

طراحی ریزشبکه توزیع در حضور منابع انرژی هیبریدی به منظور کاهش هزینه بهره‌برداری و افزایش درآمد تجمیع کننده منابع

میثاق بن سعید و ناصر عرفانی مجد

از این منابع است [۸]. با گسترش استفاده از منابع انرژی توزیع‌شده، پژوهش‌های متعددی در زمینه مدیریت و بهره‌برداری بهینه از این منابع انجام شده است. در این میان، ریزشبکه‌ها به‌عنوان بستری مناسب برای تجمیع و مدیریت منابع تولید پراکنده، نقش مهمی در افزایش قابلیت اطمینان، پایداری و بهره‌وری شبکه‌های توزیع ایفا می‌کنند [۹] تا [۱۰].

در برخی از پژوهش‌های موجود تنها از دیدگاه بهره‌بردار شبکه توزیع به برنامه‌ریزی منابع تولید پراکنده پرداخته شده است، در حالی که در تحقیقات دیگر دیدگاه‌های متنوع تری از جمله مالکیت منابع و منافع عمومی مانند کاهش آلایندگی زیست‌محیطی نیز مدنظر قرار گرفته شده است. در سال‌های اخیر، به دلیل نگرانی‌های زیست‌محیطی و هزینه‌های فزاینده سوخت، دولت‌ها مشوق‌هایی برای تولید انرژی پاک ارائه داده‌اند. در این راستا، بهینه‌سازی ریزشبکه‌ها و مدیریت سمت تقاضا برای افزایش کارایی و قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع ضروری است. در برخی از پژوهش‌های موجود در این زمینه به برنامه‌ریزی بهینه ریزشبکه‌های متشکل از منابع غیرقابل تنظیم (مانند بادی و خورشیدی) و منابع قابل تنظیم (مانند پیل سوختی و توربین میکرو گاز) پرداخته شده و از الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری برای حل مسائل بهینه‌سازی استفاده شده است [۲] تا [۹]. در مرجع [۱] بهینه‌سازی ریزشبکه‌ها با منابع غیرقابل تنظیم و قابل تنظیم جهت کاهش هزینه‌ها و انتشار گازهای گلخانه‌ای انجام شده است. در مرجع [۲] روش برنامه‌ریزی مبتنی بر بازی غیرهمکارانه^۱ برای ریزشبکه‌ها پیشنهاد شده، که در این روش با حضور ذخیره‌ساز هیدروژنی، با تکمیل اطلاعات ناقص ورودی به عدم قطعیت‌ها در حالت جزیره‌ای پرداخته شده است. در مرجع [۳] چارچوب جدیدی برای برنامه‌ریزی منابع تولید پراکنده و ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی در ریزشبکه‌ها پیشنهاد شده که در دو حالت متصل و منفصل از شبکه سراسری عمل می‌نماید. در مرجع [۴] روش مکان‌یابی بهینه منابع تولید پراکنده برای کاهش تلفات انرژی در ریزشبکه‌ها پیشنهاد شده است. در مرجع [۵] مدلی برای طراحی بهینه یک مزرعه بادی با نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای ارائه شده است. این مدل برنامه‌ریزی تولید بهینه را با هدف بهبود سودآوری و کاهش تغییرات توان فعال مورد بررسی قرار می‌دهد. در مرجع [۶] به بهینه‌سازی ریزشبکه‌های توزیع از نگاه مالک منابع با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و ذخیره‌ساز برای کاهش هزینه‌ها، تلفات انرژی و افزایش تاب‌آوری شبکه پرداخته شده است. در این مرجع با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جغرافیای زیستی، عملکرد شبکه بهبود یافته و سودآوری منابع تولید پراکنده افزایش یافته است. در مرجع [۷] روش بهینه‌سازی ظرفیت و مکان منابع تولید پراکنده با تکیه بر

چکیده: با توسعه منابع انرژی هیبریدی و ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی، بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع انعطاف‌پذیری بیشتری پیدا کرده است. به‌منظور کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، مدیریت بهینه این منابع در شبکه توزیع ضروری است. از آنجا که مالکیت این منابع معمولاً خصوصی می‌باشند، لازم است در تابع هدف، علاوه بر هزینه بهره‌برداری، درآمد مالکان نیز لحاظ شود. این تحقیق یک مدل بهینه‌سازی برای مکان‌یابی و ظرفیت‌یابی منابع انرژی هیبریدی در کنار نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای ارائه می‌دهد تا ریزشبکه‌ای با قابلیت بهره‌برداری به صورت جزیره‌ای طراحی شود. مدل پیشنهادی از دیدگاه بهره‌برداری شبکه توسط تجمیع‌کننده منابع انرژی ارائه شده است. تابع هدف شامل کاهش هزینه تلفات، هزینه تأمین انرژی، افزایش منافع تجمیع‌کننده و بهبود قابلیت اطمینان شبکه می‌باشد. عدم قطعیت‌های توان مصرفی و تولیدی منابع در قالب سناریوهای زمانی مدل‌سازی شده و از الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری و آموزش در نرم‌افزار متلب برای بهینه‌سازی استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی روی شبکه توزیع ۶۹ باس استاندارد، نشان‌دهنده برتری مدل پیشنهادی در کاهش هزینه‌ها و افزایش درآمد تجمیع‌کننده منابع می‌باشد.

کلیدواژه: طراحی ریزش‌بکه، منابع انرژی هیبریدی، هزینه بهره‌برداری، درآمد
تجمیع‌کننده منابع، الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری و آموزش.

١- مقدمه

در دهه اخیر، با توسعه منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر و ذخیره‌سازهایی مانند باتری‌ها و نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای تحول چشمگیر و گسترده‌ای در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی صورت پذیرفته است. این تحولات به ایجاد تمایل برای کسب درآمد از سرمایه‌گذاری در منابع تولیدی در سطح شبکه توزیع انرژی الکتریکی و شکل‌گیری ریزشبکه‌های توزیع منجر شده است [۸] تا [۷]. ریزشبکه‌ها به مجموعه‌ای از بارها، منابع تولید پراکنده و سیستم‌های کنترلی اطلاق می‌شود که می‌توانند به صورت مستقل از شبکه سراسری عمل نمایند. با توجه به گسترش استفاده از منابع تولید پراکنده انرژی، نیاز به توسعه ریزشبکه‌ها در شبکه توزیع برق بیشتر شده است [۸] تا [۷]. بر اساس آمار، ظرفیت کل تولید برق به وسیله منابع تجدیدپذیر در جهان تا پایان سال ۲۰۲۲ حدود ۳۳۷۲ گیگاوات بوده که نشان‌دهنده رشد قابل توجه استفاده

این مقاله در تاریخ ۸ اسفند ماه ۱۴۰۳ دریافت و در تاریخ ۱۴ مرداد ماه ۱۴۰۵ بازنگری شد.

میثاق بن سعید، گروه مهندسی برق، پردیس صنعتی شهدای هوپزه، دانشگاه شهید
چمران اهواز، اهواز، ایران، (email: misaghbensaeed@gmail.com).

ناصر عرفانی مجد (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی برق، پردیس صنعتی
شهدای هویزه، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران،
(email: n.erfanimajd@scu.ac.ir).

عملکرد سیستم مورد ارزیابی قرار گرفته شده است.

