

برنامه‌ریزی مقاوم ریزشبکه هوشمند متصل به شبکه با در نظر گرفتن انتشار کربن در حضور بارهای قابل کنترل

امین نامور و نوید تقی‌زادگان کلانتری

پارامترها

a, b, c : ضرایب تابع هزینه میکروتوربین
 C : هزینه کمترین توان تولیدی توسط میکروتوربین
 E_{SOC}^t : انرژی اولیه ذخیره‌شده در باتری
 $E_{SOC}^{t, \text{min}}$: انرژی ذخیره‌شده در باتری در ساعت ۲۴
 $E_{SOC}^{t, \text{max}}$: کمترین انرژی قابل ذخیره در باتری
 E_c : بیشترین انرژی قابل ذخیره در باتری
 E_c : انرژی مصرفی توسط بارهای قابل کنترل در ۲۴ ساعت
 m_j : شیب خطوط در خطی‌سازی میکروتوربین
 P_{ch}^{max} : بیشترین توان شارژ باتری
 P_{dch}^{max} : بیشترین توان دشارژ باتری
 P_{MT}^{min} : کمترین توان تولیدی توسط میکروتوربین
 P_{MT}^{max} : بیشترین توان تولیدی توسط میکروتوربین
 P_n : توان نامی تولیدی توسط توربین بادی
 $P_{l,c}^{\text{min}}$: کمترین توان عملکرد بارهای قابل کنترل
 $P_{l,c}^{\text{max}}$: بیشترین توان عملکرد بارهای قابل کنترل
 $P_{l,uc}^t$: توان عملکرد بارهای غیر قابل کنترل

v_{in} : سرعت وصل

v_{out} : سرعت قطع

v_n : سرعت در توان نامی

η_{ch} : بازده شارژ باتری

η_{dch} : بازده دشارژ باتری

η : بازده بارها

π_{G-pur}^t : قیمت خرید برق از شبکه

π_{G-sell}^t : قیمت فروش برق به شبکه

β_G : ضریب انتشار کربن نیروگاه‌های شبکه

β_{MT} : ضریب انتشار کربن توسط میکروتوربین

متغیرها

E_{SOC}^t : انرژی ذخیره‌شده در باتری

e_j^t : توان هر خط در خطی‌سازی میکروتوربین

l_{ch}^t, l_{dch}^t : مقادیر باینری برای جلوگیری از شارژ/دشارژ هم‌زمان باتری

P_{ch}^t : توان شارژ باتری

P_{dch}^t : توان دشارژ باتری

$P_{l,c}^t$: توان عملکرد بارهای قابل کنترل

P_{G-pur}^t : توان خریداری‌شده از شبکه

P_{G-sell}^t : توان فروخته‌شده به شبکه

تابع‌ها

C_{MT}^t : تابع هزینه میکروتوربین

OF_1 : تابع هدف ۱ (هزینه‌های بهره‌برداری)

چکیده: ریزشبکه، مجموعه‌ای از منابع تولیدکننده انرژی و مصرف‌کننده‌های محلی است که می‌تواند با هزینه کم و قابلیت اطمینان زیاد بهره‌برداری شود. در این مقاله، یک مدل چندهدفه مقاوم برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و انتشار کربن پیشنهاد شده است که در آن، یک ریزشبکه هوشمند از یک توربین بادی و میکروتوربین برای تغذیه بارهای متصل به خود بهره می‌گیرد. همچنین در این ریزشبکه از یک باتری برای ذخیره انرژی الکتریکی در ساعات‌های کم‌باری و تحویل انرژی در ساعات‌های پرباری استفاده شده است. از طرف دیگر این ریزشبکه متصل به شبکه اصلی است و می‌تواند با آن تبادل انرژی کند. مصرف‌کننده‌های متصل به این ریزشبکه به دو گروه تقسیم می‌شوند. گروه اول، بارهای غیر قابل کنترل با الگوی بار ثابت و گروه دوم، بارهای قابل کنترل هستند که مصرف انرژی مشخصی دارند و زمان بهره‌برداری از آنها قابل کنترل است. مدل پیشنهادی، یک مسئله برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح است و با حل‌کننده CPLEX در نرم‌افزار GAMS شبیه‌سازی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند زمانی که قیمت برق شبکه کم است، عمده بارها توسط برق شبکه تغذیه می‌شوند و زمانی که قیمت برق زیاد است بارها توسط میکروتوربین، باتری و توربین بادی تغذیه می‌شوند.

کلیدواژه: ریزشبکه هوشمند، انتشار کربن، بارهای قابل کنترل، توربین بادی، باتری، میکروتوربین.

فهرست علائم و اختصارات

اندیس‌ها

t : اندیس زمان

c : اندیس بارهای قابل کنترل

ch : اندیس شارژ باتری

dch : اندیس دشارژ باتری

$G-pur$: اندیس خرید برق از شبکه

$G-sell$: اندیس فروش برق به شبکه

J : اندیس تعداد نقاط انتخابی برای خطی‌سازی

L : اندیس بار

MT : اندیس میکروتوربین

SOC : اندیس وضعیت شارژ باتری

Uc : اندیس بارهای غیر قابل کنترل

WT : اندیس توربین بادی

این مقاله در تاریخ ۱۷ اسفند ماه ۱۳۹۷ دریافت و در تاریخ ۸ دی ماه ۱۳۹۸ بازنگری شد.

امین نامور، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران، (email: a.namvar@azaruniv.ac.ir).

نوید تقی‌زادگان کلانتری (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران، (email: taghizadegan@azaruniv.ac.ir).

OF_p : تابع هدف ۲ (انتشار کربن)

۱- مقدمه

روش تخمین نقطه‌ای^۱ برای برنامه‌ریزی ریزشبکه در [۱۲] ارائه شده است. مرجع [۱۳] یک طرح چندسطحی برای برنامه‌ریزی شبکه توزیع فعال در حضور منابع تولید پراکنده را با در نظر گرفتن بازآرایی ریزشبکه‌ها به منظور کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری نشان داده است. با پیشرفت فناوری، تجهیزات و سیستم‌های مختلفی در ریزشبکه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد که از جمله این تجهیزات منابع تجدیدپذیر هستند. این منابع وابستگی ریزشبکه را به خرید برق از شبکه اصلی کاهش می‌دهند و همچنین به عنوان منابع تولید انرژی پاک، سهم قابل توجهی در کاهش آلودگی هوا دارند [۱۴]. در بعضی از تحقیقات صورت گرفته، خروجی این منابع به صورت قطعی [۱۵] و در بعضی دیگر به صورت تصادفی و احتمالاتی [۱۶] و [۱۷] مدل‌سازی شده‌اند. ذخیره‌سازهای انرژی [۱۸] و [۱۹] نیز بخش قابل توجهی از مطالعات را به خود اختصاص داده‌اند چرا که این ذخیره‌سازها در ساعت‌های کم‌باری انرژی را ذخیره می‌کنند تا در زمان‌های پرباری در اختیار مصرف‌کنندگان قرار دهند.

