ناپذیر در فرمول بندی مسئله بهینه‌سازی این مرجع در قالب سناریو وارد نشده است.

در (۱۸) تا (۳۰) فرمول بندی ریاضی معادل قطعی مسئله زمان بندی تصادفی مصرف انرژی بارهای کنترل‌پذیر در طول افق زمان بندی آمده است. در این فرمول بندی هر بار کنترل‌پذیر با اندیس c نشان داده می‌شود، به طوری که $c \in C \triangleq \{c_1, \dots, c_{NC}\}$ که در آن مجموعه C مجموعه بار کنترل‌پذیر موجود و تعداد این بارها را نشان می‌دهد

$$\min \sum_{h=1}^{NP} \lambda_h \left(\sum_{c \in \Omega_c} x_{h,c} \right) \times \left[\sum_{c \in \Omega_c} x_{h,c} \right] + \sum_{s \in \Omega_s} \sum_{jw \in \Omega_{jw}} \sum_{h=NP+1}^{NH} \pi_s \times \pi_{jw} \times \tilde{\lambda}_h^{s,jw} \left(\sum_{c \in C} \tilde{x}_{h,c}^{s,jw} + lm_h^{jw} \right) \quad (18)$$

$$\times \left[\sum_{c \in C} \tilde{x}_{h,c}^{s,jw} + lm_h^{jw} \right]$$

$$X_c \triangleq [x_{1,c}, \dots, x_{NP,c}] \quad (19)$$

$$\tilde{x}_c \triangleq [\tilde{x}_{NP+1,c}, \dots, \tilde{x}_{NH,c}] \quad (20)$$

$$X \triangleq ([X_c, \bar{X}_c], \forall c \in C) \quad (21)$$

$$\sum_{h=\alpha_c}^{\beta_c} x_{h,c} = E_c, \quad \forall c \in C, \alpha_c < NP, \beta_c \leq NP \quad (22)$$

$$\sum_{h=\alpha_c}^{NP} x_{h,c} + \sum_{h=NP+1}^{\beta_c} \bar{X}_{h,c}^{s,jw} = E_c, \quad \forall c \in C, \forall s \in \Omega_s \quad (23)$$

$$, \forall jw \in \Omega_{jw}, \alpha_c \leq NP, \beta_c > NP$$

$$\sum_{h=\alpha_c}^{\beta_c} \bar{X}_{h,c}^{s,jw} = E_c, \quad \forall c \in C, \forall s \in \Omega_s, \forall jw \in \Omega_{jw} \quad (24)$$

$$, \alpha_c > NP, \beta_c > NP$$

$$\gamma_c^{\min} \leq x_{h,c} \leq \gamma_c^{\max}, \quad \forall c \in C, \forall h \in P, h \in [\alpha_c, \beta_c] \quad (25)$$

$$x_{h,c} = 0, \quad \forall c \in C, \forall h \in P, h \notin [\alpha_c, \beta_c] \quad (26)$$

$$\gamma_c^{\min} \leq \tilde{x}_{h,c}^{s,jw} \leq \gamma_c^{\max}, \quad \forall c \in C, \forall h \in H \setminus P, h \in [\alpha_c, \beta_c] \quad (27)$$

$$, \forall s \in \Omega_s, \forall jw \in \Omega_{jw}$$

$$\tilde{x}_{h,c}^{s,jw} = 0, \quad \forall c \in C, \forall h \in H \setminus P, h \notin [\alpha_c, \beta_c] \quad (28)$$

$$, \forall s \in \Omega_s, \forall jw \in \Omega_{jw}$$

$$\sum_{c \in C} x_{h,c} \leq E_h^{\max}, \quad \forall h \in P \quad (29)$$

$$\sum_{c \in C} \tilde{x}_{h,c}^{s,jw} + lm_h^{jw} \leq E_h^{\max}, \quad \forall h \in H \setminus P, \forall s \in \Omega_s, \forall jw \in \Omega_{jw} \quad (30)$$

انرژی مصرفی در ساعاتی که قیمت قطعی و غیر قطعی است، نشان می‌دهند. انتخاب مناسب بردار زمان‌بندی مصرف انرژی مورد انتظار X به قیمت و بار کنترل‌ناپذیر بستگی دارد. واحد زمان‌بند به کمک واحدهای شبیه‌ساز قیمت خرده‌فروشی و بار کنترل‌ناپذیر، مقادیر بهینه بردار زمان‌بندی مصرف انرژی مورد انتظار را اتخاذ می‌کند. پس از آن نتایج به شکل دستورات روشن/خاموش با سطح توان مشخص، از طریق سیستم بی‌سیم یا سیم‌دار که بین بارهای و کنترلر هوشمند ارتباط برقرار می‌کند، به بارهای کنترل‌پذیر اعمال می‌شود.

۲-۳- بررسی تابع هدف

همان‌طور که در بخش قبل گفته شد، تابع هدف (۱۸) به دلیل وجود توابع قیمت‌گذاری $\lambda_h(\cdot), \tilde{\lambda}_h^{s,jw}(\cdot)$ به شکل فعلی حل‌شدنی نیست. در تابع قیمت‌گذاری (۱۰)، از آنجایی که پارامتر $a_h \leq b_h$ است، هزینه پرداختی $\lambda_h(l_h) \times l_h$ در هر ساعت از $h \in P \triangleq \{1, \dots, NP\}$ از مقدار بیشینه دو خط متقاطع به دست می‌آید [۷]

$$\lambda_h(l_h) \times l_h = \max\{a_h l_h, b_h l_h + (a_h - b_h)c_h\} \quad (31)$$

از سوی دیگر این مطالب برای تابع قیمت‌گذاری (۱۶) نیز صدق می‌کند زیرا پارامتر $\tilde{a}_h^s \leq \tilde{b}_h^s$ است، بنابراین هزینه پرداختی $\tilde{\lambda}_h^{s,jw}(\tilde{l}_h^{s,jw}) \times \tilde{l}_h^{s,jw}$ در هر ساعت از $h \in H/P \triangleq \{NP+1, \dots, NH\}$ را می‌توان بدین صورت نوشت

$$\tilde{\lambda}_h^{s,jw}(\tilde{l}_h^{s,jw}) \times \tilde{l}_h^{s,jw} = \max\{\tilde{a}_h^s \tilde{l}_h^{s,jw}, \tilde{b}_h^s \tilde{l}_h^{s,jw} + (\tilde{a}_h^s - \tilde{b}_h^s)\tilde{c}_h^s\} \quad (32)$$

بنابراین می‌توان تابع هدف (۱۸) را به شکل زیر بازنویسی کرد

$$\min \sum_{h=1}^{NP} \max\{a_h \sum_{c \in C} x_{h,c}, b_h \sum_{c \in C} x_{h,c} + (a_h - b_h)c_h\} + \sum_{s \in \Omega_s} \sum_{jw \in \Omega_{jw}} \sum_{h=NP+1}^{NH} \pi_s \times \pi_{jw} \times \max\{\tilde{a}_h^s [\tilde{x}_{h,c}^{s,jw} + lm_h^{jw}], \tilde{b}_h^s [\sum_{c \in C} \tilde{x}_{h,c}^{s,jw} + lm_h^{jw}] + (\tilde{a}_h^s - \tilde{b}_h^s)\tilde{c}_h^s\} \quad (33)$$

تابع هدف (۳۳) مشتق‌پذیر اما غیر خطی است. در نهایت با تعریف متغیرهای کمکی v_h در ساعات‌های $\forall h \in P$ و $\tilde{v}_h^{s,jw}$ در ساعات‌های $\forall h \in H/P$ تابع هدف (۳۳) بدین صورت بازنویسی می‌شود

$$\min \sum_{h=1}^{NP} v_h + \sum_{s \in \Omega_s} \sum_{jw \in \Omega_{jw}} \sum_{h=NP+1}^{NH} \pi_s \times \pi_{jw} \times \tilde{v}_h^{s,jw} \quad (34)$$

$$a_h \sum_{c \in C} x_{h,c} \leq v_h, \quad \forall h \in P \quad (35)$$

$$b_h \sum_{c \in C} x_{h,c} + (a_h - b_h)c_h \leq v_h, \quad \forall h \in P \quad (36)$$

$$\tilde{a}_h^s [\sum_{c \in C} \tilde{x}_{h,c}^{s,jw} + lm_h^{jw}] \leq \tilde{v}_h^{s,jw}, \quad \forall h \in H/P \quad (37)$$

$$\tilde{b}_h^s [\sum_{c \in C} \tilde{x}_{h,c}^{s,jw} + lm_h^{jw}] + (\tilde{a}_h^s - \tilde{b}_h^s)\tilde{c}_h^s \leq \tilde{v}_h^{s,jw}, \quad \forall h \in H/P \quad (38)$$

تابع هدف (۳۴) برخلاف توابع هدف (۱۸) و (۳۳) خطی و مشتق‌پذیر است و بنابراین (۳۴) تا (۳۸) جایگزین (۱۸) در مسئله بهینه‌سازی معادل قطعی می‌شوند و در نهایت این مسئله با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی حل می‌گردد.

از طرفی تابع هزینه اقتصادی سیستم متشکل از توابع هزینه برای هر

رابطه (۱۸) نشان‌دهنده کل هزینه مورد انتظار پرداختی مصرف‌کننده در افق زمان‌بندی و کمینه‌سازی آن، هدف برنامه زمان‌بندی است. بخش اول این عبارت هزینه قطعی را در ساعات‌هایی نشان می‌دهد که قیمت و بار قطعی $\forall h \in P$ هستند. این بخش از حاصل ضرب $\lambda_h(\cdot)$ که تابع قیمت‌گذاری عمومی ارائه‌شده در (۱۰) است، در مقدار بار آن ساعت به دست آمده است. در این بخش، نشان‌دهنده متغیر تصمیم مرحله اول است که میزان مصرف انرژی هر وسیله کنترل‌پذیر c را در ساعت $\forall h \in P$ نشان می‌دهد. بخش دوم این عبارت نیز بیانگر هزینه مورد انتظار در ساعات‌هایی است که قیمت و بار دارای عدم قطعیت هستند $(\forall h \in H/P)$. این بخش نیز از حاصل $\tilde{\lambda}_h^{s,jw}$ که تابع قیمت‌گذاری عمومی ارائه‌شده در (۱۶) در هر سناریو است، در مقدار بار آن ساعت به ازای هر سناریو و همین‌طور احتمالات متناظر با هر سناریو به دست آمده است. $\tilde{X}_{h,c}^{s,jw}$ نشان‌دهنده متغیر تصمیم مرحله دوم است که میزان مصرف انرژی هر وسیله کنترل‌پذیر c را در ساعت $\forall h \in H/P$ و در هر سناریو نشان می‌دهد. تابع هدف (۱۸) مسئله بهینه‌سازی برای 1 تا NP و در شکل فعلی آن، به دلیل مشتق‌ناپذیر بودن توابع قیمت‌گذاری $\lambda_h(\cdot), \tilde{\lambda}_h^{s,jw}(\cdot)$ قابل حل نیست. رابطه (۲۰) بردار زمان‌بندی مصرف انرژی مورد انتظار بارهای کنترل‌پذیر از ساعت $NP+1$ تا NH را نشان می‌دهد. رابطه (۲۱) نیز از کنار هم قرار گرفتن این دو بردار به دست می‌آید که بردار زمان‌بندی مصرف انرژی مورد انتظار بارهای کنترل‌پذیر را در افق زمان‌بندی NH ساعته نشان می‌دهد.

فرض می‌شود که بازه زمانی قابل برنامه‌ریزی هر وسیله کنترل‌پذیر معلوم است؛ به عبارت دیگر مصرف‌کننده α_c و β_c را تعیین می‌کند که به ترتیب ابتدا و انتهای بازه زمانی هستند که مصرف انرژی هر وسیله کنترل‌پذیر c در آن بازه، مجاز به زمان‌بندی است. یعنی هر وسیله کنترل‌پذیر می‌تواند در ساعات‌هایی از این بازه روشن شود که بیانگر کل انرژی مورد نیاز برای عملکرد هر وسیله کنترل‌پذیر است. برای مثال برای یک خودروی الکتریکی $E_c = 16 \text{ kWh}$ بیانگر آن است که این خودروی الکتریکی برای طی مسافت ۴۰ مایل نیاز به ۱۶ کیلووات ساعت شارژ دارد. در واقع E_c نشان‌دهنده کل انرژی مورد نیاز برای عملکرد هر وسیله کنترل‌پذیر در بازه مجاز زمان‌بندی $[\alpha_c, \beta_c]$ است.

