Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 14 - No. 2 – Summer 2025
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Research Article

Unit Commitment under Security Constraints in Smart Grids via Robust Optimization Based on Advanced Genetic Algorithm

Mohamad Sadegh Younesian[1], ***Ph.D Student.***, Mahmoud Samiei Moghaddam[2,*] , ***Assistant Professor***, Mojtaba Vahedi[3], ***Assistant Professor***, Reza Davarzani[4] ***Assistant Professor***

[1]Department of Electrical Engineering, Sha.C.,Islamic Azad University, Shahrood, Iran.
Younesian@iau.ac.ir
[2] Department of Electrical Engineering, Da.C.,Islamic Azad University, Damghan, Iran.
samiei352@iau.ac.ir
[3]Department of Electrical Engineering, Sha.C., Islamic Azad University, Shahrood, Iran.
Vahrdi.mojtaba@iau.ac.ir
[4] Department of Electrical Engineering Sha.C., Islamic Azad University, Shahrood, Iran.
davarzani.reza@iau.ac.ir

Abstract:
This paper presents a robust optimization model for unit commitment (UC) in smart power systems, aiming to enhance stability and reduce operational costs. The proposed model preserves the problem structure and security constraints while integrating renewable energy sources (RES), energy storage systems (ESS), and electric vehicles (EVs) within a robust optimization framework. Instead of traditional two-stage methods, an advanced genetic algorithm (GA) is employed, incorporating selection processes based on roulette wheel and tournament selection, uniform crossover, and variable mutation. This algorithm is specifically designed to identify the most optimal and cost-effective UC patterns under uncertainties arising from renewable generation fluctuations and load demand variations. Simulation results on the 6-bus, 24-bus, 118-bus, and 300-bus test systems implemented in Python demonstrate that the proposed approach significantly reduces operational costs, accelerates algorithm convergence, and enhances system resilience under critical conditions.

Keywords: Unit Commitment, Smart Grid, Genetic Algorithm, Renewable Energy Sources.

Received: 15 May 2025
Revised: 11 Aug. 2025
Accepted: 16 Aug. 2025

*** Corresponding Author:** Dr. Mahmoud Samiei moghaddam

Citation: M. S. Younesian, M. Samiei Moghaddam, M. Vahedi, R. Davarzani, “Unit Commitment under Security Constraints in Smart Grids via Robust Optimization Based on Advanced Genetic Algorithm”, Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 14, no.2, pp. 61-72, September 2025 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.530]

مقاله پژوهشی

مشارکت واحدها تحت محدودیت‌های امنیتی در شبکه‌های هوشمند با رویکرد بهینه‌سازی مقاوم مبتنی بر الگوریتم ژنتیک پیشرفته

محمد صادق یونسیان[۱]، دانشجوی دکترا، محمود سمیعی مقدم[۲]، استادیار، مجتبی واحدی[۳]، استادیار، رضا داورزنی[۴]، استادیار

۱- گروه برق، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران
۲- گروه برق، واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان، ایران
۳- گروه برق، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران
۴- گروه برق، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

چکیده: در این مقاله، یک مدل بهینه‌سازی مقاوم جهت مشارکت واحدها در سیستم‌های قدرت هوشمند با هدف بهبود پایداری و کاهش هزینه‌های عملیاتی ارائه شده است. در مدل پیشنهادی، ساختار مسئله و محدودیت‌های امنیتی حفظ شده و ادغام منابع تجدیدپذیر، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و وسایل نقلیه برقی در چارچوب یک استراتژی بهینه‌سازی مقاوم مورد توجه قرار گرفته است. به جای استفاده از روش‌های سنتی دومرحله‌ای، از یک الگوریتم ژنتیک پیشرفته بهره‌گیری شده که شامل فرآیندهای انتخاب با استفاده از روش چرخ رولت و انتخاب تورنمنت، تقاطع یکپارچه و جهش متغیر می‌باشد. این الگوریتم به طور خاص برای شناسایی بهینه‌ترین و اقتصادی‌ترین الگوهای مشارکت واحدها در مواجهه با عدم قطعیت‌های ناشی از نوسانات تولید انرژی تجدیدپذیر و تغییرات بار شبکه طراحی شده است. نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار پایتون روی شبکه‌های ۶، ۲۴، ۱۱۸ و ۳۰۰ گره نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی علاوه بر کاهش چشمگیر هزینه‌های عملیاتی، باعث تسریع همگرایی الگوریتم و افزایش مقاومت سیستم در برابر شرایط بحرانی می‌شود.

کلمات کلیدی: مشارکت واحدها، شبکه هوشمند، الگوریتم ژنتیک، منابع تجدیدپذیر.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۲/۲۹
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۵/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۵/۲۵

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر محمود سمیعی مقدم
نشانی نویسنده مسئول: گروه برق، واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان، ایران

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.530]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

۱- مقدمه

در سیستم‌های قدرت هوشمند، مسئله مشارکت واحدها یکی از چالش‌های کلیدی در مدیریت و برنامه‌ریزی بهینه سیستم‌های برقی محسوب می‌شود. مشارکت واحدها به فرآیندی اطلاق می‌شود که در آن تصمیم‌گیری‌های مربوط به روشن و خاموش کردن نیروگاه‌ها با هدف به حداقل رساندن هزینه‌های عملیاتی، حفظ پایداری سیستم و تحقق محدودیت‌های امنیتی انجام می‌شود. در این میان، ادغام منابع تجدیدپذیر، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و وسایل نقلیه برقی، به عنوان اجزای جدید سیستم‌های قدرت، چالش‌ها و فرصت‌های تازه‌ای را ایجاد نموده است. با توجه به افزایش سهم منابع تجدیدپذیر در سیستم‌های قدرت و حضور سیستم‌های ذخیره‌سازی و وسایل نقلیه برقی، عدم قطعیت‌های مرتبط با تولید انرژی و تغییرات بار، مدیریت مشارکت واحدها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. این مسئله نه تنها شامل بهینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی از نظر سوخت و نگهداری، بلکه بهبود پایداری و امنیت شبکه در مواجهه با تغییرات ناگهانی بار و تولید نیز می‌باشد. بنابراین، تعریف یک چارچوب بهینه‌سازی مقاوم که بتواند تحت شرایط عدم قطعیت عملکرد مناسبی ارائه کند، برای سیستم‌های قدرت هوشمند امری ضروری است. افزایش روزافزون تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر و نوسانات ناشی از شرایط جوی، به همراه تغییرات غیرمنتظره در بار مصرفی، سیستم‌های قدرت را با چالش‌های فراوانی در زمینه مدیریت مشارکت واحدها مواجه ساخته است. علاوه بر این، کاربرد فناوری‌های نوین مانند سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و وسایل نقلیه برقی به عنوان منابع ذخیره‌سازی متحرک، نیازمند رویکردهای جدید و بهینه‌سازی‌های پیشرفته‌ای است که بتوانند به طور همزمان چندین هدف از جمله کاهش هزینه‌های عملیاتی، افزایش پایداری و تضمین امنیت شبکه را برآورده سازند. به همین دلیل، بهره‌گیری از الگوریتم‌های تکاملی مدرن به عنوان یکی از ابزارهای بهینه‌سازی هوشمند می‌تواند راهکار مناسبی برای رسیدن به اهداف فوق باشد.

