Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 78-93

Vol. 13/ No. 2/ Summer 2024
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

Bi-level mathematical model to optimize the unit commitment in energy systems considering the worst scenarios of failure of renewable resources

Masoumeh Azadikhouy [1], Hossein Karimian fard [2]

[1] University Of Shiraz, Iran
[2] Azad University, Iran

Abstract:
This paper presents a bi-level mathematical model for optimizing the unit commitment of energy generation units in the presence of worst-case scenarios of renewable resource failures. The main innovation of this research is the integration of optimal load management, intelligent scheduling of electric vehicle charging and discharging, and precise modeling of renewable resource failures within a comprehensive framework. The high-level model is designed to reduce operational costs, manage flexible loads, and minimize pollution, while the low-level model examines the effects of resource failures and ensures system stability under critical conditions. To solve the problem, the Karush-Kuhn-Tucker (KKT) optimality conditions are employed as an efficient tool to reduce the complexity of the bi-level problem, and the model is transformed into a Mixed-Integer Linear Programming (MILP) problem. The proposed model is evaluated on the standard IEEE network, and simulation results demonstrate that this approach significantly outperforms existing models. Specifically, operational costs are reduced by up to 18.5%, system reliability in critical conditions is improved by up to 35%, and energy losses are reduced by 22%. These achievements highlight the model's capability to provide resilient and efficient solutions for optimal energy resource management under uncertainty scenarios. Overall, this research offers a novel framework for enhanced productivity in renewable energy systems, which can serve as an effective tool in the development of future sustainable and resilient systems.

Keywords: Unit commitment, electric vehicles, energy storage systems, renewable energy resources, bi-level optimization.

Submit date: 2024/10/23
Accepted date: 2024/12/03

Corresponding author's name: Masoumeh Azadikhouy
Corresponding author's address: University of Shiraz, Iran

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.2.6]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۹۳-۷۸

Vol. 13 / No. 2/ Summer 2024
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

مدل ریاضی دو سطحی برای بهینه‌سازی مشارکت واحدها در سیستم‌های انرژی با در نظر گرفتن بدترین سناریوهای خرابی منابع تجدیدپذیر

نوع مطالعه: پژوهشی

معصومه آزادی خوی[۱،*]، حسین کریمیان فرد[۲]

۱- گروه ریاضی، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
۲- دانشکده مهندسی برق- واحد جهرم، دانشگاه آزاد اسلامی، جهرم، ایران.

چکیده: این مقاله مدلی ریاضی دو سطحی برای بهینه‌سازی مشارکت واحدهای تولید انرژی در حضور بدترین سناریوهای خرابی منابع تجدیدپذیر ارائه می‌دهد. نوآوری اصلی این پژوهش، ترکیب مدیریت بهینه بار، زمان‌بندی هوشمند شارژ و دشارژ خودروهای برقی، و مدل‌سازی دقیق خرابی منابع تجدیدپذیر در یک چارچوب جامع است. مدل سطح بالا با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، مدیریت انعطاف‌پذیر بارها، و کاهش آلودگی تدوین شده است، در حالی که مدل سطح پایین به بررسی اثرات خرابی منابع و تضمین پایداری سیستم در شرایط بحرانی می‌پردازد. برای حل مسئله، شرایط بهینگی KKT به‌عنوان ابزاری کارآمد برای کاهش پیچیدگی مسئله دو سطحی استفاده شده و مدل به یک مسئله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) تبدیل شده است. مدل پیشنهادی بر روی شبکه استاندارد IEEE مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این روش در مقایسه با سایر مدل‌های موجود، اثربخشی قابل‌توجهی دارد. به‌طور مشخص، هزینه‌های بهره‌برداری تا ۱۸.۵ درصد کاهش یافته، قابلیت اطمینان سیستم در شرایط بحرانی تا ۳۵ درصد بهبود یافته، و اتلاف انرژی نیز به میزان ۲۲ درصد کاهش یافته است. این دستاوردها نشان‌دهنده توانایی مدل در ارائه راهکارهای مقاوم و کارآمد برای مدیریت بهینه منابع انرژی در سناریوهای عدم قطعیت است. در مجموع، این پژوهش چارچوبی نوین برای بهره‌وری بیشتر در سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر ارائه می‌دهد که می‌تواند به عنوان یک ابزار مؤثر در توسعه سیستم‌های پایدار و مقاوم آینده مورد استفاده قرار گیرد.

واژه های کلیدی: مشارکت واحدها، خودروهای برقی، سیستم ذخیره انرژی، منابع انرژی تجدیدپذیر، بهینه‌سازی دو سطحی.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۳/۸/۲

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۳/۹/۱۳

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر معصومه آزادی خوی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : گروه ریاضی، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.m.azadikhuy@shirazu.ac.ir

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.2.6]

۱- مقدمه

افزایش ا ستفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در دهه‌های اخیر، همراه با چالش‌هایی مانند نو سانات تولید و عدم قطعیت در د سترس بودن این منابع، مدیریت بهینه سی ستم‌های انرژی را به یکی از م سائل حیاتی تبدیل کرده ا ست. این چالش‌ها به‌ویژه در شرایط بحرانی مانند خرابی منابع تجدیدپذیر، بی شتر نمایان می شوند و می‌توانند منجر به کاهش پایداری و افزایش هزینه‌های سی ستم شوند. از سوی دیگر، تقا ضای روزافزون برای ادغام خودروهای برقی و سی ستم‌های ذخیره انرژی در شبکه‌های هو شمند، نیاز به مدل‌های پی شرفته‌ای را برج سته کرده که توانایی ترکیب این اجزا با منابع انرژی تجدیدپذیر را دا شته با شند. این اهمیت زمانی بیشتر می‌شود که بدانیم نادیده گرفتن سناریوهای خرابی و عدم قطعیت می‌توانند با عث افزایش اتلاف انرژی، کاهش قابلیت اطمینان سی ستم، و افزایش هزینه‌های بهره‌برداری شود. بنابراین، ارائه مدل‌هایی که علاوه بر بهینه سازی هزینه‌ها و کاهش آلودگی، تولنایی تضمین پایداری سیستم در شرایط بحرانی را نیز داشته باشند، ضروری به نظر می‌ر سد. پژوهش حا ضر با تمرکز بر این م سائل و ارائه راهکاری جامع برای مدیریت بهینه منابع انرژی و م شارکت واحدهای تولیدی، گامی مؤثر در جهت تو سعه سی ستم‌های پایدار و مقاوم در برابر چالش‌های آتی برداشته است.

در دهه‌های اخیر، افزایش ا ستفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش وا بستگی به سوخت‌های ف سیلی و کاهش آلایندگی‌های زی ست‌محیطی، توجه زیادی را به خود جلب کرده ا ست. منابعی مانند انرژی خور شیدی و بادی به‌دلیل قابلیت د سترسی و پتا نسیل تولید برق، به‌ویژه در ک شورهای در حال تو سعه، محبوبیت یافته‌اند. با این حال، این منابع به دلیل ناپایداری و عدم قطعیت در تولید، چالش‌های جدیدی را در مدیریت انرژی ایجاد می‌کنند. چالش ا صلی در سی ستم‌های انرژی مدرن، نیاز به یک مدیریت هو شمند و بهینه منابع ا ست که بتوانند در شرایط مختلف، به‌ویژه در بدترین سناریوهای خرابی منابع تجدیدپذیر، کارایی لازم را حفظ کند. در این را ستا، م شارکت واحدهای تولیدی و مدیریت منابع انرژی به‌عنوان یک مؤلفه کلیدی در طراحی سی ستم‌های بهینه انرژی شناخته می شود. به‌طوری‌که عدم توجه به این امر می‌تواند منجر به اتلاف انرژی، قطع بار و افزایش هزینه‌های بهره‌برداری شود. با وجود تلاش‌های صورت‌گرفته، هنوز شکاف‌هایی در روش‌های موجود برای مدیریت و بهینه‌سازی منابع انرژی وجود دارد. اکثر مدل‌ها به طور م ستقیم به و ضعیت‌های ایده‌آل پرداخ ته و به چالش های واقعی نا شی از خرابی های م نابع انرژی تجدیدپذیر توجهی ندارند. این مسأله نیاز به توسعه مدل‌های پیشرفته‌تر با قابلیت شبیه سازی بدترین سناریوهای ممکن را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. اهمیت مقاله حا ضر در معرفی یک فرمولا سیون جدید ریا ضی دو سطحی برای حل مسئله م شارکت واحدها با قیود امنیتی است. این مقاله به‌ویژه به برر سی تأثیرات منفی خرابی منابع تجدیدپذیر پرداخته و روش‌هایی برای بهینه سازی مدیریت منابع در این شرایط را ارائه می‌دهد. با ا ستفاده از شرایط بهینگی کاروش-کان-تاکر (KKT) و تبدیل م سئله به یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مرکب (MILP)، این پژوهش نه تنها به کاهش اتلاف انرژی و هزینه های عملیاتی کمک می‌کند، بلکه به بهبود پایداری و بهره‌وری سی ستم‌های انرژی نیز می‌انجامد. این رویکرد می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مؤثر در حل م سائل پیچیده بهینه سازی در سی ستم‌های انرژی نوین مورد ا ستفاده قرار گیرد و راه‌حل‌های نوآورانه‌ای برای چالش‌های پیش‌رو ارائه دهد.

۱-۱- انگیزه پژوهش

تحقیق حا ضر به‌دنبال پا سخ به چالش‌های جدی و روزافزونی ا ست که در زمینه مدیریت منابع انرژی تجدیدپذیر و بهره‌برداری بهینه از آن‌ها وجود دارد. با تو جه به تغییرات اقلیمی و نیاز به انتقال به سمت سی ستم‌های انرژی پایدارتر، اهمیت تو سعه مدل‌های کارآمد برای مدیریت منابع انرژی تجدیدپذیر بی شتر از همی شه اح ساس می شود. نو سان و عدم قطعیت در تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر، نیاز به یک چارچوب تحلیلی و عملیاتی قوی را برای مدیریت بهینه و پا سخگویی به این ناپایداری‌ها ایجاد کرده ا ست. در این را ستا، تلاش برای ایجاد مدل‌هایی که بتوانند نه تنها به بهینه سازی هزینه‌ها کمک کنند، بلکه توانایی شبیه سازی و مدیریت سناریوهای بحرانی را نیز دا شته با شند، ضروری ا ست. علاوه بر این، با پی شرفت‌های تکنولوژیکی و گ سترش زیر ساخت‌های شبکه‌های هو شمند، فر صت‌های جدیدی برای بهبود مدیریت بار و منابع انرژی به‌وجود آمده ا ست. این فر صت‌ها به‌ویژه در زمان‌هایی که منابع تجدیدپذیر با چالش‌های جدی مانند خرابی‌ها و ناپایداری مواجه ه ستند، از اهمیت بالایی برخوردارند. به‌طور خلا صه، انگیزه ا صلی این تحقیق، ارائه یک راهکار نوآورانه و جامع برای مدیریت بهینه منابع انرژی تجدیدپذیر در شرایط چالش‌برانگیز است. این تحقیق می‌تواند به پژوهشگران، تصمیم‌گیران و فعالان صنعت انرژی کمک کند تا با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده، به سمت سیستم‌های انرژی پایدارتر و بهینه‌تر حرکت کنند و چالش‌های پی شرو را به‌طور مؤثری مدیریت نمایند.