بنابراین به منظور تأمین انرژی مورد نیاز هر وسیله کنترل‌پذیر نیاز است تا (۲۲) تا (۲۴) برقرار باشند. از آنجایی که این بازه مجاز زمان‌بندی می‌تواند در ساعات‌هایی که قیمت برق قطعی یا غیر قطعی است قرار گیرد، بنابراین سه رابطه تشکیل می‌شود. به طوری که در (۲۲) کل بازه مجاز زمان‌بندی در ساعات‌های $\forall h \in P$ قرار می‌گیرد؛ در (۲۳) بخشی از این بازه مجاز زمان‌بندی در ساعات‌های $\forall h \in P$ و بخش دیگر در ساعات‌های $\forall h \in H/P$ قرار می‌گیرد؛ در (۲۴) نیز کل بازه مجاز زمان‌بندی در ساعات‌های $\forall h \in H/P$ قرار می‌گیرد. در آن صورت، متغیر تصمیم نشان‌دهنده میزان مصرف بارهای کنترل‌پذیر با توجه به بازه‌ای که در آن قرار می‌گیرند، $x_{h,c}$ یا $\tilde{X}_{h,c}^{s,jw}$ خواهند بود. روابط (۲۵) و (۲۶) محدودیت مصرف انرژی ساعتی بارهای کنترل‌پذیر را در ساعاتی که قیمت قطعی است $(\forall h \in P)$ و (۲۷) و (۲۸) این محدودیت را در ساعاتی که قیمت و بار غیر قطعی‌اند $(\forall h \in H/P)$ ، نشان می‌دهند. این محدودیت بیانگر آن است که بازه‌ای که بارهای کنترل‌پذیر می‌توانند روشن شوند $(h \in [\alpha_c, \beta_c])$ ، اگر روشن شوند، انرژی مصرفی ساعتی آنها بین بیشینه و کمینه توان مصرفی خود خواهد بود و اگر روشن نشوند، انرژی مصرفی ساعتی آنها صفر خواهد بود. روابط (۲۹) و (۳۰) نیز به ترتیب محدودیت اعمالی از جانب شرکت برق یا خرده‌فروش را روی کل

$$C_{Emission} = \alpha_{CO_2} (P_{MT}(t) \times E_{MT}^{CO_2}(t) + P_{Grid}(t) \times E_{Grid}^{CO_2}(t)) + \alpha_{SO_2} (P_{MT}(t) \times E_{MT}^{SO_2}(t) + P_{Grid}(t) \times E_{Grid}^{SO_2}(t)) + \alpha_{NO_x} (P_{MT}(t) \times E_{MT}^{NO_x}(t) + P_{Grid}(t) \times E_{Grid}^{NO_x}(t)) \quad (47)$$

$$\min f_r(x) = \sum_{t=1}^{N_t} C_{Emission} \quad (48)$$

که در آن $E_{DG_i}(t)$ ، $E_{sj}(t)$ و $E_{Grid}(t)$ به ترتیب مقدار انتشار آلاینده‌گی در kg/MWh^{-1} برای هر ژنراتور، دستگاه ذخیره‌سازی و شرکت برق در دوره t است. بخش اقتصادی تابع هدف پیشنهادی از مجموع هزینه‌های بهره‌برداری ریزشکبه و هزینه‌های انتشار آلاینده‌گی منابع تأمین‌کننده توان ریزشکبه تشکیل شده است. تابع هدف اقتصادی با (۴۹) مدل‌سازی گردیده که باید مینیمم شود

$$f_E = \min \sum_{t=1}^{T} \{f_1 + f_r\} \quad (49)$$

۲-۵ الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام سالپ

برای حل مسئله بهینه‌سازی (۴۹) از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام سالپ استفاده شده است. سالپ یک آب‌دزدک دریایی لوله‌شکل و شناور است که با انقباض تن خود و پمپ‌کردن آب از میان بدن ژلاتینی‌اش در آب حرکت می‌کند (شکل ۱). یکی از جالب‌ترین رفتارهای سالپ‌ها که در این الگوریتم استفاده شده است، رفتار ازدحامی و جمعی است. در عمق اقیانوس‌ها سالپ‌ها اغلب به صورت گروهی هستند که زنجیره سالپ نامیده می‌شوند. به منظور مدل‌سازی ریاضی زنجیره سالپ‌ها، در ابتدا جمعیت به دو دسته تقسیم می‌شود: رهبر و دنبال‌کنندگان. رهبر، سالی است که در ابتدای زنجیره وجود دارد در حالی که بقیه سالپ‌ها به عنوان دنبال‌کنندگان لحاظ می‌شوند.

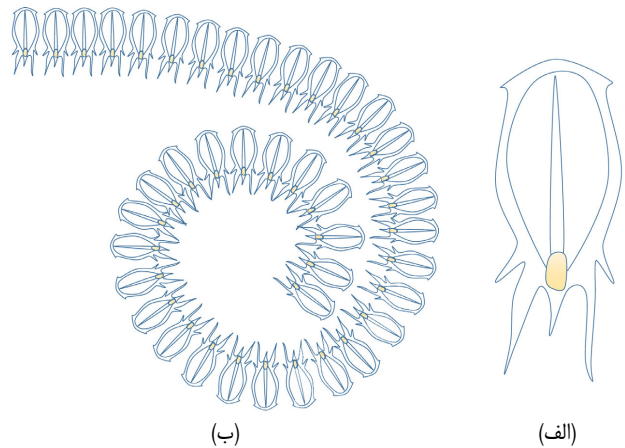
مشابه سایر روش‌های مبتنی بر ازدحام، موقعیت سالپ‌ها در یک فضای جستجوی n بعدی تعریف شده است در حالی که n با تعداد متغیرهای مسئله مورد نظر برابر است. بنابراین موقعیت تمام سالپ‌ها در یک ماتریس دوبعدی به نام x ذخیره می‌شود. همچنین فرض می‌گردد که یک منبع غذایی به نام F در فضای جستجو به عنوان هدف گروه سالپ‌ها وجود دارد.

۲-۵-۱ الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام سالپ

عمدتاً به دلیل این که دسترسی به محل زندگی این گونه موجودات و نگهداری آنها در محیط آزمایشگاه سخت است، تحقیقات بیولوژیکی در مورد این موجودات در مراحل اولیه خود می‌باشد. یکی از جالب‌ترین رفتارهای سالپ‌ها که در این الگوریتم استفاده شده است، رفتار ازدحامی و جمعی آنهاست. در عمق اقیانوس‌ها سالپ‌ها اغلب به صورت گروهی هستند که زنجیره سالپ نامیده می‌شوند. این زنجیره در شکل ۱-ب نمایش داده شده است. دلیل این نوع رفتار هنوز مشخص نیست اما بعضی از محققان معتقدند دلیل آن، جابه‌جایی بهتر با استفاده از تغییرات هماهنگ سریع است.

۲-۵-۲ مدل ریاضی برای حرکت زنجیره‌ای سالپ‌ها

مدل ریاضی رفتار گروهی سالپ‌ها در مقالات اندکی مشاهده شده و همچنین به منظور حل مسئله بهینه‌سازی کمتر در مراجع دیده می‌شود، در حالی که حرکت‌های گروهی زنبور عسل، مورچگان و ماهی‌ها به طور گسترده مدل‌سازی شده و به منظور حل مسایل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. در این بخش در ابتدا مدل ریاضی زنجیره سالپ‌ها به



شکل ۱: (الف) یک سالپ تکی و (ب) ازدحام سالپ‌ها (زنجیره‌ای از سالپ) [۲۵].

واحد تولید، هزینه‌های روشن و خاموش کردن، هزینه‌های ذخیره انرژی و تبادل با واحد، انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه مشارکت در برنامه پاسخ‌گویی بار می‌باشد. این توابع به صورت زیر بیان می‌شود

$$\min f_1(x) = \sum_{t=1}^T (cost_{DG}(t) \times ST_{DG}(t) + cost_s(t) + cost_{Grid}(t) + cost_{DR}(t)) \quad (39)$$

$$cost_{DG}(t) = \sum_{i=1}^{Ng} u_i(t) P_{DG_i}(t) B_{DG_i}(t) \quad (40)$$

$$ST_{DG}(t) = \sum_{i=1}^{Ng} S_{DG_i} |u_i(t) - u_i(t-1)| \quad (41)$$

$$cost_s(t) = \sum_{j=1}^{Ng} [u_j(t) P_{S_j}(t) + S_{S_j}(t) \left| \begin{matrix} u_j(t) \\ -u_j(t-1) \end{matrix} \right|] \quad (42)$$

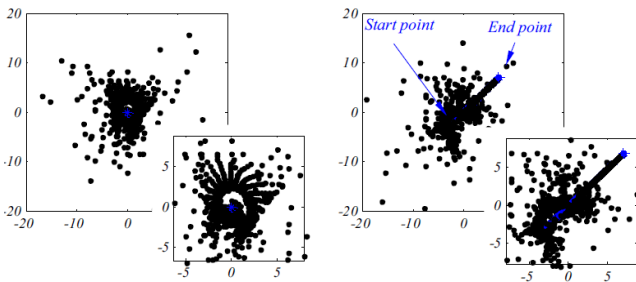
$$cost_{Grid}(t) = u_{buy}(t) P_{Grid-Buy}(t) B_{Grid-Buy}(t) - u_{sell}(t) P_{Grid-Sell}(t) B_{Grid-Sell}(t) \quad (43)$$

$$cost_{DR}(t) = P_{DR}(t) B_{DR}(t) \quad (44)$$

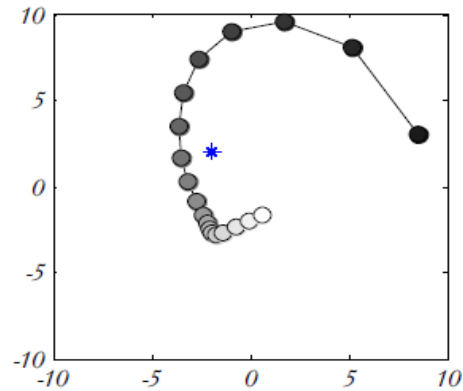
$$P_{DR}(t) = \sum_r RC(r, t) + \sum_c CC(c, t) + \sum_i IC(i, t) \quad (45)$$

که در آن $P_{DG_i}(t)$ و $P_{PL_j}(t)$ به ترتیب خروجی توان حقیقی ژنراتور i ام و z ام ذخیره‌ساز انرژی در دوره t ، $B_{DG_i}(t)$ و $B_{PL_j}(t)$ پیشنهادی تولید پراکنده‌ها و ذخیره‌ساز انرژی در دوره t و $S_{DG_i}(t)$ و $S_{PL_j}(t)$ نشان‌دهنده هزینه‌های روشن و خاموش کردن برای DG ، i ام و ذخیره‌ساز انرژی z ام است. $P_{Grid-Buy}(t)$ و $P_{Grid-Sell}(t)$ توان اکتیو خرید و فروش با شرکت برق در دوره t و $B_{Grid-Buy}(t)$ و $B_{Grid-Sell}(t)$ پیشنهاد خرید و فروش با شرکت برق در دوره t می‌باشد. $P_{DR}(t)$ و $B_{DR}(t)$ توان اکتیو و قیمت پیشنهادی برای مشارکت در تأمین‌کنندگان پاسخ‌گویی بار در دوره t است. همچنین تابع انتشار آلاینده‌ها شامل CO_2 (دی‌اکسید کربن)، SO_2 (دی‌اکسید گوگرد) و NO_x (دی‌اکسید نیتروژن) در نظر گرفته شده است

$$\sum_{t=1}^T Emission(t) = \sum_{t=1}^T \{emission_{DG}(t) + emission_{Grid}(t)\} = \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^{Ng} [u_i(t) P_{DG_i}(t) E_{DG_i}(t)] + P_{Grid}(t) E_{Grid}(t) \right\} \quad (46)$$



شکل ۳: روند جستجو حول منبع غذایی ساکن و سیار در فضای دوبعدی با ۱۰۰ تکرار [۲۵].



شکل ۲: جابه‌جایی نوعی زنجیره سالپ [۲۵].

که x_j^i موقعیت سالپ i امین دنبال‌کننده را در j امین بعد می‌دهد و $i \geq 2$ است. با معادلات فوق زنجیره سالپ می‌تواند شبیه‌سازی شود.

۲-۵-۳ شبیه‌سازی ازدحام

به منظور بررسی تأثیر مدل ریاضی مطرح‌شده در بخش قبل، یک شبیه‌سازی در این بخش صورت گرفته است. ۲۰ سالپ به صورت تصادفی با یک منبع غذایی ثابت و یا در حال حرکت در یک فضای جستجو قرار گرفته‌اند. موقعیت زنجیره سالپ و روند حرکتی هر سالپ در شکل ۲ نشان داده شده است. باید توجه داشت که نقاط آبی در شکل نشان‌دهنده منابع غذایی و دایره‌های پرشده با رنگ تیره، سالپ رهبر است. سالپ‌های دنبال‌کننده رهبر بر اساس موقعیت آنها در زنجیره سالپ با توجه به لیدر رنگ خاکستری دارند.

با بررسی رفتار زنجیره سالپ در طی ۹ تکرار متوالی می‌توان مشاهده کرد که ازدحام سالپ‌ها می‌تواند شکل گرفته و با استفاده از معادلات مطرح‌شده به درستی بعد از تکرار اول حرکت کند. همچنین می‌توان مشاهده نمود که سالپ رهبر موقعیت خود را حول منبع غذا تغییر داده و سالپ‌های دنبال‌کننده به تدریج در تکرارهای متوالی آن را دنبال می‌کنند. همچنین این مدل می‌تواند برای شبیه‌سازی‌های فضای دو یا سه‌بعدی استفاده گردد و می‌توان بیان کرد که این مدل، رفتاری که در این فضا داراست را در فضاهای n بعدی نیز خواهد داشت.