۲- ساختار مدل پیشنهادی

در این تحقیق به منظور طراحی مدل برای ریزشبه، به تعیین مکان و ظرفیت بهینه منابع هیبریدی و ذخیره ساز تلمبه ذخیره ای پرداخته شده است تا ریزشبه بتواند بخشی از بار خود را تأمین نموده و در مواقع لزوم به صورت مستقل از شبکه به صورت جزیره ای عمل نماید. منابع انرژی هیبریدی شامل منابع خورشیدی، بادی، دیزلی و نیروگاه تلمبه‌ذخیره ای می باشند. مسئله طراحی ریزشبه به صورت یک مدل بهینه سازی غیرخطی فرمول بندی شده است. هدف این تحقیق کاهش هزینه های بهره برداری و افزایش درآمد تجمیع کننده منابع انرژی می باشد. مدل ریزشبه بر روی شبکه ۶۹ باس استاندارد IEEE پیاده سازی شده است. هزینه های بهره برداری به ترتیب شامل هزینه تلفات، هزینه خرید انرژی از سیستم انتقال، هزینه بار تأمین نشده و هزینه زیست محیطی مانند انتشار کربن می باشند. همچنین درآمد تجمیع کننده به ترتیب از فروش انرژی تجمیع شده به بهره بردار شبکه توزیع انرژی و همچنین مابه التقات فروش انرژی از شبکه توزیع به شبکه انتقال انرژی حاصل می شود. در این پژوهش، بهره بردار ریزشبه و تجمیع کننده منابع انرژی به عنوان یک نهاد واحد فرض شده اند و تابع هدف از دیدگاه این نهاد یکپارچه تدوین شده است و مدل پیشنهادی یک چارچوب برنامه ریزی مبتنی بر بهره برداری ریزشبه است که در آن مکان یابی، ظرفیت یابی و بهره برداری منابع انرژی به صورت همزمان بهینه می شوند. در این تحقیق، از الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر یادگیری و آموزش^۳ (TLBO) برای بهینه سازی مدل ریزشبه (که در (۱) بیان خواهد شد) استفاده شده است.

۲-۱ مدل ریاضی و محدودیت های مسئله

در این بخش به ارائه روابط ریاضی مسئله برنامه ریزی به منظور طراحی ریزشبه توزیع و تشریح الگوریتم های حل مسئله پرداخته می شود. تابع هزینه سیستم توصیف شده در بخش قبل به صورت رابطه زیر تعریف می شود

$$F = \sum_{t=1}^T ot_t \times \left(\left(wp_t \times PG_{i,t} \right) + \left(cl_t \times \sum_{br=1}^{BR} R_{br} \times I_{br,t}^r \right) + \left(rp_t \times \sum_{i=1}^B LNS_{i,t} \right) + \left(\sum_{i=1}^B \sum_{d=1}^D ep_t \times PG_{i,t}^d \right) - \left(\sum_{i=1}^B ced_t \times PG_{i,t}^d \right) - \left(cew_t \times PG_{i,t}^w \right) \right) \quad (1)$$

در این رابطه F تابع هدف، ot_t مدت زمان برقراری سناریوی زمانی، br اندیس شمارنده شاخه، BR تعداد کل شاخه ها در شبکه، t اندیس شمارنده زمان، T کل سناریوهای زمانی مورد مطالعه، i اندیس شمارنده باس، B کل باس های ریزشبه توزیع، d اندیس شمارنده منابع دیزلی، D تعداد کل منابع دیزلی، cl_t هزینه تلفات فیدرها در زمان t ، wp_t هزینه خرید برق از سیستم انتقال، $LNS_{i,t}$ مقدار بار تأمین نشده، ep_t هزینه انتشار آلاینده های زیست محیطی به ازای تولید توان توسط منابع دیزلی، rp_t هزینه توان تأمین نشده ریزشبه توزیع در حالت بهره برداری جزیره ای، ced_t قیمت خرید برق از تجمیع کنندگان منابع انرژی هیبریدی توسط بهره بردار شبکه توزیع، cew_t مابه التفاوت قیمت خرید برق از تجمیع کنندگان منابع انرژی هیبریدی توسط بهره بردار

کاهش انرژی تأمین نشده به جهت افزایش قابلیت اطمینان ریز شبکه ارائه شده است.

در مرجع [۹] نویسندگان وضعیت فعلی سامانه های مدیریت منابع انرژی پراکنده^۱ (DERMS) را بررسی و طبقه بندی نموده و نشان می دهند که این سامانه ها چگونه به مدیریت منابع انرژی پراکنده کمک می نمایند. در مرجع [۱۰] به مرور جامع معماری های مختلف ریزشبه، روش های مدیریت توان و راهکارهای افزایش تاب آوری پرداخته شده است. نتایج این تحقیق نشان می دهد که استفاده از سامانه های مدیریت انرژی و روش های کنترلی هوشمند، قابلیت اطمینان، پایداری و انعطاف پذیری ریزشبه ها را بهبود می بخشد و توسعه این فناوری ها برای ریزشبه های آینده ضروری است. در مرجع [۱۱] رویکرد برنامه ریزی چند هدفه برای تعیین مکان منابع تولید پراکنده در ریزشبه های کنترل افتی پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی انحرافات ولتاژ و فرکانس را در سطح تقاضا کاهش می دهد. در مرجع [۱۲] مدل بهینه سازی دو مرحله ای برای ریزشبه ها با ذخیره ساز هوای فشرده پیشنهاد شده است. نتایج این تحقیق اثر بخشی اقتصادی و حفاظتی را نشان می دهند. در مرجع [۱۳] روش طراحی جامع برای ریزشبه های جزیره ای با بارهای غیرخطی ارائه شده است. این روش ظرفیت و مکان ژنراتورهای تولید پراکنده را به صورت همزمان تعیین می کند. در مرجع [۱۴] مدل ریسک پذیری برای برنامه ریزی منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع ارائه شده است. این تحقیق به چالش های شبکه در حضور منابع تولید پراکنده پرداخته است. در مرجع [۱۵] طرحی برای یکپارچه سازی سلول های خورشیدی و پارکینگ های شارژ خودرو برقی پیشنهاد شده است و سناریوهای مختلفی برای بهره برداری از این سیستم تلفیقی مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۱۶] تجمیع کننده های پارکینگ های خودروهای برقی به نحوی برنامه ریزی شده اند که ظرفیت میزبانی شبکه توزیع از منابع تولید پراکنده را ارتقاء دهند و همچنین محدودیت های فنی آن مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۱۷] یک مدل چندهدفه برای مدیریت انرژی ریزشبه های جزیره ای با استفاده از الگوریتم MOMFA^۲ ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که روش پیشنهادی با مدیریت هماهنگ منابع انرژی، ذخیره سازها، خودروهای برقی و پاسخگویی بار، تاب آوری ریزشبه را افزایش داده و موجب کاهش تلفات، انحراف ولتاژ و انتشار آلاینده ها می شود. در مرجع [۱۸] با مرور جامع روش های مدل سازی منابع انرژی پراکنده، نقش مدل های هوشمند در بهبود مدیریت انرژی، افزایش قابلیت اطمینان و یکپارچه سازی منابع تجدیدپذیر در شبکه های هوشمند بررسی و بر توسعه روش های مبتنی بر هوش مصنوعی تأکید شده است.