در مقاله [۱] به کاربرد شاخص‌های اصلاح شده توزیع خروجی خط در چارچوب محدودیت‌های امنیتی پرداخته شده و مسئله مشارکت واحدها از منظر کاهش خطرات ناشی از خرابی خطوط بررسی شده است. در مطالعه [۲] یک رویکرد استوکستیک ریسک‌گریز برای برنامه‌ریزی میان‌مدت سیستم‌های حرارتی-آبی-باد ارائه شده که در آن محدودیت‌های شبکه در مشارکت واحدها به دقت لحاظ شده است. در مقاله [۳] یک بهینه‌ساز مبتنی بر گرادیان معرفی شده است که با بهبود سرعت همگرایی، تلاش می‌کند چالش‌های محاسباتی مسئله مشارکت واحدها را کاهش دهد. در مرجع [۴]، مسئله مشارکت واحدها در سیستم‌های ترکیبی (VSC-MTDC/AC) با نفوذ بالای تولید بادی بررسی شده و محدودیت‌های امنیتی به شکل دقیق‌تری در نظر گرفته شده‌اند. در مقاله [۵] رویکردی مبتنی بر الگوریتم شاخه و قید داخلی جهت بهبود کران بالایی مسئله مشارکت واحدها پیشنهاد شده است که موجب افزایش کارایی حل مسئله می‌شود. در مطالعه [۶] یک چارچوب پیش‌بینی و بهینه‌سازی بسته به ویژگی‌ها ارائه گردیده که با رویکرد بسته به کاهش هزینه‌های اقتصادی مشارکت واحدها همراه است. در مرجع [۷] مسئله مشارکت واحدها در شبکه‌های AC از طریق تکنیک‌های آرام‌سازی و تجزیه مورد بررسی قرار گرفته و راهکارهایی جهت مدیریت پیچیدگی‌های محاسباتی ارائه شده است.

در مقاله [۸] یک مدل پیشگیرانه برای مشارکت واحدها در مقیاس بزرگ ارائه شده است که با در نظر گرفتن خرابی‌های n-k خطوط و تلفات انتقال، به پایداری سیستم کمک می‌کند. در مطالعه [۹] محدودیت‌های فرکانس به مسئله مشارکت واحدها اضافه شده و با بهره‌گیری از تکنیک‌های یادگیری عمیق و نمونه‌گیری فعال، راهکارهایی جهت تضمین پایداری فرکانس ارائه گردیده است. در مرجع [۱۰] از روش‌های یادگیری عمیق به منظور بهینه‌سازی مشارکت واحدها در سیستم‌هایی که با عدم قطعیت تولید بادی و عملکرد سیستم‌های ذخیره‌سازی باتری مواجه‌اند، استفاده شده است. در مقاله [۱۱] یک رویکرد استوکستیک برای مشارکت واحدها جهت فراهم آوردن انعطاف‌پذیری پیشرفته در سیستم‌های با سهم بالای تولید خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعه [۱۲] یک مدل مشارکت واحدها جهت بهره‌برداری بهینه از عملیات خودرو-به-شبکه ارائه شده است که به واسطه آن امکان تعامل هوشمند بین شبکه و وسایل نقلیه فراهم می‌شود. در مرجع [۱۳] یک مدل سلسله‌مراتبی برای برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت در سیستم‌های هیدرولیکی همراه با مشارکت واحدها و در نظر گرفتن وابستگی‌های سربی مطرح شده است. در مقاله [۱۴] از شبکه‌های عصبی مولد شرطی جهت ارائه یک رویکرد چرخشی برای مشارکت واحدها استفاده شده است و در مطالعه [۱۵] از یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مخلوط فازی در سطح ملی برای مشارکت واحدها با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مبتنی بر قیمت بهره گرفته شده است. در مرجع [۱۶] اثر اجرای برنامه‌های پاسخگویی مبتنی بر قیمت بر قابلیت اطمینان سیستم در مسئله مشارکت واحدها، به ویژه در حضور نیروگاه‌های بادی، تحلیل شده است. در مطالعه [۱۷] مشارکت واحدها در سیستم‌هایی با تولید بادی بزرگ با تأکید بر انعطاف‌پذیری چند زمانه بار بررسی شده است؛ در حالی که در مرجع [۱۸] از رویکردهای انبساطی مخروطی و برنامه‌ریزی محدب برای حل مسئله مشارکت واحدها در شبکه‌های AC بهره‌مند شده‌اند. در مقاله [۱۹] مسئله مشارکت واحدها در شبکه‌های چندمنطقه‌ای از طریق الگوریتم‌های توزیع‌شده مورد بررسی قرار گرفته و راهکارهایی جهت بهبود هماهنگی بین مناطق ارائه شده است. در مطالعه [۲۰] یک رویکرد مقاوم جهت مشارکت واحدها معرفی شده است که سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، منابع تجدیدپذیر و دستگاه‌های FACTS را در یک چارچوب یکپارچه مد نظر قرار می‌دهد؛ در نهایت، در مرجع [۲۱] به مسأله مشارکت واحدها همراه با سرمایه‌گذاری بهینه در سیستم‌های ذخیره‌سازی باتری و توسعه شبکه در سیستم‌های یکپارچه انرژی پرداخته شده است. این مجموعه مطالعات نشان می‌دهد که علی‌رغم پیشرفت‌های قابل توجه در حوزه مشارکت واحدها، همچنان شکاف‌هایی در زمینه بهینه‌سازی در حضور چندین منبع عدم قطعیت، کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش انعطاف‌پذیری سیستم‌ها وجود دارد؛ که ضرورت توسعه روش‌های نوین، به ویژه با بهره‌گیری از الگوریتم‌های تکاملی پیشرفته را بیش از پیش مشخص می‌کند. در [۲۲] نویسندگان مسئله مشارکت واحدها را با استفاده از مسئله مدیریت سمت تقاضا و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی ادغام نمودند. در [۲۳] برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با در نظر گرفتن برنامه های پاسخگویی بار اضطراری و بارهای قابل قطع و کاهش به منظور کاهش هزینه‌های پرداختی مصرف‌کنندگان ارائه شده است.

در مطالعات گذشته، روش‌های مختلفی برای حل مسئله مشارکت واحدها ارائه شده است. اکثر این مطالعات از تکنیک‌های بهینه‌سازی کلاسیک مانند الگوریتم‌های تفکیک ستون و قید، برنامه‌ریزی خطی/صحیح، و روش‌های مبتنی بر دو مرحله‌ای استفاده نموده‌اند. اگرچه این روش‌ها در مواردی موفق عمل کرده‌اند، اما محدودیت‌هایی از جمله افزایش زمان حل مسئله در سیستم‌های بزرگ، عدم واکنش به

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.530]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

تغییرات سریع و عدم توانایی در مدیریت همزمان چند هدف (مانند کاهش هزینه، افزایش پایداری و بهبود کارایی بهره‌برداری) را به همراه داشته‌اند. از سوی دیگر، استفاده از الگوریتم‌های تکاملی در برخی مطالعات مورد بررسی قرار گرفته است، اما کاربرد آن‌ها عمدتاً در مسائل ساده‌تر بوده و به کارگیری الگوریتم‌های تکاملی پیشرفته، به ویژه الگوریتم ژنتیک با بهبودهای مبتنی بر انتخاب تورنمنت، تقاطع یکپارچه و جهش متغیر، در حوزه مشارکت واحدها به طور کامل مورد ارزیابی قرار نگرفته است. این شکاف مطالعاتی انگیزه اصلی این تحقیق به شمار می‌رود. در مقاله حاضر، یک چارچوب بهینه‌سازی مقاوم برای مشارکت واحدها در سیستم‌های قدرت هوشمند ارائه می‌شود که ساختار کلی مسئله و محدودیت‌های امنیتی آن حفظ شده است. نقطه تمایز این پژوهش در استفاده از الگوریتم ژنتیک پیشرفته است؛ به نحوی که این الگوریتم با بهره‌گیری از روش‌های انتخاب مبتنی بر چرخ رولت و انتخاب تورنمنت، تقاطع یکپارچه و جهش متغیر، علاوه بر حفظ تنوع جمعیت، زمان همگرایی را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. این رویکرد به گونه‌ای طراحی شده است که در مواجهه با عدم قطعیت‌های ناشی از نوسانات تولید منابع تجدیدپذیر و تغییرات بار، بهینه‌ترین و اقتصادی‌ترین الگوهای مشارکت واحدها را شناسایی کند. از دیگر نوآوری‌های مقاله می‌توان به ادغام یکپارچه سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و وسایل نقلیه برقی در چارچوب بهینه‌سازی مقاوم و ارائه نتایج شبیه‌سازی در شبکه‌های ۶، ۲۴، ۱۱۸ و ۳۰۰ گره اشاره کرد که نشان‌دهنده کارآیی و مقیاس‌پذیری رویکرد پیشنهادی می‌باشد. در نهایت، این مقاله با ارائه یک مدل نوین مبتنی بر الگوریتم ژنتیک پیشرفته، انتظار دارد پاسخگوی نیازهای پیش رو در مدیریت بهینه مشارکت واحدها در سیستم‌های قدرت هوشمند بوده و در راستای کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش پایداری و امنیت شبکه‌ها گام‌های موثری بردارد. در بخش بعدی مدل بهینه‌سازی پیشنهادی به همراه تابع هدف و محدودیت‌های مسئله پرداخته شده است. در بخش سوم الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی ارائه شده و در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی ارائه و تجزیه و تحلیل شده است. در نهایت بخش آخر نتیجه‌گیری مقاله را ارائه می‌کند.