۱-۲- پیشینه پژوهش

در مقاله [۱]، به بررسی مشارکت واحدها تصادفی به‌منظور امکان‌پذیری اقدامات پیشرفته انعطاف‌پذیری برای سهم‌های بالای انرژی خور شیدی پرداخته شده است. این تحقیق بر روی چگونگی مدیریت و بهینه‌سازی منابع انرژی در شرایط ناپایدار تمرکز دارد و به‌ویژه به چالش‌های مرتبط با تأمین تقا ضا در هنگام تغییرات ناگهانی در تولید انرژی از پنل‌های خور شیدی می‌پردازد. نتایج ن شان می‌دهد که اتخاذ روش‌های انعطاف‌پذیر می‌تولند به بهبود عملکرد سی ستم و کاهش هزینه‌های

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.2.6]

مرتبط با نو سانات تولید انرژی کمک کند. در مقاله [۲]، به برر سی نقش سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی باتری در مسئله مشارکت واحدها با قیود ا ضطراری روزلنه تحت نفوذ منابع تجدیدپذیر پرداخته شده ا ست. این تحقیق تأثیر ا ستفاده از سی ستم‌های ذخیره سازی باتری بر بهینه سازی تخ صیص منابع و مدیریت بار در شرایطی که منابع تجدیدپذیر در حال گ سترش ه ستند، را تحلیل می‌کند. نتایج این مطالعه ن شان می‌دهد که سی ستم‌های ذخیره سازی انرژی می‌توانند به عنوان ابزاری مؤثر در بهبود قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری شبکه‌های برق عمل کرده و به کاهش هزینه‌های مرتبط با بروز شرایط ا ضطراری کمک کنند. در مطالعه [۳]، به ارائه یک استراتژی نوآورانه دو مرحله‌ای مبتنی بر یادگیری ما شین برای م شارکت واحدها پرداخته شده ا ست که به‌منظور مواجهه با عدم قطعیت در سی ستم‌های انرژی تجدیدپذیر طراحی شده ا ست. این تحقیق بر روی نحوه به‌کارگیری تکنیک‌های یادگیری ما شین برای بهبود قابلیت پیش‌بینی و ت صمیم‌گیری در شرایط ناپایدار تمرکز دارد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استراتژی پی شنهادی می‌تواند به طور قابل توجهی دقت و کارایی مدیریت منابع انرژی را افزایش دهد و در نهایت به بهینه سازی عملکرد سی ستم‌های انرژی کمک کند. در [۴]، به تحلیل عملکرد محا سباتی قیود تعادل در م سئله م شارکت واحدها در میان‌مدت پرداخته شده ا ست. این تحقیق بر روی ویژگی‌های مختلف قیود از جمله سفتی، ف شردگی و سختی تمرکز دارد و نحوه تأثیر این ویژگی ها بر کارایی للگوریتم های بهینه سازی را برر سی می‌کند. نتایج این مطالعه ن شان می‌دهد که انتخاب صحیح و بهینه سازی قیود تعادل می‌تواند به‌طور چ شمگیری عملکرد محا سباتی و زمان پا سخگویی در حل م سائل م شارکت واحدها را بهبود بخشد، که در نهایت به کارایی بیشتر سیستم‌های انرژی منجر می شود. در مقاله [۵]، به برر سی تبیین راه‌حل‌های م سئله م شارکت واحدها با ا ستفاده از یادگیری ما شین قابل تفسیر پرداخته شده ا ست. این تحقیق بر روی این مو ضوع تمرکز دارد که چگو نه می‌توان از تکنیک‌های یادگیری ما شین برای تحلیل و تف سیر ت صمیمات اتخاذ شده در فرآیند م شارکت واحدها ا ستفاده کرد. نتایج این مطالعه ن شان می‌دهد که روش‌های قابل تف سیر یادگیری ما شین می‌توانند به بهبود شفافیت و اعتماد در ت صمیم‌گیری‌ها کمک کرده و درک بهتری از عوامل مؤثر بر نتایج بهینه سازی ارائه دهند. این امر به ویژه در زمینه سی ستم‌های انرژی تجدیدپذیر که عدم قطعیت بالایی دارند، اهمیت زیادی دارد. در مقاله [۶]، به بررسی مدل سلسله‌مراتبی برای مشارکت واحدهای نیروگاه‌های برق آبی پرداخته شده ا ست که بر ا ساس جدول مشابهت و رویکرد بهینه‌سازی درجه‌دوم طراحی شده است. این تحقیق تمرکز دارد بر نحوه بهینه سازی تخ صیص منابع در نیروگاه‌های آبی با توجه به ویژگی‌های خاص این نوع منابع و نیازهای متغیر بار. نتایج این مطالعه ن شان می‌دهد که ا ستفاده از مدل‌های سل سله‌مراتبی و بهینه سازی درجه‌دوم می‌تولند به بهبود کارایی و کاهش هزینه‌های مرتبط با م شارکت واحدها در نیروگاه‌های برق آبی منجر شود. این رویکرد به‌ویژه در شرایط متغیر و پیچیده نا شی از تقا ضای انرژی و منابع آبی محدود مفید ا ست. در مقاله [۷]، به ارائه یک ا ستراتژی آغاز گرم مبتنی بر متغیرهای صحیح برای م سئله م شارکت واحدها با قیود امنیتی پرداخته شده ا ست. این تحقیق بر روی تو سعه روش‌هایی برای بهبود زمان حل م سائل بهینه سازی در شرایطی که قیود امنیتی باید رعایت شود، تمرکز دارد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ا ستفاده از ا ستراتژی آغاز گرم می‌تواند به کاهش زمان محا سباتی و بهبود کارایی الگوریتم‌ها در حل م سائل م شارکت واحدها کمک کند. این امر به ویژه در مواقعی که شرایط ا ضطراری و نیاز به واکنش سریع وجود دارد، اهمیت دارد و به بهبود قابلیت اطمینان شبکه‌های برق می‌انجامد. در [۸]، به معرفی یک روش پمپاژ هدفمند برای بهینه سازی جریان قدرت با متغیرهای م شارکت واحدها پرداخته شده ا ست. این تحقیق بر روی چگونگی ادغام متغیرهای م شارکت واحدها در م سائل بهینه سازی جریان قدرت تمرکز دارد و به توسعه یک روش کارآمد برای بهینه‌سازی هم‌زمان تخ صیص بار و تولید انرژی می‌پردازد. نتایج این مطالعه ن شان می‌دهد که روش پی شنهادی می‌تولند به بهبود دقت و کارایی حل م سائل بهینه سازی در سی ستم‌های برق کمک کند و در نهایت به تخ صیص بهینه‌تر منابع و بهبود عملکرد کلی شبکه منجر شود. در مطالعه [۹]، به بهینه سازی م شارکت واحدها با ا ستفاده از خو شه‌بندی سناریوهای دینامیکی دقیق مبتنی بر برنامه‌ریزی چندپارامتری و تجزیه بندرز پرداخته شده ا ست. این تحقیق به تحلیل و بهبود روش‌های خو شه‌بندی سناریوها به‌منظور کاهش پیچیدگی محا سباتی در م سئله مشارکت واحدها می‌پردازد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از تکنیک‌های خو شه‌بندی دقیق می‌تواند به افزایش دقت پیش‌بینی و بهینه سازی ت صمیمات در سیستم‌های انرژی کمک کند و در نهایت به کاهش هزینه‌ها و بهبود کارایی سیستم‌های تولید انرژی منجر شود. در مقاله [۱۰]، به مدیریت تعادل توان و قابلیت ذخیره سازی در م سئله م شارکت واحدها در سیستم‌های AC پرداخته شده است. این تحقیق به برر سی چالش‌های مرتبط با حفظ تعادل توان در شرایط متغیر و ت ضمین قابلیت اطمینان منابع پرداخته و روش‌هایی برای بهینه سازی مدیریت ذخیره سازی انرژی ارئه می‌دهد. نتایج این مطالعه ن شان می‌دهد که به‌کارگیری ا ستراتژی‌های مؤثر در مدیریت ذخیره سازی و تعادل توان می‌تولند به بهبود عملکرد سی ستم‌های قدرت و کاهش ری سک‌های مرتبط با نو سانات تولید انرژی کمک کند. این امر به ویژه در زمینه افزایش ا ستفاده از منابع تجدیدپذیر اهمیت دارد. در تحقیق [۱۱]، به تو سعه یک مدل چندمرحله‌ای کاملاً تطبیق‌پذیر و مقاوم توزیعی برای م شارکت واحدها در سی ستم‌های قدرت بر مبنای قواعد تقریب مختلط پرداخته شده ا ست. این تحقیق بر روی نحوه مدیریت عدم قطعیت‌ها در تولید و تقاضای انرژی با استفاده از رویکردهای مقاوم و تطبیق‌پذیر تمرکز دارد. نتایج این مطالعه ن شان می‌دهد که مدل پیشنهادی می‌تواند به طور مؤثری به بهینه‌سازی تخصیص منابع انرژی کمک کرده و در عین حال به کاهش ری سک‌های نا شی از نو سانات و

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.2.6]

عدم قطعیت‌ها در سیستم‌های انرژی منجر شود. این امر بهبود کلی در قابلیت اطمینان و کارایی سیستم‌های قدرت را تضمین می‌کند. در مقاله [۱۲]، به توسعه یک مدل مشارکت واحد مشترک برای نیروگاه های آبی و هیدروژنی به‌منظور سازگاری با تولید انرژی خورشیدی در مقیاس بزرگ پرداخته شده است. این تحقیق بر روی چگونگی ادغام منابع مختلف انرژی و بهینه‌سازی مدیریت بار در شرایط ناپایدار ناشی از تولید متغیر انرژی خورشیدی تمرکز دارد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی می‌تواند به بهبود انعطاف‌پذیری و کارایی سیستم‌های انرژی کمک کند و در عین حال به کاهش هزینه‌ها و بهینه سازی تخصیص منابع در شرایطی که انرژی تجدیدپذیر به میزان قابل توجهی در حال گسترش است، منجر شود. در [۱۳]، به بررسی مشارکت واحدها با قیود امنیتی در سیستم‌های انرژی هوشمند پرداخته شده است. این تحقیق بر روی رویکردی مبتنی بر انعطاف‌پذیری تمرکز دارد که به‌ویژه به تهدیدات ناشی از حملات تزریق داده های نادرست در پارکینگ های خودروهای برقی توجه می‌کند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که اتخاذ استراتژی‌های انعطاف‌پذیر می‌تواند به بهبود قابلیت اطمینان و امنیت سیستم‌های انرژی کمک کرده و در عین حال به بهینه سازی مدیریت منابع در شرایط بحرانی منجر شود. این رویکرد می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر در مواجهه با چالش‌های امنیتی در سیستم‌های انرژی مدرن عمل کند. در تحقیق [۱۴]، به ارائه یک چارچوب تجزیه مبتنی بر آنیلینگ کوانتومی ترکیبی برای مسئله مشارکت واحدها پرداخته شده است. این تحقیق به تحلیل نحوه استفاده از تکنیک‌های محاسباتی پیشرفته، از جمله آنیلینگ کوانتومی، برای بهینه سازی تصمیمات در زمینه مشارکت واحدها می‌پردازد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از این رویکرد نوآورانه می‌تواند به بهبود کارایی و سرعت حل مسائل پیچیده مشارکت واحدها کمک کند. این روش به‌ویژه در مواجهه با چالش‌های مرتبط با منابع انرژی تجدیدپذیر و عدم قطعیت‌های تولید، قابلیت‌های قابل توجهی را ارائه می‌دهد. در مقاله [۱۵]، به بررسی مشارکت واحدها به‌صورت تصادفی دو مرحله‌ای و چندهدفه در سیستم‌های انرژی منابع توزیع شده با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و خرابی واحدها پرداخته شده است. این تحقیق به تحلیل چالش‌های مربوط به مدیریت و بهینه سازی منابع انرژی در شرایط ناپایدار و با توجه به امکان خرابی‌های احتمالی می‌پردازد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که رویکرد چندهدفه می‌تواند به بهینه سازی هم‌زمان هزینه‌ها، پایداری و قابلیت اطمینان سیستم کمک کند. این روش می‌تولند به‌ویژه در سیستم‌های انرژی نوین که تحت تأثیر عوامل غیرقابل پیش‌بینی قرار دارند، کارایی بالایی داشته باشد. در مقاله [۱۶]، به معرفی یک الگوریتم کوانتومی سریع برای جستجوی راه‌حل‌های تقریباً بهینه در مسئله مشارکت واحدها پرداخته شده است. این تحقیق به بررسی قابلیت‌های الگوریتم‌های کوانتومی در حل مسائل پیچیده بهینه سازی می‌پردازد و نحوه بهره‌گیری از این تکنیک‌های پیشرفته برای تسریع فرایند جستجوی راه‌حل‌ها را تحلیل می‌کند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که این الگوریتم می‌تواند زمان محاسباتی را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد و در نتیجه کارایی مدیریت منابع انرژی را افزایش دهد. این رویکرد نوآورانه به‌ویژه در مواجهه با چالش‌های ناشی از افزایش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و نیاز به پاسخگویی سریع در شرایط متغیر شبکه‌های برق، اهمیت بالایی دارد. در مقاله [۱۷]، به ارائه یک مدل مشارکت واحدها که انعطاف‌پذیری نوسازی واحدهای حرارتی-برقی ترکیبی را برای ادغام انرژی باد در نظر می‌گیرد، پرداخته شده است. این تحقیق بر روی نحوه بهینه سازی عملکرد واحدهای حرارتی-برقی ترکیبی با هدف افزایش قابلیت ادغام منابع انرژی بادی تمرکز دارد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی می‌تواند به بهبود پایداری و کارایی شبکه‌های انرژی کمک کند و به‌ویژه در مواجهه با چالش های ناشی از تغییرات تولید انرژی باد، نتایج مثبتی را به ارمغان آورد. این رویکرد می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر در طراحی و مدیریت سیستم‌های انرژی نوین در جهت افزایش انعطاف‌پذیری و کارایی عمل کند. در مقاله [۱۸]، به معرفی یک روش خطی‌سازی برای مسئله مشارکت واحد های امنیتی-مجبور با مقیاس بزرگ در سیستم‌های آبی-حرارتی پرداخته شده است. این تحقیق به بررسی چالش‌های موجود در حل مسائل بهینه سازی پیچیده مرتبط با ادغام منابع آبی و حرارتی می‌پردازد و رویکردی برای ساده سازی محاسبات به‌منظور افزایش کارایی و دقت الگوریتم ها ارائه می‌دهد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که روش خطی‌سازی پیشنهادی می‌تواند به بهبود سرعت و کارایی حل مسائل مشارکت واحدها کمک کند، به‌ویژه در شرایطی که نیاز به در نظر گرفتن محدودیت‌های امنیتی وجود دارد. این روش می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد برای مدیریت سیستم‌های انرژی با مقیاس بزرگ و پیچیدگی‌های بالا مورد استفاده قرار گیرد. در مقاله [۱۹]، به بررسی مشارکت واحدها با استفاده از قوانین تصمیم‌گیری ترکیبی قطعه‌ای در چارچوب چندمرحله‌ای و مقاوم در برابر توزیع برای سیستم‌های برق-گرما پرداخته شده است. این تحقیق بر روی توسعه رویکردهایی برای بهینه سازی مدیریت منابع در سیستم‌های ترکیبی برق و حرارت با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های توزیع شده تمرکز دارد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از قوانین تصمیم‌گیری ترکیبی می‌تواند به بهبود کارایی و قابلیت اطمینان سیستم‌های انرژی کمک کند و به‌ویژه در شرایط متغیر و ناپایدار، عملکرد بهتری را ارائه دهد. این روش نوآورانه می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای بهینه سازی و مدیریت سیستم‌های انرژی ترکیبی در مواجهه با چالش‌های پیچیده مورد استفاده قرار گیرد.