در این تحقیق، بهینه سازی ریزشبه های توزیع با استفاده از منابع انرژی هیبریدی با هدف کاهش هزینه های اقتصادی، افزایش بهره وری و افزایش درآمد تجمیع کننده منابع تولید پراکنده مدنظر است. به منظور کاهش وابستگی به منابع دیزلی و افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیر، نیروگاه های تلمبه ذخیره ای برای ذخیره سازی انرژی در زمان های کم بار و تأمین آن در زمان های پیک به کار گرفته شده است. همچنین، قابلیت اطمینان ریزشبه با لحاظ کردن هزینه های بار تأمین نشده بهبود یافته و از طریق مدل سازی و بهینه سازی، تعادلی میان اهداف اقتصادی و زیست محیطی ایجاد شده است. در این راستا، از الگوریتم بهینه سازی فراابتکاری برای حل مسئله استفاده شده و با شبیه سازی های مختلف،

3. Teaching Learning Based Optimization

4. Cost of Electricity Distribution

5. Cost of Electric Wholesale

1. Distributed Energy Resource Management Systems

2. Multi-Objective Moth Flame Algorithm

رابطه (۹) نشان می‌دهد توان عبوری از هر فیدر به توان بیشینه فیدر یا همان حد حرارتی فیدر محدود می‌شود. در این رابطه، P_{br} میزان توان عبوری از فیدرهای شبکه توزیع است [۶] تا [۸].

$$|P_{br}| \leq P_{br, \max}, \quad br = 1, \dots, BR \quad (9)$$

رابطه (۱۰) محدودیت تعداد کل منابع تولید پراکنده مورد استفاده را نشان می‌دهد. مطابق این رابطه، تعداد کل منابع تولید پراکنده مورد استفاده در شبکه، به تعداد بیشینه منابع تولید پراکنده ($N_{dg, \max}$) محدود شده است [۶] تا [۸].

$$\sum_{dg=1}^{DG} N_{dg} \leq N_{dg, \max} \quad (10)$$

رابطه (۱۱) محدودیت باس‌های کاندید برای نصب منابع تولید پراکنده را نشان می‌دهد. مطابق این رابطه، در همه باس‌های شبکه توزیع به غیر از باس‌هایی که برای نصب منابع تولید پراکنده مدنظر است، میزان توان خروجی منابع تولید پراکنده برابر با صفر می‌باشد.

$$PG_{i,t} = 0, \forall i \in B - DGB \quad (11)$$

که در آن B کل باس‌ها و DGB باس‌های مدنظر برای منابع تولید پراکنده و $PG_{i,t}$ توان خروجی منابع تولید پراکنده است [۶] تا [۸]. محدودیت ظرفیت و تعداد واحدهای تولید پراکنده که یک قید اقتصادی است، در (۱۲) و (۱۳) مشخص شده است. مطابق این روابط، هم ظرفیت منابع C_i و هم تعداد منابع قابل نصب در هر باس N_i محدود شده است [۶] تا [۸].

$$|N_i| \leq N_{i, \max}, \quad i = 1, \dots, B \quad (12)$$

$$|C_i| \leq C_{i, \max}, \quad i = 1, \dots, B \quad (13)$$

در رابطه (۱۴) محدودیت توان اکتیو تولیدی منابع تولید پراکنده نشان داده شده است. در این رابطه، P_G توان اکتیو تولیدی از هر منبع اعم از تولید متمرکز و یا تولید پراکنده است [۶] تا [۸].

$$P_{G_i, \min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i, \max} \quad (14)$$

رابطه (۱۵) محدودیت توان راکتیو منابع تولید پراکنده را نشان می‌دهد. در این رابطه Q_G توان راکتیو تولیدی از هر منبع اعم از تولیدات متمرکز و یا تولیدات پراکنده می‌باشد. باید توجه داشت که منابع پراکنده بر حسب نوع کنترل و میزان ضریب توان مجازشان، دارای قدرت تولید توان راکتیو محدودی است [۶] تا [۸].

$$Q_{G_i, \min} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i, \max} \quad (15)$$

در رابطه (۱۶)، ظرفیت تولید توان اکتیو در نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای محدود شده است. در این رابطه $G_{ps,i}$ ظرفیت تولید توان در نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در باس i ام و $G_{ps, \max}$ بیشینه ظرفیت تولید توان در نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای است.

$$|G_{ps,i}| \leq G_{ps, \max} \quad (16)$$

ظرفیت مصرف توان اکتیو در نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای براساس (۱۷) محدود شده است. در این رابطه $D_{ps,i}$ ظرفیت مصرف توان در نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای و در باس i ام و $D_{ps, \max}$ بیشینه ظرفیت مصرف توان در نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای می‌باشد [۳] تا [۷].

$$|D_{ps,i}| \leq D_{ps, \max} \quad (17)$$

همچنین مطابق (۱۸)، میزان سطح آب در مخزن نیروگاه تلمبه

سیستم انتقال، $PG_{i,t}$ توان ورودی به ریزشکه از سمت سیستم انتقال، $PG_{i,t}^d$ توان خالص تزریقی از سمت منابع انرژی هیبریدی و نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای به ریزشکه توزیع، $PG_{i,t}^w$ توان خالص تزریقی از سمت منابع انرژی هیبریدی و نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای به سیستم انتقال، R_{br} مقاومت شاخه br در زمان t و $I_{br,t}$ دامنه جریان عبوری از شاخه br است.

در این تحقیق، هدف بهینه‌سازی تابع هدف در (۱) می‌باشد که شامل کاهش هزینه‌های تلفات، خرید انرژی از سیستم انتقال، تأمین انرژی مشترکین در شرایط جزیره‌ای و کاهش هزینه‌های انتشار کربن منابع دیزلی است. همچنین، تجمیع‌کننده منابع انرژی هیبریدی از فروش انرژی به ریزشکه و فروش توان مازاد به سیستم انتقال درآمد کسب خواهد کرد. برای یافتن راه‌حل‌های عملی و محدودیت‌های فنی و اقتصادی مانند ظرفیت تولید، نیازهای بار و قیمت انرژی در نظر گرفته شده است. در (۲) تا (۱۸) محدودیت حاکم بر سیستم تحت بررسی، بیان شده است. رابطه (۲)، پایداری توان اکتیو در باس‌های شبکه توزیع را نشان می‌دهد

$$P_i(V, \delta) - P_{Gi} + P_{Di} = 0 \quad (2)$$

در این رابطه P_{Gi} توان تولیدی در باس i ، P_{Di} توان مصرفی در باس i ، P_i توان انتقالی از باس i به سایر باس‌های متصل به آن می‌باشد. توان انتقالی از باس i به سایر باس‌های شبکه مطابق (۳) بدست می‌آید

$$P_i(V, \delta) = |V_i| \left| \sum_{j=1}^N |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \phi_{ij}) \right| \quad (3)$$

در این رابطه V ولتاژ باس، δ زاویه ولتاژ باس، Y_{ij} دامنه فازور ادمیتانس بین باس i و j و ϕ_{ij} زاویه فازور ادمیتانس است [۲] تا [۷]. در (۴)، پایداری توان راکتیو در باس‌های شبکه توزیع بیان شده است.

$$Q_i(V, \delta) - Q_{Gi} + Q_{Di} = 0 \quad (4)$$

که در آن Q_{Gi} توان تولیدی در باس i ، Q_{Di} توان مصرفی در باس i و Q_i توان انتقالی از باس i به سایر باس‌های متصل به آن می‌باشد. توان انتقالی از باس i به سایر باس‌های شبکه مطابق (۵) محاسبه می‌شود [۲] تا [۷]

$$Q_i(V, \delta) = |V_i| \left| \sum_{j=1}^N |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \phi_{ij}) \right| \quad (5)$$