۲- مدل بهینه‌سازی پیشنهادی

در مدل بهینه‌سازی پیشنهادی، هدف اصلی یافتن بهترین الگوی مشارکت واحدها در سیستم‌های قدرت هوشمند با به حداقل رساندن هزینه‌های عملیاتی، افزایش پایداری شبکه و تضمین رعایت محدودیت‌های امنیتی می‌باشد. در این مدل ابتدا تابع هدف تعریف شده است که شامل هزینه‌های تولید، هزینه‌های خاموشی و روشنایی، هزینه‌های حالت بدون بار، هزینه‌های کاهش بار، هزینه‌های مرتبط با انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه‌های عملیات سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی (شارژ و دشارژ) است. تابع هدف به صورت ریاضی به شکل زیر نمایش داده می‌شود:

$$\min Z = \sum_t \sum_i \left[C_i^P \cdot P_i(t) + C_i^N \cdot I_i(t) + C_i^S \cdot S_i(t) + C_i^D \cdot D_i(t)\right] + \sum_t \sum_j \left[C^L \cdot LC_j(t)\right] + \sum_t \left[C^E \cdot E(t)\right] + \sum_t \left[C^{ST} \cdot (\text{Charging_cost}(t) + \text{Discharging_cost}(t))\right] \quad (۱)$$

در رابطه (۱)، $P_i(t)$ توان تولید شده توسط واحد i در بازه زمانی t است و ضریب C_i^P هزینه تولید به ازای هر واحد توان می‌باشد. $I_i(t)$ متغیر دودویی وضعیت روشن یا خاموش بودن واحد i را نشان می‌دهد و ضریب C_i^N هزینه مربوط به حالت بدون بار است؛ $S_i(t)$ هزینه شروع به کار و $D_i(t)$ هزینه خاموش شدن واحد i را تعیین می‌کنند که ضرایب مربوطه به ترتیب C_i^s و C_i^d هستند. $LC_j(t)$ میزان کاهش بار در گره j می‌باشد که به ازای آن هزینه C^L در نظر گرفته شده و $E(t)$ هزینه‌های ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای با ضریب C^e به منظور کاهش اثرات زیست‌محیطی محاسبه می‌شود. در نهایت، Charging_cost و Discharging_cost هزینه‌های شارژ و دشارژ سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی (شامل باتری‌های ایستگاهی و EVها) هستند که با ضریب C^{sT} وزن‌دار شده‌اند.

در کنار تابع هدف، مدل مجموعه‌ای از قیود را در بر می‌گیرد که در ادامه به تفصیل توضیح داده می‌شود. اولین دسته از این قیود مربوط به توازن توان در شبکه است. برای هر گره و در هر بازه زمانی، قید توازن توان به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sum_i P_i(t) + P_{st}(t) + P_{EV}(t) - LC(t) = \text{Load}(t) + \sum_k P_{\text{flow}_k}(t) \quad (۲)$$

در رابطه (۲) $P_st(t)$ توان ارائه شده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و $P_EV(t)$ توان تزریق یا برداشت از وسایل نقلیه برقی می‌باشد. $LC(t)$ مقدار کاهش بار اعمال‌شده و $Load(t)$ بار تقاضا در زمان t است. همچنین، $P_flow_k(t)$ جریان انتقال در خطوط مختلف شبکه را نشان می‌دهد.

یکی دیگر از قیود اصلی مربوط به ظرفیت تولید هر واحد است. برای هر واحد i در بازه زمانی t باید محدودیت‌های حداقل و حداکثر تولید رعایت شود که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_{min_i} \le P_i(t) \le P_{max_i} \quad (۳)$$

در رابطه (۳) P_min_i و P_max_i به ترتیب توان‌های پایین و بالا برای هر واحد i هستند. همچنین، به منظور جلوگیری از تغییرات ناگهانی توان تولید، قیود نرخ تغییر (Ramp Rate) برای افزایش و کاهش توان بین بازه‌های زمانی لحاظ می‌شود:

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.530]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

$$P_i(t) - P_i(t-1) \le \text{Ramp_up}_i, \quad P_i(t-1) - P_i(t) \le \text{Ramp_down}_i \tag{۴}$$

که در آن Ramp_up_i و Ramp_down_i به ترتیب حد مجاز افزایش و کاهش توان تولید واحد i هستند. برای حفظ پایداری عملیاتی و جلوگیری از تغییرات مکرر وضعیت واحدها، قیود مربوط به زمان‌های حداقل روشن و خاموش نیز لحاظ می‌شود. این قیود به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\sum_{\tau=t}^{t+UT_i-1} I_i(\tau) \ge UT_i \cdot (I_i(t) - I_i(t-1)) \tag{۵}$$

$$\sum_{\tau=t}^{t+DT_i-1} [1 - I_i(\tau)] \ge DT_i \cdot (I_i(t-1) - I_i(t)) \tag{۶}$$

در معادلات (۵) و (۶) UT_i و DT_i به ترتیب زمان‌های حداقل روشن و خاموش بودن برای واحد i تعیین می‌شوند. از جمله قیود مهم دیگر مربوط به محدودیت‌های خطوط انتقال است. جهت حفظ امنیت شبکه و جلوگیری از جریان‌های بیش از حد، محدودیت‌های جریان خطوط انتقال به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$-P_{\text{flow_max}_k} \le P_{\text{flow}_k}(t) \le P_{\text{flow_max}_k} \tag{۷}$$

$$P_{\text{flow}_k}(t) = B_k\left[\theta_i(t) - \theta_j(t)\right] \quad (i \text{ و } j \text{ برای خط بین گره‌های}) \tag{۸}$$

در رابطه (۷) مقدار P_flow_max_k حداکثر جریان مجاز در خط k است و در رابطه (۸) B_k مقدار سوسپتانس خط k و $\theta\text{_i(t)}$ زاویه ولتاژ گره i در زمان t می‌باشد. از نظر سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، مدل دینامیکی ذخیره‌سازی به گونه‌ای تعریف شده است که تغییرات سطح انرژی ذخیره شده در طول زمان با کارایی‌های شارژ و دشارژ مد نظر قرار گیرد:

$$E_{st}(t) = E_{st}(t-1) + \eta_{\text{charge}} \cdot P_{\text{charge}}(t) - \frac{1}{\eta_{\text{discharge}}} \cdot P_{\text{discharge}}(t) \tag{۹}$$

$$E_{min} \le E_{st}(t) \le E_{max} \tag{۱۰}$$

$$0 \le P_{\text{charge}}(t) \le P_{\text{charge_max}}, \; 0 \le P_{\text{discharge}}(t) \le P_{\text{discharge_max}} \tag{۱۱}$$

در معادلات (۹) تا (۱۱)، E_st(t) سطح انرژی ذخیره شده در زمان t است؛ $\eta\text{_charge}$ و $\eta\text{_discharge}$ به‌ترتیب کارایی شارژ و دشارژ، و E_min، E_max، P_charge_max و P_discharge_max محدودیت‌های مربوط به انرژی و توان سیستم‌های ذخیره‌سازی را مشخص می‌کنند.