در این مقاله، یک مدل چندهدفه در قالب برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و همچنین کاهش انتشار کربن در ریزشبکه هوشمند متصل به شبکه ارائه شده است. مدل پیشنهادی از توربین بادی، باتری و میکروتوربین برای تأمین نیازهای مصرف‌کنندگان بهره می‌گیرد و می‌تواند مزاد تولید خود را به شبکه بفروشد. در این شبیه‌سازی از بارهای قابل کنترل نیز استفاده شده که دارای حداقل و حداکثر توان مصرفی هستند و می‌توان میزان توان مصرفی آنها را در ساعت‌های مختلف کنترل کرد. لازم به ذکر است که تابع هزینه میکروتوربین یک تابع درجه دو است که در این مقاله خطی‌سازی شده است. همچنین قیمت خرید برق دارای عدم قطعیت است که توسط بهینه‌سازی مقاوم مدل‌سازی شده است. بر اساس آنچه گفته شد، نوآوری‌های ارائه‌شده در این مقاله به صورت زیر است:

- ۱) برنامه‌ریزی خطی چندهدفه ریزشبکه با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و آلودگی هوا
 - ۲) استفاده از بهینه‌سازی مقاوم برای مقابله با عدم قطعیت قیمت خرید برق
 - ۳) استفاده از برنامه پاسخ‌گویی به تقاضا در قالب بهره‌برداری از بارهای قابل کنترل برای اصلاح پیک بار
 - ۴) خطی‌سازی تابع هزینه دیزل ژنراتور برای استفاده در مدل خطی پیشنهادی برای رسیدن به بهینگی سراسری
- قسمت‌های مختلف مقاله بدین شرح است: در بخش ۲ به معرفی و فرمول‌بندی ریاضی مدل پیشنهادی پرداخته شده و در بخش ۳، روش حل مسئله بهینه‌سازی در مدل پیشنهادی آمده است. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی در بخش ۴ مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته و در نهایت، نتیجه‌گیری کلی از مدل‌سازی در بخش ۵ نشان داده شده است.

۲- مدل‌سازی ریزشبکه هوشمند

در این بخش به معرفی مدل پیشنهادی و همچنین فرمول‌بندی ریاضی تجهیزات به کار رفته (باتری، میکروتوربین و توربین بادی) و بارهای قابل کنترل در ریزشبکه هوشمند پرداخته می‌شود.

امروزه با گسترش جوامع، تقاضا برای برق افزایش یافته است و این موضوع نیازمند گسترش شبکه قدرت می‌باشد. گسترش شبکه قدرت باعث به وجود آمدن مشکلات و مسایل گوناگون از جمله افزایش تلفات و تراکم در خطوط انتقال و همچنین افزایش هزینه‌های حفظ و نگهداری از شبکه می‌شود. از طرف دیگر، توسعه شبکه برق مستلزم افزایش ظرفیت تولید است و این مسئله موجب افزایش آلودگی هوا می‌شود چرا زیرا نیروگاه‌ها و واحدهای تولیدی اغلب با سوخت‌های فسیلی کار می‌کنند. این در حالی است که در سال‌های اخیر، استفاده از منابع تولید پراکنده رشد قابل توجهی داشته است زیرا این منابع دارای مزایای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی زیادی هستند [۱] و [۲]. در این میان منابع تولید انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان منابع انرژی پاک مورد توجه خاصی قرار گرفته است. استفاده از این منابع برای تغذیه بارهای محلی به صورت غیر متمرکز باعث به وجود آمدن مفهومی به نام ریزشبکه شده است. در واقع ریزشبکه گروهی از بارها و منابع تولید پراکنده است که دارای محدودیت تولید و مصرف است و می‌تواند به صورت متصل به شبکه یا به صورت جزیره‌ای بهره‌برداری شود [۳].

تحقیقات و مطالعات زیادی در زمینه ریزشبکه انجام شده که در این قسمت به بررسی برخی از آنها پرداخته خواهد شد. مرجع [۴] بهینه‌سازی مقاوم دوسطحی را برای جایابی بهینه منابع تولید پراکنده در ریزشبکه‌ها پیشنهاد کرده است. در این مدل‌سازی، هزینه‌های بلندمدت برنامه‌ریزی شامل هزینه‌های آلودگی هوا، خرید سوخت، نگهداری، بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری است و درآمد شامل پرداختی‌های مصرف‌کنندگان و شبکه بالادستی است. همچنین در این مقاله از روش بهینه‌سازی مقاوم برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها استفاده شده است. مرجع [۵] یک مدل مبتنی بر قابلیت اطمینان را با هدف کاهش هزینه‌ها توسط برنامه‌ریزی بهینه منابع پراکنده تولید توان راکتو در ریزشبکه ارائه کرده است. مرجع [۶] به بررسی برنامه‌ریزی توسعه خط انتقال در حضور ریزشبکه‌ها می‌پردازد و هدف آن، کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری ریزشبکه‌ها، برنامه‌ریزی کردن واحدهای تولید بزرگ و خطوط انتقال و هزینه‌های انرژی ذخیره‌نشده است که در قالب قطع بار در تابع هدف ذکر شده است. در [۷] مدل چندهدفه برای طراحی توپولوژی ریزشبکه با استفاده از برنامه‌ریزی غیر خطی آمیخته با عدد صحیح، بیان شده که هدف آن رسیدن به منافع اقتصادی و زیست‌محیطی برای ریزشبکه ایزوله است. این اهداف شامل کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و آلودگی هوا می‌باشد. مدل برنامه‌ریزی ریزشبکه‌ها مبتنی بر قابلیت اطمینان برای بررسی خطاهای موقت و ماندگار از طریق شاخص قابلیت اطمینان احتمالاتی در [۸] نشان داده شده است. مرجع [۹] توسعه تولید ریزشبکه را با در نظر گرفته منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازهای انرژی مورد بررسی قرار داده است. هدف اصلی این مقاله کاهش هزینه‌های شرکت‌های توزیع و افزایش سود مالکان منابع تجدیدپذیر با در نظر گرفتن قراردادهای فی‌مابین است. مرجع [۱۰] مرور کلی بر مدل‌سازی، برنامه‌ریزی و مدیریت انرژی سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت در ریزشبکه را انجام داده است. در [۱۱] طرح جدید برای برنامه‌ریزی و کنترل ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن سیستم‌های ارتباطی و جنبه‌های اقتصادی پیشنهاد شده است. مدل‌سازی چندهدفه تصادفی با اهداف کاهش تلفات انرژی، کاهش هزینه تولید انرژی، کاهش آلودگی هوا و کاهش انحراف ولتاژ باس‌ها توسط

ذخیره می‌کند تا در زمان‌های پرباری، انرژی ذخیره‌شده را در اختیار مصرف‌کنندگان قرار دهد. روابط ریاضی مربوط به باتری در زیر آمده است [۲۱] که (۱) نشان‌دهنده وضعیت شارژ باتری^۲ یا همان انرژی ذخیره‌شده در باتری است. رابطه (۲) حداقل و حداکثر مقداری را که باتری می‌تواند ذخیره کند نشان می‌دهد. رابطه (۳) بر این موضوع دلالت دارد که میزان انرژی ذخیره‌شده در باتری در ساعت ۲۴ با مقدار اولیه آن برابر است. رابطه‌های (۴) و (۵) به ترتیب بیانگر حداکثر توان قابل شارژ و دشارژ توسط باتری در هر ساعت هستند و (۶) مانع از شارژ و دشارژ هم‌زمان باتری می‌شود

$$E_{SOC}^{t+\Delta t} = E_{SOC}^t + (\eta_{ch} P_{ch}^t - \frac{P_{dch}^t}{\eta_{dch}}) \Delta t \quad (1)$$

$$E_{SOC}^{min} \leq E_{SOC}^t \leq E_{SOC}^{max} \quad (2)$$

$$E_{SOC}^{ref} = E_{SOC} \quad (3)$$

$$0 \leq P_{ch}^t \leq P_{ch}^{max} I_{ch}^t \quad (4)$$

$$0 \leq P_{dch}^t \leq P_{dch}^{max} I_{dch}^t \quad (5)$$

$$I_{ch}^t + I_{dch}^t \leq 1 \quad (6)$$

۲-۲-۲ میکروتوربین

میکروتوربین دیگر وسیله‌ای است که در این مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته تا با استفاده از گاز طبیعی، برق تولید کند. ظرفیت تولید میکروتوربین باید به قدری باشد که بتواند حداکثر میزان بار را تأمین کند. تابع هزینه تولید میکروتوربین در (۷) و بازه تولید توان توسط آن در (۸) نشان داده شده است

