Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 96-105

Vol. 10 / No. 2/ Summer 2021
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

Unit Commitment in Smart Grids Considering Emission and Energy Storage Systems

Ali Zandi[1], Mohsen Simab[2]

[1]*ali72zandi@gmail.com*

[2]*msimab@miau.ac.ir*

Abstract:The problem of unit commitment (UC) or in other words, the issue of placing the units in orbit is a very important optimization problem, the exact solution of which can lead to a significant reduction in operation costs. In general, UC's goal is to minimize the total cost of production units by considering the constraints of the units and the system during the intended period. In fact, UC is divided into two issues. First, there is the issue of determining the on or off mode of production units for each hour, which is usually 24 hours, and the second is the distribution of economic dispatch between production units. Considering both problems at the same time will complicate the solution. It should also be noted that the difficulty of the problem also increases in proportion to the number of production units as well as the constraints considered. As mentioned, unit cost is typically the primary goal of minimizing UC issues. This paper considers smart grids, one of whose goals is reducing environmental pollution in addition to reducing costs. Therefore, this paper considers UC problem-solving in smart grids by considering the pollution of production units, so a multi-objective function is selected for minimization. On the other hand, with the introduction of smart grids, the existence of energy storage systems (ESS) in the network is also considered. This paper suggests optimal charging and discharging of energy storage systems, too. Another issue modeled in this paper is the issue of demand response in smart grids. Demand response program modeling allows grid demands to be shifted within the specified range at different times of the day. The proposed model is a mixed integer linear programming model (MILP) that has been tested to validate the performance of the proposed model, i.e., 4-unit and 10-unit systems with storage resources. To solve the proposed model, a powerful Gurobi solver is used. This solver also guarantees optimal global solutions and can get optimal solutions in the shortest time. In the end, the simulation results showed that modeling the problem of optimizing the charge and discharge of the energy storage system, along with the problem of demand-response management in the issue of unit participation, is very effective in reducing operating costs and reducing pollution. On the other hand, due to the linear nature of the problem, the proposed model can be solved in larger dimensions of the power systems.

Keywords: Unit commitment, Pollution, Mixed-Integer Linear Programming, Energy Storage System

Received:2020 July 11

Accepted:2021 May 5

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص 96-105

Vol. 10 / No. 2/ Summer 2021
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

حل مسئله مشارکت واحدها در شبکه‌های هوشمند با در نظر گرفتن پاسخگویی بار و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی

علی زندی[1]، محسن سیماب[2]

۱- گروه مهندسی برق قدرت- واحد مرودشت-دانشگاه آزاد اسلامی- مرودشت- ایران
ali72zandi@gmail.com
۲- گروه مهندسی برق قدرت- واحد مرودشت-دانشگاه آزاد اسلامی- مرودشت- ایران
msimab@miau.ac.ir