برای مدلسازی عملیات وسایل نقلیه برقی (EV)، روابط مشابهی جهت نشان دادن دینامیک انرژی باتری EVها در نظر گرفته شده است:

$$E_{EV}(t) = E_{EV}(t-1) + \eta_{EV}^{\text{charge}} \cdot P_{EV}^{\text{charge}}(t) - \frac{1}{\eta_{EV}^{\text{discharge}}} \cdot P_{EV}^{\text{discharge}}(t) \tag{۱۲}$$

$$E_{EV}^{\min} \le E_{EV}(t) \le E_{EV}^{\max} \tag{۱۳}$$

$$P_{EV,\text{charge}}^{\min} \le P_{EV}^{\text{charge}}(t) \le P_{EV,\text{charge}}^{\max} \tag{۱۴}$$

$$P_{EV,\text{discharge}}^{\min} \le P_{EV}^{\text{discharge}}(t) \le P_{EV,\text{discharge}}^{\max} \tag{۱۵}$$

در این معادلات، E_EV(t) سطح انرژی باتری وسایل نقلیه برقی در زمان t بوده و $\eta\text{_EV_charge}$ و $\eta\text{_EV_discharge}$ به‌ترتیب کارایی شارژ و دشارژ EVها را نشان می‌دهند. همچنین محدودیت‌های مربوط به توان شارژ و دشارژ با استفاده از P_EV_charge_min، $\text{P_EV_discharge_min}$، P_EV_charge_max و $\text{P_EV_discharge_max}$ تعریف شده‌اند.

جهت مدیریت انعطاف‌پذیری بار و فراهم آوردن امکان تغییر در مصرف برق، یک قید جهت مجاز بودن تغییرات بار به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$|\Delta\text{Load}(t)| \le \alpha \cdot \text{Load}(t) \tag{۱۶}$$

در این معادله، α درصد تغییر مجاز در بار در هر بازه زمانی است. علاوه بر این، برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ناشی از تغییرات بار و تولید منابع تجدیدپذیر، از مجموعه‌های عدم قطعیت استفاده می‌شود. به عنوان مثال، عدم قطعیت بار به شکل زیر مدل‌سازی می‌شود:

$$\text{Load}_{\text{uncertain}}(t) \in [(1-\beta) \cdot \text{Load}(t), (1+\beta) \cdot \text{Load}(t)] \tag{۱۷}$$

و عدم قطعیت تولید منابع تجدیدپذیر به صورت زیر تعریف می‌شود:

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.530]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

$$\text{Renewable}_{\text{uncertain}}(t) \in [(1-\gamma)\cdot R(t), (1+\gamma)\cdot R(t)] \quad (18)$$

در معادلات (۱۷) و (۱۸)، β و γ درصد تغییرات ناخواسته در بار و تولید منابع تجدیدپذیر هستند و $R(t)$ میزان تولید پیش‌بینی شده از منابع تجدیدپذیر را نشان می‌دهد. به‌منظور حل مسئله به جای استفاده از روش‌های سنتی دو مرحله‌ای یا تفکیک ستون و قید، از یک الگوریتم ژنتیک پیشرفته استفاده شده است. در این الگوریتم، هر راهکار (کروموزوم) به عنوان یک بردار نشان‌دهنده وضعیت مشارکت واحدها در طول دوره زمان‌بندی (مثلاً به صورت دودویی) نمایش داده می‌شود. مراحل اصلی الگوریتم شامل انتخاب، تقاطع و جهش می‌باشد. در فاز انتخاب، از روش چرخ رولت به همراه انتخاب تورنمنت استفاده می‌شود به طوری که احتمال انتخاب هر کروموزوم متناسب با مقدار تابع هدف آن تعیین شود. سپس در فاز تقاطع، روش تقاطع یکپارچه به منظور ایجاد نسل جدیدی از راهکارها به کار گرفته می‌شود. در نهایت، عملیات جهش با استفاده از شیوه جهش متغیر صورت می‌گیرد تا از افت در اکید صحت محلی جلوگیری شود و تنوع در جمعیت حفظ گردد.

پس از اعمال عملیات ژنتیکی، هر کروموزوم با ارزیابی تابع هدف (رابطه (۱)) و اطمینان از رعایت تمامی قیود (روابط (۲) تا (۱۸)) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و بهترین راهکارها انتخاب شده و فرایند تکرار می‌شود تا همگرایی رخ دهد.

در کل، مدل بهینه‌سازی پیشنهادی با ترکیب تابع هدف جامع جهت کاهش هزینه‌های عملیاتی و مجموعه‌ای از قیود فنی و عملیاتی، یک چارچوب یکپارچه جهت مدیریت مشارکت واحدها در سیستم‌های قدرت هوشمند ارائه می‌دهد. استفاده از الگوریتم ژنتیک پیشرفته، این امکان را فراهم می‌آورد که در حضور عدم قطعیت‌های ناشی از نوسانات تولید منابع تجدیدپذیر و تغییرات بار، پاسخ‌های بهینه و سریعی استخراج گردد که هم از نظر اقتصادی و هم از نظر پایداری و امنیت سیستم عملکرد مطلوبی داشته باشد.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی

در این پژوهش، به‌منظور حل مدل بهینه‌سازی پیشنهادی مشارکت واحدها تحت محدودیت‌های امنیتی و عدم قطعیت‌های موجود در سیستم قدرت، از یک الگوریتم ژنتیک پیشرفته استفاده شده است. این الگوریتم به عنوان یکی از روش‌های تکاملی الهام‌گرفته از نظریه انتخاب طبیعی، قابلیت بالایی در جستجوی فضای پاسخ‌های غیرخطی، ناپیوسته و با ابعاد بزرگ دارد و برای حل مسائل پیچیده و مقیاس‌پذیر در حوزه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت، بسیار مناسب است.

در گام اول الگوریتم، جمعیت اولیه‌ای از جواب‌ها تولید می‌شود. هر عضو این جمعیت، که کروموزوم نامیده می‌شود، نمایش‌دهنده یک راهکار بالقوه برای مسئله مشارکت واحدها در کل بازه زمانی مورد مطالعه است. ساختار کروموزوم به گونه‌ای طراحی می‌شود که اطلاعات لازم برای روشن یا خاموش بودن واحدها، مقدار تولید هر واحد، وضعیت شارژ و دشارژ سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، سطح انرژی در هر لحظه، وضعیت توان تبادلی وسایل نقلیه برقی و دیگر تصمیمات کنترلی سیستم قدرت را در بر بگیرد. برای این منظور، ترکیبی از رمزگذاری‌های دودویی (برای متغیرهای روشن/خاموش) و عددی (برای متغیرهای پیوسته مانند توان تولید یا انرژی ذخیره‌شده) استفاده می‌شود.

پس از تولید جمعیت اولیه، در هر نسل الگوریتم، مقدار تابع هدف برای هر کروموزوم محاسبه می‌شود. این تابع، همان تابع هزینه کلی سیستم (رابطه (۱) مدل پیشنهادی) است که هزینه‌های تولید، روشن و خاموش شدن، کاهش بار، آلایندگی، و عملیات سیستم‌های ذخیره‌سازی و EV ها را شامل می‌شود. همچنین، بررسی کامل تمامی قیود مسئله نیز انجام می‌گیرد. اگر کروموزومی با نقض یکی از قیود مواجه باشد، یا از جمعیت حذف شده و یا با استفاده از یک مکانیزم اصلاح، به ناحیه مجاز منتقل می‌شود. برای مثال، اگر مجموع توان تولید شده در یک بازه زمانی از نیاز بار کمتر باشد، سیستم به‌طور خودکار میزان کاهش بار یا تزریق انرژی از EV ها یا باتری‌ها را افزایش می‌دهد تا تعادل توان برقرار شود.