که در آن V ولتاژ باس، δ زاویه ولتاژ باس، Y_{ij} دامنه فازور ادمیتانس بین باس i و j و ϕ_{ij} زاویه فازور ادمیتانس است رابطه (۶)، پایداری و تعادل توان اکتیو در کل شبکه توزیع را نشان می‌دهد

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi} - \sum_{i=1}^{N_D} P_{Di} - P_L = 0 \quad (6)$$

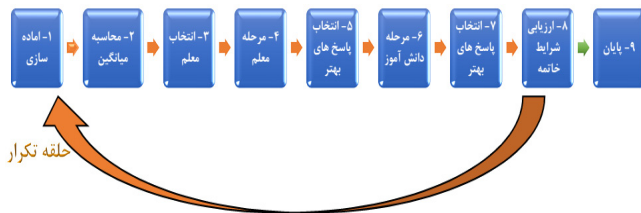
که در آن P_{Gi} توان اکتیو تولیدی در باس i ، P_{Di} توان اکتیو مصرفی در باس i و P_L تلفات توان اکتیو در کل شبکه می‌باشد. رابطه (۷) پایداری و تعادل توان راکتیو در کل شبکه توزیع را بیان می‌نماید

$$\sum_{i=1}^{N_G} Q_{Gi} - \sum_{i=1}^{N_D} Q_{Di} - Q_L = 0 \quad (7)$$

در این رابطه Q_{Gi} توان راکتیو تولیدی در باس i ، Q_{Di} توان راکتیو مصرفی در باس i و Q_L تلفات توان راکتیو در کل شبکه می‌باشد [۱] تا [۶]. ولتاژ باس می‌باید مطابق رابطه زیر بین دو مقدار حد کمینه و حد بیشینه قرار بگیرد

$$V_{\min} < V_i < V_{\max} \quad (8)$$

در این رابطه V_i ولتاژ باس i ام، $V_{\max}$ ولتاژ بیشینه باس و $V_{\min}$ ولتاژ کمینه باس است [۱] تا [۶].



شکل ۱: فلوچارت الگوریتم TLBO.

و سپس پارامترهای مربوط به مدل‌سازی مسئله، شامل محدودیت‌ها و حدود متغیرها مشخص می‌شوند. اطلاعات شبکه مانند شاخه‌ها، بارها و ژنراتورها نیز دریافت شده و در ادامه، الگوریتم TLBO با تولید پاسخ‌های اولیه برای هر دانش‌آموز اجرا می‌شود و این پاسخ‌ها به ماژول محاسبه تابع هدف ارسال می‌گردد. در این مرحله، با توجه به اطلاعات دانش‌آموزان، شبکه به‌روزرسانی و تابع هدف محاسبه می‌شود. سپس مقادیر تابع هدف به الگوریتم TLBO بازگردانده شده و پاسخ‌ها مرتب‌سازی می‌شوند تا دانش‌آموز با کمترین هزینه انتخاب گردد. اگر شرط خاتمه یعنی تعداد حداکثر تکرارها برقرار نشده باشد، فرآیند تکرار می‌شود و در غیر این صورت بهترین پاسخ به‌عنوان نتیجه نهایی انتخاب می‌شود. در نهایت، منحنی تابع هدف رسم شده و نتایج نهایی استخراج می‌گردد. در بخش بعد نتایج به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی تحلیل خواهند شد.

۳- نتایج شبیه‌سازی

۳-۱ فرضیات مدل

در این تحقیق، تمامی باس‌های شبکه برای نصب منابع تولید پراکنده (دیزلی، بادی، خورشیدی) کاندید شده‌اند اما حداکثر ۳ باس برای هر منبع با ظرفیت ۱ مگاوات انتخاب شده است. همچنین، یک باس برای نصب نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای با ظرفیت پمپ و ژنراتور هر کدام ۱ مگاوات تخصیص داده شده است. سطح آب تانکر این نیروگاه بین ۰/۳ و ۰/۹۵ تعیین شده و سطح اولیه آن ۰/۷ در نظر گرفته شده است. ظرفیت کل انرژی ذخیره‌شده برابر با ۸ برابر میانگین ظرفیت پمپ و ژنراتور در نظر گرفته شده است. بازدهی مصرف انرژی پمپ ذخیره‌ساز ۰/۹۹ فرض شده است. افق زمانی برای مدل‌سازی به مدت ۱ سال (۳۶۵ روز) و به‌صورت ۲۴ ساعته تعریف شده است. هزینه تلفات ۲۰ درصد بیشتر از هزینه خرید و فروش توان در سطح انتقال و هزینه خرید و فروش توان در سطح شبکه توزیع نیز ۱۰ درصد کمتر از هزینه برق در سطح انتقال در نظر گرفته شده است. هزینه انرژی تأمین نشده در شرایط بهره‌برداری جزیره‌ای از ریزشبه توزیع ۵ برابر قیمت برق سیستم انتقال در نظر گرفته شده است. دلیل انتخاب ضریب بزرگ، جریمه بهره‌بردار در صورت عدم توانایی در تأمین بارهای شبکه در شرایط جزیره‌ای است. به منظور محاسبه هزینه انتشار کربن ناشی از منبع دیزلی، فرض شده است که این منبع به ازای هر مگاوات‌ساعت، ۰/۳۳ تن آلاینده‌ی کربنی منتشر نموده است. جریمه منبع دیزلی بابت انتشار آلاینده‌ی کربنی برابر با ۲۰۰۰ تومان به ازای هر تن انتشار کربن در نظر گرفته شده است. همچنین، فرض شده است که ریزشبه مد نظر در بازه‌های زمانی ۱ تا ۹ و ۱۵ تا ۲۲ به شبکه انتقال متصل بوده و در سایر بازه‌های زمانی به صورت جزیره‌ای برق‌دار گردیده است. با استفاده از ملاحظات مذکور و با قابلیت تولباکس مت‌پاور در محیط نرم‌افزار متلب به اجرای شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی پرداخته می‌شود.

ذخیره‌ای ($soc(t)$) به مقدار کمینه و بیشینه محدود شده است [۲] تا [۶].

$$soc_{min} \leq soc(t) \leq soc_{max} \quad (۱۸)$$

در (۱۹) میزان افزایش سطح آب در نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای بیان شده است

$$soc(t + \Delta t) = soc(t) + \frac{\eta_{ch} \times D_{ps,i}(t) \times \Delta t}{S_{ps}} - \frac{G_{ps,i}(t) \times \Delta t}{S_{ps} \times \eta_{dch}} \quad (۱۹)$$

که در آن $soc(t)$ سطح آب در مخزن نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در لحظه t ، η_{dch} بازدهی در مصرف توان (شارژ)، η_{ch} بازدهی در تولید توان (دشارژ)، $D_{ps,i}$ ظرفیت مصرف توان در نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در باس i ام، $G_{ps,i}$ ظرفیت تولید توان در نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در باس i ام، S_{ps} ظرفیت کل نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای و Δt پله زمانی شبیه‌سازی است [۲] تا [۶].