$$C_{MT}^t = a.(P_{MT}^t)^b + b.P_{MT}^t + c \quad (7)$$

$$P_{MT}^{min} \leq P_{MT}^t \leq P_{MT}^{max} \quad (8)$$

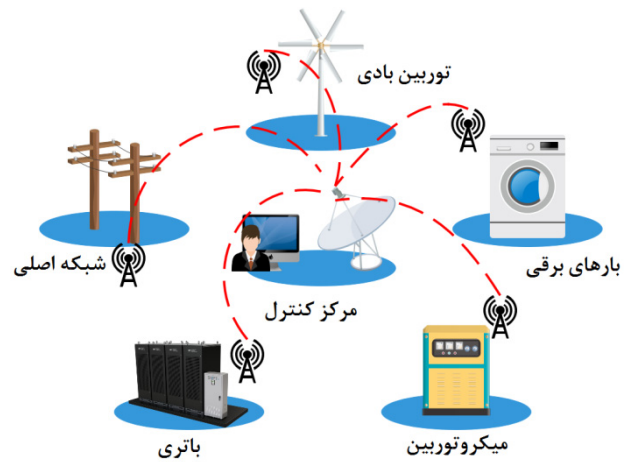
همان طور که مشاهده می‌شود تابع هزینه میکروتوربین یک تابع درجه ۲ است در حالی که مدل‌سازی انجام‌گرفته در این مقاله، یک مدل‌سازی خطی است، لذا نمی‌توان از تابع هزینه مذکور در شبیه‌سازی استفاده کرد و باید خطی‌سازی شود. برای خطی‌سازی از روشی به نام روش «کارترین» [۲۲] استفاده شده است. در این روش شکل تابع درجه ۲ که به صورت سهمی است به وسیله خط‌های کوچک، تقریب زده می‌شود. روابط ریاضی مربوط به مدل خطی‌شده تابع هزینه میکروتوربین به صورت زیر است: [۲۳] رابطه (۹) تابع هزینه خطی‌شده میکروتوربین را نشان می‌دهد. در (۱۰) نیز توان تولیدشده برای هر ساعت نشان داده شده است. بازه توان به دست آمده در هر کدام از تکه خط‌های تقریب زده شده توسط (۱۱) نمایش داده می‌شود. همچنین مقدار هزینه تولید در حداقل توان میکروتوربین از (۱۲) به دست می‌آید. در نهایت (۱۳) و (۱۴) به ترتیب حداکثر و حداقل ظرفیت تولید میکروتوربین را نشان می‌دهند

$$C_{MT}^t = C_0 + \sum_{j=1}^J m_j e_j^t \quad (9)$$

$$P_{MT}^t = Pl_0 + \sum_{j=1}^J e_j^t \quad (10)$$

$$0 \leq e_j^t \leq Pl_j - Pl_{j-1} \quad (11)$$

2. State of Charge
3. Cartesian



شکل ۱: مدل ریزشبه هوشمند پیشنهادی.

۱-۲ مدل پیشنهادی

در این مقاله یک مدل کلی برای مدیریت انرژی در ریزشبه‌ها ارائه شده است که در آن با مدیریت هوشمند مصرف و تولید، هزینه‌های بهره‌برداری و انتشار کربن کاهش پیدا می‌کند. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود مدل پیشنهادی، یک ریزشبه هوشمند متصل به شبکه است که برق را از آن دریافت می‌کند و در صورت لزوم می‌تواند به آن برق بفروشد. همچنین این ریزشبه از تجهیزات مختلف از جمله باتری، توربین بادی و میکروتوربین برای تغذیه بارهای متصل به خود استفاده می‌کند. این ریزشبه یک مجموعه هوشمند است که از فناوری اینترنت اشیا^۱ برای کنترل عملکرد تجهیزات و کنترل بارها بهره می‌گیرد. نحوه کنترل این ریزشبه بدین صورت است که مقدار برق ورودی به ریزشبه، بارها و وضعیت عملکرد تجهیزات توسط سنسور اندازه‌گیری شده و به مرکز کنترل هوشمند انتقال داده می‌شود. همچنین اطلاعات بازار برق برای دریافت قیمت برق در اختیار مرکز کنترل قرار می‌گیرد. در نهایت، این مرکز کنترل با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و آلودگی هوا، سیستم را بهره‌برداری می‌کند تا نیاز مصرف‌کنندگان با کمترین هزینه تأمین شود.

۲-۲ مدل‌سازی ریاضی

در این بخش، توابع هدف مسئله که شامل هزینه‌های بهره‌برداری و میزان انتشار کربن است ارائه می‌شود. همچنین هر یک از تجهیزات با استفاده از فرمول‌های ریاضی مدل‌سازی می‌شوند تا به عنوان قیود مسئله مورد استفاده قرار گیرند.

۱-۲-۲ باتری

واحدهای ذخیره‌ساز انرژی یکی از مهم‌ترین اجزای شبکه‌های هوشمند هستند [۲۰] که به خاطر مزیت‌های اقتصادی مورد توجه قرار گرفته‌اند. استفاده از واحدهای ذخیره‌ساز انرژی کمک زیادی به کاهش هزینه‌های خرید برق از شبکه می‌کنند چرا که این واحدها در ساعت‌هایی که قیمت برق کم است، مانند مصرف‌کننده عمل کرده و شارژ می‌شوند و در ساعت‌هایی که قیمت برق زیاد است به عنوان منبع انرژی دشارژ می‌شوند تا نیاز مصرف‌کنندگان را برطرف کنند. در این مقاله نیز زمانی که قیمت برق کم است، برق شبکه و همچنین مازاد تولید منابع تولید پراکنده را

عدم قطعیت باشد. در این صورت مدل مقاوم این تابع به صورت زیر خواهد بود

$$\min \sum_{t=1}^T c_t x_t + z \cdot \Gamma + \sum_{t=1}^T q_t \quad (21)$$

$$\text{S.t} \sum_{t=1}^T a_{nt} x_t \leq b_n, \quad n = 1, \dots, M \quad (22)$$

$$z + q_t \geq d_t y_t, \quad t = 1, \dots, T \quad (23)$$

$$q_t \geq 0, \quad t = 1, \dots, T \quad (24)$$

$$y_t \geq 0, \quad t = 1, \dots, T \quad (25)$$

$$z \geq 0 \quad (26)$$

$$x_t \geq 0, \quad t = 1, \dots, T \quad (27)$$

$$x_t \leq y_t, \quad t = 1, \dots, T \quad (28)$$

۲-۲-۶ قید تعادل توان

یکی از مهم‌ترین قیود در این مدل‌سازی، قید تعادل توان است. این قید به این معنی است که توان تولیدشده و خریداری‌شده باید با توان مصرف‌شده و فروخته‌شده برابر باشد. رابطه ریاضی مربوط به تعادل توان به صورت (۲۹) است

$$P_{G-pur}^t + P_{MT}^t + P_{WT}^t + P_{dch}^t = \frac{P_{l,uc}^t + P_{l,c}^t}{\eta_l} + P_{G-sell}^t + P_{ch}^t \quad (29)$$