شکل ۳ نیز روند موقعیت سالپ‌ها حول منبع غذایی ثابت و سیار را در فضای دوبعدی بعد از ۱۰۰ تکرار نشان می‌دهد و نقاط جستجو شده حول منبع غذایی ثابت نشان می‌دهد که سالپ‌ها به طور مؤثر در فضای جستجو حرکت می‌کنند. توزیع نقاط منطقی است و نشان می‌دهد که مدل مطرح‌شده قادر به کشف و استخراج فضای دارای منبع غذایی ثابت و یا سیار است. همچنین در این شکل می‌توان مشاهده کرد که مدل ریاضی مطرح‌شده نیاز به سالپ‌هایی در زنجیره سالپ دارد تا منبع غذایی در حال حرکت را تعقیب کنند. توزیع نقاط جستجو شده پیرامون نقطه شروع بیشتر از نقطه پایانی است. این اتفاق به دلیل پارامتر c_1 است که اکتشاف و استخراج را کنترل می‌کند. این نتایج نشان می‌دهد که مدل زنجیره سالپ قادر به اکتشاف و استخراج فضای حول منبع غذایی ساکن و سیار است.

۲-۵-۴ الگوریتم ازدحام سالپ تک‌هدفه

نیاز به گفتن نیست که مدل ریاضی برای شبیه‌سازی زنجیره سالپ نمی‌تواند به طور مستقیم برای حل مسئله بهینه‌سازی به کار گرفته شود. به عبارت دیگر نیاز است تا مدل برای استفاده در حل مسایل بهینه‌سازی کمی پیچیده‌تر از این شود. هدف نهایی بهینه‌سازهای تک‌هدفه تعیین مقدار بهینه کلی است. در مدل ازدحام سالپ، سالپ‌های دنبال‌کننده سالپ رهبر را پیروی می‌کنند و همچنین سالپ رهبر به سمت منبع غذایی حرکت می‌کند. اگر مقدار بهینه کلی به جای منبع غذایی قرار گیرد، در

منظور حل مسئله بهینه‌سازی مطرح می‌شود. همان طور که نام این سالپ‌ها بدان اشاره دارد، رهبر کل گروه را راهنمایی کرده و دنبال‌کنندگان یکدیگر را دنبال می‌کنند. در واقع یا به طور مستقیم و یا به طور غیر مستقیم از رهبر پیروی می‌کنند.

مشابه سایر روش‌های مبتنی بر ازدحام، موقعیت سالپ‌ها در یک فضای جستجوی n بعدی تعریف شده است در حالی که n با تعداد متغیرهای مسئله مورد نظر برابر می‌باشد. بنابراین موقعیت تمام سالپ‌ها در یک ماتریس دوبعدی که x نامیده می‌شود ذخیره می‌گردد. همچنین فرض می‌شود که یک منبع غذایی به نام F در فضای جستجو به عنوان هدف گروه سالپ‌ها وجود دارد. آپدیت موقعیت رهبر مطابق با رابطه زیر تعریف می‌شود

$$x_j^i = \begin{cases} F_j + c_1((ub_j - lb_j)c_r + lb_j), & c_r \geq \frac{1}{2} \\ F_j - c_1((ub_j - lb_j)c_r + lb_j), & c_r \leq \frac{1}{2} \end{cases} \quad (50)$$

که در آن x_j^i موقعیت اولین سالپ (رهبر) در j امین بعد، F_j موقعیت منبع غذایی در j امین بعد و ub_j و lb_j به ترتیب مقدار حداکثر و حداقل بعد j ام هستند. c_1 ، c_r و c_2 نیز اعداد تصادفی می‌باشند.

رابطه (۵۲) نشان می‌دهد که فقط موقعیت رهبر با توجه به منبع غذایی به روز می‌شود. ضریب c_1 مهم‌ترین پارامتر در الگوریتم بهینه‌سازی سالپ است زیرا مطابق رابطه زیر اکتشاف و استخراج را متعادل می‌کند

$$x_j^i = F_j \pm c_1((ub_j - lb_j)c_r + lb) \quad (51)$$

$$c_1 = \frac{1}{2} e^{-\frac{t}{L}} \quad (52)$$

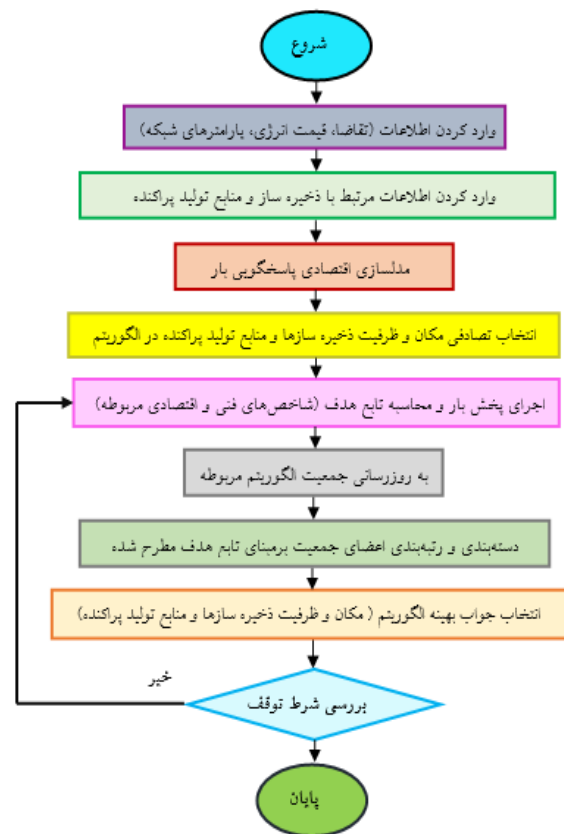
که در آن L تکرار حال حاضر و L حداکثر تکرارهای الگوریتم می‌باشد. پارامتر c_1 و c_2 اعداد تصادفی هستند که به طور یکنواخت در بازه $[0, 1]$ تولید شده‌اند. در حقیقت آنها تعیین می‌کنند که موقعیت بعدی در j امین بعد باید به سمت مثبت بی‌نهایت، منفی بی‌نهایت و یا اندازه گام باشد. به روز شدن موقعیت دنبال‌کنندگان نیز مطابق رابطه زیر است

$$x_j^i = \frac{1}{\nu} at^2 + \nu t \quad (53)$$

x_j^i موقعیت سالپ i امین دنبال‌کننده را در j امین بعد می‌دهد و $i \geq 2$ است. t زمان و ν سرعت اولیه می‌باشد. همچنین $a = v_{final}/\nu$ است در حالی که $\nu = (x - x_0)/t$ به دلیل این که زمان در بهینه‌سازی تکرار می‌شود، اختلاف بین تکرارهای برابر با ۱ در نظر گرفته شده و $\nu = 0$ در نظر گرفته می‌شود و این معادله می‌تواند به صورت زیر خلاصه‌سازی شود

$$x_j^i = \frac{1}{\nu} (x_j^i - x_j^{i-1}) \quad (54)$$

- الگوریتم ازدحام سالپ موقعیت سالپ رهبر را تنها با توجه به منبع غذایی به روز می‌کند که همان بهترین پاسخ به دست آمده تا کنون است. بنابراین رهبر همیشه در حول آن اکتشاف و استخراج می‌کند.
- الگوریتم ازدحام سالپ موقعیت دنبال‌کنندگان را با توجه به یکدیگر به روز می‌کند که در نهایت آنها به تدریج به سمت سالپ رهبر حرکت می‌نمایند.
- حرکت تدریجی سالپ‌های دنبال‌کننده مانع گرافتادن راحت الگوریتم ازدحام سالپ در نقاط بهینه محلی می‌شود.
- پارامتر c_1 به طور تطبیقی با تکرارهای بیشتر کاهش می‌یابد، بنابراین الگوریتم ازدحام سالپ ابتدای فضای جستجو را اکتشاف و سپس استخراج می‌کند.
- الگوریتم ازدحام سالپ تنها یک پارامتر کنترل‌کننده اصلی دارد (c).^(۱)
- الگوریتم ازدحام سالپ برای اجرا بسیار ساده و راحت است. این ویژگی‌ها، الگوریتم ازدحام سالپ را از نظر تئوری و بالقوه قادر به حل مسایل بهینه تک‌هدفه با فضای جستجوی ناشناخته می‌سازد. روند تطبیقی این الگوریتم به آن اجازه می‌دهد که از پاسخ‌های محلی دوری کرده و در نهایت یک تخمین صحیح از بهترین پاسخ به دست آمده در طی دوره بهینه‌سازی فراهم کند. مزایای ذکر شده فوق به صورت بالقوه به ازدحام سالپ اجازه می‌دهد تا بهتر از الگوریتم‌های مشابه هم‌رده خود باشد. به هر حال با تمام این ویژگی‌ها نمی‌توان بر طبق نظریه NFL آن را برای تمام مسایل بهینه‌سازی تضمین کرد.



شکل ۴: روند اجرای طرح پیشنهادی.

۲-۶ روندنمای روش پیشنهادی

روندنمای اجرای طرح پیشنهادی در شکل ۴ آمده است. به منظور جایابی و تعیین اندازه هم‌زمان ذخیره‌سازهای انرژی و DGها در شبکه، ابتدا داده‌های ابتدایی مربوط به شبکه، بار، قیمت انرژی ساعتی، ذخیره‌سازها، DGها و پارامترهای مربوط به توابع توزیع احتمالی وارد می‌شود. سپس پس از مدل‌سازی پاسخ‌گویی بار جمعیت اولیه، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام سالپ، مکان و ظرفیت‌های مورد نظر را به طور تصادفی تعیین و پس از آن پخش بار تابع تعریف‌شده در سناریوی مربوط را محاسبه می‌کند. مطابق با میزان تابع هدف به دست آمده، به جمعیت موجود امتیاز داده و جمعیت خود را به روز می‌کند. با در نظر گرفتن قیود این روند تکرار شده تا جواب بهینه به دست آید.

۳- نتایج شبیه‌سازی

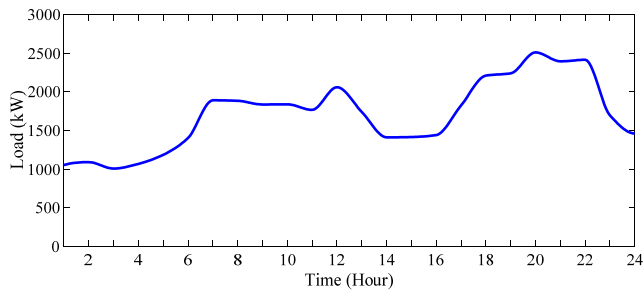
همان‌طور که بیان شد، هدف از انجام این مطالعه بهره‌برداری یکپارچه از منابع انرژی پراکنده در شبکه توزیع فعال است. جهت شبیه‌سازی و بهینه‌سازی تأمین بارها و ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی با در نظر گرفتن برآورده شدن اهداف فنی (نظیر کاهش تلفات و بهبود ولتاژ) و اهداف اقتصادی (نظیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و سوخت منابع انرژی پراکنده، هزینه ذخیره‌سازهای انرژی و خرید انرژی از شبکه بالادستی) از الگوریتم سالپ استفاده شده است. همچنین در سیستم مدیریت انرژی ارائه‌شده به منظور عملکرد بهینه شبکه توزیع فعال در کوتاه‌مدت در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر دارای عدم قطعیت سعی شده تا با اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار مبتنی بر تشویق^(۱) (IBDR) هزینه‌ها کاهش یابد.

نتیجه زنجیره سالپ‌ها به طور خودکار به سمت آن حرکت خواهند کرد، اما مشکل این است که مقدار بهینه کلی مسایل بهینه‌سازی مشخص نیست. در این مورد فرض می‌شود که بهترین پاسخ به دست آمده تا به حال همان پاسخ بهینه کلی است و به عنوان منبع غذایی در نظر گرفته می‌شود تا توسط زنجیره سالپ تعقیب شود.

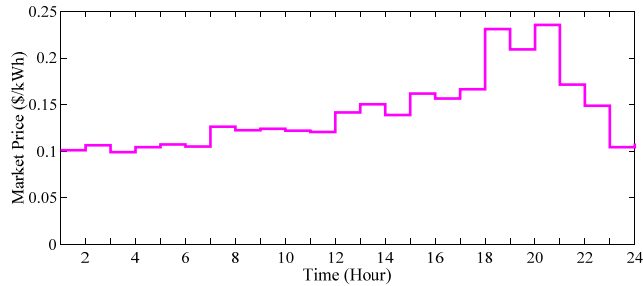
الگوریتم سالپ با تقریب‌زنی مقدار بهینه کلی شروع می‌شود و چندین سالپ را با موقعیت‌های تصادفی مقداردهی می‌کند. سپس برآزندگی هر سالپ را محاسبه می‌نماید و سالی با بهترین برآزندگی را پیدا و موقعیت آن را به عنوان منبع غذایی تعیین کرده تا توسط زنجیره سالپ دنبال شود. در همین حال مقدار c_1 به روز می‌شود. برای هر بعد، موقعیت سالپ‌های رهبر و دنبال‌کننده با استفاده از روابط ذکر شده به روز می‌گردد. اگر هر سالی از فضای جستجو خارج شود، به محدوده جستجو باز خواهد گشت. تمام این مراحل به جز مرحله مقداردهی اولیه به صورت تکراری تا زمانی که معیارهای نهایی برآورده شود اجرا خواهند شد.