۲-۲ الگوریتم بهینه‌سازی

در این تحقیق جهت بهینه‌سازی تابع هدف در (۱) از الگوریتم TLBO استفاده شده است. این الگوریتم که برای اولین بار در سال ۲۰۱۱ معرفی شده، یک الگوریتم فراابتکاری الهام‌گرفته از فرایند مبتنی بر یادگیری و آموزش می‌باشد [۱۹]. این الگوریتم از دو مرحله اصلی تشکیل شده است:

۱. **مرحله معلم:** بهترین فرد (معلم) در جمعیت انتخاب شده و سعی می‌نماید عملکرد دیگر افراد را با نزدیک کردن میانگین جمعیت به سطح خود بهبود بخشد.

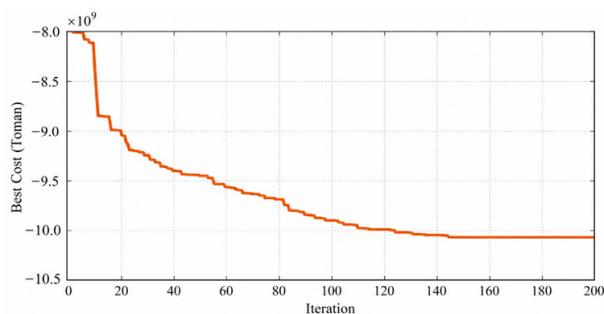
$$\begin{cases} T = X_{best} \\ X_i^{new} = X_i + \bar{r} \times (X_{best} - TF \times M) \end{cases} \quad (۲۰)$$

در این رابطه T بهترین عضو جمعیت، X_i^{new} پاسخ جدید، X_i پاسخ قدیم، $\bar{r}$ بردار اعداد تصادفی، M میانگین فعلی و TF فاکتور آموزش است.

۲. **مرحله دانش‌آموز:** دانش‌آموزان با عملکرد ضعیف‌تر از هم‌کلاسی‌ها با عملکرد قوی‌تر آموزش می‌بینند و تلاش می‌نمایند عملکرد خود را بهبود بخشند.

$$X_j^{new} = \begin{cases} X_j + rand \times (X_i - X_j) & \text{if } C(X_i) \leq C(X_j) \\ X_j + rand \times (X_j - X_i) & \text{if } C(X_i) \geq C(X_j) \end{cases} \quad (۲۱)$$

این رابطه بیان می‌دارد که اگر دانش‌آموز i ام از دانش‌آموز j ام نمره بالاتری داشته باشد، نمره دانش‌آموز j ام نیز ارتقاء می‌یابد. در غیر این صورت، دانش‌آموز j ام از دانش‌آموز i ام فاصله می‌گیرد و در خلاف مسیر آموزشی او حرکت می‌نماید. $rand$ نیز عددی تصادفی است که بین صفر و یک با توزیع یکنواخت تعیین می‌شود. این مرحله در الگوریتم TLBO تحت عنوان مرحله یادگیری یا مرحله دانش‌آموز شناخته می‌شود. فلوچارت الگوریتم TLBO در شکل ۱ نشان داده شده است [۱۹]. این الگوریتم به دلیل سادگی و عدم نیاز به تنظیم پارامترهای پیچیده، در حل مسائل بهینه‌سازی، مانند بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع انرژی، کاربرد زیادی دارد [۱۹]. در پیاده‌سازی الگوریتم TLBO، ابتدا پارامترهای الگوریتم مانند تعداد دانش‌آموزان و حداکثر تکرارها تنظیم شده



شکل ۵: روند بهبود تابع هدف.

جدول ۱: مکان و ظرفیت بهینه نصب نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در ریزشبه توزیع.

متغیر	مقدار بهینه
مکان نصب	۱۴
ظرفیت ژنراتور	۰٫۸۹۴۹۴۳
ظرفیت پمپ	۰٫۱۱۷۲۵۲

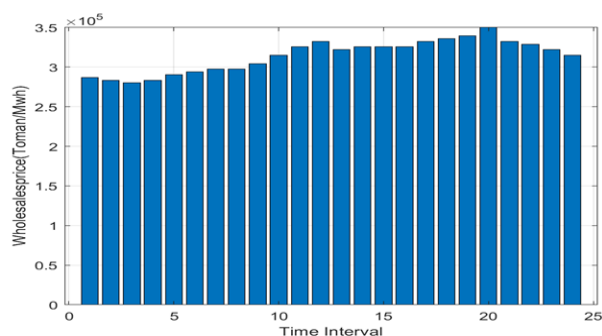
جدول ۲: مکان و ظرفیت بهینه نصب منابع هیبریدی در ریزشبه توزیع.

نوع منبع	مکان نصب	ظرفیت (مگاوات)
دیزلی	۶۳	۱
	۳۷	۱
	۳۰	۱
بادی	۶۴	۱
	۱۴	۱
	۱۹	۱
خورشیدی	۳۲	۰٫۱۲
	۵۶	۰٫۱۲۸
	۴۶	۰٫۳

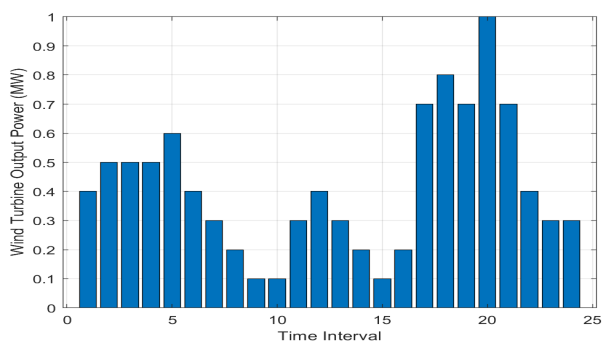
منابع محلی، نیازی به خرید انرژی از سیستم انتقال نبوده و هزینه‌ها صفر شده است. اما در حالت عادی، هزینه‌های زیادی به دلیل عدم تأمین انرژی و وابستگی به شبکه انتقال وجود داشته است. همچنین، هزینه انرژی تأمین نشده در حالت عادی ۵ برابر قیمت انرژی در سطح انتقال بوده، در حالی که در حالت بهینه این هزینه‌ها صفر شده‌اند.

در شکل ۹ هزینه تلفات انرژی در حالت بهینه و عادی مقایسه شده است. در حالت بهره‌برداری بهینه به دلیل تأمین بار در محل مصرف، میزان توان عبوری از شاخه‌ها کمتر می‌شود و در نتیجه تلفات کاهش قابل توجهی یافته است. در ادامه به ارزیابی جملات تابع هدف مربوط به درآمد تجمیع‌کننده پرداخته می‌شود. شکل ۱۰ بیانگر توان خروجی منابع هیبریدی در زمان بهره‌برداری ریزشبه می باشد همانطور که مشاهده می‌شود در ساعات بهره‌برداری جزیره ای توان تولیدی منابع دیزلی به دلیل عدم توانایی فروش انرژی به شبکه بالادست کاهش یافته است. شکل ۱۱ نیز توان بهینه شارژ و دشارژ نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در ساعات مختلف بهره‌برداری از ریزشبه را نشان می‌دهد و بیانگر شارژ نیروگاه مذکور در حالت اتصال به شبکه و دشارژ انرژی در ساعات بهره‌برداری به صورت جزیره‌ای می‌باشد.