۲-۲-۷ توابع هدف

مدل پیشنهادی یک مسئله چندهدفه است که تابع هدف اول کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و تابع هدف دوم کاهش انتشار کربن است. هزینه‌های بهره‌برداری شامل هزینه خرید برق از شبکه و هزینه بهره‌برداری میکروتوربین و باتری است. همچنین ریزش شبکه پیشنهادی می‌تواند مازاد تولید خود را به شبکه بفروشد. در مورد انتشار کربن نیز میکروتوربین و نیروگاه‌های شبکه به عنوان منشأ انتشار کربن در نظر گرفته شده‌اند. روابط ریاضی مربوط به توابع هدف به صورت زیر است: رابطه (۳۰) نشان‌دهنده هزینه‌های بهره‌برداری و (۳۶) بیانگر انتشار کربن است

$$OF_1 = \sum_{t=1}^T (\pi_{G-pur}^t P_{G-pur}^t - \pi_{G-sell}^t P_{G-sell}^t + C_{MT}^t + \pi_{G-pur}^t (P_{ch}^t - P_{dch}^t)) \quad (30)$$

$$+ z_0 \Gamma + \sum_{t=1}^T q_t \quad (31)$$

$$z + q_t \geq d_t y_t, \quad t = 1, \dots, T \quad (31)$$

$$q_t \geq 0, \quad t = 1, \dots, T \quad (32)$$

$$y_t \geq 0, \quad t = 1, \dots, T \quad (33)$$

$$z \geq 0 \quad (34)$$

$$P_{G-pur}^t \leq y_t, \quad t = 1, \dots, T \quad (35)$$

$$OF_2 = \sum_{t=1}^T (\beta_G P_{G-pur}^t + \beta_{MT} P_{MT}^t) \quad (36)$$

$$\text{S.t} (1)-(6), (9)-(17), (29), (31)-(35)$$

$$C_t = a_t (P_t)^r + b_t P_t + c \quad (12)$$

$$P_{L_j} = P_{MT}^{\max} \quad (13)$$

$$P_{L_j} = P_{MT}^{\min} \quad (14)$$

۲-۲-۳ توربین بادی

امروزه آلودگی هوا یکی از نگرانی‌های اصلی جوامع بشری است. این نگرانی‌ها باعث شده تا انسان‌ها به استفاده از منابع پاک برای تولید انرژی گرایش پیدا کنند. یکی از این منابع، توربین‌های بادی هستند که با استفاده از وزش باد برق تولید می‌کنند. در این مقاله از توربین بادی به عنوان یکی از منابع پاک و تأثیرگذار در تولید برق استفاده شده که مدل ریاضی آن مطابق (۱۵) است [۲۴]

$$P_{WT}^t = \begin{cases} 0 & v^t < v_{in}, v^t > v_{out} \\ \frac{v^t - v_{in}}{v_n - v_{in}} P_n & v_{in} \leq v^t < v_n \\ P_n & v_n \leq v^t < v_{out} \end{cases} \quad (15)$$

۲-۲-۴ بارهای قابل کنترل

اخیراً برنامه‌های مدیریت تقاضا در سمت مصرف در سیستم‌های هوشمند به عنوان یک روش مؤثر در کاهش پیک بار و اصلاح الگوی مصرف توجهات زیادی را به خود جلب کرده است [۲۵]. هدف اصلی برنامه‌های مدیریت تقاضا در سمت مصرف، تغییر الگوی بار با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و بهبود قابلیت اطمینان سیستم است. این برنامه‌ها باعث می‌شوند بخشی از مصرف به ساعت‌های کم‌باری منتقل شود تا مصرف‌کنندگان مجبور به خرید برق در ساعت‌هایی که قیمت برق زیاد است نشوند. روابط ریاضی برای مدل‌سازی بارهای قابل کنترل به صورت زیر است [۲۶]: رابطه (۱۶) بیان می‌کند که مجموع توان مصرفی توسط بارهای قابل کنترل برابر با انرژی مصرفی این بارها در ۲۴ ساعت است. رابطه (۱۷) نیز حداقل و حداکثر توان مصرفی بارهای قابل کنترل را نشان می‌دهد

$$\sum_{t=1}^{24} P_{l,c}^t = E_c \quad (16)$$

$$P_{l,c}^{\min} \leq P_{l,c}^t \leq P_{l,c}^{\max} \quad (17)$$

۲-۲-۵ بهینه‌سازی مقاوم

بهینه‌سازی مقاوم یکی از روش‌های مقابله با عدم قطعیت پارامترها است. در این روش نیازی به تابع توزیع احتمال برای تولید سناریو نیست بلکه برای پارامتر دارای عدم قطعیت بازه‌ای تعریف می‌شود که مقادیر پیش‌بینی شده و حداکثر میزان انحراف از مقدار پیش‌بینی می‌باشد. پس از انتخاب بازه مسئله را برای بدترین حالت بهینه‌سازی می‌کنند تا مسئله برای سایر شرایط نیز بهینه باشد. فرض کنید مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر باشد

$$\min \sum_{t=1}^T c_t x_t \quad (18)$$

$$\text{S.t} \sum_{t=1}^T a_{nt} x_t \leq b_n, \quad n = 1, \dots, M \quad (19)$$

$$x_t \geq 0, \quad t = 1, \dots, T \quad (20)$$

اگر پارامتر c دارای عدم قطعیت باشد، باید بازه‌ای برای آن تعریف کرد که به صورت $[c-d, c+d]$ باشد و در بیانگر حداکثر تغییر پارامتر دارای

دست می‌آید

$$\mu_i^k = \begin{cases} 1 & F_i^k \leq \min F_i \\ \frac{\max F_i - F_i^k}{\max F_i - \min F_i} & \min F_i \leq F_i^k \leq \max F_i \\ 0 & F_i^k \geq \max F_i \end{cases} \quad (40)$$

در (۴۰)، F_i^k تابع i -ام در جواب k -ام و μ_i^k تابع عضویت آن است. سپس با استفاده از (۴۱)، تابع عضویت کل برای هر یک از جواب‌ها به دست می‌آید و در نهایت جوابی که دارای بیشترین مقدار تابع عضویت باشد به عنوان جواب بهینه انتخاب می‌شود

$$\mu^k = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \mu_i^k}{\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N w_i \mu_i^k} \quad (41)$$

که در این رابطه w_i ضریب وزنی برای هر تابع هدف است که در تابع عضویت مربوط به آن تابع هدف (μ_i^k) ضرب می‌شود. M تعداد جواب‌ها و N تعداد توابع هدف است.

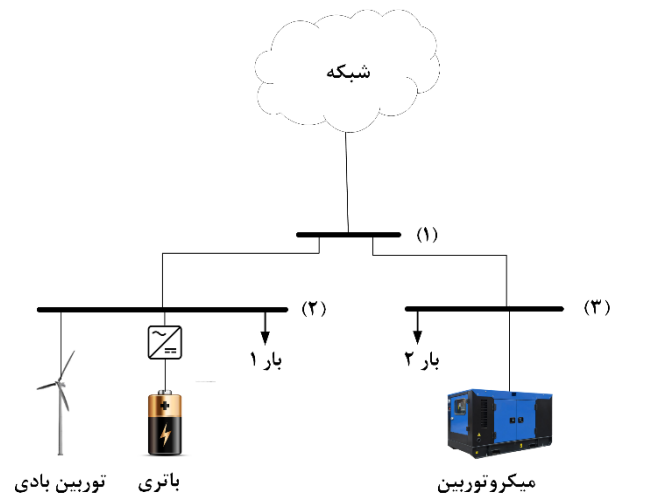
۴- نتایج عددی

به منظور ارزیابی کارامدی مدل پیشنهادی، یک سیستم آزمایشی ساده به عنوان ریزشکبه هوشمند شامل توربین بادی، میکروتوربین و ذخیره‌ساز انرژی در نظر گرفته شده است. در این مدل‌سازی، دو تابع هدف به منظور کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و کاهش انتشار کربن ارائه شده که توسط روش اپسیلون- محدودیت حل شده است. سیستم آزمایشی مورد مطالعه برای شبیه‌سازی در شکل ۲ آمده است. مطابق شکل، ریزشکبه پیشنهادی از سه شین تشکیل شده که شین ۱، شین اسلک است. توربین بادی، باتری و بار ۱ به شین ۲ متصل شده‌اند و میکروتوربین و بار ۲ به شین ۳ وصل هستند. از طرفی همان‌طور که گفته شد، این ریزشکبه به شبکه اصلی متصل بوده و با آن تبادل انرژی می‌کند. لازم به ذکر است که این مدل‌سازی یک مدل‌سازی خطی است که با برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح (MIP) توسط حل‌کننده CPLEX در محیط نرم‌افزار GAMS اجرا شده است. همچنین مراحل مختلف انجام شبیه‌سازی در شکل ۳ نشان داده شده است.