در مرحله بعد، فرآیند انتخاب انجام می‌شود. هدف از این مرحله انتخاب کروموزوم‌هایی است که با احتمال بیشتری در تولید نسل بعد مشارکت داده شوند. در این الگوریتم از ترکیب دو روش انتخاب چرخ رولت و انتخاب تورنمنت استفاده شده است. در روش چرخ رولت، احتمال انتخاب هر کروموزوم متناسب با میزان تناسب آن تعیین می‌شود، به طوری که جواب‌هایی با تابع هدف کمتر (در مسئله کمینه‌سازی) احتمال انتخاب بیشتری دارند. در روش تورنمنت، چندین کروموزوم به‌طور تصادفی انتخاب شده و بهترین آن‌ها برای تولید نسل بعدی انتخاب می‌شود. این ترکیب باعث تعادل بین بهره‌برداری از کروموزوم‌های خوب و حفظ تنوع جمعیت می‌شود.

پس از انتخاب، فرآیند تقاطع انجام می‌گیرد. در این مرحله، جفت‌های کروموزوم انتخاب‌شده با هم ترکیب شده و نسل جدیدی از کروموزوم‌ها تولید می‌شود. در این پژوهش از روش تقاطع یکپارچه‌استفاده شده است که در آن هر ژن (بخش کوچکی از کروموزوم) به‌طور مستقل از یکی از والدین به فرزند منتقل می‌شود. نرخ تقاطع به‌طور تطبیقی تنظیم می‌شود تا در نسل‌های ابتدایی، تنوع زیادی ایجاد شده و در نسل‌های نهایی تمرکز بر روی بهینه‌سازی جزئی صورت گیرد.

فرآیند جهش در ادامه اجرا می‌شود. در الگوریتم پیشنهادی از جهش با نرخ متغیر استفاده شده است. در این روش، در هر نسل و برای هر ژن، با احتمالی مشخص، مقدار آن ژن تغییر داده می‌شود. برای ژن‌های دودویی (مانند وضعیت روشن یا خاموش بودن واحد)، عمل جهش به معنای تغییر مقدار ۰ به ۱ یا بالعکس است. برای ژن‌های عددی (مانند توان تولید یا انرژی ذخیره‌شده)، مقدار ژن با یک مقدار کوچک تصادفی افزایش یا کاهش می‌یابد. نرخ جهش در ابتدا نسبتاً بالا در نظر گرفته می‌شود تا تنوع در جمعیت حفظ شود و به مرور زمان کاهش می‌یابد تا همگرایی به سمت جواب بهینه حاصل گردد.

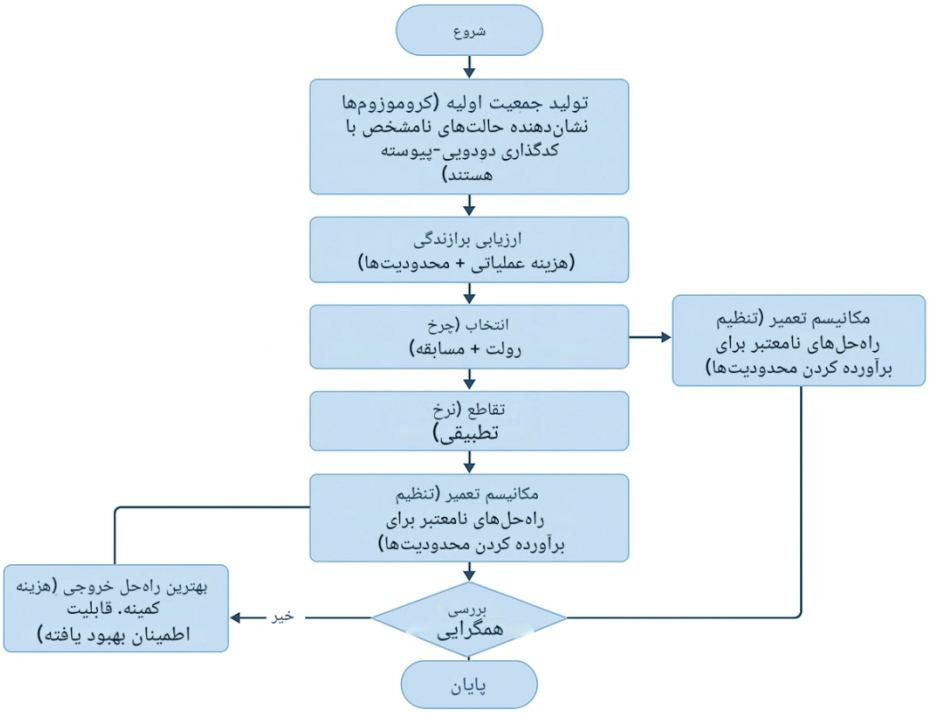
پس از اجرای مراحل انتخاب، تقاطع و جهش، جمعیت جدیدی از کروموزوم‌ها تشکیل می‌شود که باید مورد ارزیابی قرار گیرند. برای هر کروموزوم، تابع هدف مجدداً محاسبه شده و قیود مدل بررسی می‌شود. در صورتی که کروموزوم با قیود سازگار باشد، در جمعیت باقی می‌ماند؛ در غیر این صورت یا حذف می‌شود یا به کمک یک الگوریتم اصلاح‌کننده به کروموزومی معتبر تبدیل می‌شود. مکانیزم اصلاح

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.530]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

شامل تخصیص مجدد توان تولید، فعال یا غیرفعال کردن منابع ذخیره‌سازی و تنظیم مقادیر بار کاهش‌یافته است تا تعادل توان، محدودیت خطوط و سایر الزامات سیستم رعایت گردد.

الگوریتم به‌طور تکراری ادامه می‌یابد تا زمانی که یک معیار توقف برآورده شود. این معیار می‌تواند شامل رسیدن به تعداد مشخصی نسل، یا عدم بهبود محسوس در مقدار تابع هدف طی چند نسل متوالی باشد. در پایان، بهترین کروموزوم یافت‌شده به عنوان جواب نهایی مسئله مشارکت واحدها در شرایط عدم قطعیت پذیرفته می‌شود. این راهکار نه تنها هزینه‌های کلی سیستم را به حداقل می‌رساند، بلکه موجب رعایت کامل محدودیت‌های فنی و امنیتی، استفاده بهینه از منابع تجدیدپذیر، بهره‌برداری کارآمد از سیستم‌های ذخیره‌سازی و وسایل نقلیه برقی، و همچنین افزایش انعطاف‌پذیری و پایداری شبکه می‌شود.

الگوریتم پیشنهادی به دلیل ساختار تطبیقی، قابلیت تنظیم خودکار نرخ جهش و تقاطع، و استفاده همزمان از روش‌های انتخاب چندگانه، در مقایسه با الگوریتم‌های سنتی ژنتیک یا سایر روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک، از سرعت همگرایی بالاتر، پایداری عددی بیشتر و قدرت جستجوی گسترده‌تری برخوردار است. این ویژگی‌ها موجب شده تا الگوریتم ژنتیک پیشرفته به عنوان هسته حل مدل پیشنهادی، عملکردی قوی در مواجهه با شرایط پیچیده، ناپایدار و نامطمئن سیستم‌های قدرت هوشمند از خود نشان دهد. در شکل (۱) فلوچارت الگوریتم پیشنهادی نشان داده شده است.



شکل (۱): فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

Figure (1): Flowchart of the proposed algorithm

۴- نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی عملکرد مدل و الگوریتم پیشنهادی، شبیه‌سازی‌هایی بر روی چند سیستم استاندارد قدرت با اندازه‌های مختلف انجام شده است. این بخش شامل معرفی سیستم‌های تست، سناریوهای شبیه‌سازی، پارامترهای الگوریتم، و تحلیل دقیق نتایج عددی در قالب جداول و نمودارها است. برای ارزیابی مدل و الگوریتم ژنتیک پیشرفته، از چهار سیستم تست استاندارد IEEE شامل سیستم‌های ۶، ۲۴، ۱۱۸ و ۳۰۰ باس استفاده شده است. مشخصات کلیدی هر سیستم شامل تعداد واحدهای تولید، خطوط انتقال، ظرفیت‌های بار، و ساختار توپولوژیکی شبکه‌ها به شرح زیر است.