چکیده: مسئله مشارکت واحدها (UC) یا به عبارتی مسئله در مدار قرار گرفتن واحدها یک مسئله بهینه‌سازی بسیار مهم می‌باشد که حل دقیق آن می‌تواند منجر به کاهش چشمگیر هزینه‌ها شود. به طور کلی هدف UC کمینه کردن هزینهٔ کل واحدهای تولیدی با در نظر گرفتن قیود واحدها و سیستم در طول دوره در نظر گرفته شده می‌باشد. در مجموع UC به دو مسئله تقسیم می‌شود، نخست مسئله‌ای برای تعیین حالت روشن و یا خاموش شدن واحدهای تولیدی برای هر ساعت در نظر گرفته شده که معمولا ۲۴ ساعته می‌باشد و مسئله دیگر نیز پخش بار اقتصادی بین واحدهای تولیدی می‌باشد. در نظر گرفتن هر دو مسئله به صورت همزمان سبب پیچیده شدن حل خواهد شد، همچنین باید توجه داشت که دشواری مسئله نیز متناسب با تعداد واحدهای تولیدی و همچنین قیود در نظر گرفته شده افزایش می‌یابد. همانطور که گفته شد به طور معمول هزینه واحدها به عنوان هدف اصلی کمینه‌سازی در مسائل UC قرار می‌گیرد. در این مقاله شبکه‌های هوشمند مد نظر قرار گرفته است، که یکی از اهداف این شبکه‌ها علاوه‌بر کاهش هزینه، کاهش مسائل زیست محیطی هم می‌باشد، لذا در این مقاله حل مساله UC در شبکه‌های هوشمند با در نظر گرفتن آلودگی واحدهای تولیدی مد نظر قرار گرفته است، در نتیجه یک تابع چند هدفه برای کمینه‌سازی انتخاب شده است، از طرفی دیگر با معرفی شبکه‌های هوشمند، وجود سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی (ESS) هم در شبکه مد نظر قرار گرفته است، که در این مقاله شارژ و دشارژ بهینه سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی نیز پیشنهاد شده است. از دیگر مسائل مدل‌سازی شده در این مقاله مسئله پاسخگویی بار در شبکه‌های هوشمند می‌باشد که در این مقاله به آن پرداخته شده است. مدل پیشنهاد شده یک مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح می‌باشد (MILP)، که به منظور صحت‌سنجی عملکرد مدل و روش پیشنهادی دو سیستم ۴ و ۱۰ واحدی به همراه منابع ذخیره‌ساز آزمایش شده است، که نتایج نشان از عملکرد مطلوب مدل پیشنهادی می‌باشد.

واژه های کلیدی: مشارکت واحدها، آلایندگی، برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح، سیستم ذخیره‌ساز انرژی، پاسخگویی بار

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۹/۰۴/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۰/۰۲/۱۵

نام نویسنده‌ی مسئول : محسن سیماب

نشانی نویسنده‌ی مسئول : گروه مهندسی برق قدرت- واحد مرودشت-دانشگاه آزاد اسلامی- مرودشت- ایران.

۱- مقدمه

مسئله مشارکت واحدها یا UC یکی از مهمترین مسائل بهینه‌سازی در سیستم‌های قدرت می‌باشد، که با مطرح شدن شبکه های هو شمند تغییراتی در ساختار این مسئله اضافه شده است، برای نمو نه م سئله UC در دهه‌های پیش تنها با هدف کاهش هزی نه تول ید وا حدهای ژنراتوری در نظر گرفته می‌شد، اما در سال‌های اخیر به دلیل آ لودگی-های زیست محیطی که منجر به گرم شدن زمین شده است، محق قان تلاش کردنده‌اند که نقش آلودگی را نیز در مسائل اقتصادی مدل‌سازی کنند. از مسائل دیگری که در شبکه‌های هوشمند مد نظر قرار گرف ته است وجود سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی می‌باشد، که تا حد ز یادی می‌تواند سبب بهبود اهداف در نظر گرفته شده شود، در ه مین را ستا در نظر گرفتن و مدل‌سازی سیستم‌های ذخیره‌سازی ا نرژی می‌توا ند نتایج موثری در تجزیه و تحلیل مسئله مشارکت واحدها بگذارد.