۴-۱ اطلاعات مسئله

در این قسمت اطلاعات مربوط به ریزشکبه هوشمند پیشنهادی به منظور انجام بهینه‌سازی ارائه می‌شود. شکل ۴ قیمت خرید برق از شبکه اصلی و فروش برق به آن را که به صورت تعرفه زمان استفاده^۴ است نشان می‌دهد. این نوع تعرفه یک تعرفه معمول در بهره‌برداری از ریزشکبه‌هاست. در این مقاله نیز از تعرفه زمان استفاده دوسطحی استفاده شده و همچنین قیمت خرید برق غیر قطعی فرض شده است. مطابق شکل ۴ از ساعت ۱ تا ۱۲ و ۲۱ تا ۲۴، زمان‌های کم‌باری بوده و از ساعت ۱۳ تا ۲۱ نیز زمان‌های پرباری است. اطلاعات ذخیره‌ساز انرژی یا همان باتری که مربوط به حداکثر شارژ و دشارژ، بازده آنها و همچنین حداقل و حداکثر انرژی قابل ذخیره و انرژی اولیه است در جدول ۱ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که وضعیت شارژ باتری در ساعت‌های مختلف از حل مسئله بهینه‌سازی به دست می‌آید. همچنین مقدار انرژی

4. Time of Use



شکل ۲: سیستم آزمایشی مورد مطالعه.

۳- روش بهینه‌سازی مسئله

در این بخش نیز روش حل مسئله بهینه‌سازی ارائه می‌گردد که با استفاده از آنها مدل چندهدفه ریزشکبه هوشمند پیشنهادی بهینه‌سازی شود تا جواب‌های مسئله به دست بیاید.

۳-۱ روش اپسیلون- محدودیت

روش اپسیلون- محدودیت^۱، یک روش بهینه‌سازی کلاسیک برای حل مسئله‌های چندهدفه است. در این روش، یکی از توابع به عنوان تابع هدف اصلی در نظر گرفته شده و بقیه توابع هدف به عنوان قید برای تابع هدف اصلی در نظر گرفته می‌شوند. روابط ریاضی برای یک مسئله چندهدفه فرضی به صورت زیر است

$$\min F_1 \quad (37)$$

$$\text{s.t } F_r \leq e_{r_i} \quad , \quad F_r \geq e_{r_j}$$

$$e_{r_i} = \max F_r - \frac{\max F_r - \min F_r}{q_r} \times i \quad , \quad i = 0, 1, \dots, q_r \quad (38)$$

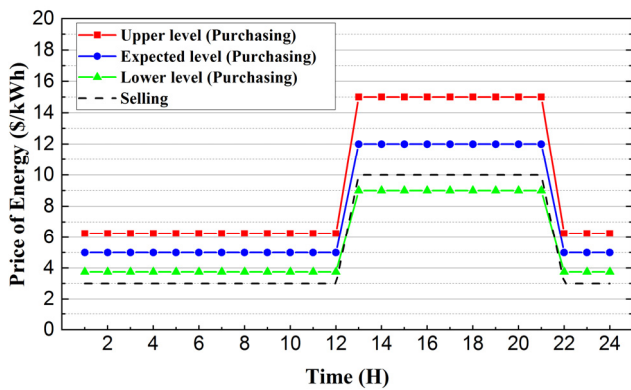
$$e_{r_j} = \min F_r + \frac{\max F_r - \min F_r}{q_r} \times j \quad , \quad j = 0, 1, \dots, q_r \quad (39)$$

در (۳۷)، F_1 به عنوان تابع هدف اصلی و توابع F_r و F_r نیز به عنوان قید برای تابع هدف اصلی در نظر گرفته شده‌اند. e_{r_i} و e_{r_j} هم به عنوان محدودیت برای قیود مذکور به کار می‌روند که به ترتیب از (۳۸) و (۳۹) به دست می‌آیند. لازم به ذکر است که برای مسئله فوق به تعداد $(q_r + 1) \times (q_r + 1)$ جواب به دست می‌آید که فقط یکی از جواب‌ها، جواب بهینه است.

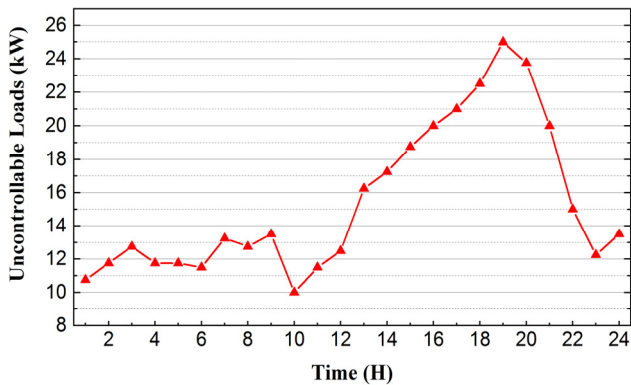
۳-۲ روش تصمیم‌سازی فازی

پس از آن که جواب‌های مسئله بهینه‌سازی به دست آمد باید یکی از جواب‌ها به عنوان جواب بهینه انتخاب شود که این جواب از طریق روش تصمیم‌سازی فازی^۲ به دست می‌آید. در این روش با استفاده از (۴۰) برای هر کدام از توابع هدف در هر کدام از جواب‌ها یک تابع عضویت^۳ به

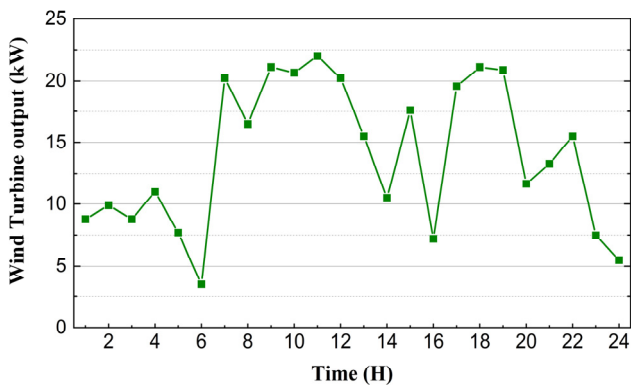
1. ϵ -Constraint
2. Fuzzy Decision Making
3. Membership Function



شکل ۴: قیمت خرید و فروش برق.



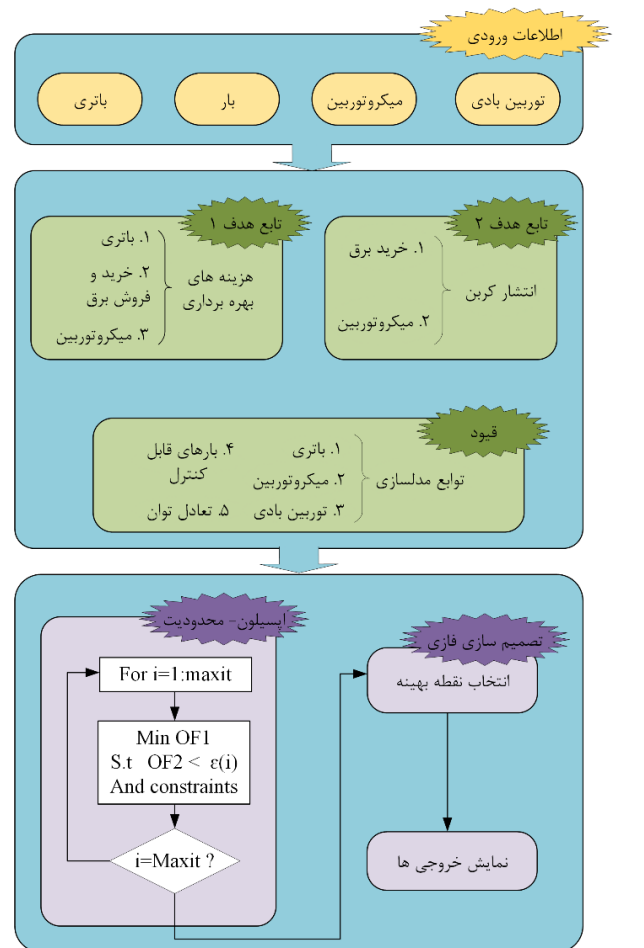
شکل ۵: الگوی بارهای غیر قابل کنترل.