باید در نظر داشت که منبع غذایی در طول روند بهینه‌سازی به دلیل این که زنجیره سالپ به احتمال زیاد ممکن است با اکتشاف و استخراج پاسخ بهتری را پیدا کند، به روز خواهد شد. شبیه‌سازی انجام‌شده در بخش قبل نشان داد که زنجیره سالپ مدل‌شده به طور ذاتی قادر به تعقیب منبع غذایی سیار است. بنابراین زنجیره سالپ به طور ذاتی قادر به حرکت به سمت مقدار بهینه نهایی که در طول تکرارهای مختلف تغییر خواهد کرد می‌باشد. برای مشاهده چگونگی این که مدل زنجیره سالپ و الگوریتم ازدحام سالپ به طور مؤثر قادر به حل مسئله بهینه‌سازی است، بعضی از ویژگی‌های آن به صورت زیر خلاصه شده است:

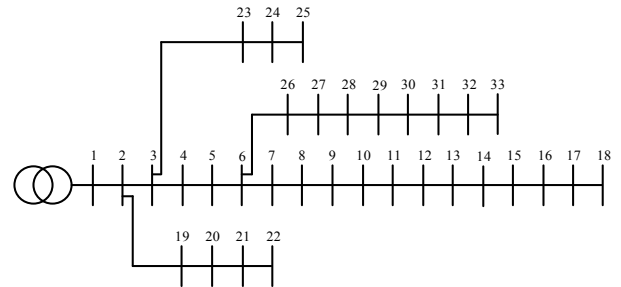
- الگوریتم ازدحام سالپ بهترین پاسخ به دست آمده تا به حال را به عنوان منبع غذایی متغیر ذخیره می‌کند و بنابراین هیچ زمانی آن را از دست نمی‌دهد، حتی اگر کل جمعیت سالپ‌ها نابود شوند.



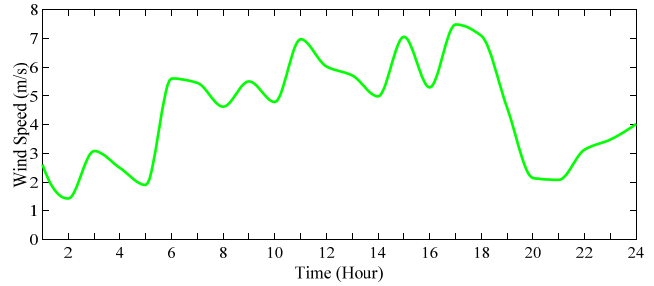
شکل ۸: منحنی پروفیل بار مصرفی.



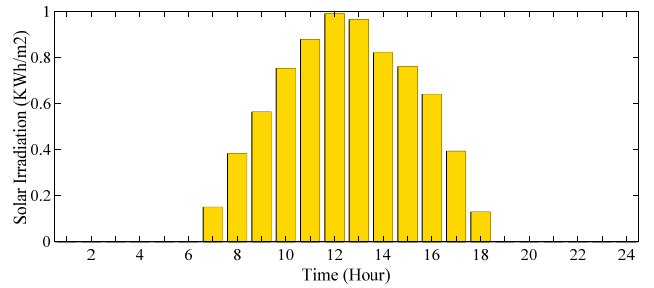
شکل ۹: منحنی قیمت بازار برق.



شکل ۵: شبکه ۳۳ شین استاندارد IEEE مورد مطالعه [۲۶].



شکل ۶: میزان سرعت باد در بازه ۲۴ ساعت مورد مطالعه.



شکل ۷: میزان تابش خورشید در بازه ۲۴ ساعت مورد مطالعه.

سناریوی ۵) بهره‌برداری هماهنگ منابع DERS و شبکه جهت بهینه‌سازی تابع هدف با در نظر گرفتن برنامه‌های مختلف پاسخ‌گویی بار سیستم ۳۳ شین استاندارد IEEE مطابق شکل ۵ که یک سیستم شعاعی است برای مطالعه در نظر گرفته شده است [۲۶]. اطلاعات این شبکه در پیوست مقاله (جدول پ-۱) آورده شده است. برای شبیه‌سازی سیستم و به کارگیری الگوریتم سالپ از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. برای بررسی اطلاعات بار، آب و هوای شبکه توزیع مورد مطالعه از اطلاعات سایت شبکه مشابه در شهر سجزی و در ۳۵ کیلومتری بخش مرکزی اصفهان استفاده شده است. این شبکه در طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۷ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۴۲ دقیقه شمالی با ارتفاع ۱۵۴۲ متر از سطح دریای آزاد واقع شده است. شکل‌های ۶ تا ۸ به ترتیب نمونه‌های تصادفی سرعت باد، تابش خورشید و همچنین کل توان مصرفی شبکه را برای هر ساعت نشان می‌دهند. قیمت لحظه‌ای بازار برق نیز مطابق شکل ۹ در نظر گرفته شده است.

۳-۱- تأمین کل توان مصرفی توزیع فعال توسط شبکه بالادست

در حالت اول تمام توان مورد نیاز مصرف‌کنندگان در ریزشکه توسط شبکه بالادستی تأمین می‌گردد. در این حالت کل هزینه تأمین انرژی مصرف‌کنندگان در ۲۴ ساعت برابر ۶۴۱۰/۸۳۵۶ دلار می‌گردد که از این میزان ۶۰۲۳/۴۰۴۱ دلار مربوط به هزینه خرید انرژی از شبکه بالادستی و ۳۸۶/۷۶۶۵ دلار مربوط به هزینه ناشی از خسارت انتشار آلودگی است. میزان تلفات سیستم در این سناریو برابر ۲۱۰/۹ کیلووات خواهد بود. شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ به ترتیب وضعیت ولتاژ شین‌های سیستم، وضعیت تأمین توان و تعادل توان، هزینه بهره‌برداری سیستم و هزینه هر کیلووات برق مصرفی توسط مصرف‌کننده را در ۲۴ ساعت نشان می‌دهند.

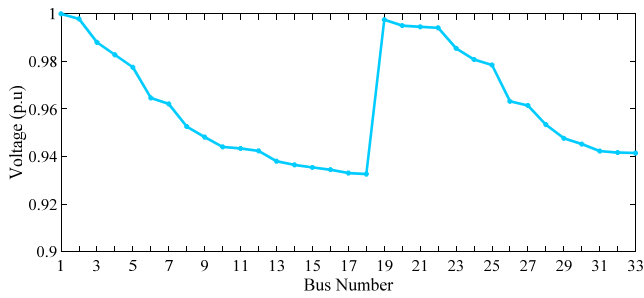
۳-۲- جابجایی و بهره‌برداری هماهنگ منابع DG و شبکه

در حالت دوم منابع DG حاضر در شبکه نیز در تأمین بار شرکت می‌کنند. به طور کلی در شرایط بازار برق زمانی که منابع تجدیدپذیر

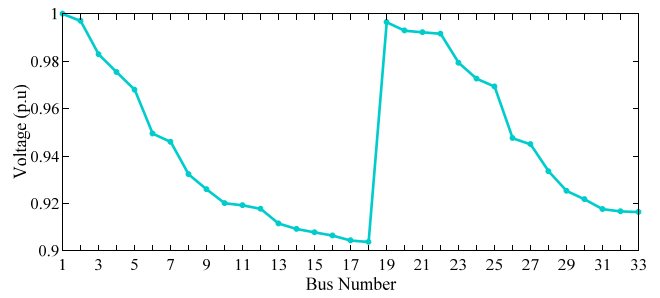
به دلایل فنی و اقتصادی متعدد و همچنین تأثیرات زیست‌محیطی نیروگاه‌های تجدیدپذیر، تلاش‌های زیادی به منظور نصب منابع انرژی پراکنده (DERS) در شبکه صورت گرفته که جابجایی آن تأثیر بسزایی در بالا بردن کیفیت پارامترهای شبکه برق دارد. در واقع جابجایی صحیح و تعیین ظرفیت به اندازه DERS می‌تواند در هزینه‌های کلی و قابلیت اطمینان بالاتر اثرات مفیدی بگذارد. در نتیجه جابجایی و مقدار تولید DERS ضرورت دارد.

هدف اصلی این است که مکان و مقدار تولید DERS به گونه‌ای تعیین شود که تابع هدف بیان‌شده کمینه گردد. تابع هدف ارائه‌شده در واقع ترکیبی از مسایل فنی و هزینه‌های بهره‌برداری و انتشار گازهای گلخانه‌ای است که باید در کمترین مقدار خود قرار بگیرد. همچنین ارائه برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مبتنی بر تشویق مصرف‌کنندگان به منظور کاهش مصرف انرژی الکتریکی در شبکه توزیع فعال در پنج سناریو به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

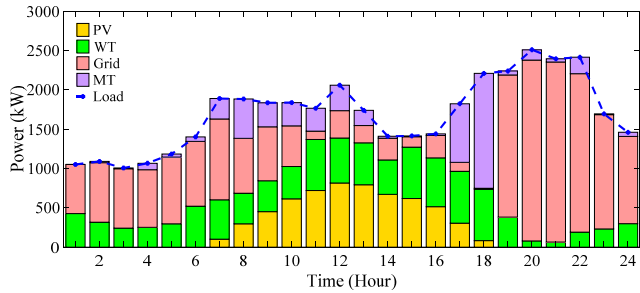
- سناریوی ۱) تأمین کل توان مصرفی توزیع فعال توسط شبکه بالادست
- سناریوی ۲) جابجایی و بهره‌برداری هماهنگ منابع DG و شبکه
- سناریوی ۳) جابجایی و بهره‌برداری ذخیره‌سازهای انرژی و شبکه (عدم حضور منابع انرژی تجدیدپذیر)
- سناریوی ۴) بهره‌برداری هماهنگ منابع DERS و شبکه جهت بهینه‌سازی تابع هدف (بدون بارهای پاسخ‌گویی بار)



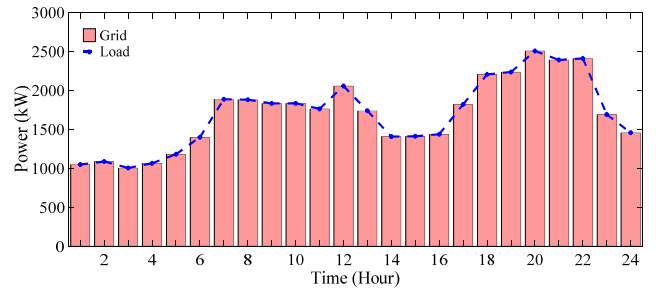
شکل ۱۵: ولتاژ شین‌های سیستم (سناریوی ۲).



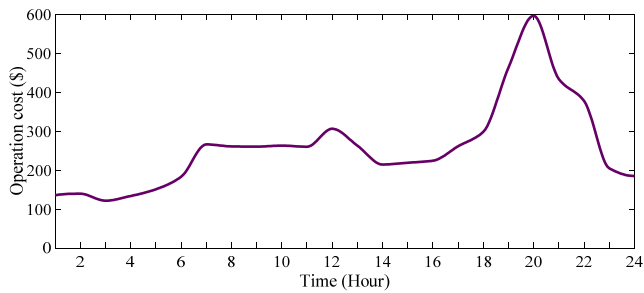
شکل ۱۰: ولتاژ شین‌های سیستم (سناریوی ۱).



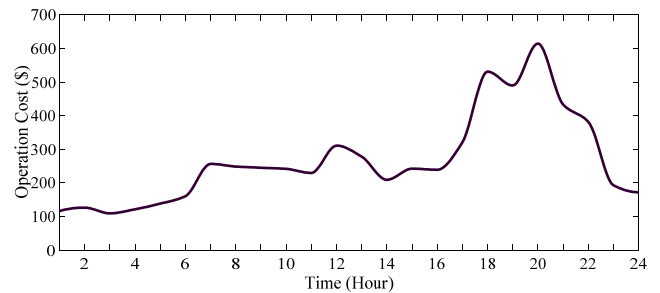
شکل ۱۶: وضعیت مشارکت منابع تأمین‌کننده توان و تعادل توان (سناریوی ۲).



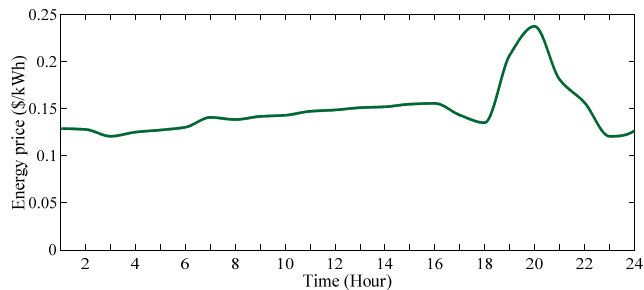
شکل ۱۱: وضعیت مشارکت منابع تأمین‌کننده توان و تعادل توان (سناریوی ۱).



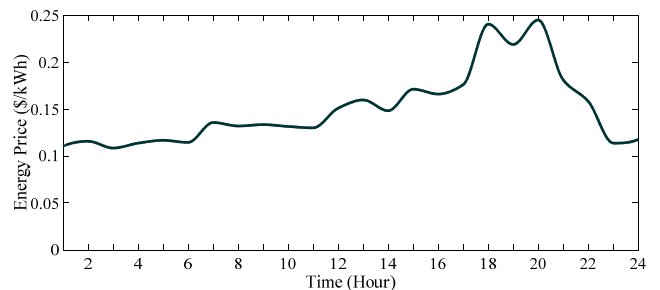
شکل ۱۷: هزینه بهره‌برداری سیستم در ۲۴ ساعت (سناریوی ۲).



شکل ۱۲: هزینه بهره‌برداری سیستم در ۲۴ ساعت (سناریوی ۱).