جدول (۱): سیستم‌های مورد مطالعه

Table (1): Systems studied

سیستم تست	تعداد باس‌ها	تعداد واحد تولید	تعداد خطوط انتقال	حداکثر بار (MW)
IEEE ۶-bus	۶	۳	۱۱	۱۲۶
IEEE ۲۴-bus	۲۴	۱۰	۳۸	۲۸۵۰
IEEE ۱۱۸-bus	۱۱۸	۵۴	۱۸۶	۴۲۴۲
IEEE ۳۰۰-bus	۳۰۰	۶۹	۴۱۱	۸۵۰۰

پارامترهای الگوریتم ژنتیک پیشرفته برای همه سیستم‌ها با مقادیر زیر تنظیم شده‌اند تا تعادل مناسبی بین سرعت همگرایی و دقت حاصل شود. اندازه جمعیت اولیه: ۱۰۰، حداکثر تعداد نسل‌ها: ۲۰۰، نرخ تقاطع: ۰.۸ (کاهش تدریجی تا ۰.۵ در نسل‌های پایانی)، نرخ جهش: ۰.۲

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.530]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

(کاهش تا ۰.۰۵)، روش انتخاب: ترکیب چرخ رولت و تورنمنت با سایز ۵، روش تقاطع: تقاطع یکنواخت، مکانیزم اصلاح: تنظیم تولید، بار، و ذخیره‌سازی برای ارضای قیود می‌باشد.

برای بررسی عملکرد مدل تحت شرایط مختلف، سه سناریو تعریف شده است:

- **سناریو ۱: حالت پایه بدون منابع تجدیدپذیر و بدون ذخیره‌سازی انرژی**
- **سناریو ۲: حضور منابع تجدیدپذیر با عدم قطعیت (باد و خورشیدی)، بدون ذخیره‌سازی**
- **سناریو ۳: حضور منابع تجدیدپذیر + سیستم ذخیره‌سازی + وسایل نقلیه برقی (EV)**

در تمامی سناریوها، سطح تقاضا و قیمت سوخت به صورت زمان‌متغیر تعریف شده و عدم قطعیت تولید تجدیدپذیر به صورت ±۲۰٪ پیش‌بینی مدل شده است. سیستم‌های ذخیره‌سازی شامل باتری‌هایی با ظرفیت متوسط ۱۰–۱۰۰ MWh در گره‌های کلیدی شبکه‌اند، و EVها دارای ظرفیت ۵–۲۰ MWh با پروفایل رفت‌وآمد روزانه می‌باشند.

نتایج شبیه‌سازی برای سیستم ۲۴ باس به عنوان مثال مرجع ارائه شده‌اند. جدول (۲) مقایسه هزینه کل سیستم در هر سناریو را نشان می‌دهد.

جدول (۲): نتایج شبیه‌سازی

Table (2): Simulation results

سناریو	هزینه کل سیستم (هزار دلار)	زمان همگرایی (ثانیه)	هزینه کاهش بار	نرخ استفاده از ذخیره‌سازی
۱	۱,۴۸۲.۷	۱۴.۲	۳۸.۱	۰٪
۲	۱,۲۹۶.۳	۱۷.۵	۴۲.۶	۰٪
۳	۱,۰۸۴.۹	۲۱.۳	۷.۹	۵۸٪

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سناریوی سوم، با افزودن سیستم‌های ذخیره‌سازی و وسایل نقلیه برقی، هزینه کل بهره‌برداری حدود ۲۶.۸٪ نسبت به حالت پایه کاهش یافته است. همچنین هزینه‌های کاهش بار نیز به طور قابل توجهی کاهش یافته است، که نشان‌دهنده بهبود قابلیت پاسخ‌دهی سیستم در شرایط بحرانی است. در جدول (۳)، مقایسه درصد مشارکت منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌سازی را در سناریوی ۲ و ۳ را نشان می‌دهد.

جدول (۳): مقایسه سناریوها

Table (3): Comparison of scenarios

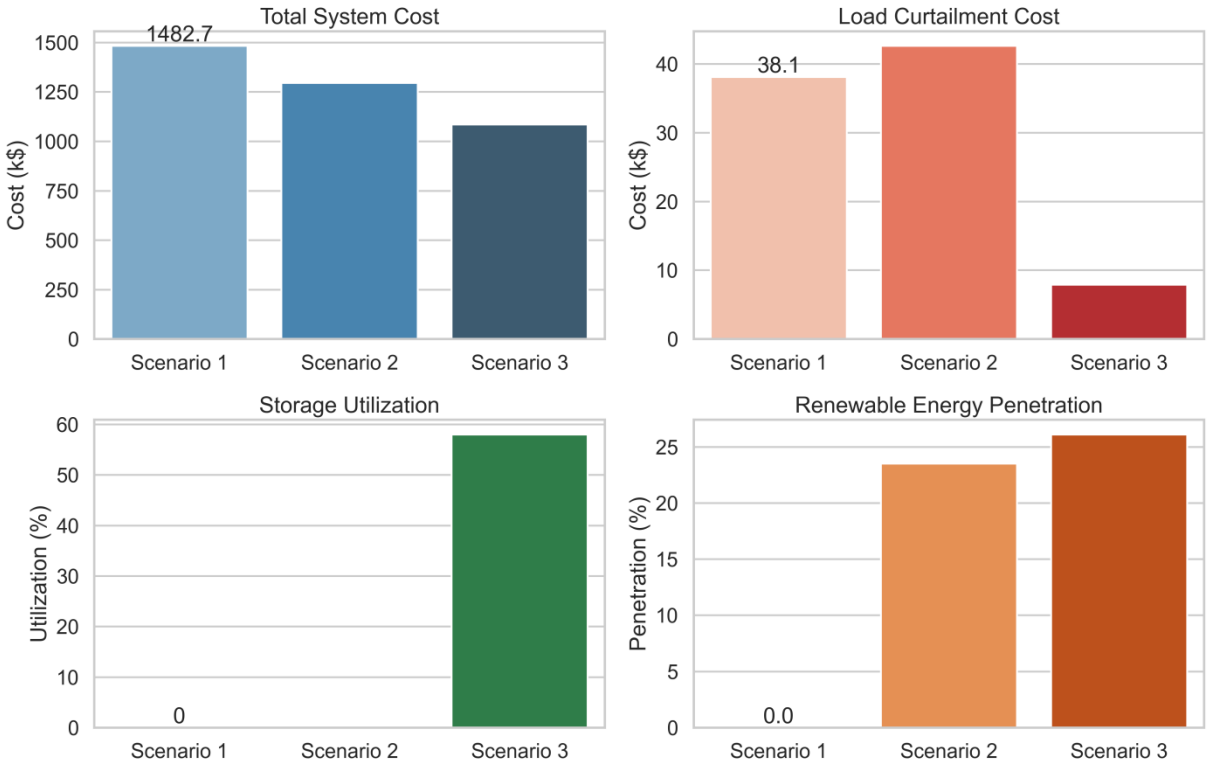
نوع منبع	سناریو ۲ (درصد مشارکت)	سناریو ۳ (درصد مشارکت)
منابع تجدیدپذیر	۲۳.۵٪	۲۶.۱٪
سیستم‌های ذخیره‌سازی	۰٪	۱۴.۴٪
EVها	۰٪	۶.۲٪