شکل ۶: تولید توان توسط توربین بادی.

۴-۲ نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی پرداخته خواهد شد. همان‌طور که بیان شد این شبیه‌سازی یک مدل چندهدفه است و دو تابع هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و کاهش انتشار کربن در تضاد با یکدیگر هستند، به عبارت دیگر افزایش یا کاهش یکی از دو تابع هدف اثر عکس بر روی تابع هدف دارد. از این رو شبیه‌سازی با روش اپسیلون-محدودیت استفاده شده و منحنی پرتوی آن در شکل ۷ نشان داده شده است. در بین نقاط موجود در شکل ۷، نقطه قرمز رنگ با استفاده از روش تصمیم‌سازی فازی به عنوان مقادیر بهینه انتخاب شده است یعنی مقادیر ۲۳۸ کیلوگرم برای انتشار کربن و ۴۶۶۶ دلار برای هزینه‌های بهره‌برداری، مقادیر بهینه شبیه‌سازی ریزشکه هوشمند پیشنهادی هستند و توان تولید میکروتوربین، شارژ و دشارژ باتری، مقدار مبادله توان با شبکه و توان مصرفی بارهای قابل کنترل بر اساس مقادیر بهینه هزینه‌های بهره‌برداری و انتشار کربن ذکر شده به دست آمده است.



شکل ۳: روند کلی انجام‌شده در این مقاله.

جدول ۱: اطلاعات باتری.

P_{ch}^{max} (kW)	P_{dch}^{max} (kW)	E_{SOC}^{min} (kWh)	E_{SOC}^{max} (kWh)	E_{SOC} (kWh)	η_{ch}	η_{dch}
۱۰	۱۰	۱۰	۸۰	۱۰	۰٫۸	۰٫۸

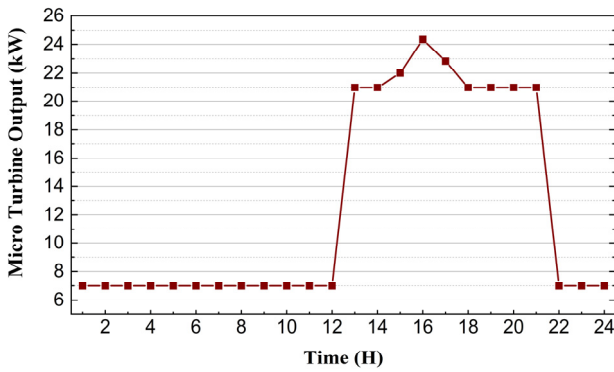
جدول ۲: اطلاعات بارهای قابل کنترل.

$P_{l,c}^{min}$ (kW)	$P_{l,c}^{max}$ (kW)	E_c (kWh)	زمان بهره‌برداری (ساعت)
۷	۱۵	۱۴۰	۷-۱۹

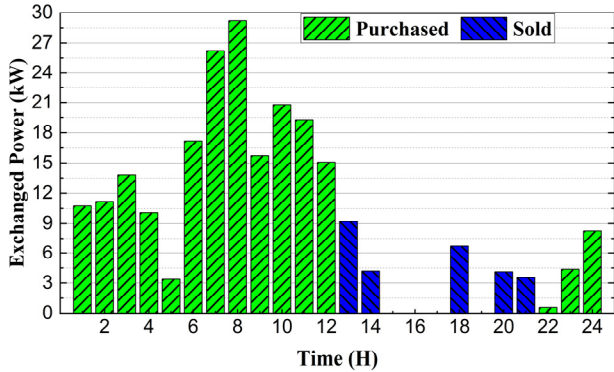
جدول ۳: اطلاعات میکروتوربین.

j	Pl_j	m_j	a	b	c
۱	۷	-	۰٫۰۸	۵٫۳	۹۰
۲	۱۳	۳٫۹			
۳	۱۷	۴٫۷			
۴	۲۱	۵٫۳۴			
۵	۲۵	۵٫۸۹			

مصرفی روزانه و حداقل و حداکثر توان قابل بهره‌برداری در هر ساعت توسط مجموعه بارهای قابل کنترل و همچنین بازه زمانی قابل قبول برای بهره‌برداری از این بارها در جدول ۲ بیان شده است. الگوی بارهای غیر قابل کنترل و نیز مقدار تولید توان توسط توربین بادی که در این مدل‌سازی با مقادیر قطعی فرض شده‌اند، به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ آمده است. در نهایت، جدول ۳ اطلاعات مربوط به مدل خطی‌سازی شده میکروتوربین را نشان می‌دهد.



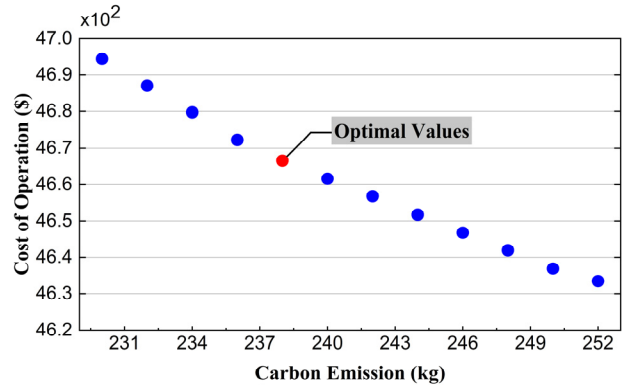
شکل ۱۰: مقدار تولید میکروتوربین.



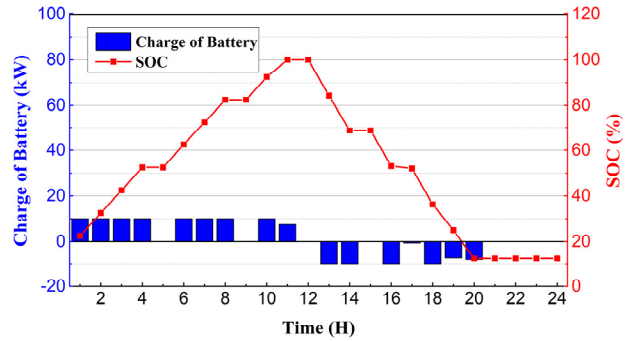
شکل ۱۱: مقدار توان مبادله‌شده با شبکه.

میکروتوربین به عنوان وسیله‌ای که نقش زیادی در تأمین نیاز مصرف‌کنندگان دارد، دارای سهم قابل توجهی در هزینه‌های بهره‌برداری و آلودگی هوا است که مقدار توان تولیدشده توسط آن در هر ساعت در شکل ۱۰ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود از ساعت ۱ تا ۱۲ و ۲۲ تا ۲۴ که قیمت برق شبکه از قیمت تولیدی توسط میکروتوربین کمتر است، میکروتوربین با حداقل ظرفیت خود توان تولید می‌کند. همچنین از ساعت ۱۳ تا ۲۱ به صرفه است که میکروتوربین توان تولیدی خود را افزایش دهد. از طرفی مطابق شکل ۱۰، میکروتوربین در هیچ ساعتی با حداکثر توان خود کار نمی‌کند و این موضوع به خاطر بحث انتشار کربن است. چرا که میکروتوربین یکی از عوامل انتشار کربن است که در تابع هدف دوم به آن اشاره شده و تولید توان کمتر توسط میکروتوربین به معنی تولید کم آلودگی است. از این رو میکروتوربین هیچ‌گاه با حداکثر توان خود کار نمی‌کند.