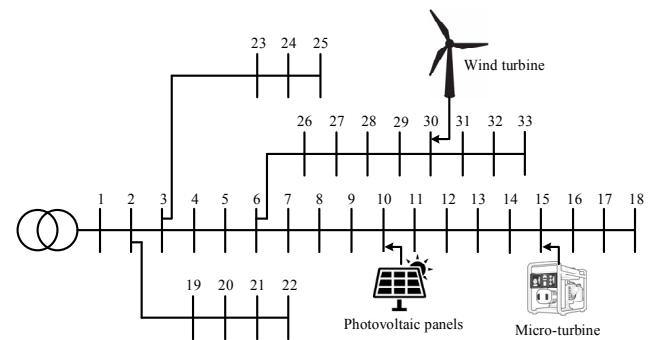


شکل ۱۸: هزینه هر کیلووات برق مصرفی توسط مصرف‌کننده در ۲۴ ساعت (سناریوی ۲).



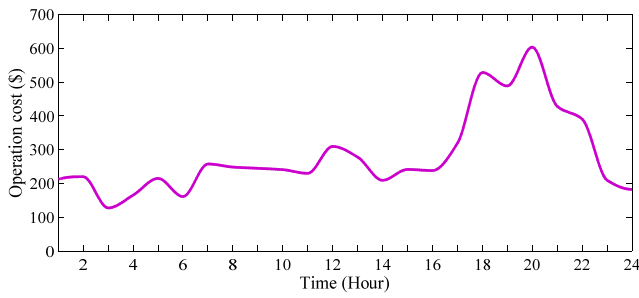
شکل ۱۳: هزینه هر کیلووات برق مصرفی توسط مصرف‌کننده در ۲۴ ساعت (سناریوی ۱).

برنامه‌ریزی مشارکت واحدها است. البته در بسیاری از بازارهای برق که سیاست‌های حمایتی جهت مشارکت انرژی‌های تجدیدپذیر دارند، شرایط خرید و فروش انرژی می‌تواند کمی متفاوت باشد. در این مقاله جهت بررسی دقیق تأثیر منابع DG هزینه‌های سرمایه‌گذاری واحدها در قیمت فروش انرژی این منابع به شبکه لحاظ شده و با ارائه یک برنامه حمایتی سعی گردیده تا استفاده حداکثری از منابع تجدیدپذیر صورت گیرد. ذکر است که توان‌های نامی نیروگاه‌هایی که به ظرفیت آن مربوط است جزء مجهول مسئله می‌باشد و باید توسط الگوریتم بهینه‌ساز تعیین گردد. شکل ۱۴ وضعیت جایابی منابع DG را بر روی شبکه تست مورد مطالعه نشان می‌دهد. شکل‌های ۱۵ تا ۱۸ به ترتیب وضعیت ولتاژ شین‌های سیستم، وضعیت تأمین توان و تعادل توان، هزینه بهره‌برداری سیستم و هزینه هر کیلووات برق مصرفی توسط مصرف‌کننده را در ۲۴ ساعت نشان می‌دهند.

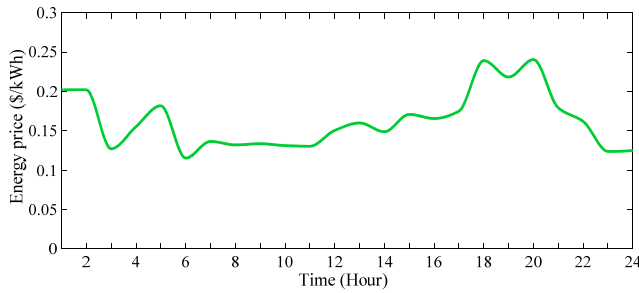


شکل ۱۴: وضعیت جایابی منابع DG بر روی سیستم ۳۳ شین استاندارد IEEE.

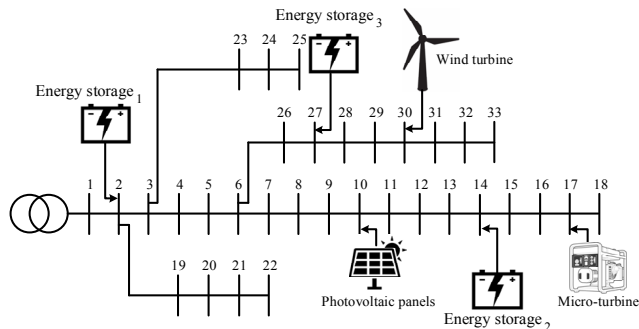
همچون منابع بادی و خورشیدی در تأمین توان ریزشبهه شرکت دارند، بهره‌بردار شبکه برق مازاد این منابع را با قیمتی کمتر از قیمت بازار خریداری می‌نماید. این امر به دلیل عدم قطعیت تولید توان این منابع در



شکل ۲۳: هزینه بهره‌برداری سیستم در ۲۴ ساعت (سناریوی ۳).

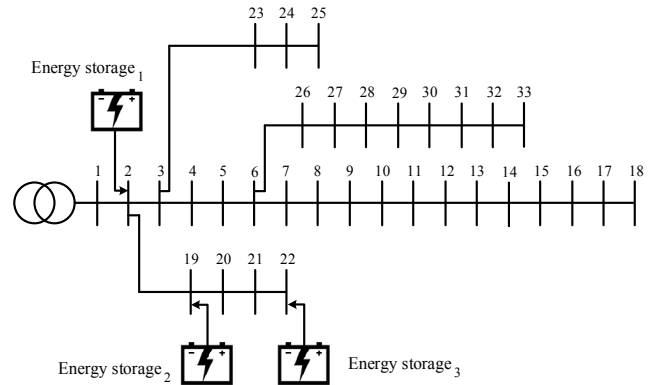


شکل ۲۴: هزینه هر کیلووات برق مصرفی توسط مصرف‌کننده در ۲۴ ساعت (سناریوی ۳).

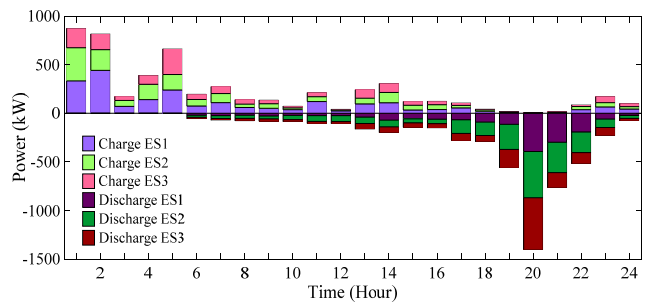


شکل ۲۵: وضعیت جابجایی ذخیره‌سازهای انرژی و منابع توزیع‌شده بر روی سیستم ۳۳ شین استاندارد IEEE.

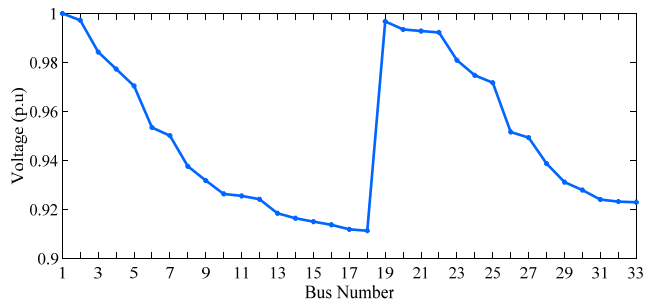
در این حالت تمام توان اصلی مورد نیاز مصرف‌کنندگان در شبکه توسط شبکه بالادستی تأمین می‌گردد. ذخیره‌سازهای انرژی نیز با شارژ و دشارژ در ساعات مختلف در برنامه مدیریت انرژی شبکه مشارکت دارند. در شکل ۲۰ شیوه مشارکت و حضور ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی در برنامه مدیریت انرژی شبکه نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌گردد ذخیره‌سازهای انرژی با توجه به قیمت بازار برق و سیاست تشویقی موجود ترجیح می‌دهند تا در ساعات کم‌باری شبکه که برق ارزان است، اقدام به شارژ نموده و در ساعات پرباری که قیمت برق گران است اقدام به دشارژ و فروش انرژی به شبکه نمایند. در این حالت کل هزینه انرژی مصرفی در ۲۴ ساعت برابر ۶۷۵۷٫۳۰۵۶ دلار می‌گردد که از این میزان ۵۶۸۴٫۲۶۹۶ دلار مربوط به هزینه خرید انرژی از شبکه بالادستی، ۹۷۳٫۴۷۱۷ دلار هزینه و سود ذخیره‌سازهای انرژی و ۳۷۶٫۷۵۴۷ دلار هزینه ناشی از خسارت انتشار آلودگی است. در این حالت میزان توان تأمین‌نشده، بار تغذیه‌نشده و توان مازاد سیستم نیز به ترتیب برابر ۰٫۶۲۰۲، ۴٫۵۱۸۹ و ۳۳٫۳۱۵۲ کیلووات خواهد بود. میزان تلفات سیستم در این حالت برابر ۱۹۸٫۰۱ کیلووات است. شکل‌های ۲۱ تا ۲۴ به ترتیب وضعیت ولتاژ شین‌های سیستم، وضعیت تأمین توان و تعادل توان، هزینه بهره‌برداری سیستم و هزینه هر کیلووات برق مصرفی توسط مصرف‌کننده را در ۲۴ ساعت نشان می‌دهند.



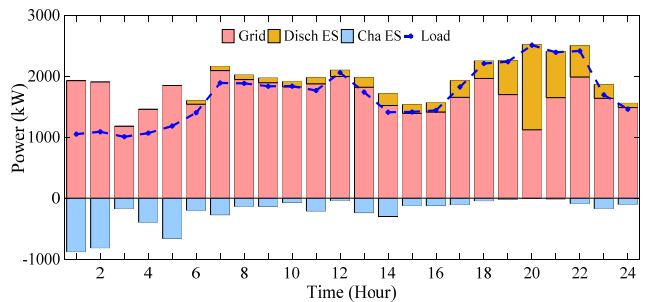
شکل ۱۹: وضعیت جابجایی ذخیره‌سازهای انرژی بر روی سیستم ۳۳ شین استاندارد IEEE.



شکل ۲۰: شیوه مشارکت و حضور ذخیره‌سازهای انرژی در ۲۴ ساعت (سناریوی ۳).



شکل ۲۱: ولتاژ شین‌های سیستم (سناریوی ۳).

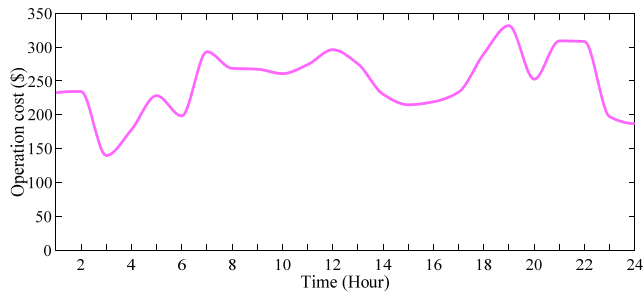


شکل ۲۲: وضعیت مشارکت منابع تأمین‌کننده توان و تعادل توان (سناریوی ۳).

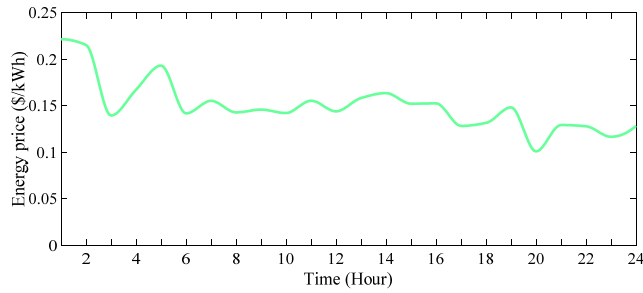
پارامترهای توربین بادی و نیروگاه خورشیدی به همراه پارامترهای تابع توزیع و پارامترهای مربوط به هزینه‌های DG در پیوست آورده شده است (جداول پ-۲ و پ-۳).

۳-۳ جابجایی و بهره‌برداری ذخیره‌سازهای انرژی و شبکه (عدم حضور منابع انرژی تجدیدپذیر)

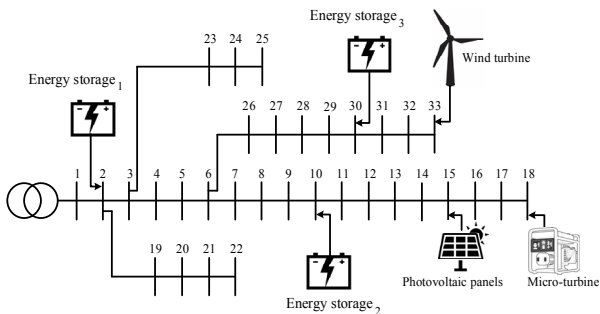
در حالت سوم تأثیر ظرفیت ذخیره‌سازهای انرژی در شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۱۹ وضعیت جابجایی ذخیره‌سازهای انرژی را بر روی شبکه تست مورد مطالعه نشان می‌دهد.



شکل ۳۰: هزینه بهره‌برداری سیستم در ۲۴ ساعت (سناریوی ۴).



شکل ۳۱: هزینه هر کیلووات برق مصرفی توسط مصرف‌کننده در ۲۴ ساعت (سناریوی ۴).

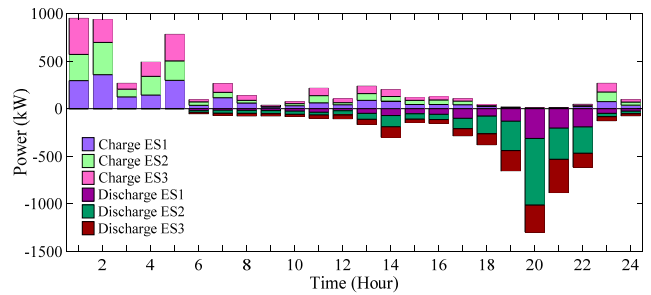


شکل ۳۲: وضعیت جایی ذخیره‌سازهای انرژی و منابع توزیع‌شده بر روی سیستم ۳۳ شین استاندارد IEEE.