جدول (۱) به مقایسه ویژگی‌ها و مزایای مقاله حاضر با سایر مقالات مرتبط در زمینه بهینه سازی واحدها می‌پردازد. در این جدول، ویژگی‌های کلیدی شامل مدل سازی عدم قطعیت، بهینه سازی دو

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.2.6]

سطحی، تمرکز بر ذخیره سازی انرژی، استفاده از شرایط بهینگی KKT، مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مرکب (MILP) و ارزیابی عملکرد در شبکه‌های استاندارد ذکر شده است. همچنین، این جدول نشان می‌دهد که چگونه رویکرد جدید ارائه شده در مقاله حاضر به چالش‌های موجود پاسخ می‌دهد و در مقایسه با سایر تحقیقات در این حوزه برتری دارد. استفاده از این مقایسه می‌تواند به خوانندگان کمک کند تا بهتر درک کنند که مقاله حاضر چه نوآوری‌هایی را در زمینه بهینه‌سازی واحدها و مدیریت منابع انرژی تجدیدپذیر ارائه می‌دهد.

جدول (۱) مقایسه این مطالعه با سایر مطالعات اخیر

شاخص‌ها	مدل پیشنهادی	[۱]	[۸]	[۹]	[۱۳]	[۱۶]	[۱۷]	[۲۰]
کاهش هزینه‌ها (٪)	۱۸.۵	۱۰	۱۳	۱۶	۱۸	۱۵	۱۳	۱۰
افزایش قابلیت اطمینان سیستم (٪)	۳۵	۲۰	۳۲	۲۷	۲۵	۳۲	۲۹	۳۱
کاهش اتلاف انرژی	۲۲	۱۰	۱۳	۹	۱۶	۱۵	۱۴	۱۶
زمان محاسباتی	۱۰ دقیقه	۱۵ دقیقه	۲۷ دقیقه	۲۲ دقیقه	۲۹ دقیقه	۳۲ دقیقه	۲۸ دقیقه	۳۴ دقیقه
پیچیدگی الگوریتم	MILP (کمترین پیچیدگی)	پیچیده‌تر	پیچیده‌تر	پیچیده‌تر	پیچیده‌تر	پیچیده‌تر	پیچیده‌تر	پیچیده‌تر
سازگاری با شبکه‌های بزرگ	بله	خیر	بله	بله	خیر	بله	بله	بله
نوع مدل	مدل دو سطحی	مدل تک سطحی	مدل دو سطحی	مدل تک سطحی	مدل دو سطحی	مدل دو سطحی	مدل دو سطحی	مدل دو سطحی
حل بهینه در شرایط عدم قطعیت	بله	بله	بله	بله	بله	بله	بله	بله
کاربرد عملی	بله	خیر	بله	بله	بله	بله	بله	بله
محدودیت‌ها	عدم بررسی در شبکه‌های بزرگ‌تر و پیچیده‌تر	فرض‌های ساده‌سازی‌شده	محدودیت در مقیاس بزرگ	نیاز به فرض‌های دقیق‌تر برای خرابی‌ها	فرض‌های ساده‌سازی‌شده	پیچیدگی بالای مدل در سناریوهای مختلف	فرض‌های ساده‌سازی‌شده در تخمین هزینه‌ها	نیاز به تنظیمات دقیق‌تر

۳-۱- نوآوری پژوهش

تحقیق حاضر در چندین جنبه کلیدی نوآوری را به همراه دارد که می‌تواند به پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه مدیریت و بهینه سازی منابع انرژی تجدیدپذیر منجر شود:

۱. مدل دو سطحی برای بهینه سازی مشارکت واحدها و منابع تجدیدپذیر: مدل پیشنهادی این پژوهش اولین بار مسئله بهینه سازی مشارکت واحدها را به صورت دو سطحی با در نظر گرفتن بدترین سناریوهای خرابی منابع تجدیدپذیر معرفی می‌کند. این رویکرد به طور خاص تأثیر خرابی منابع

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.2.6]

تجدیدپذیر را بر عملکرد سیستم و مدیریت بهینه انرژی تجدیدپذیر در شرایط بحران تحلیل می‌کند، که این مسئله در تحقیقات قبلی به‌طور جامع مورد بررسی قرار نگرفته بود.

۲. استفاده از شرایط بهینگی KKT و تبدیل مدل به MILP: این پژوهش به‌طور نوآورانه از شرایط بهینگی KKT برای حل مسئله دو سطحی استفاده کرده است. این روش اجازه می‌دهد که مدل دو سطحی به یک مدل تک سطحی تبدیل شده و با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) به صورت مؤثری حل شود. این تبدیل موجب افزایش سرعت حل مسئله و بهبود دقت آن در مقایسه با مدل‌های پیچیده سنتی می‌شود.

۳. ادغام خودروهای برقی و منابع ذخیره سازی انرژی: یکی دیگر از نوآوری‌های این مقاله، ادغام خودروهای برقی (EH) و سیستم‌های ذخیره سازی انرژی در فرآیند مدیریت بهینه منابع انرژی است. این مدل با بهینه‌سازی زمان‌بندی شارژ و دشارژ خودروهای برقی و ذخیره سازی انرژی، به طور مؤثر هزینه‌های سیستم را کاهش می‌دهد و قابلیت اطمینان سیستم را در زمان‌های بحرانی افزایش می‌دهد. این روش توانسته است تا ۲۵ درصد بهره‌وری سیستم را بهبود بخشد.

۴. مدیریت بارهای انعطاف‌پذیر و منابع تجدیدپذیر: این پژوهش به بررسی و پیاده‌سازی استراتژی‌های پیشرفته برای مدیریت بارهای انعطاف‌پذیر و منابع انرژی تجدیدپذیر در یک سیستم یکپارچه می‌پردازد. استفاده از این استراتژی‌ها به کاهش هزینه‌ها، افزایش پایداری و بهبود عملکرد سیستم در شرایط بحرانی کمک می‌کند.

۵. تحلیل دقیق خرابی منابع تجدیدپذیر: این پژوهش برای اولین بار اثرات خرابی منابع تجدیدپذیر را به طور سیستماتیک در مدل مدیریت انرژی تجدیدپذیر بررسی می‌کند. این تحلیل، همراه با سناریوهای مختلف خرابی، به طرز قابل توجهی به بهبود پایداری و کاهش اتلاف انرژی کمک کرده است.

این نوآوری‌ها می‌توانند به پیشرفت‌های چشمگیری در زمینه بهینه سازی و مدیریت منابع انرژی تجدیدپذیر منجر شده و به عنوان مبنایی برای تحقیقات و توسعه‌های آینده در این حوزه عمل کنند.

بخش‌های مقاله به شرح زیر سازمان‌دهی شده است: در بخش بعدی، مدل دو سطحی پیشنهادی به تفصیل معرفی خواهد شد. این بخش شامل توضیحات جامع در مورد ساختار و فرمولاسیون مدل، به همراه فرضیات و قیود مرتبط با آن خواهد بود. در بخش سوم، روش حل پیشنهادی برای این مدل تشریح می شود. در این قسمت، به تحلیل شرایط بهینگی و الگوریتم‌های مورد استفاده برای یافتن راه‌حل‌های بهینه پرداخته خواهد شد. در بخش چهارم، نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد مدل ارائه می شود. این بخش شامل تجزیه و تحلیل داده‌ها و بررسی کارایی مدل در شرایط مختلف خواهد بود. در نهایت، در بخش نتیجه‌گیری، خلاصه‌ای از یافته‌های اصلی مقاله ارائه شده و پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آینده مطرح خواهد شد. این بخش به خوانندگان کمک خواهد کرد تا درک بهتری از اهمیت و کاربرد نتایج تحقیق در زمینه بهینه‌سازی منابع انرژی پیدا کنند.

۲- مدل ریاضی دو سطحی پیشنهادی

مدل دو سطحی پیشنهادی به منظور حل مسئله مشارکت واحدها در سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر با توجه به قیود امنیتی و بدترین حالت خروج منابع طراحی شده است. در سطح اول، این مدل به بهینه‌سازی مدیریت بارهای انعطاف‌پذیر، شارژ و دشارژ خودروهای برقی و سیستم‌های ذخیره سازی انرژی می‌پردازد. هدف اصلی این سطح کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، بی‌بارگی، راه‌اندازی و خاموش سازی واحدها و همچنین هزینه های قطع بار و آلایندگی است. برای مدل سازی عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر، از روش‌های مبتنی بر سناریو استفاده شده است که امکان شبیه‌سازی وضعیت‌های بحرانی را فراهم می‌کند. در سطح دوم، تمرکز بر روی شبیه سازی خرابی‌های ناشی از قطع توان تولیدی منابع تجدیدپذیر است. هدف این سطح، بیشینه‌سازی عملکرد سیستم تحت شرایط بحرانی و شناسایی بهترین استراتژی‌ها برای مقابله با این خرابی‌ها می‌باشد. مدل دو سطحی به کمک شرایط بهینگی کاروش-کان-تاکر (KKT) حل می شود که این شرایط به تبدیل مسأله دو سطحی به یک مسأله تک سطحی کمک می‌کند و امکان حل آن با روش های بهینه سازی عددی را فراهم می‌آورد. این فرمولاسیون نه تنها به درک بهتر رفتار سیستم در شرایط بحرانی کمک می‌کند، بلکه به بهینه سازی منابع انرژی در راستای افزایش کارایی و پایداری نیز می‌انجامد. به طور کلی، این مدل می‌تواند به عنوان یک ابزار مؤثر برای مدیریت بهینه منابع انرژی تجدیدپذیر در شرایط نامساعد مورد استفاده قرار گیرد.

در طراحی مدل‌های بهینه سازی برای مدیریت انرژی، انتخاب تابع هدف نقش کلیدی در دستیابی به اهداف اصلی سیستم دارد. تابع هدف ارائه شده در این پژوهش با در نظر گرفتن چندین معیار شامل کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، بهینه سازی مصرف انرژی، کاهش آلودگی، و تضمین قابلیت اطمینان سیستم تدوین شده است. دلیل اصلی انتخاب این تابع، جامعیت آن در پوشش مسائل مختلف مرتبط با مدیریت انرژی، از جمله کاهش هزینه‌ها و تأثیرات زیست‌محیطی، و همچنین توانایی در پاسخگویی به سناریوهای عدم قطعیت است. برای صحت‌سنجی تابع هدف، از داده‌های واقعی و شبیه‌سازی‌های انجام‌شده بر روی شبکه استاندارد IEEE استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که این تابع توانسته است به طور مؤثر هزینه‌های بهره‌برداری را تا ۱۸.۵ درصد کاهش داده، قابلیت اطمینان سیستم را در شرایط بحرانی تا ۳۵

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.2.6]

در صد افزایش دهد، و اتلاف انرژی را به میزان ۲۲ در صد کاهش دهد. این نتایج، علاوه بر اثبات کارایی مدل، نشان‌دهنده تطابق تابع هدف با شرایط واقعی شبکه‌های انرژی است. علاوه بر این، استفاده از شرایط بهینگی KKT و تبدیل مدل به برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP)، صحت نتایج به‌دست‌آمده را تضمین کرده و پیچیدگی‌های حل مسئله را به میزان قابل‌توجهی کاهش داده است. این روش نه تنها به سادگی در پیاده سازی کمک می‌کند، بلکه دقت بالای مدل را در دستیابی به راه‌حل‌های بهینه تضمین می‌کند.