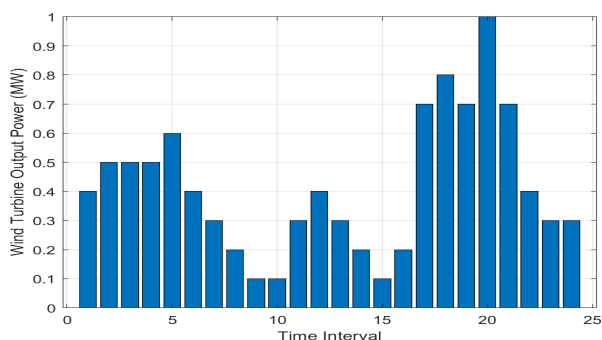
شکل های ۱۲ و ۱۳ درآمد تجمیع‌کننده از فروش انرژی به شبکه توزیع و مابه‌التفاوت آن به شبکه انتقال را نشان می‌دهند. در شکل ۱۴ درآمد حاصل از فروش انرژی توسط نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای نشان شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در ساعات بهره‌برداری جزیره‌ای، درآمد حاصل از منابع دیزلی کاهش یافته است. همچنین شکل ۱۵ نشان



شکل ۲: قیمت خرید/فروش انرژی در سطح سیستم انتقال.



شکل ۳: منحنی توان اکتیو خروجی منبع انرژی بادی یک مگاواتی.

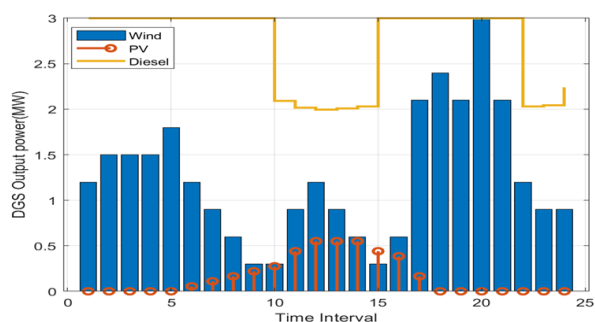


شکل ۴: منحنی توان اکتیو خروجی منبع انرژی خورشیدی یک مگاواتی.

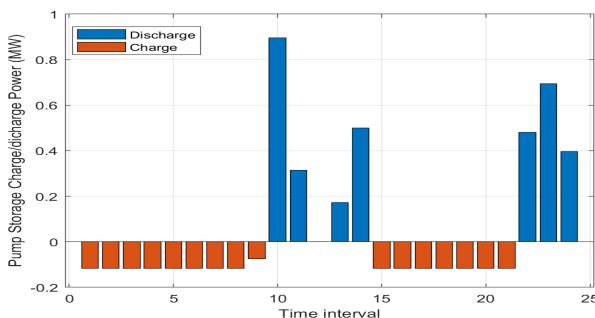
در شکل ۲ نمودار قیمت خرید و فروش انرژی در سطح شبکه انتقال بیان شده است. قیمت‌ها بدلیل تفاوت بها انرژی در ساعات مختلف در یک شبانه روز ضریبی از ۳۵۰ هزار تومان در نظر گرفته شده است. در شکل‌های ۳ و ۴ نمودارهای توان تولیدی منابع بادی و خورشیدی در بازه زمانی ۲۴ ساعته نشان داده شده است.

۳-۲ نتایج شبیه‌سازی مدل

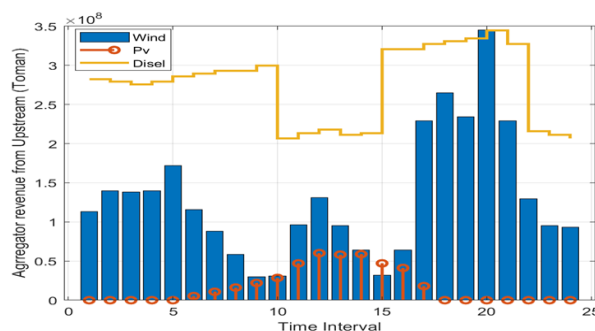
در این بخش به شبیه‌سازی مدل ارائه شده در (۱) پرداخته می‌شود. با اجرای الگوریتم TLBO، روند بهبود تابع هدف مطابق شکل ۵ به‌دست آمده است. در شکل مذکور تفاضل درآمدها از هزینه‌ها عدد ۱۰/۱۵- میلیارد تومان است که این عدد نشان دهنده مقدار سوددهی تابع هزینه در (۱) است. مکان نصب نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای و ظرفیت پمپ و ژنراتور نیروگاه که با استفاده از الگوریتم TLBO بدست آمده در جدول ۱ ارائه شده است. به‌علاوه مکان و ظرفیت بهینه نصب منابع هیبریدی نیز در جدول ۲ نشان شده است. همچنین در شکل ۶ شماتیک مکان بهینه منابع انرژی بکار برده شده در سیستم ۶۹ باس IEEE نمایش داده شده است. در شکل‌های ۷ و ۸ هزینه‌های خرید انرژی و انرژی تأمین نشده در حالت بهینه و عادی ریزشبه ارائه شده است. در حالت بهینه، به دلیل استفاده از



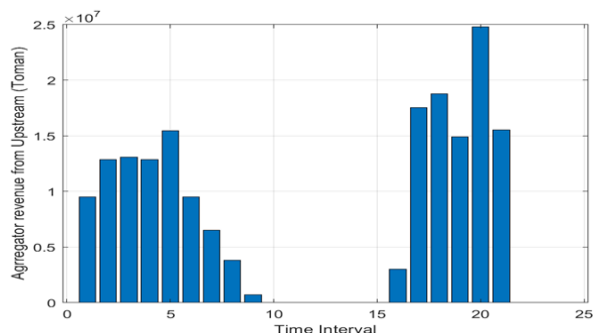
شکل ۱۰: توان خروجی منابع تولید پراکنده مختلف.



شکل ۱۱: وضعیت بهینه شارژ و دشارژ ذخیره ساز.

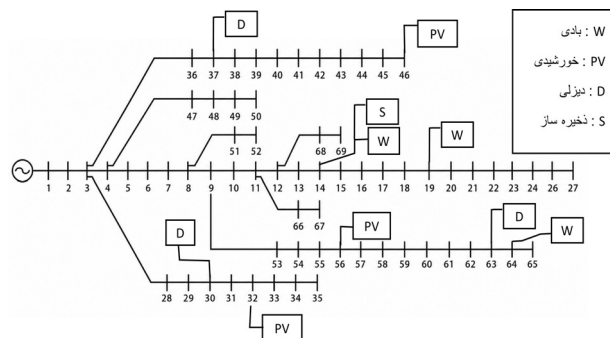


شکل ۱۲: درآمد تجمیع کننده منابع تولید پراکنده.

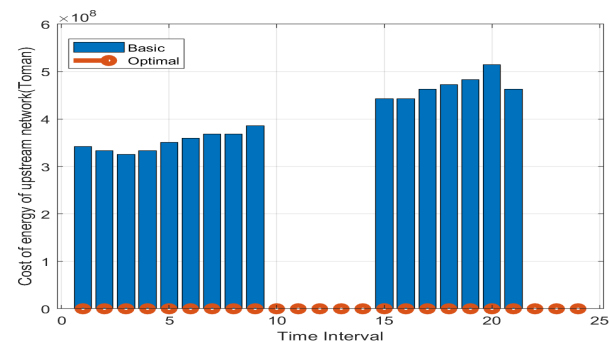


شکل ۱۳: درآمد تجمیع کننده منابع از محل مابه التفاوت فروش انرژی به سیستم انتقال.