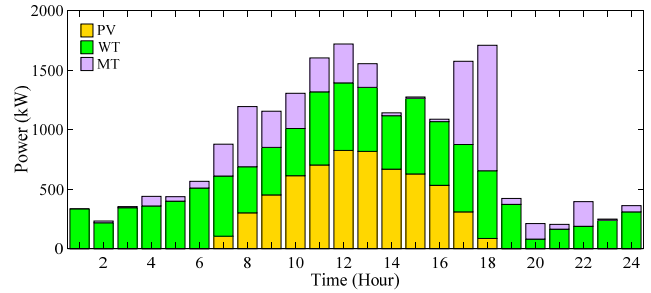
در برنامه‌ریزی انجام‌شده، شبکه بالادست با تولید ۲۰۴۵۱/۶۹۰۷ کیلووات انرژی سهم تأثیرگذاری در تأمین توان دارا خواهد بود. میزان تولید توان میکروتوربین در این حالت با کاهش نسبت به دو حالت قبل به ۴۶۸۰/۶۴۷۸ کیلووات رسیده است. کل هزینه انرژی و هزینه ناشی از آلودگی نیز با کاهش نسبت به سایر سناریوها برابر ۵۸۹۴/۲۶۸۸ دلار و ۲۱۱/۹۴۸۲ دلار شده است. در این حالت میزان توان تأمین‌نشده، بار تغذیه‌نشده و توان مازاد سیستم به ترتیب برابر ۴/۴۷۰۳ و ۳۲/۹۸۹۷ کیلووات خواهد بود. میزان تلفات سیستم در این سناریو برابر ۱۱۴/۶۸۲ کیلووات است. شکل‌های ۲۹ تا ۳۱ به ترتیب وضعیت ولتاژ شین‌های سیستم، هزینه بهره‌برداری سیستم و هزینه هر کیلووات برق مصرفی توسط مصرف‌کننده را در ۲۴ ساعت نشان می‌دهند.

۳-۵ بهره‌برداری هماهنگ منابع DERs و شبکه جهت بهینه‌سازی تابع هدف با در نظر گرفتن برنامه‌های مختلف پاسخ‌گویی بار

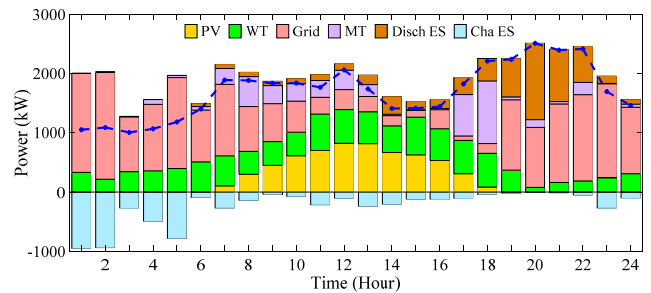
در این حالت برای برنامه پاسخ‌گویی بار از نوع برنامه پاسخ‌گویی بار-زمان استفاده شده است. هدف از استفاده برنامه پاسخ‌گویی بار، هموارکردن منحنی بار با استفاده از شیفت بار از بازه‌های پیک به بازه‌های کم‌باری و میان‌باری است. شکل ۳۲ وضعیت جایی ذخیره‌سازهای انرژی و منابع انرژی توزیع‌شده را بر روی شبکه تست مورد مطالعه برای این حالت نشان



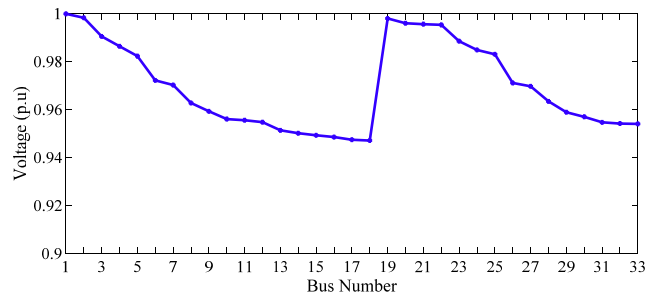
شکل ۲۶: شیوه مشارکت و حضور ذخیره‌سازهای انرژی در ۲۴ ساعت (سناریوی ۴).



شکل ۲۷: وضعیت تولید توان توسط منابع تولید توزیع‌شده (سناریوی ۴).



شکل ۲۸: وضعیت مشارکت منابع تأمین‌کننده توان و تعادل توان (سناریوی ۴).



شکل ۲۹: ولتاژ شین‌های سیستم (سناریوی ۴).

۳-۴ بهره‌برداری هماهنگ منابع DERs و شبکه جهت بهینه‌سازی تابع هدف (بدون بارهای پاسخ‌گویی بار)

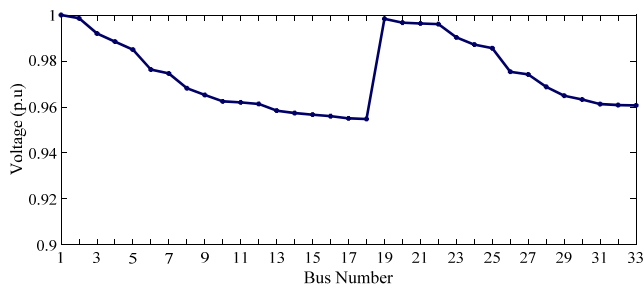
در این حالت تأثیر جایی هم‌زمان ذخیره‌سازهای انرژی و منابع انرژی توزیع‌شده در مدیریت و بهره‌برداری بهینه شبکه بررسی می‌شود. شکل ۲۵

وضعیت جایی ذخیره‌سازهای انرژی و منابع انرژی توزیع‌شده را بر روی شبکه تست مورد مطالعه نشان می‌دهد.

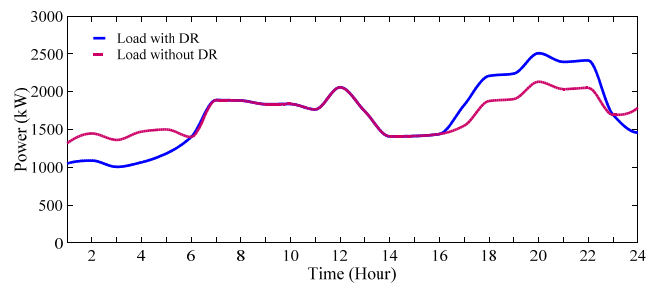
شیوه مشارکت و حضور ذخیره‌سازهای انرژی و وضعیت تولید توان توسط منابع تولید توزیع‌شده در شکل‌های ۲۶ و ۲۷ نشان داده شده است.

شکل ۲۸ چگونگی سهم‌بندی تولید توان منابع موجود در شبکه را جهت تأمین توان در این حالت نشان می‌دهد.

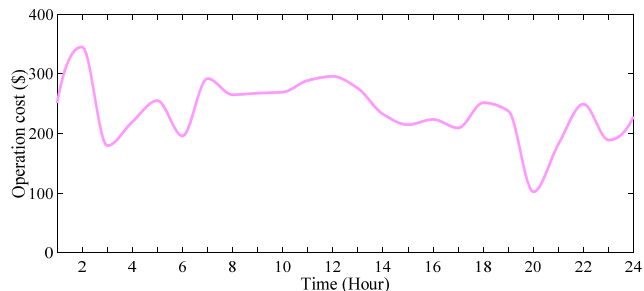
واحد بادی و خورشیدی به ترتیب با تولید توان ۹۶۷۲/۶۶۲۹ و ۶۰۳۵/۵۵۱۴ کیلووات حداکثر مشارکت خود را در تأمین توان شبکه دارند.



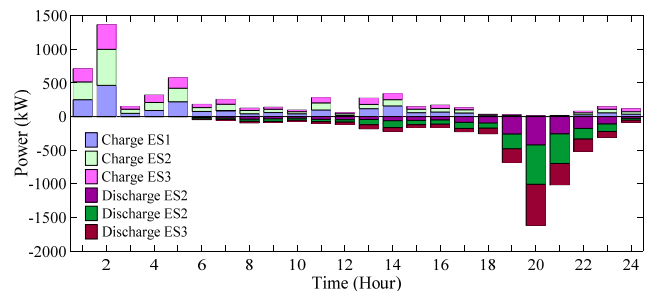
شکل ۳۷: ولتاژ شین‌های سیستم (سناریوی ۵).



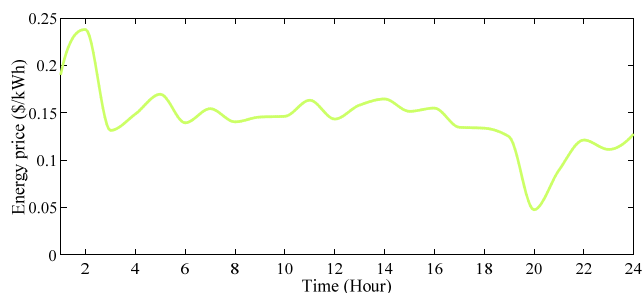
شکل ۳۳: منحنی بار مصرفی ریزشکه قبل و بعد از اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار.



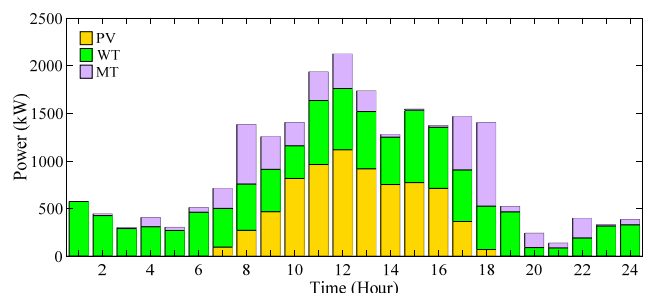
شکل ۳۸: هزینه بهره‌برداری سیستم در ۲۴ ساعت (سناریوی ۵).



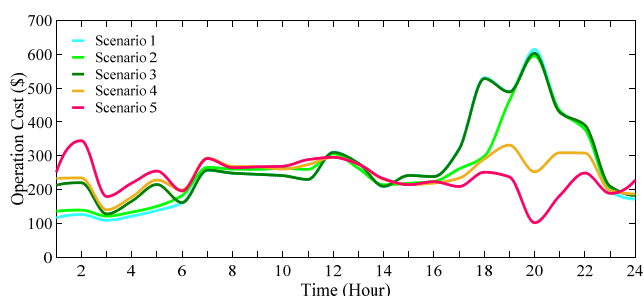
شکل ۳۴: شیوه مشارکت و حضور ذخیره‌سازهای انرژی در ۲۴ ساعت (سناریوی ۵).



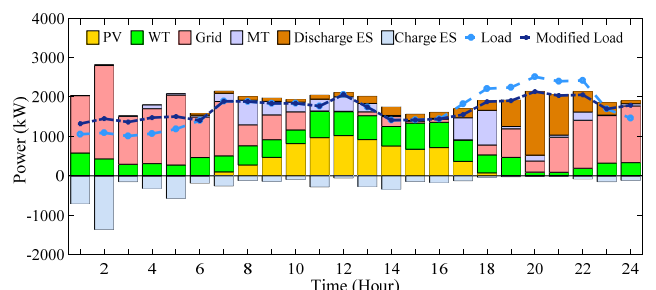
شکل ۳۹: هزینه هر کیلووات برق مصرفی توسط مصرف‌کننده در ۲۴ ساعت (سناریوی ۵).



شکل ۳۵: وضعیت تولید توان توسط منابع تولید توزیع‌شده (سناریوی ۵).



شکل ۴۰: تغییرات متوسط هزینه بهره‌برداری سیستم در ۲۴ ساعت (در ۵ سناریو).



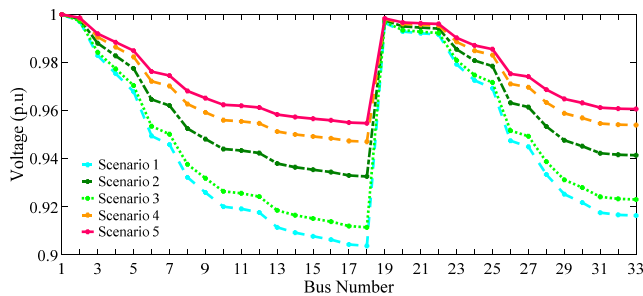
شکل ۳۶: وضعیت مشارکت منابع تأمین‌کننده توان و تعادل توان (سناریوی ۵).

است، در این حالت کل هزینه تأمین انرژی مصرف‌کنندگان در ۲۴ ساعت برابر ۵۷۳۰/۵۱۵۰ دلار می‌گردد. میزان توان تأمین‌نشده، بار تغذیه‌نشده و توان مازاد سیستم به ترتیب برابر ۰/۵۸۷۵، ۴/۳۴۱۴ و ۳۲/۰۳۸۶ کیلووات است. میزان تلفات سیستم در این سناریو برابر ۱۱۰/۷۷۹۶ کیلووات است. شکل‌های ۳۷ تا ۳۹ به ترتیب وضعیت ولتاژ شین‌های سیستم، هزینه بهره‌برداری سیستم و هزینه هر کیلووات برق مصرفی توسط مصرف‌کننده را در ۲۴ ساعت نشان می‌دهند.