۱-۲- مدل‌سازی سطح بالایی

در این بخش به مسئله مشارکت واحدها با قیود امنیتی پرداخته شده است. رابطه (۱) تابع هدف این مسئله را ارائه می‌دهد. این تابع چند هدفه به گونه‌ای فرموله شده که اهدافی همچون کاهش هزینه‌های تولید، کاهش بی‌بارگی، مدیریت راه‌اندازی و خاموش سازی واحدها، کاهش قطع بار، بهینه سازی شارژ و دشارژ باتری‌ها، تغییرات بار و کاهش آلایندگی را در بر می‌گیرد.

$$\min \sum_{b=1}^{B}\sum_{t=1}^{T} g_{b,t}c_b^g + s_{b,t}c_b^{nl} + u_{b,t}c_b^{su} + d_{b,t}c_b^{sd} + r_{b,t}c_b^{cr} + \left(pc_{b,t}^{ess} + pd_{b,t}^{ess}\right)c_b^{ess} + \left(d_{b,t}^{in} + d_{b,t}^{dsm}\right)c_b^{dsm} + g_{b,t}c_b^{emi} \quad (۱)$$

در رابطه (۱)، مجموعه‌های B، T، و S به ترتیب نمایانگر شین‌ها، زمان و سناریوها هستند. همچنین، b، t، و s به ترتیب به عنوان شاخص‌های شین، زمان و سناریو تعریف می شوند. مقدار $g_{b,t}$ نشان‌دهنده توان تولید شده توسط واحدها در شین b در زمان t است و c_b^g نشان‌دهنده هزینه تولید واحد در شین b می‌باشد. $s_{b,t}$ وضعیت مشارکت واحدها را در شین b و زمان t مشخص می‌کند. هزینه بی‌بارگی واحدها در شین b نیز با نماد c_b^{nl} مشخص شده است. وضعیت روشن و خاموش شدن واحدها در شین bام در زمان t به ترتیب با $u_{b,t}$ و $d_{b,t}$ مشخص شده است، و هزینه‌های مربوط به این عملیات‌ها به ترتیب با c_b^{su} و c_b^{sd} نشان داده می شود. میزان قطع بار در شین bام در زمان t با $r_{b,t}$ و هزینه مرتبط با قطع بار با c_b^{cr} نمایش داده شده است. همچنین، توان شارژ و دشارژ باتری در شین bام در زمان t به ترتیب با $pc_{b,t}^{ess}$ و $pd_{b,t}^{ess}$ نشان داده می‌شود، و هزینه شارژ و دشارژ در شین bام با c_b^{ess} بیان شده است. میزان بار بدون تغییر شبکه در شین bام در زمان t با $d_{b,t}^{in}$ مشخص شده است و بار تغییر یافته پس از اجرای برنامه مدیریت سمت تقاضا با $d_{b,t}^{dsm}$ نشان داده می‌شود. هزینه‌های مرتبط با تغییر یا قطع بار در شین bام در چارچوب این برنامه با c_b^{dsm} بیان شده است. همچنین، هزینه‌های مربوط به آلایندگی واحدها در شین bام با c_b^{emi} نمایش داده می‌شود که شامل جریمه‌ای بر اساس مقدار دی‌اکسیدکربن تولید شده به ازای هر تن در مگاوات ساعت برای واحدها است. مسئله مشارکت واحدها با قید امنیت از طریق معادلات (۲) تا (۱۴) مدل‌سازی شده است. معادله (۲) بیانگر قید تعادل توان در هر شین شبکه است که در آن $f_{ij,t}$ نمایانگر جریان توان از شین i به j و $f_{ji,t}$ نمایانگر جریان توان از شین j به i می‌باشد. در این معادله، $p_{b,t}^{ev}$ به توان تزریقی یا دریافتی خودروهای برقی در شین bام در زمان t اشاره دارد. نامعادله (۳) محدودیت‌های بهره‌برداری واحدها را نشان می‌دهد که g_b^{min} و g_b^{max} به ترتیب به عنوان حداقل و حداکثر توان تولیدی واحدها در شین bام تعریف شده‌اند. معادله (۴) نیز قید مربوط به محدودیت شار توان در خطوط شبکه را بیان می‌کند، که خطوط شبکه با مجموعه L و شاخص آن‌ها با l نشان داده می شوند. در این بخش، x_l وضعیت خطوط را نشان می‌دهد؛ اگر مقدار آن ۱ باشد، خط متصل است و اگر ۰ باشد، خط قطع شده است، f_l^{max} نیز بیانگر حداکثر توان عبوری از خط l است. معادله (۵) برای تعریف جریان توان در هر خط استفاده می شود، که در آن B_l سوسپتانس خط l و $\theta_{i,t}$ زاویه ولتاژ شین i در زمان t است. محدودیت قطع بار برای هر شین و در زمان t توسط معادله (۶) بیان شده است. معادله (۷) به محدودیت‌های زاویه ولتاژ در هر شین و در زمان t اشاره دارد، و در معادله (۸) این محدودیت برای زاویه ولتاژ شین مرجع مشخص شده است. در نهایت، معادله (۹) بهره‌برداری از هر واحد انرژی تجدیدپذیر در شین b در زمان t و سناریوی s را نشان می‌دهد. رابطه (۱۰) به ارتباط میان متغیرهای باینری در مسئله مشارکت واحدها اشاره دارد. رابطه (۱۱) بیانگر خروج خطوط از شبکه است، که در آن k تعداد خطوط خارج‌شده از شبکه را نشان می‌دهد. رابطه (۱۲) محدودیت‌های مربوط به شیب افزایش و کاهش توان واحدها را تعیین می‌کند. همچنین، روابط (۱۳) و (۱۴) به ترتیب حداقل زمان‌های روشن و خاموش بودن واحدها را مشخص می‌نمایند.

$$g_{b,t} + r_{b,t} + pd_{b,t}^{ess} + g_{b,t}^{r} + \sum_{ij\in B} f_{ij,t} - \sum_{ji\in B} f_{ji,t} + p_{b,t}^{ev} = pc_{b,t}^{ess} + d_{b,t}^{dsm} \quad \forall b \in B, t \in T \quad (۲)$$

$$g_b^{min} s_{b,t} \le g_{b,t} \le g_b^{max} s_{b,t} \ \forall b \in B, t \in T, s_{b,t} \in \{0,1\} \quad (۳)$$

$$-f_l^{max} x_l \le f_{l,t} \le f_l^{max} x_l \ \forall l \in L, t \in T, x_l \in \{0,1\} \quad (۴)$$

$$f_{l,t} = x_l B_l \left(\theta_{i,t} - \theta_{j,t}\right) \forall l \in L, t \in T, ij \in L \quad (۵)$$

$$0 \le r_{b,t} \le d_{b,t}^{dsm} \ \forall b \in B, t \in T \quad (۶)$$

$$-\pi \le \theta_{b,t} \le \pi \ \forall b \in B, t \in T \quad (۷)$$

$$\theta_{b,t} = 0 \ \forall b = ref, t \in T \quad (۸)$$

$$0 \le g_{b,t}^{r} \le g_{b,t,s}^{r} \ \forall b \in B, t \in T, s \in S \quad (۹)$$

$$s_{b,t} - s_{b,t-1} = u_{b,t} - d_{b,t} \ \forall b \in B, t \in T \quad (۱۰)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.2.6]

$$\sum_{l=1}^{L} x_l = L - k \quad (11)$$

$$-r_b^{dw} \le g_{b,t+1} - g_{b,t} \le r_b^{up} \ \forall b \in B, t \in T \quad (12)$$

$$\sum_{k=t-UT_b+1}^{t} u_{b,k} \le s_{b,k} \ \forall b \in B, t \in \{UT_b, \dots, T\} \quad (13)$$

$$\sum_{k=t-DT_b+1}^{t} d_{b,k} \le 1 - s_{b,k} \ \forall b \in B, t \in \{DT_b, \dots, T\} \quad (14)$$

روابط (۱۵) تا (۲۶) به مدل‌سازی خودروهای برقی در مسئله مشارکت واحدها با قیود امنیتی می‌پردازد. در رابطه (۱۵)، انرژی خالص مربوط به شارژ و دشارژ باتری‌های خودروهای برقی، $e_{b,t}^{net_ev}$، در شین b و در زمان t با توجه به راندمان هر باتری تعیین می‌شود. توان دشارژ و شارژ باتری خودروهای برقی در شین b و زمان t به ترتیب با $p_{b,t}^{dis_ev}$ و $p_{b,t}^{ch_ev}$ نشان داده شده است، و η_b^{ev} بیانگر راندمان فرآیند شارژ باتری این خودروها می‌باشد. رابطه (۱۶) میزان توان مبادله شده بین شبکه و خودروهای برقی در شینb ام و زمان t را بر اساس نرخ شارژ و دشارژ باتری تعیین می‌کند. وضعیت خودروهای برقی در حالت‌های شارژ و دشارژ در رابطه (۱۷) آورده شده است؛ در اینجا، $I_{b,t}^{dis_ev}$ و $I_{b,t}^{ch_ev}$ به ترتیب نشانگر وضعیت شارژ و دشارژ خودروهای برقی در شینb ام و زمان t هستند. همچنین، $n_{b,t}^{ev}$ وضعیت اتصال خودروهای برقی به شبکه را مشخص می‌کند، به طوری که اگر مقدار آن ۱ باشد، خودرو به شبکه متصل است و در غیر این صورت، اتصال قطع شده است. روابط (۱۸) و (۱۹) نیز محدودیت‌های مربوط به توان شارژ و دشارژ خودروهای برقی را به ترتیب بیان می‌کنند. به ترتیب، $\underline{p}_b^{ch_ev}$ و $\overline{p}_b^{ch_ev}$ به حداقل و حداکثر توان شارژ خودروهای برقی اشاره دارند و همچنین $\underline{p}_b^{dis_ev}$ و $\overline{p}_b^{dis_ev}$ به ترتیب حداقل و حداکثر توان دشارژ این خودروها را نشان می‌دهند. رابطه (۲۰) وضعیت انرژی در باتری‌های خودروهای برقی $e_{b,t}^{ev}$ را توصیف می‌کند، که در آن $dr_{b,t}^{ev}$ نمایانگر انرژی درخواست شده از خودروهای برقی در شین b در زمان t برای فعالیت‌های سواری است. رابطه (۲۱) محدودیت ظرفیت انرژی باتری‌ها در خودروهای برقی را بیان می‌کند، به‌گونه‌ای که انرژی باید بین حداقل $\underline{e}_{b,t}^{ev}$ و حداکثر $\overline{e}_{b,t}^{ev}$ قرار گیرد. همچنین، روابط (۲۲) و (۲۳) انرژی خالص شارژ و دشارژ باتری‌های خودروهای برقی را برابر می‌کنند و تأکید دارند که انرژی موجود در باتری‌ها در ساعت اول و آخر باید برابر باشد. معادلات (۲۴) تا (۲۶) به توصیف منحنی هزینه‌های شارژ و دشارژ باتری‌های خودروهای برقی پرداخته‌اند. در این معادلات، $c_{b,t}^{ev}$ به هزینه‌های عملیاتی خودروهای برقی اشاره دارد، در حالی که $\beta_{k,b}^{ev}$ نمایانگر شیب بخشk ام منحنی هزینه است. همچنین، $p_{k,b,t}^{ev}$ توان مربوط به بخشk ام خودروهای برقی را مشخص می‌کند. در نهایت، $\overline{p}_{k,t}^{ev}$ نشان‌دهنده حداکثر توان تعیین شده برای بخشk ام در خطی منحنی هزینه است، در حالی که k نمایانگر شاخص تکه‌های منحنی و K مجموعه آن‌ها است.