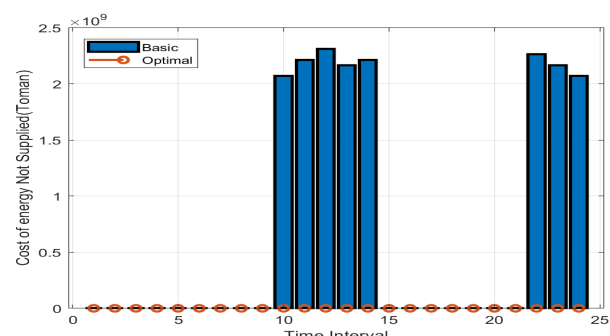
جدول ۳ مقادیر تابع هدف شبکه ۶۹ شینه را در حالت عادی و بهینه نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، هزینه خرید انرژی از شبکه انتقال در شبکه بهینه مقدار ۰/۰۹۶۹۲۶ میلیون تومان می باشد که نسبت به این مقدار در شبکه عادی کاهش قابل توجهی داشته است. همچنین مشاهده می شود که هزینه های بهره برداری در شبکه عادی که شامل هزینه خرید انرژی از سیستم انتقال و هزینه تلفات انرژی می باشد از رقم ۷۲۵۷/۷ میلیون تومان به رقم ۳۳۳/۱ میلیون تومان در شبکه بهینه کاهش یافته است. این هزینه در شبکه بهینه مجموع هزینه خرید انرژی از سیستم انتقال، هزینه تلفات انرژی و هزینه آلاینده گی کربنی منبع دیزلی



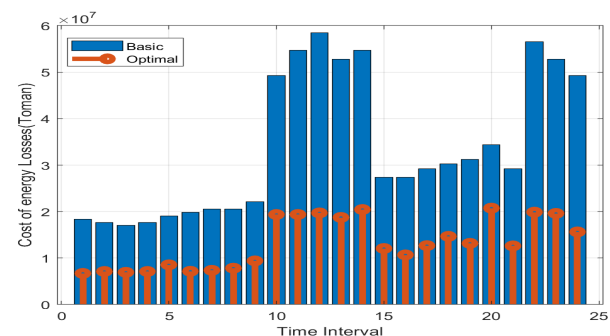
شکل ۶: شماتیک مکان نصب منابع هیبریدی در شبکه ۶۹ باس.



شکل ۷: هزینه خرید انرژی از بهره بردار انتقال.

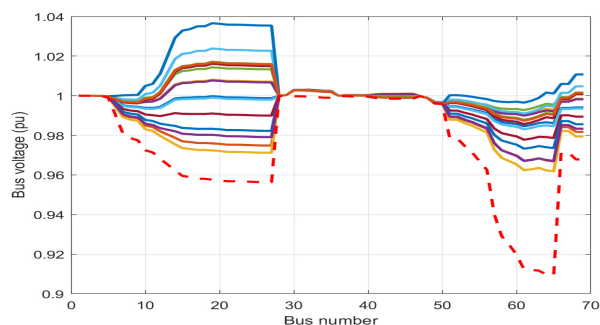


شکل ۸: هزینه انرژی تأمین نشده ریز شبکه در حالت بهینه و عادی.

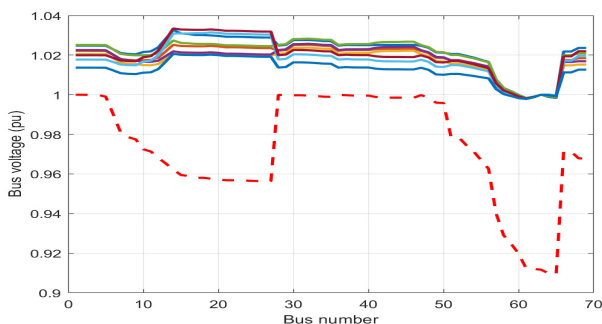


شکل ۹: هزینه تلفات انرژی در حالت بهینه و عادی.

می دهد هزینه های زیست محیطی واحدهای دیزلی، در ساعات بهره برداری جزیره ای به دلیل کاهش تولید از منابع دیزلی نیز کاهش می یابد. در ادامه به ارزیابی فنی ریز شبکه توزیع به ازای اعمال پاسخ بهینه بر روی آن پرداخته شده است. شکل های ۱۶ و ۱۷ به ترتیب منحنی ولتاژ شینه های ریز شبکه را به ازای ساعات مختلف بهره برداری در حالت اتصال ریز شبکه به سیستم انتقال و در وضعیت بهره برداری جزیره ای نشان می دهد. مشاهده می شود، منحنی ولتاژ در محدوده استاندارد (۰/۹۵ تا ۱/۰۵ پریونیت) می باشد.



شکل ۱۶: منحنی ولتاژ شینه‌های شبکه ۶۹ باس در حالت بهینه (رنگی) و عادی (خطچین) در وضعیت اتصال به سیستم انتقال.

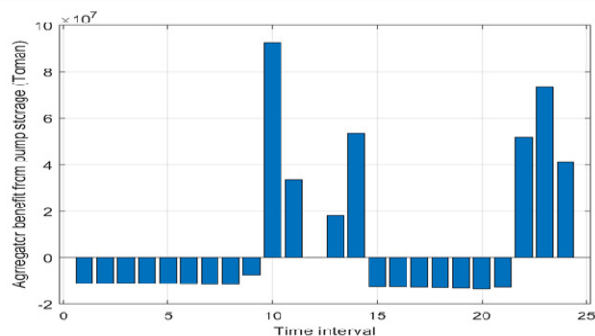


شکل ۱۷: منحنی ولتاژ شینه‌های شبکه ۶۹ باس در حالت عادی (خطچین) و بهینه (رنگی) در بهره‌برداری جزیره‌ای.

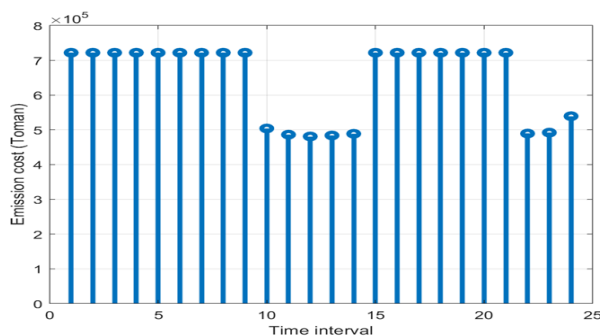
توزیع انجام شده است. با استفاده از الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر یادگیری و آموزش و شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب روی شبکه ۶۹ باس، مشخص شد راه‌حل پیشنهادی توانسته هزینه‌های بهره‌برداری را از رقم ۷۲۵۷/۷ میلیون تومان به رقم ۳۳۳/۱ میلیون تومان کاهش داده و انرژی پایدار و استاندارد را حتی در حالت جزیره‌ای تأمین نماید. همچنین تجمیع‌کننده منابع قادر است در شبکه بهینه به میزان ۷۰۱۸/۹۵ میلیون تومان کسب درآمد نماید. موفقیت مدل در مدیریت عدم قطعیت‌ها و ارائه طراحی بهینه ریزشبه، کارآمدی راه‌حل پیشنهادی را تأیید نموده است.