در (Saranya and Saravanan 2020) نویسندگان مسئله م شارکت واحدها را با در نظر گرفتن سیستم‌های ذخیره‌سازی ارا ئه نمود ند. در این مقاله نویسندگان یک الگوریتم فراابتکاری با نام الگوریتم ا نحلال-پذیری گاز هنری (HGSA) را برای حل مسئله پی شنهاد نمود ند. تا حدودی به نظر می‌رسد این ال گوریتم رف تاری شبیه ال گوریتم PSO داشته باشد، اما به دلیل مدل‌سازی دقیق‌تر تابع بروز رسانی می‌توا ند نسبت به الگوریتم PSO بر تر با شد. در (Junkai and Tang 2020) نویسندگان مسئله مشارکت واحدها را با در ن ظر گرفتن شبکه گاز طبیعی ارائه نمودند. در این مقاله ا هداف کمی نه سازی هزی نه ب هره-برداری واحدها و همچنین هزینه واحدهای گازی در نظر گرف ته شده ا ست. در (Dimbalita and Datta 2019) نوی سندگان م سئله مشارکت واحدها را با هدف کاهش هزینه تول ید پی شنهاد نمود ند. در این مقاله قید تغییرات شیب واحدها مورد مطالعه قرار گرفت، همچنین از چندین الگوریتم ابتکاری برای حل مسئله پیشنهادی ا ستفاده شد، که نهایتاً نشان داده شد که الگوریتم تکامل تفا ضلی ن سبت به دی گر الگوریتم‌های تکاملی در زمی نه م شارکت وا حدها از عما کرد به تری برخوردار می‌باشد. نوی سندگان در (Linfeng and et al. 2020) یک الگوریتم جدید بهینه‌سازی سرا سری را برای حل م سئله م شارکت واحدها پیشنهاد کردند. الگوریتم نقطه مرکزی (CP) برای حل م سئله مشارکت واحدها مدل‌سازی شده است که در نها یت با حل م سئله توسط CPLEX مورد مقایسه قرار گرفته است، که نتایج نشان می‌دهد این الگوریتم از عملکرد بهتری نسبت به CPLEX برخوردار ا ست. در (Shuang et al. 2019) نویسندگان یک تابع چند هدفه را با در ن ظر گرفتن عدم قطعیت و تنظیم پیک بار و توان توربین بادی در م سئله مشارکت واحدها ارائه کردند. این مقاله افزایش ظرفیت تنظیم پیک بار و کاهش هزینه واحدها را به عنوان یک تابع چند هدفه در نظر گرف ته است. در این مقاله مدل‌سازی بارهای حرارتی هم در نظر گرف ته شده است، همچنین سی ستم ۱۱۸ باس ن یز برای تجز یه و تحل یل روش پیشنهاد شده مد نظر قرار گرفته است. در (Dhaliwal and Dhillon 2019) نویسندگان الگوریتم تکامل تفاضلی باینری (MBDE) را برای حل مسئله مسارکت واحدها انتخاب نموده‌اند. هدف ا صلی در م سئله مشارکت واحدها در این مقاله تنها کاهش هزینه‌های وا حدهای تول ید توان انتخاب شده ا ست. در (Wang and et al. 2019) نوی سندگان مسئله مشارکت واحدها را با در نظر گرفتن پاسخگویی بار خودرو های الکتریکی پیشنهاد نموده‌اند. در این مقا له روش بهی نه سازی ر قابتی موازی برای حل مسئله پیشنهادی در نظر گرفته شده است. هدف این مقاله کاهش هزی نه کل تول ید م نابع مو جود در شبکه می‌با شد. نویسندگان در (Anand and et al. 2019) مسئله مشارکت واحدهای حرارتی و الکتریکی را با هدف بهبود یک تابع چند هدفه با ا ستفاده از یک الگوریتم تکاملی ارائه دادند. در این مقاله کاهش هزینه کل ب هره-برداری از واحدها و همچنین انتشار آلایندگی مد نظر قرار گرفته است. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات باینری (BPSO) برای حل م سئله م شارکت وا حدهای حرار تی و الکتری کی پی شنهاد شده ا ست. در (Alvarado-Barrios and et al. 2020) مسئله مشارکت واحدها در ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت نیز بررسی شده است. در این مقاله بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی نیز مد نظر قرار گرفته است. در این مقاله پیش‌بینی بار به صورت غ یر قط عی در ن ظر گرف ته شده و تو سط روش خود همب ستگی م یانگین مت حرک (ARMA) پیشنهاد شده است. هدف ا صلی کاهش هزی نه تول یدی واحدها در ن ظر گرف ته شده ا ست. در (Nikzad and Abdi 2020) نویسندگان حل م سئله م شارکت وا حدها را با ا ستفاده از ترک یب الگوریتم ژنتیک و روش لیست اولویت پیشنهاد کرد ند. در ا ین مقا له سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی به منظور بهبود تابع هزینه مد ن ظر قرار گرفته است. کاهش هزینه بهره‌برداری واحدها در این مقاله به ع نوان تابع هدف مسئله در نظر گرفته شده است. نوی سندگان در (Panwar and et al. 2018) روش بهی نه سازی گرگ خاک ستری باینری (BGWO) را برای حل مسئله مشارکت واحدها در مقیاس بزرگ ارائه نموده‌اند. در این مقاله نشان داده شده است که روش تکاملی پی شنهاد شده قادر به یافتن جواب‌های بهینه در مسائل سخت و بزرگ می‌باشد. تابع هدف در نظر گرفته شده در این مقاله کاهش هزی نه سوخت در نظر گرف ته شده ا ست. در (Barani and et al. 2017) نوی سندگان ال گوریتم ج ستجوی گران شی ال هام گرف ته از کوان توم باینری (BQIGSA) را برای حل مسئله مشارکت واحدها پیشنهاد نمودند. در این مقاله هدف کاهش هزینه بهره‌برداری و راه‌اندازی واحدهای تولیدی در نظر گرفته شده است. در (Matayoshi and et al. 2018) م سئله مشارکت واحدهای چند هدفه با در نظر گرفتن پایداری ولتاژ در حضور عدم قطعیت منابع PV پیشنهاد شده است. در این مقا له روش شبکه عصبی برای حل مسئله انتخاب شده ا ست، همچ نین کاهش هزی نه بهره‌برداری، سوخت، راه‌اندازی و رزرو برای حل مسئله در ن ظر گرف ته شده است. در این مقاله تاثیر سی ستم ذخ یره ساز ا نرژی در م سئله