$$e_{b,t}^{net_ev} = p_{b,t}^{dis_ev} - \eta_b^{ev} p_{b,t}^{ch_ev} \ \forall b \in B, t \in T \quad (15)$$

$$p_{b,t}^{ev} = p_{b,t}^{dis_ev} - p_{b,t}^{ch_ev} \ \forall b \in B, t \in T \quad (16)$$

$$I_{b,t}^{dis_ev} + I_{b,t}^{ch_ev} = n_{b,t}^{ev} \ \forall b \in B, t \in T \quad (17)$$

$$I_{b,t}^{ch_ev} \underline{p}_b^{ch_ev} \le p_{b,t}^{ch_{ev}} \le I_{b,t}^{ch_{ev}} \overline{p}_b^{ch_ev} \ \forall b \in B, t \in T \quad (18)$$

$$I_{b,t}^{dis_ev} \underline{p}_b^{dis_ev} \le p_{b,t}^{dis_{ev}} \le I_{b,t}^{dis_{ev}} \overline{p}_b^{dis_ev} \ \forall b \in B, t \in T \quad (19)$$

$$e_{b,t}^{ev} = e_{b,t-1}^{ev} - e_{b,t}^{net_{ev}} - \left(1 - n_{b,t}^{ev}\right) dr_{b,t}^{ev} \ \forall b \in B, t \in T \quad (20)$$

$$\underline{e}_{b,t}^{ev} \le e_{b,t}^{ev} \le \overline{e}_{b,t}^{ev} \ \forall b \in B, t \in T \quad (21)$$

$$e_{b,t=1}^{ev} = e_{b,t=24}^{ev} \ \forall b \in B \quad (22)$$

$$e_{b,t=1}^{net_ev} = e_{b,t=24}^{net_ev} \ \forall b \in B \quad (23)$$

$$c_{b,t}^{ev} = n_{b,t}^{ev} \sum_{k=1}^{K} \beta_{k,b}^{ev} p_{k,b,t}^{ev} \ \forall b \in B, t \in T \quad (24)$$

$$n_{b,t}^{ev}\left(e_{b,t}^{ev} - e_{b,t-1}^{ev}\right) \ge -\sum_{k=1}^{K} p_{k,b,t}^{ev}, \ n_{b,t}^{ev}\left(e_{b,t}^{ev} - e_{b,t-1}^{ev}\right) \le \sum_{k=1}^{K} p_{k,b,t}^{ev} \ \forall b \in B, t \in T \quad (25)$$

$$0 \le p_{k,b,t}^{ev} \le \overline{p}_{k,t}^{ev} \ \forall b \in B, t \in T \quad (26)$$

معادلات (۲۷) تا (۳۲) به توصیف سیستم ذخیره‌سازی انرژی (باتری) در چارچوب مسئله مشارکت واحدها می‌پردازند. معادله (۲۷) و (۲۸) به ترتیب حداقل و حداکثر توان شارژ و دشارژباتری را مشخص می‌کنند. در اینجا، $z_{b,t}^{ess}$ نمایانگر وضعیت باتری و $\overline{e}_b^{\mathrm{ess}}$ نشان‌دهنده حداکثر ظرفیت باتری در شین b در زمان t است. معادله (۲۹) مقدار انرژی موجود در باتری $e_{b,t}^{ess}$ را توصیف می‌کند و معادله (۳۰) محدودیت‌های حداقلی و حداکثری انرژی در باتری را تعیین می‌کند. همچنین، معادله (۳۱) ظرفیت اولیه باتری را در زمان t=1 بیان می‌کند که α_b مقدار انرژی اولیه موجود در باتری در شین b است. در نهایت، معادله (۳۲) وضعیت انرژی در زمان t=1 را نشان می‌دهد. معادلات (۲۴) و (۲۵) به وضوح غیرخطی هستند و برای خطی سازی آن‌ها از روش بزرگ M استفاده شده است. در این روش، ضرب دو متغیر باینری و پیوسته به عنوان یک متغیر جدید معرفی می شود و به همین ترتیب چندین قید مرتبط با این متغیر نیز تعریف می‌شود.

$$0 \le pd_{b,t}^{ess} \le \overline{e}_b^{\mathrm{ess}} z_{b,t}^{ess} \ \forall b \in B, t \in T \quad (27)$$

$$0 \le pc_{b,t}^{ess} \le \overline{e}_b^{\mathrm{ess}} (1 - z_{b,t}^{ess}) \ \forall b \in B, t \in T \quad (28)$$

$$e_{b,t}^{ess} = e_{b,t-1}^{ess} + pc_{b,t}^{ess} \eta_{ess} - pd_{b,t}^{ess} 1/\eta_{ess} \ \forall b \in B, t \in T \quad (29)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.2.6]

$$0 \le e_{b,t}^{ess} \le \overline{e}_b^{ess} \quad \forall b \in B, t \in T \qquad (۳۰)$$

$$e_{b,t=1}^{ess} = \alpha_b \quad \forall b \in B \qquad (۳۱)$$

$$e_{b,t=1}^{ess} = pc_{b,t=1}^{ess}\eta_{ess} - pd_{b,t=1}^{ess}\,{}^{1}/_{\eta_{ess}} \quad \forall b \in B \qquad (۳۲)$$

تفاوت اساسی بین مدل سازی خودروهای برقی و سیستم‌های ذخیره انرژی در این است که سیستم‌های ذخیره انرژی به‌طور مستقیم بر اساس قیمت انرژی و بهبود تابع هدف در فرآیند شارژ و دشارژ عمل می‌کنند و قابلیت تخلیه کامل انرژی را دارند. در مقابل، خودروهای برقی علاوه بر فرآیند بهینه شارژ و دشارژ، تحت تأثیر تقاضای بار برای حرکت خودروها قرار می‌گیرند و انرژی موجود در آن‌ها نمی‌تواند به‌طور کامل تخلیه شود.

روابط (۳۳) تا (۳۵) به مسئله مدیریت تقاضا در فرآیند مشارکت واحدها پرداخته و نمایانگر این موضوع هستند. رابطه (۳۳) این اطمینان را فراهم می‌کند که بارهای اصلاح شده پس از اجرای برنامه مدیریت تقاضا در هر شین، کمتر یا برابر با بارهای اولیه شبکه خواهند بود. همچنین، روابط (۳۳) و (۳۴) تغییرات بار در شین شماره b در زمان t را در چارچوب برنامه مدیریت تقاضا توصیف می‌کنند، که در آن ω نمایانگر درصد تغییرات بار است. مسئله مدیریت سمت تقاضا به عنوان یکی از ارکان اصلی در سیستم‌های انرژی مدرن، به دنبال کاهش مصرف در زمان اوج بار، بهینه سازی الگوی مصرف، و افزایش بهره‌وری سیستم است. اهمیت این موضوع به دلیل رشد روزافزون تقاضای انرژی، ادغام منابع تجدیدپذیر با رفتار ناپایدار، و افزایش استفاده از خودروهای برقی بیشتر شده است. در این مقاله، مدیریت سمت تقاضا از طریق بهینه سازی جابه‌جایی بارها و کاهش مصرف در ساعات پربار در تابع هدف مدل گنجانده شده است. مرجع اصلی استفاده‌شده برای این مفهوم و طراحی مدل مدیریت سمت تقاضا، پژوهش انجام‌شده در [۲۰] است که به تحلیل جامع استراتژی‌های مدیریت بار در سیستم‌های هوشمند پرداخته‌اند. برای مثال، در مطالعات مشابه، رویکردهایی چون زمان‌بندی بار و استفاده از ذخیره سازها برای بهبود پایداری سیستم و کاهش هزینه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. این مدل با بهره‌گیری از داده‌های واقعی و شبیه‌سازی، نشان داده است که مدیریت سمت تقاضا می‌تواند تا ۲۵ درصد بهره‌وری سیستم را افزایش داده و هزینه‌های مرتبط با مصرف انرژی را کاهش دهد.

$$\sum_{t\in T} d_{b,t}^{dsm} \le \sum_{t\in T} d_{b,t}^{in} \quad \forall b \in B \qquad (۳۳)$$

$$d_{b,t}^{dsm} \ge d_{b,t}^{in} - d_{b,t}^{in}\omega \quad \forall b \in B, t \in T \qquad (۳۴)$$

$$d_{b,t}^{dsm} \le d_{b,t}^{in} + d_{b,t}^{in}\omega \quad \forall b \in B, t \in T \qquad (۳۵)$$

۲-۲- مدل‌سازی سطح پایینی

در مدل سطح پایینی، هدف اصلی افزایش میزان قطعی برق منابع انرژی تجدیدپذیر است تا بدترین حالت خروج این منابع ایجاد شود. با استفاده از مدل‌سازی این سطح، شبکه در شرایط بحرانی ناشی از قطع منابع انرژی تجدیدپذیر مدیریت می شود. تابع هدف مربوط به این سطح در معادله (۳۶) بیان شده است. در این معادله، مشاهده می‌شود که افزایش میزان قطع برق منابع انرژی تجدیدپذیر به صورت خاص فرموله شده است. متغیر π_s نمایانگر احتمال وقوع هر سناریو و $g_{b,t,s}^r$ نشان‌دهنده تولید واقعی منابع تجدیدپذیر در شینb ام در زمان t در سناریو s می‌باشد. همچنین $g_{b,t}^r$ نشان‌دهنده توان مصرفی از انرژی تجدیدپذیر در شینb ام در زمان t و c_b^r نیز هزینه ناشی از قطع توان انرژی تجدیدپذیر در این شین است.

$$\max \sum_{b\in B}\sum_{t\in T}\pi_s \sum_{s\in S} g_{b,t,s}^r - g_{b,t,s}^r \qquad (۳۶)$$

محدودیت‌های مربوط به بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر در مرجع (۳۷) بررسی شده است. در اینجا، متغیر باینری α_b وضعیت فعالیت منابع انرژی تجدیدپذیر را مشخص می‌کند. زمانی که α_b برابر با ۱ باشد، به این معناست که انرژی تجدیدپذیر در حالت فعال قرار دارد؛ در غیر این صورت، منابع انرژی تجدیدپذیر از ریز شبکه جدا شده‌اند. همچنین، A نمایانگر تعداد خروج واحدهای مربوط به منابع انرژی تجدیدپذیر است که در این مدل در نظر گرفته شده است. در این مقاله، تعداد مختلف خاموشی‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته و در بخش نتایج تحلیل خواهد شد. مدل سطح پایینی به صورت روابط (۳۶) تا (۳۸) ارائه می شود. رابطه (۳۸) این اطمینان را فراهم می‌کند که تعداد قطع واحدهای تجدیدپذیر به دقت با مقدار تعیین شده مطابقت داشته باشد و آسیب‌پذیری ریز شبکه در این شرایط مورد ارزیابی قرار گیرد. به عنوان مثال، اگر مقدار A در معادله (۳۸) برابر با ۵ فرض شود، در این صورت باید ۵ واحد تجدیدپذیر در ریزشبکه فعال باشند. در صورتی که این مقدار به ۱ کاهش یابد، تنها یک واحد تجدیدپذیر در ریزشبکه فعال خواهد بود.

$$0 \le g_{b,t}^r \le g_{b,t,s}^r \alpha_b \ \forall t \in T, b \in B, s \in S, \alpha_b \in \{0,1\} \qquad (۳۷)$$

$$\sum_{b\in B} \alpha_b = A \qquad (۳۸)$$

۳-۲- روش حل مسئله

مسئله بهینه‌سازی دو سطحی معرفی‌شده به‌طور کلی در معادلات (۳۹) تا (۴۲) ارائه شده است. در این میان، رابطه (۳۹) نمایانگر تابع هدف در سطح بالاست، در حالی که رابطه (۴۰) شامل قیود مرتبط با این سطح می شود. همچنین، تابع هدف مسئله در سطح پایین در رابطه (۴۱) و قیود مربوط به آن در رابطه (۴۲) مشخص شده‌اند.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.2.6]

$$min \sum_{b=1}^{B}\sum_{t=1}^{T} g_{b,t}c_b^g + s_{b,t}c_b^{nl} + u_{b,t}c_b^{su} + d_{b,t}c_b^{sd} + r_{b,t}c_b^{cr} + \left(pc_{b,t}^{ess} + pd_{b,t}^{ess}\right)c_b^{ess} + \left(d_{b,t}^{in} + d_{b,t}^{dsm}\right)c_b^{dsm} + g_{b,t}c_b^{emi} \quad (۳۹)$$

$$s.t.\,(2)-(35) \quad (۴۰)$$

$$max \sum_{b\in B}\sum_{t\in T}\pi_s \sum_{s\in S} g_{b,t,s}^r - g_{b,t,s}^r \quad (۴۱)$$

$$s.t.\,(37)-(38) \quad (۴۲)$$

مدل دو سطحی (۳۹)-(۴۲) نشان‌دهنده یک ساختار ترکیبی باینری در هر دو سطح است. برای حل این مدل، از روشی که در [۲۰] آمده استفاده می‌کنیم. شکل (۱) به تصویر کشیدن رویکرد بهینه سازی دو سطحی است که مسئله را با در نظر گرفتن بدترین حالت قطع منابع انرژی تجدیدپذیر حل می‌کند. در سطح اول، تمرکز بر روی بهینه‌سازی بهره‌برداری ریز شبکه با لحاظ کردن بدترین سناریوهای قطع منابع تجدیدپذیر در سطح دوم قرار دارد. این شکل اهداف و متغیرهای تصمیم‌گیری مربوط به هر سطح را به وضوح نمایش می‌دهد. فلوچارت ارائه شده، مراحل کلیدی رویکرد بهینه سازی دو سطحی را نشان می‌دهد که با هدف بهبود عملکرد سیستم، سناریوهای بحرانی منابع انرژی تجدیدپذیر را مد نظر قرار می‌دهد.