مراجع

- [1] M. Sedighizadeh, M. Esmaili, A. Jamshidi, and M. H. Ghaderi, "Stochastic multi-objective economic-environmental energy and reserve scheduling of microgrids considering battery energy storage system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 106, pp. 1-16, Mar. 2019.
- [2] H. Li, Zh. Ren, A. Trivedi, P. P. Verma, D. Srinivasan, and W. Li, "A Noncooperative game-Based approach for microgrid planning considering existing interconnected and clustered microgrids on an island," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 13, no. 4, pp. 2064-2078, Oct. 2022.
- [3] F. Zainab, et al., "An optimal joint planning of DGs and electric vehicle charging stations in grid-connected and islanded microgrids," *IET Renewable Power Generation*, vol. 17, no. 7, pp. 1623-1634, May 2023.
- [4] S. M. R. H. Shawon, X. Liang, and M. Janbakhsh, "Optimal placement of distributed generation units for microgrid planning in distribution networks," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 59, no. 3, pp. 2785-2795, May 2023.
- [5] B. Panagiotis, and K. L. Katsifarakis, "Optimizing operation of a large-scale pumped storage hydropower system coordinated with wind farm by means of genetic algorithms," *Global NEST Journal*, vol. 21, no. 4, pp. 405-504, Dec. 2019.
- [6] S. Haji Mohammadi, and M. Modaresi, "Optimal planning of distributed energy resources in distribution microgrid to improve resource owner profit and network resiliency," *Signal Processing and Renewable Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 23-40, Autumn 2023.
- [7] S. F. Contreras, C. A. Cortes, and J. M. A. Myrzik, "Optimal microgrid planning for enhancing ancillary service provision,"



شکل ۱۴: درآمد تجمیع‌کننده از طریق نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای.



شکل ۱۵: هزینه تجمیع‌کننده از محل انتشار آلاینده‌گی.

جدول ۳: مقایسه جملات تابع هدف در حالت عادی و بهینه.

جمله	شبکه بهینه (میلیون تومان)	شبکه عادی (میلیون تومان)
هزینه خرید انرژی از سیستم انتقال	۰/۰۹۶۹۲۶	۶۴۴۷/۳۲۱
هزینه تلفات انرژی	۳۱۷/۵۴۵۴	۸۱۰/۳۸۵۴
هزینه انرژی تأمین نشده	۰	۱۷۴۷۷/۲۳
قرینه درآمد تجمیع‌کننده از فروش انرژی منابع خورشیدی	-۴۱۳/۲۶۶	۰
قرینه درآمد تجمیع‌کننده از فروش انرژی منابع بادی	-۳/۴	۰
قرینه درآمد تجمیع‌کننده از فروش انرژی نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای	-۱۷۷/۵۴۶	۰
قرینه درآمد تجمیع‌کننده از فروش انرژی منابع دیزلی	-۶۵۷۸/۹۳	۰
قرینه درآمد تجمیع‌کننده از فروش انرژی به سیستم انتقال	-۱۷۸/۹۱	۰
هزینه انتشار آلاینده‌گی کربنی منبع دیزلی	۱۵/۴۵۷۴۸	۰

می‌باشد. جدول ۳ نشان می‌دهد که تجمیع‌کننده منابع قادر است در شبکه بهینه به میزان ۷۰۱۸/۹۵ میلیون تومان کسب درآمد نماید که این رقم تفاضل مجموع درآمدهای کسب‌شده در شبکه بهینه در جدول ۳ از هزینه‌های بهره‌برداری در این شبکه است. همان‌طور که بیان شد برنامه‌ریزی منابع هیبریدی و نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای موجب کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و افزایش درآمد تجمیع‌کننده منابع شده است.

۴- نتیجه گیری

این تحقیق با هدف برنامه‌ریزی بهره‌برداری بهینه منابع انرژی هیبریدی شامل خورشیدی، بادی، دیزلی و نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در شبکه

- vehicle aggregators," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 15, no. 2, pp. 359-370, Jan. 2021.
- [17] M. Hosseina, M. S. Moghaddam, and A. Hassannia, "Optimizing energy and load management in island microgrids for enhancing resilience against resource interruptions," *Scientific Reports*, vol. 15, Article ID: 16297, May 2025.
- [18] D. R. T. Ngueko, O. Boukar, G. D. L. Libouga, and N. Ndjia, "Optimizing decentralized energy: A comprehensive review of distributed energy resource modeling," *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 12, no. 1, Article ID: 72, Sept. 2025.
- [19] R.V. Rao, V.J. Savsani, and D.P. Vakharia, "Teaching-learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems," *Computer-Aided Design*, vol. 43, no. 3, pp. 303-315, Mar. 2011.
- میشاق بن سعید** در سال ۱۳۹۴ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد آبادان و در سال ۱۴۰۴ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه شهید چمران اهواز دریافت نموده است. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده شامل موضوعاتی مانند انرژی‌های تجدیدپذیر و هیبریدی، الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی می‌باشد.
- ناصر عرفانی مجد** در سال ۱۳۸۷ مدرک کارشناسی مهندسی برق را از دانشگاه شهید چمران اهواز، در سال ۱۳۹۰ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق را از دانشگاه تربیت مدرس تهران و در سال ۱۳۹۵ مدرک دکتری در مهندسی برق را از دانشگاه امیر کبیر تهران دریافت نموده است. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند طراحی مدارهای آنالوگ و دیجیتال، انرژی‌های تجدیدپذیر و هیبریدی، الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی می‌باشد.
- Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 864-875, Jul. 2019.
- [8] Our World in Data, *Renewable Energy*, Available at <https://ourworldindata.org/renewable-energy>
- [9] M. Adham, S. Keene, and R. B. Bass, "Distributed energy resources: a systematic literature review," *Energy Reports*, vol. 13, pp. 1980-1999, Jun. 2025.
- [10] S. T. Saranya and P. Bhowmik, "A comprehensive review of microgrid architectures, power management and resilient operation," *Energy Reports*, vol. 15, Article ID: 109021, Jun. 2026.
- [11] M. F. Shaaban, A. Saber, M. E. Ammar, and H. H. Zeineldin, "A multi-objective planning approach for optimal DG allocation for droop based microgrids," *Electric Power Systems Research*, vol. 200, Article ID: 107474, Nov. 2021.
- [12] J. Gao, *et al.*, "A cost-effective two-stage optimization model for microgrid planning and scheduling with compressed air energy storage and preventive maintenance," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 125, Article ID: 106547, Feb. 2021.
- [13] A. H. Yazdavar, M. F. Shaaban, E. F. Elsaadany, M. M. A. Salama, and H. H. Zeineldin, "Optimal planning of distributed generators and shunt capacitors in isolated microgrids with nonlinear loads," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 11, no. 4, pp. 2732-2744, Feb. 2020.
- [14] A. Garry, F. Cadoux, M. C. Alvarez-Herault, and N. Hadjsaid, "Risk aversion model of distribution network planning rules considering distributed generation curtailment," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 99, pp. 385-393, Jul. 2018.
- [15] R. Fachrizal, U. H. Ramadhani, J. Munkhammar, and J. Widén, "Combined PV-EV hosting capacity assessment for a residential LV distribution grid with smart EV charging and PV curtailment," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 26, Article ID: 100445, Jun. 2021.
- [16] D. A. Quijano, O. D. Melgar-Dominguez, C. Sabillon, B. Venkatesh, and A. Padilha-Feltrin, "Increasing distributed generation hosting capacity in distribution systems via optimal coordination of electric