مشارکت واحدها نشان داده شده است. در (Feizollahi and et al. 2015) نویسندگان یک روش غیر متمرکز را برای حل مسئله مشارکت واحدها در مقایس بزرگ را پیشنهاد نمودند. در این مقاله روش تجزیه را برای حل مسئله مشارکت واحدها بر روی سیستم واقعی ۳۰۰۰ باس پیشنهاد نمودند. نویسندگان در (Li and et al. 2018) تاثیر عملکرد واحدهای یکپارچه پخش توان (UPFC) را با ادغام ژنراتورهای بادی در حل مسئله مشارکت واحدها بررسی نمودند. در این مقاله یک مدل دو سطحی برای حل مسئله UC انتخاب شده است. در سطح اول هدف کاهش هزینه خاموش/روشن سازی واحدها و در سطح دوم کاهش هزینه سوخت، قطع توان باد و بار در نظر گرفته شده است. نویسندگان در مرجع (Moghaddas Tafreshi and et al. 2016) مسئله مشارکت واحدها را با در نظر گرفتن بهره‌برداری بهینه شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی در ریزشبکه‌ها ارائه نمودند. در این مقاله کاهش هزینه واحدها به همراه هزینه شارژ و دشارژ خودروها مد نظر قرار گرفته است، همچنین الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات برای حل مسئله پیشنهادی انتخاب شده است. در این مقاله سعی شده است تا مسئله مشارکت واحدها در شبکه‌های هوشمند در نظر گرفته شود و سیستم‌ها ذخیره‌ساز انرژی در مسئله مدل سازی گردد، همچنین کاهش آلودگی زیست محیطی نیز در این مسئله مد نظر قرار گرفته است و قیدهای وابسته به این مسئله، از جمله قید محدودیت شیب، حداقل/حداکثر زمان روشن/خاموش بودن واحدها و قید رزرو نیز در نظر گرفته شده است، تا یک مدل کامل از مسئله مشارکت واحدها ارائه شده باشد.