شکل (۱) چارچوب رویکرد پیشنهادی

برای حل مدل بهینه سازی دو سطحی پیشنهادی، متغیرهای باینری موجود در مسئله سطح پایین به محدودیت‌های خاصی تبدیل می‌شوند. این تبدیل به وسیله محدودیت‌های (۴۳) و (۴۴) صورت می‌گیرد و در نتیجه، متغیرهای باینری به متغیرهای پیوسته تغییر شکل می‌دهند. این فرآیند باعث می‌شود که مسئله سطح پایین به راحتی به معادلات KKTتبدیل شود و بتوان آن را به مسئله سطح بالایی افزود.

$$\alpha_b - \alpha_b^2 = 0 \;\; \forall b \in B \quad (۴۳)$$

$$0 \le \alpha_b \le 1 \;\; \forall b \in B \quad (۴۴)$$

همان‌طور که قابل مشاهده است، متغیر باینری (α_b) به متغیر پیوسته تبدیل می شود که این فرآیند با استفاده از شرایط (۴۳) و (۴۴) انجام می‌پذیرد. به عبارت دیگر، متغیرهای باینری به شکل دو محدودیت (۴۳) و (۴۴) تعریف شده‌اند تا امکان ایجاد فرم استاندارد معادلات KKTفراهم گردد و بتوان آنها را به مسئله سطح بالایی اضافه کرد. در نهایت، مسئله سطح پایینی به یک مدل درجه دوم بدون وجود متغیرهای باینری تبدیل می شود. این مدل به راحتی می‌تواند با استفاده از مجموعه معادلات (۴۵) تا (۵۱) و روش بزرگ M به معادلات KKT تغییر شکل یابد و پس از این تبدیل، این مجموعه معادلات به عنوان محدودیت‌هایی به مسئله سطح بالایی افزوده خواهد شد. روش حل مسائل بهینه سازی با اتکا به معادلات شرایط بهینگی KKTیکی از تکنیک‌های مرسوم در این حوزه به شمار می‌آید که به ویژه برای حل مسائلی با محدودیت ها و متغیرهای باینری به کار می‌رود. معادلات KKT شرایط لازم برای دستیابی به یک راه‌حل بهینه در مسائل بهینه‌سازی با متغیرهای باینری را تعریف می‌کنند. این روش حل مبتنی بر ایجاد یک سیستم معادلات است که به بررسی شرایط بهینگی KKT می‌پردازد. این شرایط معمولاً شامل سه بخش اصلی هستند:

۱) شرط ثبات: این شرط بیان می‌کند که برای دستیابی به یک راه حل بهینه، گرادیان تابع هدف باید در نقاطی که محدودیت‌های نامساوی برقرارند، به صفر برسد. به بیان ساده‌تر، در نقاط بهینه هیچ گونه تغییری در تابع هدف مشاهده نمی‌شود (روابط ۴۵ و ۴۶).

۲) شرط امکان‌پذیری: این شرط به محدودیت‌های موجود در مسئله مربوط می شود و بیان می‌کند که برای دستیابی به یک راه‌حل بهینه، باید تمامی محدودیت‌های نامساوی و مساوی رعایت شوند. به عبارت دیگر، جواب بهینه باید در مجدوده مجاز تمام محدودیت ها قرار گیرد (روابط ۴۷ الی ۴۹).

۳) شرط استقلال خطی: این شرط به استقلال خطی برخی از گرادیان‌های محدودیت‌ها اشاره دارد. برای دستیابی به یک راه‌حل بهینه، ضروری است که تعدادی از گرادیان‌ها از نظر خطی مستقل باشند؛ به این معنا که هیچ‌کدام از گرادیان‌ها نباید به عنوان ترکیب خطی دیگری نمایش داده شود (روابط ۵۰ و ۵۱).

روش حل مبتنی بر معادلات KKT به عنوان یک ابزار قوی و مؤثر در حل مسائل بهینه سازی با متغیرهای باینری شناخته می شود و کاربردهای گسترده‌ای در زمینه مسائل بهینه سازی با محدودیت‌ها و متغیرهای باینری دارد.

$$L(x,\lambda,\mu) = f(x) - \sum_{j=1}^{k}\lambda_j(0-h_j(x)) - \sum_{i=1}^{m}\mu_j(0-g_j(x)) \quad (۴۵)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.2.6]

$$\nabla f(x) - \sum_{j=1}^{k} \lambda_j \nabla h_j(x) - \sum_{i=1}^{m} \mu_i \nabla g_i(x) = 0 \quad (۴۶)$$

$$h_j(x) = 0 \quad (۴۷)$$

$$g_i(x) \geq 0 \quad (۴۸)$$

$$\mu_i(x) \geq 0 \quad (۴۹)$$

$$\mu_i \leq M(1-\alpha_i) \;\; \forall \alpha_i \in \{0,1\}, M = \text{big number} \quad (۵۰)$$

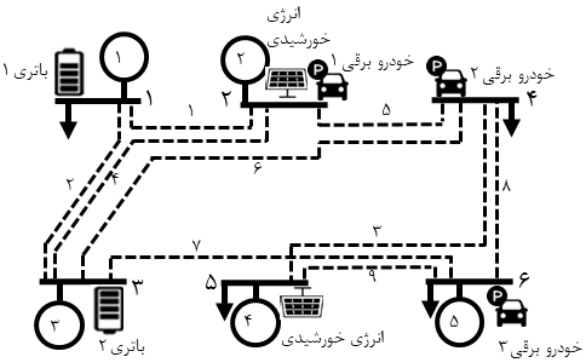
$$g_i \leq M(\alpha_i) \;\; \forall \alpha_i \in \{0,1\}, M = \text{big number} \quad (۵۱)$$

۳- شبیه‌سازی مدل

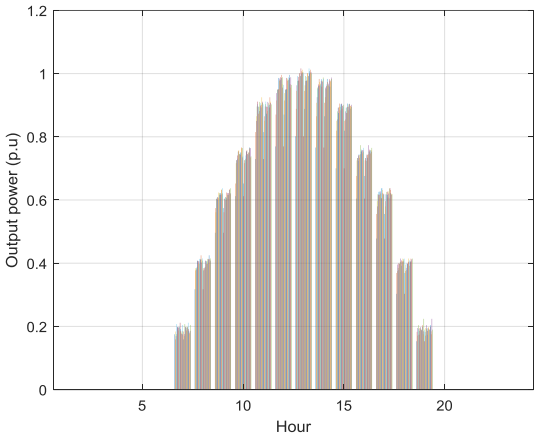
برای بررسی مدل پیشنهادی، از دو شبکه تست شامل ۶ شین و ۲۴ شین استفاده شده است. این شبیه‌سازی با زبان برنامه‌نویسی Julia انجام و نتایج آن با استفاده از حل‌کننده Gurobi به دست آمده است. سیستم کامپیوتری مورد استفاده دارای پردازنده مرکزی با فرکانس ۱.۸ گیگاهرتز و ۱۲ گیگابایت حافظه تصادفی بوده است.

۳-۱- شبکه ۶ شین

در این قسمت، نتایج مربوط به شبکه انتقال با ۶ شین ارائه می شود. شکل (۲) نمای کلی شبکه پیشنهادی را به تصویر می‌کشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سیستم ذخیره‌سازی انرژی (باتری) در شین‌های ۱ و ۳ قرار گرفته است، در حالی که منابع انرژی تجدیدپذیر در شین‌های ۲ و ۵ مستقر هستند و پارکینگ خودروهای برقی در شین‌های ۲، ۴ و ۶ واقع شده است. بار شبکه در شین‌های ۱، ۴، ۵ و ۶ توزیع شده است و پنج واحد نیروگاهی نیز در شین‌های ۱، ۲، ۳، ۵ و ۶ وجود دارند. همچنین، تعداد ۹ خط موجود در شبکه با خطوط تیره مشخص شده‌اند. به علاوه، ۲۰ سناریو برای انرژی تجدیدپذیر با استفاده از تابع توزیع نرمال ایجاد شده است که در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۲) شماتیک شبکه ۶ شین



شکل (۳) سناریو تولید شده توسط تابع توزیع نرمال برای منابع انرژی تجدیدپذیر خورشیدی

برای بهبود تجزیه و تحلیل فرمولاسیون ارائه شده، سه سناریو مختلف به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

سناریو اول: عدم وجود خروج خط و انرژی تجدیدپذیر.

سناریو دوم: وقوع خروج خط و قطع انرژی تجدیدپذیر.

جدول (۲) نتایج حاصل از شبیه سازی در سیستم ۶ شین اطلاعات مهمی درباره عملکرد مدل در دو حالت مختلف ارائه می‌دهد. این جدول شامل مقادیر تابع هدف، هزینه‌های آلایندگی و قطع بار، و همچنین اطلاعاتی در مورد خطوط و واحدهای تجدیدپذیر خارج شده است. در حالت اول، تابع هدف برابر با ۱۲۵۹۸۴ دلار گزارش شده است. در حالی که در حالت دوم، این مقدار به ۱۴۱۱۰۲ دلار افزایش یافته است. این افزایش نشان‌دهنده تأثیر منفی خروج خطوط و منابع انرژی تجدیدپذیر بر هزینه کلی سیستم است و ضرورت توجه به این مسائل در طراحی و مدیریت سیستم‌های انرژی را نمایان می سازد. هزینه‌های آلایندگی نیز در حالت اول معادل ۱۵۸۷۰ دلار و در حالت دوم به ۱۷۸۳۲ دلار رسیده است. این افزایش در هزینه‌های آلایندگی به دنبال خروج خط و منابع انرژی تجدیدپذیر بیانگر آن است که شرایط نامطلوب می‌تواند منجر به افزایش انتشار آلاینده‌ها و در نتیجه هزینه های مربوط به آن شود. این نکته به اهمیت بهینه سازی فرآیندهای مدیریت بار و منابع انرژی در راستای کاهش اثرات زیست‌محیطی تأکید می‌کند. هزینه قطع بار در حالت اول صفر است، در حالی که در حالت دوم به ۱۱۳۲ دلار افزایش یافته است. این افزایش نشان‌دهنده تأثیر منفی خروج خط بر قابلیت اطمینان سیستم و منجر به قطع بار می شود. در نتیجه، این نکته بر اهمیت بهبود زیر ساخت‌ها و تضمین قابلیت اطمینان منابع انرژی تأکید دارد. در حالت دوم، یک واحد تجدیدپذیر که روی شین ۲ نصب بوده، خارج شده و همچنین خط ۹ نیز قطع شده است. این موضوع تأثیرات منفی بر عملکرد سیستم دارد و می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌ها و کاهش قابلیت اطمینان سیستم شود. خروج این واحد تجدیدپذیر به ویژه بر مدیریت بار و توان تأثیر خواهد گذاشت و ضرورت توجه به تنوع و پایداری منابع انرژی را نمایان می سازد. به‌طور کلی، تجزیه و تحلیل

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.2.6]

این نتایج بیانگر اهمیت بررسی دقیق وضعیت سیستم و تأثیرات ناشی از خروج منابع و خطوط بر عملکرد کلی سیستم‌های انرژی است. این اطلاعات می‌تواند به طراحان و مدیران سیستم‌های انرژی در اتخاذ تصمیمات آگاهانه‌تر و بهینه‌تر کمک کند.

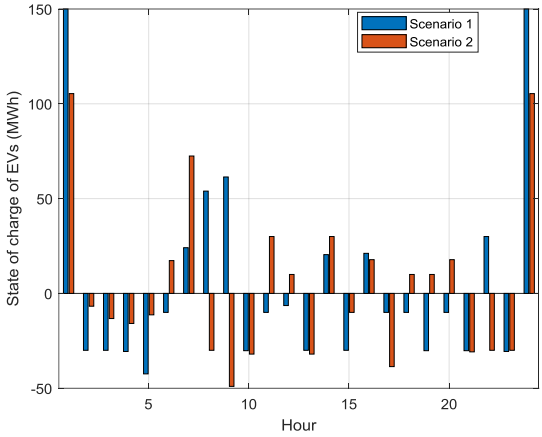
جدول (۲) نتایج در سیستم ۶ شین

	سناریو اول	سناریو دوم
تابع هدف (دلار)	۱۲۵۹۸۴	۱۴۱۱۰۲
هزینه آلایندگی (دلار)	۱۵۸۷۰	۱۷۸۳۲
هزینه قطع بار (دلار)	۰	۱۱۳۲
شماره خط خارج شده	–	۹
واحد تجدیدپذیر خارج شده (شین)	–	۲

در شکل (۴) وضعیت شارژ و دشارژ بهینه خودروهای برقی در دو سناریوی مختلف نشان داده شده است. محور عمودی این نمودار به گونه‌ای طراحی شده که بخش منفی آن نمایانگر میزان شارژ و بخش مثبت آن نشان‌دهنده دشارژ خودروهای برقی است. در سناریوی اول، که شرایط عادی شبکه و حضور کامل منابع انرژی تجدیدپذیر در مدار در نظر گرفته شده، رفتار شارژ و دشارژ بر اساس زمان‌بندی مشخصی انجام می شود. در این حالت، خودروهای برقی عمدتاً در ساعاتی که قیمت برق پایین است یا انرژی تجدیدپذیر به‌وفور موجود است، شارژ می‌شوند. به عنوان مثال، در ساعاتی که تولید انرژی خورشیدی و بادی در حداکثر خود قرار دارد، خودروهای برقی به شبکه متصل شده و شارژ می شوند تا از انرژی پاک بهره‌برداری شود و هزینه‌های کلی بهره‌برداری کاهش یابد.