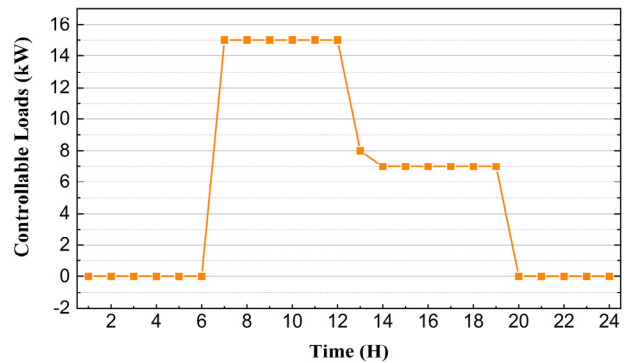
شکل ۱۱ مقدار توان مبادله‌شده با شبکه در ۲۴ ساعت را نشان می‌دهد. مطابق با آنچه در شکل مشاهده می‌شود در زمان‌های کم‌باری یعنی بین ساعت ۱ تا ۱۲ و ۲۲ تا ۲۴ که قیمت برق با تعرفه کم محاسبه می‌شود، ریزشکبه از شبکه برق می‌خرد تا نیاز مصرف‌کنندگان را تأمین کند و ساعت‌های پرباری یعنی بین ساعت‌های ۱۳ تا ۲۱ که قیمت برق زیاد است، نیاز مصرف‌کنندگان را از طریق توربین بادی و میکروتوربین و همچنین دشارژ باتری تأمین می‌کند و مازاد تولید خود را به شبکه می‌فروشد تا با ایجاد درآمد هزینه‌های بهره‌برداری را کاهش دهد. در نهایت برای نشان‌دادن کارآمدی مدل پیشنهادی، نتایج به دست آمده در این مقاله با چند تحقیق مشابه مقایسه گردیده و نتایج مقایسه در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روش پیشنهادی در پژوهش حاضر باعث شده تا هزینه‌های بهره‌برداری در این مقاله نسبت به بقیه تحقیقات نشان داده شده در جدول ۴ کاهش بیشتری داشته باشد که این کاهش هزینه به صورت درصد نشان داده شده است. لازم به ذکر



شکل ۷: منحنی پرتوی حاصل از شبیه‌سازی.



شکل ۸: وضعیت شارژ و دشارژ باتری.



شکل ۹: الگوی مصرف بارهای قابل کنترل.

شکل ۸ وضعیت شارژ و دشارژ باتری را در طول ۲۴ ساعت نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود باتری در ساعت‌هایی که قیمت برق کم است، شارژ و ساعت‌هایی که قیمت برق زیاد است، دشارژ می‌شود تا در ساعت‌های پرباری با تغذیه مصرف‌کننده‌ها و همچنین فروش مازاد انرژی خود به شبکه، هم باعث کاهش نیاز ریزشکبه به خرید برق از شبکه و هم باعث ایجاد درآمد برای ریزشکبه گردد. به عنوان مثال از ساعت ۱ تا ۱۲ که قیمت برق کم است باتری شارژ شده و بین ساعت‌های ۱۳ تا ۲۱ که قیمت برق زیاد است دشارژ شده است.

الگوی مصرف بارهای قابل کنترل در شکل ۹ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بارهای قابل کنترل در ساعت‌هایی که قیمت برق زیاد است با حداقل توان و زمان‌هایی که قیمت برق کم است با حداکثر توان خود کار می‌کنند. مثلاً از ساعت ۷ تا ۱۲ که قیمت برق کم است با حداکثر توان و از ساعت ۱۳ تا ۱۹ که قیمت برق زیاد است با حداقل توان خود کار می‌کنند. به عبارت دیگر، انتقال مصرف حداکثری بارهای قابل کنترل به ساعت‌های کم‌باری برای ایجاد تعادل بین بارهای قابل کنترل و غیر قابل کنترل برای اصلاح پیک بار است. لازم به ذکر است که بارهای قابل کنترل مجاز به بهره‌برداری بین ساعت‌های ۷ تا ۱۹ است.

جدول ۴: مقایسه نتایج پژوهش حاضر با سایر تحقیقات.

تحقیق حاضر	مرجع [۲۷]	مرجع [۲۸]	مرجع [۲۹]	مرجع [۳۰]
سیستم آزمایشی	بخشی از شبکه توزیع	خانه مسکونی	دهکده	بخشی از شبکه توزیع
تجهیزات مورد استفاده	منابع تولید برقی	خودروی برقی	منابع تولید پراکنده	منابع تولید پراکنده
آلودگی هوا	دارد	ندارد	ندارد	ندارد
مدل سازی	خطی	غیر خطی	خطی	غیر خطی
عدم قطعیت	دارد	ندارد	دارد	ندارد
هزینه اولیه (دلار)	۶۴۴۰	۴۴,۷۷	۱۵۴۳۴	۵۸۴۵۶
هزینه روش پیشنهادی (دلار)	۴۶۶۶	۳۷,۹	۱۱۵۶۴	۵۱۸۹۰
میزان کاهش هزینه (درصد)	٪۲۷,۵	٪۱۵,۳	٪۱۵	٪۱۱,۳

- [3] D. T. Ton and M. A. Smith, "The US department of energy's microgrid initiative," *The Electricity J.*, vol. 25, no. 8, pp. 84-94, Oct. 2012.
- [4] Z. Wang, B. Chen, J. Wang, J. Kim, and M. M. Begovic, "Robust optimization based optimal DG placement in microgrids," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 5, no. 5, pp. 2173-2182, Sept. 2014.
- [5] S. A. Arefifar and Y. A. R. I. Mohamed, "DG mix, reactive sources and energy storage units for optimizing microgrid reliability and supply security," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1835-1844, May 2014.
- [6] A. Khodaei and M. Shahidehpour, "Microgrid-based co-optimization of generation and transmission planning in power systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 1582-1590, Dec. 2013.
- [7] L. Guo, W. Liu, B. Jiao, B. Hong, and C. Wang, "Multi-objective stochastic optimal planning method for stand-alone microgrid system," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 7, pp. 1263-1273, Feb. 2014.
- [8] S. A. Arefifar, A. R. M. Yasser, and T. H. El-Fouly, "Optimum microgrid design for enhancing reliability and supply-security," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1567-1575, Aug. 2013.
- [9] V. Kalkhambkar, R. Kumar, and R. Bhakar, "Joint optimal allocation methodology for renewable distributed generation and energy storage for economic benefits," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 9, pp. 1422-1429, Jun. 2016.
- [10] W. Gu, Z. Wu, R. Bo, W. Liu, G. Zhou, W. Chen, et al., "Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: a review," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 54, pp. 26-37, Jan. 2014.
- [11] S. A. Arefifar, Y. A. R. I. Mohamed, and T. El-Fouly, "Optimized multiple microgrid-based clustering of active distribution systems considering communication and control requirements," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 2, pp. 711-723, Aug. 2015.
- [12] A. R. Malekpour, T. Niknam, A. Pahwa, and A. K. Fard, "Multi-objective stochastic distribution feeder reconfiguration in systems with wind power generators and fuel cells using the point estimate method," *IEEE Trans. Power Syst*, vol. 28, no. 2, pp. 1483-1492, Oct. 2013.
- [13] X. Shen, M. Shahidehpour, S. Zhu, Y. Han, and J. Zheng, "Multi-stage planning of active distribution networks considering the co-optimization of operation strategies," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 1425-1433, Jul. 2018.
- [14] X. Guan, Z. Xu, and Q. S. Jia, "Energy-efficient buildings facilitated by microgrid," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 243-252, Nov. 2010.
- [15] E. Fabrizio, V. Corrado, and M. Filippi, "A model to design and optimize multi-energy systems in buildings at the design concept stage," *Renewable Energy*, vol. 35, no. 3, pp. 644-655, Mar. 2010.
- [16] S. Saboori, R. Kazemzadeh, and H. Saboori, "Stochastic analysis of wind energy uncertainty impact on ISO risk-taking in joint energy and reserve markets using conditional value at risk," *J. of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 8, no. 5, p. 053101, Sept. 2016.
- [17] S. Pazouki and M. R. Haghifam, "Optimal planning and scheduling of energy hub in presence of wind, storage and demand response under uncertainty," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 80, pp. 219-239, Sept. 2016.
- [18] F. Adamek, M. Arnold, and G. Andersson, "On decisive storage parameters for minimizing energy supply costs in multicarrier energy systems," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 102-109, Aug. 2014.
- [19] E. E. Ufluoglu and G. Kayakutlu, "Mathematical model for a microgrid consisting of wind turbine, PV panels, and energy storage unit," *J. of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 8, no. 5, p. 054101, Sept. 2016.