نوآوری اصلی این مقاله ارائه یک مدل‌سازی مسئله مشارکت واحدها به صورت برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) و مسئله پاسخگویی بار به همراه مسئله شارژ و دشارژ بهینه منابع ذخیره سازی انرژی با هدف کمینه‌سازی آلودگی زیست محیطی، هزینه های بهره‌برداری، هزینه راه‌اندازی، بی باری و خاموش‌سازی واحدها می‌باشد. در واقع در این مقاله سه مسئله مشارکت واحدها، پاسخگویی بار و شارژ و دشارژ بهینه باتری با هم ترکیب و در قالب یک مدل‌سازی خطی عدد صحیح ارائه شده است. مدل‌سازی مسئله UC در این مقاله یک مدل کامل موجود UC با مدل‌سازی قید حداکثر و حداقل شیب تولید واحد و حداقل زمان خاموش یا روشن بودن واحدها و همچنین قید رزرو شبکه می‌باشد. از آنجایی که شبکه‌های هوشمند در این مقاله مطرح گردیده است، مسئله شارژ و دشارژ بهینه سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی نیز در مسئله UC و همچنین مسئله پاسخگویی بار مدل سازی شده است که در کل یک مدل بهینه‌سازی خطی آمیخته با عدد صحیح برای حل مسئله در روز پیشرو ۲۴ ساعته در نظر گرفته شده است. دیگر بخش‌های مقاله به این شرح است: در بخش دوم مدل سازی و روابط ریاضی مطرح می‌شود. نتایج شبیه‌سازی و تحلیل آن‌ها در بخش سوم و نتیجه‌گیری در بخش آخر ارائه می‌شود.

۲- مدل‌سازی پیشنهادی

در این بخش مدل‌سازی‌های در نظر گرفته شده مثل مدل تابع چند هدفه، قیود حاکم بر بهینه‌سازی و پخش بار ارائه می شود و در پایان الگوریتم تکاملی در نظر گرفته شده توصیف و ارائه خواهد شد. در این مقاله هدف کاهش تلفات توان، بهبود پروفیل ولتاژ و همچنین متعادل کردن شاخص بار می‌باشد که به عنوان یک تابع چند هدفه ارائه شده است.

۲-۱- تابع هدف مسئله

در این بخش مدل ریاضی و روش پیشنهادی در نظر گرفته شده برای حل مسئله پیشنهادی ارائه می‌گردد. در ابتدا مدل سازی های مسئله شامل تابع هدف و قیود مسئله معرفی و ارائه می گردد و در انتها به روش پیشنهادی حل مسئله اشاره می‌شود.

$$\begin{aligned} min\ F = & \left(\sum_{i\in N}\sum_{t\in T} c_i^{fix} v_{i,t} + c_i^{var} g_{i,t} + c_i^{fule} g_{i,t} + c_i^{su} s_{i,t} + c_i^{sd} u_{i,t}\right) \\ & + \left(\sum_{i\in N}\sum_{t\in T} c_i^{sox} g_{i,t} + c_i^{nox} g_{i,t} + c_i^{co2} g_{i,t}\right) \\ & + \left(\sum_{i\in M}\sum_{t\in T} c_i^{ess}\left[p_{i,t}^{cha} \times \eta_i - p_{i,t}^{dis} \times 1/\eta_i\right]\right) \end{aligned} \quad (۱)$$

رابطه (۱) نشان‌دهنده تابع چند هدفه در نظر گرفته شده در این مقاله می‌باشد. همانطور که مشخص است، این تابع شامل سه پرانتز می‌باشد، که پرانتز اول شامل هزینه‌های بهره‌برداری واحدها، پرانتز دوم شامل هزینه‌های آلایندگی واحدها و پرانتز سوم شامل هزینه شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی می‌باشد. در پرانتز اول تابع هدف، N برابر مجموع واحدهای تولیدی و T برابر مجموعه زمان بهره‌برداری می‌باشد، c_i^{fix} برابر هزینه ثابت واحد تولیدی i ام و $v_{i,t}$ برابر متغیر باینری واحد i ام در زمان t ام به منظور نشان دادن وضعیت خاموش/روشن بودن واحد تولیدی می‌باشد، c_i^{var} برابر هزینه متغیر واحد i ام و $g_{i,t}$ برابر توان تولید شده از واحد i ام در زمان t ام می‌باشد، c_i^{fule} برابر هزینه سوخت واحد i ام و c_i^{su} برابر هزینه روشن‌سازی واحد i ام است و $s_{i,t}$ برابر متغیر باینری واحد i ام در زمان t ام به منظور نشان دادن ساعات روشن بودن واحدهای تولیدی می‌باشد، c_i^{sd} برابر هزینه خاموش‌سازی واحد i ام می‌باشد و $u_{i,t}$ برابر متغیر باینری واحد i ام در