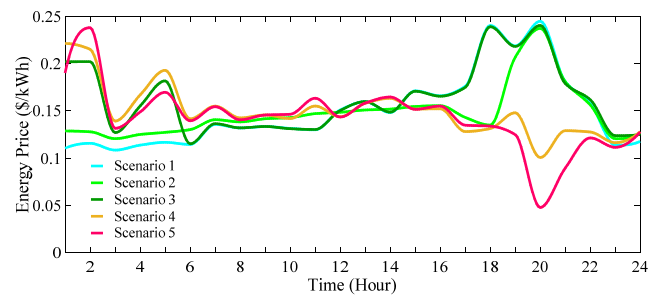
۳-۶ مقایسه پنج سناریوی مختلف

نتایج شبیه‌سازی ۵ سناریوی مورد مطالعه در جدول ۱ آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، بیشترین متوسط هزینه بهره‌برداری سیستم در هر ساعت با ۲۸۱/۵۵۴۴ دلار مربوط به سناریوی ۳ و کمترین هزینه کل بهره‌برداری سیستم با ۲۳۸/۲۳۲۰ دلار مربوط به سناریوی ۵

می‌دهد. شکل ۳۳ منحنی بار مصرفی شبکه را قبل و بعد از اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار نشان می‌دهد. شیوه مشارکت و حضور ذخیره‌سازهای انرژی و وضعیت تولید توان توسط منابع تولید توزیع‌شده در شکل‌های ۳۴ و ۳۵ نشان داده شده است. برنامه مشارکت واحدها و میزان توان تولیدی منابع توزیع‌شده در سیستم و ذخیره‌سازهای انرژی بهینه‌سازی شده در شبکه مورد مطالعه بر اساس حالت پنجم در شکل ۳۶ نشان داده شده است. در این حالت واحد بادی و خورشیدی به ترتیب با تولید توان ۱۰۱۷۳/۷۶۰۴ و ۷۱۲۵/۵۲۲۴ کیلووات مشارکت بیشتری در برنامه‌ریزی انجام‌شده دارند. بر این اساس واحد بادی و خورشیدی مقدار ۱۵۵۶/۵۸۵۳ و ۱۰۹۰/۲۰۴۹ دلار درآمد از فروش انرژی در شبکه خواهند داشت. مبلغ انرژی مورد نیاز شبکه نیز توسط شبکه بالادست تأمین می‌گردد که این میزان انرژی هزینه ۲۲۹۸/۱۹۱۴ دلار برای شبکه خواهد داشت. خسارت ناشی از انتشار آلودگی انرژی مصرف‌شده در شبکه برابر ۲۰۵/۸۳۷۷ دلار



شکل ۴۰: تغییرات ولتاژ شین‌های سیستم در ۲۴ ساعت (در ۵ سناریو).



شکل ۴۱: تغییرات متوسط هزینه هر کیلووات برق مصرفی سیستم در ۲۴ ساعت (در ۵ سناریو).

جدول ۱: مقایسه نتایج شبیه‌سازی در ۵ سناریوی مختلف مورد مطالعه.

پارامتر	سناریوی ۱	سناریوی ۲	سناریوی ۳	سناریوی ۴	سناریوی ۵
توان گرفته‌شده از شبکه بالادست (KW)	۴۰۸۳۳,۵۹۲۹	۱۹۹۴۹,۵۸۰۸	۴۰۸۳۸,۵۹۳۰	۲۰۴۵۱,۶۹۰۷	۱۸۷۳۰,۹۹۹۲
توان تولیدی بادی (KW)	.	۹۷۷۴,۷۸۷	.	۹۶۷۲,۶۶۲۹	۱۰۱۷۳,۷۶۰۴
توان تولیدی خورشیدی (KW)	.	۵۹۸۸,۲۹۵	.	۶۰۳۵,۵۵۱۴	۷۱۲۵,۵۲۲۴
توان تولیدی میکروتوربین (KW)	.	۵۱۲۰,۹۳۰	.	۴۶۸۰,۶۴۷۸	۴۵۸۳,۱۶۱۶
هزینه توان شبکه بالادست (\$)	۶۰۲۳,۴۰۴۱	۲۹۴۲,۲۱۸	۵۶۸۴,۲۶۹۶	۲۷۱۴,۰۹۴۴	۲۲۹۸,۱۹۱۴
هزینه و درآمد واحد بادی (\$)	.	۱۴۹۵,۵۴۲	.	۱۴۹۵,۵۴۲۴	۱۵۵۶,۵۸۵۳
هزینه و درآمد واحد خورشیدی (\$)	.	۹۱۶,۲۰۹	.	۹۱۶,۲۰۹۱	۱۰۹۰,۲۰۴۹
هزینه و درآمد میکروتوربین (\$)	.	۶۴۰,۱۱۶	.	۵۷۸,۰۸۹۲	۵۷۲,۸۹۵۲
هزینه شارژ ذخیره‌سازهای انرژی (\$)	.	.	۶۳۴,۳۳۷۲	۶۴۲,۵۶۳۴	۶۹۶,۳۳۶۳
درآمد دشارژ ذخیره‌سازهای انرژی (\$)	.	.	۹۷۳,۴۷۱۷	۹۸۴,۶۰۱۴	۱۱۰۴,۲۴۱۶
خسارت انتشار آلودگی (\$)	۳۸۶,۷۶۶۵	۲۲۲,۶۷۷	۳۷۶,۷۵۴۷	۲۱۱,۹۴۸۲	۲۰۵,۸۳۷۷
توان تأمین‌نشده (KW)	۰,۶۵۳۱	۰,۶۳۵۶	۰,۶۲۰۲	۰,۶۰۵۰	۰,۵۸۷۵
بار تغذیه‌نشده (KW)	۳,۶۵۷۹	۴,۶۹۶۶	۴,۵۱۸۹	۴,۴۷۰۳	۴,۳۴۱۴
توان مازاد (KW)	۳۲,۲۷۶۲	۳۴,۶۵۹۸	۳۳,۳۱۵۲	۳۲,۹۸۹۷	۳۲,۰۳۸۶
تلفات سیستم (KW)	۲۱۰,۹	۱۲۵,۱	۱۹۸,۰۱	۱۱۴,۰۶۸۲	۱۱۰,۷۷۹۶
هزینه کل بهره‌برداری سیستم (\$)	۶۴۱۰,۸۳۵۶	۶۳۱۷,۴۸۸۱	۶۷۵۷,۳۰۵۶	۵۸۹۴,۲۶۸۸	۵۷۳۰,۵۱۵۰
متوسط هزینه بهره‌برداری (\$)	۲۶۷,۱۱۸۱	۲۵۹,۰۶۱۹	۲۸۱,۵۵۴۴	۲۴۶,۸۰۱۳	۲۳۸,۲۳۲۰
متوسط هزینه هر کیلووات برق مصرفی (\$)	۰,۱۴۹۵۶	۰,۱۴۷۴۶۶	۰,۱۶۲۷۱۴	۰,۱۴۹۸۶	۰,۱۴۳۰۶

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای حضور حداکثری منابع تجدیدپذیر، یک سیاست حمایتی در بازار برق در نظر گرفته شد که استفاده از این روش منجر به کاهش هزینه‌های آلودگی و سیستم گردید. برای بررسی اثربخشی تابع هدف پیشنهادی، پنج حالت مختلف تعریف گردید و نتایج نشان داد که استفاده از برنامه پاسخ‌گویی بار در کنار بهره‌گیری از منابع انرژی توزیع‌شده و ذخیره‌سازهای انرژی می‌تواند تأثیر مناسبی در کاهش هزینه بهره‌برداری سیستم و بهبود پارامترهای کیفیت توان شبکه داشته باشد. جابجایی و حضور ذخیره‌سازهای انرژی به تنهایی تأثیر کمتری در کاهش هزینه بهره‌برداری سیستم و بهبود پارامترهای کیفیت توان دارد. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در کنار حضور ذخیره‌سازهای انرژی سبب مشارکت بهینه و بهره‌برداری مناسب سیستم گردید تا در کنار مزایای زیست‌محیطی این محصول سبز، رفتار فنی شبکه نیز بهبود یابد. همچنین به منظور بررسی دقیق تابع هدف پیشنهادی، سعی شد تا شرایط منطقی و واقعی بر بازار برق حاکم باشد تا اثر منابع انرژی تجدیدپذیر و حضور ذخیره‌سازهای انرژی به خوبی در بهبود رفتار شبکه مشاهده شود. با جابجایی بهینه منابع انرژی توزیع‌شده و ذخیره‌سازهای انرژی علاوه بر بهره‌برداری مناسب از ذخیره‌سازهای انرژی، تلفات شبکه کاهش یافته و همچنین انحراف ولتاژ نیز بهبود پیدا کرده است.

است. شکل ۴۰ تغییرات متوسط هزینه بهره‌برداری سیستم را در بازه زمانی مورد مطالعه نشان می‌دهد. همچنین بیشترین متوسط هزینه هر کیلووات برق مصرفی نیز با ۰,۱۶۲۷۱۴ کیلووات ساعت بر دلار مربوط به سناریوی ۳ و کمترین متوسط هزینه هر کیلووات برق مصرفی با ۰,۱۴۳۰۶ کیلووات ساعت بر دلار مربوط به سناریوی ۵ است. شکل ۴۱ تغییرات متوسط هزینه هر کیلووات برق مصرفی سیستم را در بازه زمانی مورد مطالعه نشان می‌دهد.

بیشترین توان تأمین‌نشده مربوط به سناریوی ۱ یعنی ۰,۶۵۳۱ کیلووات و کمترین میزان آن مربوط به سناریوی ۵ یعنی ۰,۵۸۷۵ کیلووات است. همچنین بیشترین تلفات سیستم با ۲۱۰,۹ کیلووات مربوط به سناریوی ۱ و کمترین میزان آن با ۱۱۰,۷۷۹۶ کیلووات مربوط به سناریوی ۵ است.

تغییرات ولتاژ شین‌های سیستم در سناریوهای مختلف در بازه زمانی مورد مطالعه در شکل ۴۲ نشان داده شده است. در مجموع همان گونه که مشاهده می‌شود، سناریوی ۵ که بهره‌برداری هماهنگ منابع انرژی تجدیدپذیر و شبکه با در نظر گرفتن برنامه‌های مختلف پاسخ‌گویی بار است، بهترین نوع عملکرد سیستم را نمایش می‌دهد. برای نشان‌دادن درستی و توانایی روش بهینه‌سازی پیشنهادی، مسئله پیشنهادی سناریوی ۵ با روش‌های GA و ICA با تعداد تکرارهای مشابه مقایسه گردیده که نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود، روش ازدحام سالپ از عملکرد بهتری نسبت به دو روش یادشده برخوردار است.

جدول ۲: مقایسه نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی با الگوریتم‌های بهینه‌سازی GA و ICA.

پارامتر	روش پیشنهادی	روش GA	روش ICA
توان گرفته‌شده از شبکه بالادست (KW)	۱۸۷۳۰٫۹۹۹۲	۱۸۷۳۰٫۹۹۸۳	۱۸۷۳۰٫۹۹۸۸
توان تولیدی بادی (KW)	۱۰۱۷۳٫۷۶۰۴	۱۰۱۷۳٫۷۷۱۱	۱۰۱۷۳٫۷۸۱۲
توان تولیدی خورشیدی (KW)	۷۱۲۵٫۵۲۳۴	۷۱۲۵٫۵۴۱۸	۷۱۲۵٫۸۳۶۹
توان تولیدی میکروتوربین (KW)	۴۵۸۳٫۱۶۱۶	۴۵۸۲٫۳۳۰۵	۴۵۸۲٫۱۹۱۷
هزینه توان شبکه بالادست (\$)	۲۲۹۸٫۱۹۱۴	۲۳۰۰٫۲۴۱۸	۲۳۰۳٫۹۱۷۲
هزینه و درآمد واحد بادی (\$)	۱۵۵۶٫۵۸۵۳	۱۵۵۹٫۱۴۱۷	۱۵۵۸٫۱۱۱۳
هزینه و درآمد واحد خورشیدی (\$)	۱۰۹۰٫۲۰۴۹	۱۰۹۵٫۶۵۲۴	۱۰۹۲٫۱۸۱۹
هزینه و درآمد میکروتوربین (\$)	۵۷۲٫۸۹۵۲	۵۷۳٫۱۴۷۲	۵۷۴٫۱۸۲۴
هزینه شارژ ذخیره‌سازهای انرژی (\$)	۶۹۶٫۳۳۶۳	۶۹۹٫۲۳۱۵	۶۹۷٫۵۸۹۷
درآمد دشارژ ذخیره‌سازهای انرژی (\$)	۱۱۰۴٫۲۴۱۶	۱۱۰۸٫۱۹۱۹	۱۱۰۷٫۷۲۳۶
خسارت انتشار آلودگی (\$)	۲۰۵٫۸۳۷۷	۲۰۹٫۲۵۶۹	۲۱۱٫۱۴۱۹
توان تأمین‌نشده (KW)	۰٫۵۸۷۵	۰٫۵۹۲۴	۰٫۵۹۹۸
بار تغذیه‌نشده (KW)	۴٫۳۴۱۴	۴٫۳۸۵۶	۴٫۳۶۱۹
توان مازاد (KW)	۳۲٫۰۳۸۶	۳۲٫۱۲۵۴	۳۲٫۱۲۶۹
تلفات سیستم (KW)	۱۱۰٫۷۷۹۶	۱۱۴٫۲۲۲۳	۱۱۳٫۱۹۹۷
هزینه کل بهره‌برداری سیستم (\$)	۵۷۳۰٫۵۱۵۰	۵۷۳۹٫۱۴۱۸	۵۷۴۵٫۵۱۲۱
متوسط هزینه بهره‌برداری (\$)	۲۳۸٫۲۳۲۰	۲۳۸٫۴۵۱۴	۲۳۸٫۸۲۶۹
متوسط هزینه هر کیلووات برق مصرفی (\$)	۰٫۱۴۳۰۶	۰٫۱۴۳۱۲	۰٫۱۴۳۰۹

جدول پ-۱: پارامترهای سیستم ۳۳ باس استاندارد IEEE.