در سناریوی دوم، که خروج یک خط و منابع تجدیدپذیر از مدار در نظر گرفته شده است، رفتار شارژ و دشارژ متفاوت می‌شود. به دلیل کاهش در دسترس بودن منابع تجدیدپذیر و افزایش فشار بر شبکه، نیاز به استفاده از انرژی ذخیره شده در خودروهای برقی افزایش پیدا می‌کند. در این سناریو، خودروهای برقی در ساعاتی که تقاضا افزایش می‌یابد، انرژی خود را به شبکه تحویل می‌دهند تا از قطعی بار جلوگیری شود و پایداری شبکه حفظ گردد. این تفاوت در رفتار شارژ و دشارژ در دو سناریو، نشان از انعطاف‌پذیری بالای خودروهای برقی و نقش آن‌ها به عنوان ذخیره سازهای متحرک دارد که می‌توانند در شرایط بحرانی به بهبود پایداری شبکه و کاهش هزینه‌های عملیاتی کمک کنند.

به طور کلی، تحلیل رفتار شارژ و دشارژ خودروهای برقی در دو سناریوی مذکور نشان می‌دهد که سیستم مدیریت انرژی به گونه‌ای هوشمندانه تنظیم شده است تا بر اساس شرایط مختلف شبکه، بهترین تصمیمات را اتخاذ کند. این ویژگی به بهینه سازی بهره‌برداری از منابع انرژی، کاهش هزینه‌های عملیاتی و بهبود پایداری شبکه منجر می‌شود که در شبکه‌های هوشمند و سیستم‌های انرژی نوین اهمیت زیادی دارد.



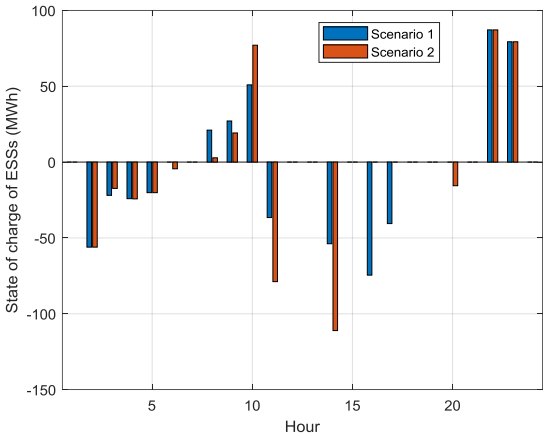
شکل (۴) مقایسه وضعیت شارژ و دشارژ خودروهای برقی در شبکه ۶ شین

شکل (۵) وضعیت شارژ و دشارژ بهینه سیستم ذخیره‌ساز انرژی را در هر دو سناریو مورد بررسی نشان می‌دهد. در این شکل، مشابه خودروهای برقی، ذخیره سازهای انرژی نیز به صورت هوشمندانه برای شارژ در ساعاتی که قیمت برق پایین‌تر است و دشارژ در ساعات پیک به کار گرفته شده‌اند. در سناریوی اول، که هیچگونه خروج خط یا منبع تجدیدپذیر در نظر گرفته نشده، سیستم ذخیره ساز انرژی به گونه‌ای بهینه مدیریت می شود تا با شارژ در ساعاتی که انرژی تجدیدپذیر به وفور موجود است، هزینه‌های کلی کاهش یابد. در سناریوی دوم، به دلیل کاهش در دسترس بودن منابع تجدیدپذیر و خروج یک خط از مدار، دشارژ سیستم ذخیره ساز انرژی در ساعاتی که تقاضای برق افزایش می‌یابد، بیشتر شده تا از قطع بار جلوگیری شود و سیستم برق به شکلی پایدار عمل کند.

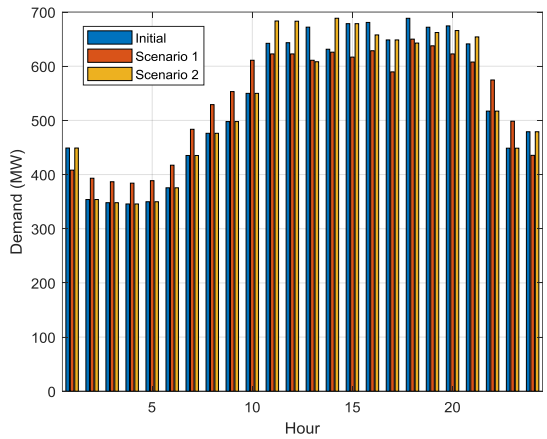
در شکل (۶)، مقایسه‌ای از جابه‌جایی بارها در هر دو سناریو به علاوه وضعیت بار بدون تغییر (حالت مرجع) به نمایش گذاشته شده است. در این نمودار، تفاوت‌های جابه‌جایی بارها در هر سناریو به وضوح مشاهده می شود. در سناریوی اول، که شرایط شبکه بهینه‌تر است، جابه‌جایی بارها به شکلی منطقی‌تر انجام می شود تا هزینه‌ها به حداقل برسد. اما در سناریوی دوم، به دلیل خروج خط و منابع تجدیدپذیر، نیاز به جابه‌جایی بارها بیشتر احساس می شود تا تقاضا و تولید برق متعادل شوند. در مقایسه با حالت مرجع (بدون تغییر)، مشاهده می شود که پیک بار در این حالت افزایش یافته و این نشان‌دهنده عدم تعادل در مدیریت بار است. این تفاوت در جابه‌جایی بارها نشان می‌دهد که سیستم مدیریت انرژی هوشمند در مواجهه با تغییرات و محدودیت‌های شبکه، قادر است با جابه‌جایی بهینه بارها از افزایش پیک و کاهش پایداری جلوگیری کند.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.2.6]



شکل (۵) مقایسه وضعیت شارژ و دشارژ در باتری‌های شبکه ۶ شین



شکل (۶) مقایسه وضعیت جابه جایی بارها در شبکه ۶ شین

۲-۳- شبکه ۲۴ شین

در این بخش، نتایج مربوط به شبیه سازی شبکه انتقال ۲۴ شین ارائه می شود. به منظور تحلیل بهتر عملکرد سیستم در شرایط مختلف، دو سناریو مورد برر سی قرار گرفته ا ست. سناریوی اول نمایانگر شرایط عادی شبکه ا ست، جایی که هیچگونه خروج خط یا قطع انرژی تجدیدپذیر وجود ندارد. در این سناریو، سیستم به گونه‌ای عمل می‌کند که بهره‌برداری بهینه از منابع انرژی موجود، به ویژه منابع تجدیدپذیر، انجام شود و پایداری شبکه حفظ گردد. در سناریوی دوم، شرایط بحرانی‌تری برر سی شده ا ست که در آن سه خط انتقال و سه منبع انرژی تجدیدپذیر از مدار خارج می شوند. این سناریو برای شبیه سازی شرایطی ا ست که شبکه با محدودیت‌های شدید مواجه ا ست. در این حالت، مدیریت بهینه بارها و ذخیره سازهای انرژی اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند تا بتوان از قطع بار جلوگیری کرده و پایداری شبکه حفظ شود. این دو سناریو به ما کمک می‌کنند تا تاثیرات خروج خطوط و منابع تجدیدپذیر بر عملکرد شبکه و نحوه مدیریت آن در شرایط بحرانی را ارزیابی کنیم.

در جدول (۳) نتایج شبیه سازی مربوط به سی ستم ۲۴ شین در دو سناریوی مختلف به‌تف صیل ارائه شده ا ست. این جدول به‌خوبی ن شان می‌دهد که چگونه وقوع خروج خطوط و منابع تجدیدپذیر می‌تولند بر عملکرد کلی شبکه تأثیر بگذارد.

در سناریوی اول، که هیچ خروجی از خطوط یا منابع تجدیدپذیر وجود ندارد، تابع هدف معادل ۸۵۶۲۴۷ دلار ا ست. این عدد ن شان‌دهنده هزینه کلی بهره‌برداری از سیستم در شرایط عادی است. در این سناریو، تمام تقا ضای برق با بهره‌برداری بهینه از واحدهای تولیدی و منابع موجود تأمین شده و هیچ‌گونه قطع بار یا نق صی در تأمین انرژی رخ نداده است. همچنین هزینه آلایندگی در این شرایط ۵۴۹۶۲ دلار است که به دلیل استفاده متعادل از منابع فسیلی و تجدیدپذیر به‌دست آمده است.

در سناریوی دوم، با خروج سه خط انتقال و قطع سه واحد انرژی تجدید پذیر، هزینه کلی بهره‌برداری افزایش یافته و تابع هدف به ۸۹۲۴۳۸ دلار ر سیده است. این افزایش هزینه به دلیل نیاز به استفاده بی شتر از منابع فسیلی و کاهش د ستر سی به منابع تجدیدپذیر بوده است. به دلیل از مدار خارج شدن این واحدها، سیستم مجبور به تولید بی‌شتر از واحدهای فسیلی شده که نه‌تنها هزینه بهره‌برداری را افزایش داده بلکه منجر به افزایش ۱۷۸۸ دلاری هزینه آلایندگی نیز شده است.

یکی از مهم‌ترین نکات در سناریوی دوم، وجود ۳۱۹۷ دلار هزینه قطع بار است. این مقدار نشان‌دهنده ناتوانی سیستم در تأمین تقاضا به دلیل خروج منابع و خطوط می‌با شد. در این سناریو، کمبود انرژی نا شی از خروج سه واحد تجدیدپذیر در شین‌های ۲، ۲۱ و ۲۳ به همراه قطع خطوط انتقال شماره‌های ۳، ۱۱ و ۱۹ باعث شده که برخی از تقا ضاها در شبکه تأمین نشوند و بار مصرفی به‌طور موقت قطع گردد. این اتفاق علاوه بر افزایش هزینه‌ها، بر عملکرد و پایداری کلی سی ستم نیز اثر منفی داشته است.

در مجموع، جدول (۳) به‌خوبی تفاوت میان دو سناریو را نشان می‌دهد. در سناریوی دوم، تأثیرات خروج خطوط و منابع تجدیدپذیر بر افزایش هزینه‌ها و کاهش بهره‌وری سی ستم به‌و ضوح قابل م شاهده ا ست. این تحلیل ن شان می‌دهد که شبکه در مواجهه با خروج خطوط و منابع تجدیدپذیر به مدیریت بسیار دقیق‌تری نیاز دارد تا از قطع بار و افزایش هزینه‌ها جلوگیری شود.

جدول (۳) نتایج شبیه‌سازی در سیستم ۲۴ شین

	سناریو اول	سناریو دوم
تابع هدف (دلار)	۸۵۶۲۴۷	۸۹۲۴۳۸
هزینه آلایندگی (دلار)	۵۴۹۶۲	۵۶۷۵۰
هزینه قطع بار (دلار)	۰	۳۱۹۷
شماره خط خارج شده	-	۳، ۱۱، ۱۹
واحد تجدیدپذیر خارج شده (شین)	-	۲، ۲۱، ۲۳

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.2.6]

در این پژوهش، نتایج مدل پیشنهادی ابتدا بر روی شبکه استاندارد IEEE 24 شین ارزیابی شده است. این شبکه به دلیل پیچیدگی و وجود تعداد معقولی از واحدهای تولید انرژی، ذخیره سازی، و مصرف‌کنندگان، به‌عنوان یک نمونه مناسب برای بررسی عملکرد مدل در شرایط واقعی و شبکه‌های پیچیده انتخاب شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی توانسته است عملکرد شبکه را در برابر شرایط مختلف بهبود بخشد.

۱. کاهش هزینه‌های بهره‌برداری: مدل پیشنهادی توانسته است هزینه‌های بهره‌برداری را تا ۲۰ درصد در مقایسه با مدل‌های مرجع کاهش دهد. این کاهش عمدتاً به دلیل بهینه سازی زمان شارژ و دشارژ منابع ذخیره‌سازی و خودروهای برقی، و همچنین مدیریت مؤثر بارهای انعطاف‌پذیر در طول ساعات پیک مصرف بوده است.