در سناریوی سوم، حضور ذخیره‌سازها و EVها نه تنها به بهبود انعطاف‌پذیری کمک کرده بلکه باعث استفاده مؤثرتر از منابع تجدیدپذیر نیز شده است. از منظر زمانی، هر چه ابعاد سیستم افزایش یافته، الگوریتم ژنتیک با ساختار پیشنهادی همچنان توانسته همگرایی مناسبی را در زمان معقول ارائه دهد. زمان همگرایی برای سیستم‌های ۶، ۲۴، ۱۱۸ و ۳۰۰ گره به ترتیب برابر با ۴.۶، ۲۱.۳، ۸۹.۷ و ۱۵۷.۴ ثانیه بوده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی نه تنها قابلیت حل مسائل بزرگ‌مقیاس را دارد بلکه در شرایط عدم قطعیت نیز پایداری و کارایی مناسبی ارائه می‌دهد. بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک پیشرفته باعث کاهش قابل‌توجه هزینه عملیاتی و بهبود زمان حل شده و استفاده از منابع ذخیره‌سازی و EVها سبب بهبود انعطاف‌پذیری و امنیت بهره‌برداری گردیده است. همچنین مشاهده شد که در سناریوهای بدون ذخیره‌سازی، در مواجهه با پیک‌های بار، میزان قطع بار افزایش می‌یابد، در حالی که استفاده از EVها به عنوان منابع ذخیره‌سازی سیار، توانسته است در ساعات بحرانی نقش کلیدی ایفا کند. این موضوع به ویژه در سیستم‌های بزرگ‌تر با بار متغیر، اهمیت بیشتری دارد. در مجموع، نتایج شبیه‌سازی اثربخشی مدل پیشنهادی را در کاهش هزینه‌ها، افزایش بهره‌برداری از منابع پاک، بهبود پایداری و تسریع در زمان حل مسئله نشان می‌دهند. الگوریتم ژنتیک پیشرفته نیز با ساختار چندمرحله‌ای و تطبیقی خود توانسته است در مقایسه با روش‌های کلاسیک عملکرد بهتری داشته باشد.

در شکل (۲) نتایج شبیه‌سازی سه سناریوی مختلف از مسئله مشارکت واحدها در یک سیستم قدرت هوشمند نشان داده شده است. این نمودارها به صورت چهار زیربخش در یک قاب تجمیع شده‌اند تا مقایسه‌ی مؤلفه‌های کلیدی عملکرد سیستم در هر سناریو به‌صورت بصری قابل مشاهده باشد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.530]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025



شکل (۲): نتایج سناریوهای مختلف

Figure (2): Results of different scenarios

نمودار بالا سمت چپ به بررسی هزینه کل بهره‌برداری سیستم در سه سناریو می‌پردازد. در این نمودار مشاهده می‌شود که هزینه کل در سناریوی پایه (بدون منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌سازی) بیشترین مقدار را دارد و با ورود منابع تجدیدپذیر در سناریوی دوم کاهش می‌یابد. با اضافه شدن سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و وسایل نقلیه برقی در سناریوی سوم، هزینه کل بهره‌برداری به شکل چشم‌گیری کاهش پیدا کرده است که نشان‌دهنده تأثیر مثبت ادغام منابع ذخیره و انعطاف‌پذیر در بهره‌برداری اقتصادی از سیستم قدرت است.

نمودار بالا سمت راست مربوط به هزینه کاهش بار در سناریوهای مختلف است. اگرچه در سناریوی دوم به دلیل نوسانات تولید منابع تجدیدپذیر، هزینه کاهش بار نسبت به سناریوی اول کمی افزایش یافته، اما در سناریوی سوم با استفاده از ظرفیت ذخیره‌سازی و پاسخگویی وسایل نقلیه برقی، این هزینه به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. این امر نشان می‌دهد که ادغام منابع ذخیره‌سازی می‌تواند در شرایط بحرانی، به عنوان پشتیبان بار عمل کرده و نیاز به کاهش بار اجباری را کاهش دهد.

نمودار پایین سمت چپ، درصد استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی را در هر سناریو نمایش می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود، در سناریوهای اول و دوم به دلیل عدم حضور ذخیره‌سازها، میزان استفاده صفر است. در سناریوی سوم، میزان استفاده از ذخیره‌سازی به حدود ۵۸ درصد می‌رسد که نشان می‌دهد این منابع در فرآیند بهره‌برداری به خوبی فعال شده‌اند و نقش مؤثری در کاهش هزینه‌ها و افزایش انعطاف‌پذیری ایفا کرده‌اند.

نمودار پایین سمت راست، میزان مشارکت منابع تجدیدپذیر را در سه سناریو مقایسه می‌کند. در سناریوی اول این مقدار صفر است و در سناریوی دوم حدود ۲۳.۵ درصد از تأمین توان توسط منابع تجدیدپذیر صورت گرفته است. با ادغام ذخیره‌سازی و وسایل نقلیه برقی در سناریوی سوم، این مقدار به حدود ۲۶.۱ درصد افزایش یافته است. این افزایش نشان‌دهنده توانمندی سیستم در جذب بهتر نوسانات تولید تجدیدپذیر در حضور ذخیره‌سازی و منابع پاسخ‌گو است.

در مجموع، شکل (۲) به وضوح نشان می‌دهد که استفاده از مدل پیشنهادی به همراه الگوریتم ژنتیک پیشرفته و ادغام منابع نوین، می‌تواند نه تنها هزینه‌های بهره‌برداری سیستم قدرت را کاهش دهد، بلکه پایداری، انعطاف‌پذیری و توان جذب منابع تجدیدپذیر را نیز بهبود بخشد. این نتایج نشان‌دهنده کارایی بالای مدل پیشنهادی در مواجهه با چالش‌های بهره‌برداری در سیستم‌های قدرت مدرن و هوشمند است.

در این مقاله، یک چارچوب نوین برای مسئله مشارکت واحدها در سیستم‌های قدرت هوشمند ارائه شد که در آن محدودیت‌های امنیتی شبکه، حضور منابع تجدیدپذیر، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و وسایل نقلیه برقی با دقت مدل‌سازی شده‌اند. تفاوت اصلی این پژوهش با مطالعات پیشین، تمرکز بر طراحی یک الگوریتم ژنتیک پیشرفته برای حل مسئله در شرایط عدم قطعیت و پیچیدگی بالا بوده است. برخلاف روش‌های سنتی مبتنی بر برنامه‌ریزی عدد صحیح، تفکیک ستون و قید، یا الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلاسیک، در این تحقیق از یک الگوریتم تکاملی با ساختار پویا، نرخ جهش و تقاطع تطبیقی، و مکانیزم اصلاح راهکارها استفاده شده است که عملکرد سیستم را در ابعاد مختلف بهبود داده است.

نتایج شبیه‌سازی در سیستم‌های مختلف، از ابعاد کوچک تا شبکه‌های بزرگ‌مقیاس، نشان داد که مدل پیشنهادی توانسته است با کاهش هزینه‌های عملیاتی، کاهش چشمگیر بار کاهش یافته، و بهبود در بهره‌برداری از منابع تجدیدپذیر، اثربخشی خود را به اثبات برساند. در سناریوی کامل شامل منابع تجدیدپذیر، ذخیره‌سازی انرژی و وسایل نقلیه برقی، میزان هزینه کل بهره‌برداری تا بیش از ۲۵ درصد نسبت

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.530]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

به حالت پایه کاهش یافت. همچنین، نرخ اســتفاده از ذخیره‌ســازی و EVها نشــان داد که این منابع در مدیریت پیک بار، تأمین توان در ساعات بحرانی و افزایش قابلیت اطمینان سیستم نقش کلیدی ایفا می‌کنند.

در شـرایطی که سـیسـتم با نوسـانات بار و تولید تجدیدپذیر مواجه اسـت، مدل پیشـنهادی با اسـتفاده از مجموعه‌های عدم قطعیت و قیود مقاوم، توانسـت پاسـخ‌هایی پایدار و قابل اطمینان ارائه دهد. نکته قابل توجه آن اسـت که همگرایی الگوریتم ژنتیک پیشـرفته در مقایسـه با نسـخه‌های کلاسـیک، سـریع‌تر و با نوسـانات کمتر صـورت گرفت و حتی در سـیسـتم‌های بزرگ با بیش از ۱۰۰ گره، زمان حل مسـئله در محدوده قابل قبول باقی ماند. این ویژگی، قابلیت کاربرد مدل در سیستم‌های واقعی با ابعاد بالا را تأیید می‌کند.