است که هر کدام از تحقیقات بیان شده در جدول ۴ سیستم آزمایشی متفاوتی دارند و بدیهی است که مقدار هزینه‌های بهره‌برداری متفاوت باشد. برای مثال [۲۷]، بخشی از یک شبکه توزیع را به عنوان ریزشبهه در نظر گرفته و [۲۸] یک خانه مسکونی را به عنوان ریزشبهه فرض کرده است ولی آنچه مهم می‌باشد میزان تأثیر روش پیشنهادی در هزینه‌ها است که به صورت درصد بیان شده است. در این مقاله علاوه بر هزینه‌های بهره‌برداری، بحث آلودگی هوا نیز مطرح گردیده، همچنین از مدل سازی خطی برای رسیدن به بهینگی سراسری استفاده شده و از طرف دیگر عدم قطعیت‌های مدل سازی نیز در شبیه سازی لحاظ شده است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله به منظور مدیریت انرژی و بهره‌برداری بهینه در ریزشبهه‌ها، یک مدل کلی چندهدفه خطی با هدف‌های کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و کاهش انتشار کربن ارائه شده است. در این مدل سازی یک ریزشبهه هوشمند متصل به شبکه فرض شده که دو نوع بار الکتریکی قابل کنترل و غیر قابل کنترل را تغذیه می‌کند. بارهای غیر قابل کنترل دارای الگوی بار ثابت و بارهای قابل کنترل دارای بازه زمانی و حداقل و حداکثر توان بهره‌برداری هستند. تولیدکننده‌های توان متصل به این ریزشبهه شامل توربین بادی و میکروتوربین می‌باشند. تولید توان توسط توربین بادی به صورت قطعی فرض شده و تابع هزینه میکروتوربین که یک تابع درجه ۲ است نیز به صورت خطی مدل سازی شده است.

طبق نتایج به دست آمده مقادیر بهینه انتشار کربن و هزینه‌های بهره‌برداری به ترتیب ۲۳۸ کیلوگرم و ۴۶۶۶ دلار است. باتری نیز در ساعت‌های کم‌باری که قیمت برق کم است، شارژ و ساعت‌های پرباری دشارژ می‌شود تا مصرف‌کننده‌ها را تغذیه کند. میکروتوربین در ساعت‌های پرباری با حداقل ظرفیت خود و در ساعت‌های کم‌باری با ظرفیت بیشتری توان تولید می‌کند. بارهای قابل کنترل نیز به زمان‌های کم‌باری انتقال داده شده‌اند تا هزینه‌ها کاهش یابد و در نهایت این ریزشبهه، زمانی که قیمت برق کم است از شبکه برق می‌خرد و زمانی که قیمت برق زیاد می‌باشد به شبکه برق می‌فروشد تا با ایجاد درآمد، هزینه‌های بهره‌برداری را کاهش دهد.

مراجع

- [1] A. A. A. Radwan and Y. A. R. I. Mohamed, "Linear active stabilization of converter-dominated DC microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 203-216, Oct. 2012.
- [2] Y. Xia, K. H. Ahmed, and B. W. Williams, "Wind turbine power coefficient analysis of a new maximum power point tracking technique," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 3, pp. 1122-1132, Jun. 2013.

- [29] R. Palma-Behnke, C. Benavides, F. Lanás, B. Severino, L. Reyes, J. Llanos, *et al.*, "A microgrid energy management system based on the rolling horizon strategy," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 996-1006, Jan. 2013.
- [30] ع. مهدی‌زاده، ک. نوید تقی‌زادگان و ج. صالحی، "بهره‌برداری بهینه ریزشبکه AC در حضور خودروهای برقی تحت مدیریت طرف تقاضا،" *مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، الف-مهندسی برق*، سال ۱۶، شماره ۳، صص. ۲۰۴-۱۹۶، پاییز ۱۳۹۷.
- امین نامور** در سال ۱۳۹۴ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز و در سال ۱۳۹۷ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه شهید مدنی آذربایجان دریافت نمود. نام‌برده از سال ۱۳۹۷ به دوره دکتری مهندسی برق در دانشگاه شهید مدنی آذربایجان وارد گردید و در حال حاضر مشغول تحصیل در مقطع دکتری است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: مدیریت انرژی و بهره‌برداری از ریزشبکه.
- نوید تقی‌زادگان کلانتری** در سال ۱۳۶۸ مدرک کارشناسی مهندسی برق با گرایش الکترونیک خود را از دانشگاه تبریز و در سال ۱۳۷۳ نیز مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق با گرایش قدرت خود را از دانشگاه تهران دریافت نمود. از سال ۱۳۷۴ الی ۱۳۹۱ نام‌برده به‌عنوان عضو هیأت علمی - صنعتی در وزارت نیرو مشغول آموزش و تحقیق بوده و در این اثنا نیز در سال ۱۳۷۹ به دوره دکتری مهندسی برق گرایش قدرت در دانشگاه تبریز وارد گردیده و در سال ۱۳۸۶ موفق به اخذ درجه دکترا از دانشگاه مذکور گردید. دکتر تقی‌زادگان از سال ۱۳۹۱ در دانشکده فنی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان در تبریز مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی با مرتبه دانشیاری این دانشکده می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند ایده‌های نو در سیستم‌های قدرت، حفاظت سیستم‌های قدرت، شبکه‌های توزیع و قابلیت اطمینان در مهندسی برق می‌باشد.
- [20] J. Rajasekharan and V. Koivunen, "Optimal energy consumption model for smart grid households with energy storage," *IEEE J. of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 6, pp. 1154-1166, Oct. 2014.
- [21] M. Q. Wang and H. Gooi, "Spinning reserve estimation in microgrids," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 1164-1174, Jan. 2011.
- [22] J. Sumbera, *Modelling Generator Constraints for the Self-Scheduling Problem*, Econometrics and Operational Research, University of Economics, Prague, Czech Republic, 2012.
- [23] S. Moradi, R. Ghaffarpour, A. M. Ranjbar, and B. Mozaffari, "Optimal integrated sizing and planning of hubs with midsize/large CHP units considering reliability of supply," *Energy Conversion and Management*, vol. 148, pp. 974-992, Sept. 2017.
- [24] S. Xia, X. Luo, K. W. Chan, M. Zhou, and G. Li, "Probabilistic transient stability constrained optimal power flow for power systems with multiple correlated uncertain wind generations," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 1133-1144, Mar. 2016.
- [25] T. Logenthiran, D. Srinivasan, and K. Vanessa, "Demand side management of smart grid: load shifting and incentives," *J. of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 6, no. 3, p. 033136, May 2014.
- [26] N. Li, L. Chen, and S. H. Low, "Optimal demand response based on utility maximization in power networks," in *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 8 pp., Detroit, MI, USA, 24-28 Jul. 2011.
- [27] M. Shamshirband, J. Salehi, and F. S. Gazijahani, "Decentralized trading of plug-in electric vehicle aggregation agents for optimal energy management of smart renewable penetrated microgrids with the aim of CO2 emission reduction," *J. of Cleaner Production*, vol. 200, pp. 622-640, Nov. 2018.
- [28] A. H. Mohsenian-Rad, V. W. Wong, J. Jatskevich, R. Schober, and A. Leon-Garcia, "Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 320-331, Nov. 2010.