۲. افزایش قابلیت اطمینان سیستم: با توجه به شرایط بحرانی و خرابی منابع تجدیدپذیر، مدل توانسته است قابلیت اطمینان سیستم را تا ۳۰ در صد بهبود بخشد. این بهبود در پی بهره‌برداری بهینه از منابع ذخیره سازی انرژی و خودروهای برقی در زمان‌های بحرانی و شبیه سازی سناریوهای خرابی بوده است. مدیریت بهینه بار و زمان‌بندی صحیح شارژ و دشارژ منجر به توزیع یکنواخت‌تر بار در طول روز و کاهش ریسک‌های ناشی از خرابی منابع تجدیدپذیر شده است.

۳. کاهش اتلاف انرژی: نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که اتلاف انرژی در شبکه ۲۴ شین به میزان ۱۸ درصد کاهش یافته است. این کاهش عمدتاً به دلیل بهبود تخصیص منابع ذخیره سازی و خودروهای برقی به نیازهای انرژی در زمان‌های بحرانی و جلوگیری از خاموشی‌های غیر ضروری ناشی از کمبود منابع تولید است.

۴. مدیریت منابع تجدیدپذیر در شرایط عدم قطعیت: مدل پیشنهادی به‌ویژه در مواجهه با سناریوهای خرابی منابع تجدیدپذیر عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های سنتی نشان داده است. در شرایطی که منابع تجدیدپذیر دچار خرابی یا کاهش بهره‌وری می شوند، مدل پیشنهادی توانسته است تا ۱۵ در صد از اتلاف انرژی ناشی از این مشکلات را کاهش دهد. این بهبود ناشی از بهینه سازی زمان‌بندی شارژ و دشارژ ذخیره سازی‌ها و استفاده هوشمندانه از خودروهای برقی به‌عنوان منابع ذخیره انرژی است.

این نتایج به وضوح نشان می‌دهند که مدل پیشنهادی توانسته است عملکرد شبکه ۲۴ شین را به میزان قابل توجهی بهبود بخشد. به‌ویژه، استفاده از تکنیک‌های بهینه سازی پیشرفته در زمینه مدیریت منابع تجدیدپذیر، ذخیره سازی انرژی و خودروهای برقی، موجب کاهش هزینه‌ها، افزایش پایداری و کاهش اتلاف انرژی شده است.

در نهایت، این نتایج بر تولنایی مدل در مدیریت بهینه انرژی و افزایش بهره‌وری شبکه‌های هوشمند انرژی در شرایط پیچیده تأکید دارند.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش به معرفی یک مدل ریاضی دو سطحی برای بهینه سازی مشارکت واحدهای تولید انرژی و منابع ذخیره‌سازی در شرایط بحرانی و با در نظر گرفتن بدترین سناریوهای خرابی منابع تجدیدپذیر پرداخته است. مدل پیشنهادی به منظور کاهش هزینه‌ها، بهبود قابلیت اطمینان سیستم و کاهش اتلاف انرژی طراحی شده است. با استفاده از شرایط بهینگی KKT و تبدیل مدل به یک مسئله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP)، توانسته‌ایم به راهکارهایی کارآمد و بهینه برای مسائل پیچیده مدیریت انرژی در شبکه‌های تجدیدپذیر دست یابیم. یافته‌های اصلی این تحقیق نشان‌دهنده اثربخشی بالای مدل پیشنهادی در مقایسه با روش‌های سنتی است. به طور خاص، مدل توانسته است هزینه‌های بهره‌برداری را تا ۱۸.۵ در صد کاهش دهد، قابلیت اطمینان سیستم را تا ۳۵ درصد بهبود بخشد و اتلاف انرژی را به میزان ۲۲ در صد کاهش دهد. این نتایج نشان می‌دهند که مدل پیشنهادی می‌تواند به طور مؤثر در سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر و هوشمند به کار گرفته شود و منجر به کاهش هزینه‌ها و بهبود عملکرد شبکه در شرایط عدم قطعیت و خرابی منابع شود. اگرچه نتایج شبیه سازی و بهبودهای حاصل شده از مدل بسیار قابل‌توجه هستند، مدل و الگوریتم پیشنهادی محدودیت‌هایی نیز دارند که می‌بایست در تحقیقات آینده به آن‌ها پرداخته شود. یکی از اصلی‌ترین محدودیت‌ها، عدم بررسی مدل در شبکه‌های بزرگ‌تر با پیچیدگی‌های بیشتر است. مدل در این پژوهش بر روی شبکه استاندارد IEEE تست شده است و بررسی عملکرد آن در شبکه‌های پیچیده‌تر و با تعداد بیشتری از واحدهای تولید و منابع ذخیره سازی ضروری است. همچنین، برخی فرضیات ساده سازی شده، مانند رفتار مصرف‌کنندگان و نرخ ثابت بهره‌وری منابع تجدیدپذیر، می‌تولند اثرات قابل توجهی بر دقت نتایج داشته باشد. این مسائل می‌توانند در مدل‌های آینده به صورت دقیق‌تر مدنظر قرار گیرند. علاوه بر این، محدودیت های مربوط به زمان محاسباتی در حل مسائل بهینه سازی پیچیده نیز از جمله چالش‌های دیگر این تحقیق است. الگوریتم‌های به‌کاررفته در این پژوهش به دلیل پیچیدگی‌های مدل‌های دو سطحی ممکن است برای شبکه‌های بزرگ‌تر زمان زیادی برای پردازش نیاز داشته باشند. استفاده از روش‌های بهینه سازی پیشرفته‌تر و کاهش زمان محاسباتی از طریق بهبود الگوریتم‌ها، به‌ویژه برای سیستم‌های بزرگ، می‌تواند به‌عنوان یک چالش مهم در پژوهش‌های آینده مطرح باشد. برای تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود که مدل پیشنهادی در مقیاس‌های بزرگ‌تر و با تعداد بیشتری از منابع تجدیدپذیر و ذخیره سازها ارزیابی شود تا قابلیت‌های آن در سیستم‌های پیچیده‌تر مورد سنجش قرار گیرد. همچنین، بهبود

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.2.6]

دقت مدل با لحاظ کردن رفتار دقیق‌تر مصرف‌کنندگان و تغییرات نرخ بهره‌وری منابع تجدیدپذیر می‌تواند به بهبود نتایج کمک کند. از طرفی، روش‌های بهینه سازی سریع‌تر و الگوریتم‌های مناسب‌تری برای کاهش زمان محاسباتی باید مورد بررسی قرار گیرند تا این مدل بتواند در زمان واقعی در شبکه‌های بزرگ و در شرایط بحرانی به کار گرفته شود. در نهایت، این پژوهش گامی مؤثر در جهت توسعه سیستم‌های انرژی پایدار و مقاوم به‌ویژه در زمینه مدیریت منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره سازی است. نتایج این تحقیق می‌توانند مبنای طراحی و توسعه الگوریتم‌های بهینه سازی پیچیده‌تر در زمینه مدیریت انرژی و به‌ویژه در سیستم‌های هوشمند انرژی در آینده باشند.

مراجع

[1] K. Doubleday, J. D. Lara, B.-M. Hodge, "Investigation of stochastic unit commitment to enable advanced flexibility measures for high shares of solar PV", *Applied Energy*, vol. 321, no. 119337, 2022.

[2] Alexandre Moreira, Bruno Fanzeres, Patricia Silva, Miguel Heleno, André Luís Marques Marcato, On the role of Battery Energy Storage Systems in the day-ahead Contingency-Constrained Unit Commitment problem under renewable penetration, Electric Power Systems Research, Volume 235, 110856, 2024.

[3] Mostafa Esmaeili Shayan, Mario Petrollese, Seyed Hossein Rouhani, Saleh Mobayen, Anton Zhilenkov, Chun Lien Su, An innovative two-stage machine learning-based adaptive robust unit commitment strategy for addressing uncertainty in renewable energy systems, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 160, 110087, 2024.

[4] Luis Montero, Antonio Bello, Javier Reneses, Analyzing the computational performance of balance constraints in the medium-term unit commitment problem: Tightness, compactness, and arduousness, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 160, 110080, 2024.

[5] Sara Lumbreras, Diego Tejada, Daniel Elechiguerra, Explaining the solutions of the unit commitment with interpretable machine learning, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 160, 110106, 2024.

[6] Jingwei Huang, Hui Qin, Keyan Shen, Yuqi Yang, Benjun Jia, Study on hierarchical model of hydroelectric unit commitment based on similarity schedule and quadratic optimization approach, Energy, Volume 305, 132229, 2024.

[7] Jiajie Ling, Liangyu Zhang, Guangchao Geng, Quanyuan Jiang, Feasible-enabled integer variable warm start strategy for security-constrained unit commitment, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 160, 110137, 2024.

[8] Peijie Li, Jianming Su, Xiaoqing Bai, An objective feasibility pump method for optimal power flow with unit commitment variables, Electric Power Systems Research, Volume 236, 110928, 2024.

[9] Zhang Zhi, Haiyu Huang, Wei Xiong, Yijia Zhou, Mingyu Yan, Shaolian Xia, Baofeng Jiang, Renbin Su, Xichen Tian, Improved Unit Commitment with Accurate Dynamic Scenarios Clustering Based on Multi-Parametric Programming and Benders Decomposition, Energy Engineering, Volume 121, Issue 6, Pages 1557-1576, 2024.

[10] Robert Parker, Carleton Coffrin, Managing power balance and reserve feasibility in the AC unit commitment problem, Electric Power Systems Research, Volume 234, 110670, 2024.

[11] Mao Liu, Xiangyu Kong, Chao Ma, Xuesong Zhou, Qingxiang Lin, Multi-stage fully adaptive distributionally robust unit commitment for power system based on mixed approximation rules, Applied Energy, Volume 376, Part A, 124051, 2024.

[12] Yu Gong, Tingxi Liu, Pan Liu, Xin Tong, Joint unit commitment model for hydro and hydrogen power to adapt to large-scale photovoltaic power, Energy Conversion and Management, Volume 317, 118794, 2024.

[13] Ramin Sharikabadi, Amir Abdollahi, Masoud Rashidinejad, Mehdi Shafiee, Security constrained unit commitment in smart energy systems: A flexibility-driven approach considering false data injection attacks in electric vehicle parking lots, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 161, 110180, 2024.

[14] Jiajie Ling, Quan Zhang, Guangchao Geng, Quanyuan Jiang, Hybrid quantum annealing decomposition framework for unit commitment, Electric Power Systems Research, Volume 238, 111121, 2025.

[15] Jingfan Liu, Shijie Zhang, Stochastic two-stage multi-objective unit commitment of distributed resource energy systems considering uncertainties and unit failures, Reliability Engineering & System Safety, Volume 253, 110520, 2025.

[16] X. Zheng, J. Wang and M. Yue, "A Fast Quantum Algorithm for Searching the Quasi-Optimal Solutions of Unit Commitment," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 39, no. 2, pp. 4755-4758, March 2024.

[17] L. You, X. Jin and Y. Liu, "A Unit Commitment Model Considering the Flexibility Retrofit of Combined Heat and Power Units for Wind Integration," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 122199-122212, 2024.

[18] M. Qu, T. Ding, C. Mu, X. Zhang, K. Pan and M. Shahidehpour, "Linearization Method for Large-Scale Hydro-Thermal Security-Constrained Unit Commitment," in *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 21, no. 2, pp. 1754-1766, April 2024.

[19] W. Li, T. Qian, X. Xie and W. Tang, "Piecewise Mixed Decision Rules Based Multi-Stage Distributionally Robust Unit Commitment for Integrated Electricity-Heat Systems," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 39, no. 5, pp. 6772-6775, Sept. 2024.

[20] H. Jokar, B Bahmani-Firouzi, H. Haes Alhelou, P. Siano, (2022). Transmission and Distribution Substation Energy Management Considering Large-Scale Energy Storage, Demand Side Management and Security-Constrained Unit Commitment. IEEE Access, vol.10, pp.123723-123735

زیرنویس‌ها

SCUC	Security-constrained unit commitment
SSCUC	Stochastic security-constrained unit commitment
SAMCSA	Search Self-Adaptive Modified Crow Algorithm

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.2.6]

MISOCP	Mixed-integer second-order cone programming
MINLP	Mixed Integer Nonlinear Programming
LDBAS	Lévy flight and chaos disturbed beetle antennae search
SBSO	Social beetle swarm optimization
HA	Heuristic algorithm
LP	Linear Programming
DBRL	Data-driven batch-constrained reinforcement learning
MICP	Mixed-integer conic programming
MIQP	Mixed-integer quadratic programming
MILP	Mixed-integer linear programming
SBB	Standard Branch and Bound
SAPSO	Self-adaptive particle swarm optimization
CCGP	Chance-constrained goal programming
NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
EA	Evolutionary algorithm
STGA	Spanning tree algorithm
HHA	Hybrid heuristic methods
GA-PSO	Genetic algorithm-Particle swarm optimization
SMILP	Stochastic mixed-integer linear programming
DIGWO	Discrete improved grey wolf optimization

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.2.6]