از منظر سـاختاری نیز، مدل پیشـنهادی به گونه‌ای طراحی شـده که قابلیت توسـعه و انطباق با سـایر منابع انرژی نو، الگوهای پاسـخگویی به تقاضـا و حتی سـناریوهای چندهدفه (مانند ترکیب هزینه و آلایندگی یا هزینه و قابلیت اطمینان) را دارد. به‌کارگیری روش‌های تکاملی نیز، به‌خصـوص در مسـائل با فضـای جسـتجوی ناپیوسـته و شـامل متغیرهای گسسـته و پیوسـته، نشـان داد که می‌تواند جایگزینی قدرتمند برای روش‌های سنتی باشد، به‌ویژه هنگامی که سرعت و پایداری همگرایی، اولویت اصلی است.

۴- نتیجه‌گیری

در جمع‌بندی می‌توان گفت که الگوریتم پیشـنهادی ضـمن حفظ دقت و جامعیت مدل، توانسـته عملکردی سـریع، پایدار و مقیاس‌پذیر در حل مسئله مشارکت واحدها ارائه دهد. ادغام ذخیره‌سازی و وسایل نقلیه برقی در چارچوب مدل، موجب افزایش انعطاف‌پذیری بهره‌برداری و کاهش وابسـتگی به تولید سـنتی شـده و امکان بهره‌برداری اقتصـادی‌تر از منابع را فراهم سـاخته اسـت. این نتایج می‌تواند مبنای توسـعه ابزارهای تصمیم‌یار برای اپراتورهای سیستم‌های قدرت در محیط‌های آینده انرژی باشد. در تحقیقات آتی، می‌توان این چارچوب را به سمت مدل‌های چندهدفه، بهینه‌سازی توزیع‌شده در سیستم‌های چندمنطقه‌ای، و الگوریتم‌های ترکیبی (مانند GA-PSO یا GA-ANN) توسعه داد. همچنین، لحاظ کردن پاسخ‌گویی بار به صـورت دینامیکی و اسـتفاده از داده‌های واقعی در برنامه‌ریزی بهره‌برداری می‌تواند گامی مؤثر در راستای افزایش واقع‌گرایی و کارایی مدل پیشنهادی باشد.

References
مراجع

[1] H. Zhou, K. Yuan and C. Lei, "Security Constrained Unit Commitment Based on Modified Line Outage Distribution Factors," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 25258-25266, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3156081.

[2] Y. Yin, C. He, T. Liu and L. Wu, "Risk-Averse Stochastic Midterm Scheduling of Thermal-Hydro-Wind System: A Network-Constrained Clustered Unit Commitment Approach," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 13, no. 3, pp. 1293-1304, July 2022, doi: 10.1109/TSTE.2022.3150918.

[3] M. Said, E. H. Houssein, S. Deb, A. A. Alhussan and R. M. Ghoniem, "A Novel Gradient Based Optimizer for Solving Unit Commitment Problem," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 18081-18092, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3150857.

[4] Z. Jiang, Y. Liu, Z. Kang, T. Han and J. Zhou, "Security-Constrained Unit Commitment for Hybrid VSC-MTDC/AC Power Systems With High Penetration of Wind Generation," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 14029-14037, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3148316.

[5] Q. Gao, Z. Yang, W. Yin, W. Li and J. Yu, "Internally Induced Branch-and-Cut Acceleration for Unit Commitment Based on Improvement of Upper Bound," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 37, no. 3, pp. 2455-2458, May 2022, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3146772.

[6] X. Chen, Y. Yang, Y. Liu and L. Wu, "Feature-Driven Economic Improvement for Network-Constrained Unit Commitment: A Closed-Loop Predict-and-Optimize Framework," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 37, no. 4, pp. 3104-3118, July 2022, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3128485.

[7] G. E. Constante-Flores, A. J. Conejo and F. Qiu, "AC Network-Constrained Unit Commitment via Relaxation and Decomposition," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 37, no. 3, pp. 2187-2196, May 2022, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3120180.

[8] G. Gutiérrez-Alcaraz, B. Díaz-López, J. M. Arroyo and V. H. Hinojosa, "Large-Scale Preventive Security-Constrained Unit Commitment Considering N-k Line Outages and

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.530] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Transmission Losses," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 37, no. 3, pp. 2032-2041, May 2022, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3116462.

[9] Y. Zhang et al., "Encoding Frequency Constraints in Preventive Unit Commitment Using Deep Learning With Region-of-Interest Active Sampling," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 37, no. 3, pp. 1942-1955, May 2022, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3110881.

[10] T. Wu, Y. -J. Angela Zhang and S. Wang, "Deep Learning to Optimize: Security-Constrained Unit Commitment With Uncertain Wind Power Generation and BESSs," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 13, no. 1, pp. 231-240, Jan. 2022, doi: 10.1109/TSTE.2021.3107848.

[11] Kate Doubleday, José Daniel Lara, Bri-Mathias Hodge, "Investigation of stochastic unit commitment to enable advanced flexibility measures for high shares of solar PV", *Applied Energy*, Volume 321, 119337, 2022.

[12] Ona Egbue, Charles Uko, Ali Aldubaisi, Enrico Santi, "A unit commitment model for optimal vehicle-to-grid operation in a power system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 141, 108094, 2022.

[13] Xianliang Cheng, Suzhen Feng, Hao Zheng, Jinwen Wang, Shuangquan Liu, "A hierarchical model in short-term hydro scheduling with unit commitment and head-dependency," *Energy*, Volume 251, 123908, 2022.

[14] Yeqi Sun, Bo Wang, Ran Yuan, Junzo Watada, "Rolling unit commitment based on dual-discriminator conditional generative adversarial networks," *Electric Power Systems Research*, Volume 205, 107770, 2022.

[15] Hoa Quynh Truong, Chawalit Jeenanunta, "Fuzzy mixed integer linear programming model for national level monthly unit commitment under price-based uncertainty: A case study in Thailand," *Electric Power Systems Research*, Volume 209, 107963, 2022.

[16] Paria Mansourshoar, Ahmad Sadeghi Yazdankhah, Mohsen Vatanpour, Behnam Mohammadi-Ivatloo, "Impact of implementing a price-based demand response program on the system reliability in security-constrained unit commitment problem coupled with wind farms in the presence of contingencies," *Energy*, Volume 255, 124333, 2022.

[17] Jiayin Xu, Yinghao Ma, Kun Li, Zhiwei Li, "Unit commitment of power system with large-scale wind power considering multi time scale flexibility contribution of demand response," *Energy Reports*, Volume 7, Supplement 7, Pages 342-352, 2021.

[18] Gonzalo E. Constante-Flores, Antonio J. Conejo, Feng Qiu, "AC network-constrained unit commitment via conic relaxation and convex programming," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 134, 107364, 2022.

[19] Chen Zhang, Linfeng Yang, "Distributed AC security-constrained unit commitment for multi-area interconnected power systems," *Electric Power Systems Research*, Volume 211, 108197, 2022.

[20] Pan Liang, Navid Bohlooli, "Optimal unit commitment integrated energy storage system, renewable energy sources and FACTS devices with robust method," *Electric Power Systems Research*, Volume 209, 107961, 2022.

[21] H. Karimianfard, H. Haghighat and B. Zeng, "Co-Optimization of Battery Storage Investment and Grid Expansion in Integrated Energy Systems," *IEEE Systems Journal*, doi: 10.1109/JSYST.2021.3130057.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.530]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

[22] Jokar H, Bahmani-Firouzi B, Simab M. Unit Commitment in Smart Grids Considering Demand Side Management and Energy Storage Systems. Modern Research in Smart Power Systems 2021; 10 (3):11-18

[23] Ashkan Ahmadi, Javad Nikokar, "Unit Commitment Considering Emergency Demand Response Planning (EDRP) and Interruptible/Cuttable Loads (I/CL) to Reduce Customer Payments." Modern Research in Smart Power Systems 2014; 3 (1): 48-58

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.530] [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025