باس فرستنده	باس گیرنده	R (Ω)	X (Ω)	P (kW)	Q (kVar)	باس فرستنده	باس گیرنده	R (Ω)	X (Ω)	P (kW)	Q (kVar)
۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱۷	۱۸	۰٫۷۳۲۰	۰٫۵۷۴۰	۹۰	۴۰
۱	۲	۰٫۰۹۲۲	۰٫۰۴۷۰	۱۰۰	۶۰	۲	۱۹	۰٫۱۶۴۰	۰٫۱۵۶۵	۹۰	۴۰
۲	۳	۰٫۴۹۳۰	۰٫۲۵۱۱	۹۰	۴۰	۱۹	۲۰	۱٫۵۰۴۲	۱٫۳۵۵۴	۹۰	۴۰
۳	۴	۰٫۳۶۶۰	۰٫۱۸۶۴	۱۲۰	۸۰	۲۰	۲۱	۰٫۴۰۹۵	۰٫۴۷۸۴	۹۰	۴۰
۴	۵	۰٫۳۸۱۱	۰٫۱۹۴۱	۶۰	۳۰	۲۱	۲۲	۰٫۷۰۸۹	۰٫۹۳۷۳	۹۰	۴۰
۵	۶	۰٫۸۱۹۰	۰٫۷۰۷۰	۶۰	۲۰	۳	۲۳	۰٫۴۵۱۲	۰٫۳۰۸۳	۹۰	۵۰
۶	۷	۰٫۱۸۷۲	۰٫۶۱۸۸	۲۰۰	۱۰۰	۲۳	۲۴	۰٫۸۹۸۰	۰٫۷۰۹۱	۴۲۰	۲۰۰
۷	۸	۰٫۷۱۱۴	۰٫۲۳۵۱	۲۰۰	۱۰۰	۲۴	۲۵	۰٫۸۹۶۰	۰٫۷۰۱۱	۴۲۰	۲۰۰
۸	۹	۱٫۰۳۰۰	۰٫۷۴۰۰	۶۰	۲۰	۶	۲۶	۰٫۲۰۲۰	۰٫۱۰۳۴	۶۰	۲۵
۹	۱۰	۱٫۰۴۴۰	۰٫۷۴۰۰	۶۰	۲۰	۲۶	۲۷	۰٫۲۸۴۲	۰٫۱۴۴۷	۶۰	۲۵
۱۰	۱۱	۰٫۱۹۶۶	۰٫۰۶۵۰	۴۵	۳۰	۲۷	۲۸	۱٫۰۵۹۰	۰٫۹۳۳۷	۶۰	۲۰
۱۱	۱۲	۰٫۳۷۴۴	۰٫۱۲۳۸	۶۰	۳۵	۲۸	۲۹	۰٫۸۰۴۲	۰٫۷۰۰۶	۱۲۰	۷۰
۱۲	۱۳	۱٫۴۶۸۰	۱٫۱۵۵۰	۶۰	۳۵	۲۹	۳۰	۰٫۵۰۷۵	۰٫۲۵۸۵	۲۰۰	۶۰۰
۱۳	۱۴	۰٫۵۴۱۶	۰٫۷۱۲۹	۱۲۰	۸۰	۳۰	۳۱	۰٫۹۷۴۴	۰٫۹۶۳۰	۱۵۰	۷۰
۱۴	۱۵	۰٫۵۹۱۰	۰٫۵۲۶۰	۶۰	۱۰	۳۱	۳۲	۰٫۳۱۰۵	۰٫۳۶۱۹	۲۱۰	۱۰۰
۱۵	۱۶	۰٫۷۴۶۳	۰٫۵۴۵۰	۶۰	۲۰	۳۲	۳۳	۰٫۳۴۱۰	۰٫۵۳۰۲	۶۰	۴۰
۱۶	۱۷	۱٫۲۸۹۰	۱٫۷۲۱۰	۶۰	۲۰						

جدول پ-۲: پارامترهای توربین بادی و نیروگاه خورشیدی به همراه پارامترهای تابع توزیع.

$C_w = ۲٫۵$	$K_w = ۸٫۵$	$v_r = ۱۵ \text{ m/s}$	$v_{co} = ۲۵ \text{ m/s}$	$v_{ei} = ۳ \text{ m/s}$	نیروگاه بادی
---	---	$C_p = ۱٫۸$	$K_p = ۵٫۵$	$S_r = ۱۰$	نیروگاه خورشیدی

جدول پ-۳: پارامترهای مربوط به هزینه‌های DG.

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۰٫۱ \$/kWh	هزینه تعمیرات و نگهداری نیروگاه خورشیدی	۹۰۰ \$/kW	هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه MT
۰٫۰۳ \$/kWh	هزینه سوخت نیروگاه MT	۲۲۰۰ \$/kW	هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه بادی
۱۵ سال	طول عمر مفید نیروگاه MT	۵۲۰۰ \$/kW	هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه خورشیدی
۲۰ سال	طول عمر مفید نیروگاه بادی	۰٫۴۵ \$/kWh	هزینه تعمیرات و نگهداری نیروگاه MT
۲۰ سال	طول عمر مفید نیروگاه خورشیدی	۰٫۲ \$/kWh	هزینه تعمیرات و نگهداری نیروگاه بادی

- [16] S. Shojaabadi, S. Abapour, M. Abapour, and A. Nahavandi, "Optimal planning of plug-in hybrid electric vehicle charging station in distribution network considering demand response programs and uncertainties," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 10, no. 13, pp. 3330-3340, Oct. 2016.
- [17] P. Kayal and C. K. Chanda, "Optimal mix of solar and wind distributed generations considering performance improvement of electrical distribution network," *Renewable Energy*, vol. 75, pp. 173-186, Mar. 2015.
- [18] S. Hadayeghparast, A. S. Farsangi, H. Shayanfar, and H. Karimipour, "Stochastic multi-objective economic/emission energy management of a microgrid in presence of combined heat and power systems," in *Proc. IEEE/IAS 55th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conf.*, 9 pp., Calgary, Canada, 5-8 May 2019.
- [19] M. Shepero, J. Munkhammar, J. Widen, J. D. Bishop, and T. Bostrom, "Modeling of photovoltaic power generation and electric vehicles charging on city-scale: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89, pp. 61-71, Jun. 2018.
- [20] J. Boland and A. Grantham, "Nonparametric conditional heteroscedastic hourly probabilistic forecasting of solar radiation," *Multidisciplinary Scientific J.*, vol. 1, no. 1, pp. 174-191, Dec. 2018.
- [21] H. Shayeghi and E. Shahryari, "Optimal operation management of grid-connected microgrid using multi-objective group search optimization algorithm," *J. of Operation and Automation in Power Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 227-239, Autumn 2017.
- [22] J. Munkhammar, J. Widen, and J. Ryden, "On a probability distribution model combining household power consumption, electric vehicle home-charging and photovoltaic power production," *Applied Energy*, vol. 142, pp. 135-143, Mar. 2015.
- [23] F. Kalavani, B. Mohammadi-Ivatloo, A. Karimi, and F. Kalavani, "Stochastic optimal sizing of integrated cryogenic energy storage and air liquefaction unit in microgrid," *Renewable Energy*, vol. 136, pp. 15-22, Jun. 2019.
- [24] M. Majidi, B. Mohammadi-Ivatloo, and A. Anvari-Moghaddam, "Optimal robust operation of combined heat and power systems with demand response programs," *Applied Thermal Engineering*, vol. 149, pp. 1359-1369, Feb. 2019.
- [25] S. Mirjalili, et al., "Salp swarm algorithm: a bio-inspired optimizer for engineering design problems," *Advances in Engineering Software*, vol. 114, pp. 163-191, Dec. 2017.
- [26] S. H. Dolatabadi, M. Ghorbanian, P. Siano, and N. D. Hatzigiorgiou, "An enhanced IEEE 33 bus benchmark test system for distribution system studies," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 36, no. 3, pp. 2565-2572, May 2021.

محسن صرامی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۸ در دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد به پایان رسانده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: برنامه‌ریزی و مدیریت سیستم‌های انرژی الکتریکی، شبکه‌های هوشمند و بهینه‌سازی در سیستم‌های قدرت.

مجید معظمی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق قدرت، در دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۶ به پایان رسانده است. وی تحصیلات خود را در مقطع دکتری در دانشگاه اصفهان ادامه داد و در سال ۱۳۹۲ موفق به اخذ مدرک دکتری در رشته مهندسی برق از این دانشگاه گردید. ایشان از سال ۱۳۸۸ به عضویت هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد درآمده و در حال حاضر دانشیار این دانشکده می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی ایشان، بازار برق، بهینه‌سازی در سیستم‌های قدرت و انرژی‌های نو و ریزشبکه‌ها می‌باشد.

غضنفر شاهقلیان تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۰ و ۱۳۷۳ در دانشگاه صنعتی اصفهان و دانشگاه تبریز و دکتری مهندسی برق را در دانشگاه علوم و تحقیقات تهران به پایان رسانده و هم‌اکنون دانشیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: الکترونیک قدرت، دینامیک سیستم‌های قدرت و انرژی‌های نو.

بیوست

پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های این مقاله در جدول پ-۱ الی پ-۳ ارائه شده است.

مراجع

- [1] M. B. Mollah, et al., "Blockchain for future smart grid: a comprehensive survey," *IEEE Internet of Things J.*, vol. 8, no. 1, pp. 18-43, Jan. 2021.
- [2] J. L. Gallardo, M. A. Ahmed, and N. Jara, "Clustering algorithm-based network planning for advanced metering infrastructure in smart grid," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 48992-49006, 2021.
- [3] W. Mendieta and C. A. Canizares, "Primary frequency control in isolated microgrids using thermostatically controllable loads," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 12, no. 1, pp. 93-105, Jan. 2021.
- [4] S. J. A. D. Hosseini, M. Moradian, H. Shahinzadeh, and S. Ahmadi, "Optimal placement of distributed generators with regard to reliability assessment using virus colony search algorithm," *International J. of Renewable Energy Research*, vol. 8, no. 2, pp. 714-723, Jun. 2018.
- [5] M. Daneshvar, B. Mohammadi-Ivatloo, and K. Zare, Integration of distributed energy resources under the transactive energy structure in the future smart distribution networks, Ch. 14, pp. 349-379, Academic Press, 2018.
- [6] M. Nazari-Heris, B. Mohammadi-Ivatloo, G. B. Gharehpetian, and M. Shahidehpour, "Robust short-term scheduling of integrated heat and power microgrids," *IEEE Systems J.*, vol. 13, no. 3, pp. 3295-3303, Sept. 2019.
- [7] G. G. Talapur, H. M. Suryawanshi, L. Xu, and A. B. Shitole, "A reliable microgrid with seamless transition between grid connected and islanded mode for residential community with enhanced power quality," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 54, no. 5, pp. 5246-5255, Sep/Oct. 2018.
- [8] J. Llanos, D. E. Olivares, J. W. Simpson-Porco, M. Kazerani, and D. Saez, "A novel distributed control strategy for optimal dispatch of isolated microgrids considering congestion," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 10, no. 6, pp. 6595-6606, Nov. 2019.
- [9] H. Shahinzadeh, M. Moazzami, M. Abbasi, H. Masoudi, and V. Sheigani, "Smart design and management of hybrid energy structures for isolated systems using biogeography-based optimization algorithm," in *Proc. IEEE Smart Grids Conf.*, 7 pp., Kerman, Iran, 20-21 Dec. 2016.
- [10] T. Kerdphol, K. Fujii, Y. Mitani, M. Watanabe, and Y. Qudaih, "Optimization of a battery energy storage system using particle swarm optimization for stand-alone microgrids," *International J. of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 81, pp. 32-39, Oct. 2016.
- [11] Y. Yang, S. Bremner, C. Menictas, and M. Kay, "Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 109-125, Aug. 2018.
- [12] H. Shahinzadeh, M. Moazzami, S. H. Fathi, and G. B. Gharehpetian, "Optimal sizing and energy management of a grid-connected microgrid using HOMER software," in *Proc. IEEE Smart Grids Conf.*, 6 pp., Kerman, Iran, 20-21 Dec. 2016.
- [13] S. Karellas and N. Tzouganatos, "Comparison of the performance of compressed-air and hydrogen energy storage systems: Karpathos island case study," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 865-882, Jan. 2014.
- [14] H. A. Aalami, M. P. Moghaddam, and G. R. Yousefi, "Evaluation of nonlinear models for time-based rates demand response programs," *International J. of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 65, pp. 282-290, Feb. 2015.
- [15] S. Upadhyay and M. P. Sharma, "Selection of a suitable energy management strategy for a hybrid energy system in a remote rural area of India," *Energy*, vol. 94, pp. 352-366, Jan. 2016.