زمان t ام به منظور نشان‌دادن ساعات خاموش بودن واحدهای تولیدی می‌باشد، در پرانتز دوم تابع هدف c_i^{sox}، c_i^{nox} و c_i^{co2} به ترتیب برابر هزینه آلایندگی sox، nox و co_2 واحدهای تولید i ام می‌باشد، در پرانتز سوم نیز c_i^{ess} برابر هزینه بهره‌برداری سیستم ذخیره ساز i ام و $p_{i,t}^{cha}$ برابر توان شارژ ذخیره‌ساز i ام در ساعت t ام و $p_{i,t}^{dis}$ برابر توان دشارژ سیستم ذخیره‌ساز i ام در ساعت t ام خواهد بود، همچنین η_i نشان‌دهنده راندمان سیستم ذخیره‌ساز i ام می‌باشد و M نشان‌دهنده مجموعه تعداد سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی موجود در سیستم می‌باشد.

۲-۲- قیود مسئله

در این بخش محدودیت‌های حاکم بر مسئله ارائه می‌شود. محدودیت‌های مسئله UC پیشنهادی، به طور خلاصه برابر، محدودیت بهره‌برداری از واحدهای تولیدی، تعادل توان در سیستم، محدودیت شیب توان، حداکثر و حداقل زمان خاموش/روشن بودن واحدها، قید رزرو در سیستم و محدودیت‌های شامل شارژ و دشارژ بهینه سیستم ذخیره‌ساز انرژی و انرژی مانده در سیستم ذخیره‌ساز می‌باشد، که به ترتیب در زیر ارائه می‌شود. قید (۲) تضمین می‌کند که واحدهای تولیدی بین حداقل و حداکثر توان مجاز بهره‌برداری شوند.

$$v_{i,t}g_{i,t}^{min} \le g_{i,t} \le v_{i,t}g_{i,t}^{max} \quad (۲)$$

رابطه (۳) محدودیت شیب توان رو به بالا و پایین واحدهای تولید توان را نشان می‌دهد.

$$-R_i^{dw} \le g_{i,t+1} - g_{i,t} \le R_i^{up} \quad (۳)$$

در رابطه (۳) R_i^{up} و R_i^{dw} به ترتیب برابر شیب توان رو به بالا و پایین واحد تولیدی i ام می‌باشد. رابطه (۴) و (۵) به ترتیب نشان‌دهنده حداقل زمان روشن و خاموش شدن واحدهای تولید می‌باشد، که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\sum_{k=t-UP_i+1}^{t} s_{i,k} \le v_{i,t} \quad (۴)$$

$$\sum_{k=t-DT_i+1}^{t} u_{i,k} \le 1 - v_{i,t} \quad (۵)$$

در رابطه (۴) UP_i برابر حداقل زمان روشن بودن و در رابطه (۵) DT_i برابر حداقل زمان خاموش بودن واحد i ام می‌باشد. رابطه (۶) نشان‌دهنده رابطه بین متغیرهای باینری خاموش و روشن سازی واحدها و وضعیت واحدها می‌باشد، که به صورت زیر معرفی شده است.

$$s_{i,t+1} - u_{i,t+1} = v_{i,t+1} - v_{i,t} \quad (۶)$$

رابطه (۷) نیز نشان دهنده انرژی مانده در ساعت t ام در سیستم ذخیره‌ساز i ام می‌باشد، که به صورت زیر تعریف شده است.

$$e_{i,t+1} = e_{i,t} + p_{i,t}^{cha} \times \eta_i - p_{i,t}^{dis} \times 1/\eta_i \quad (۷)$$

در رابطه (۷) $e_{i,t}$ برابر انرژی مانده در ذخیره ساز i ام در زمان t ام می‌باشد. رابطه (۸) و (۹) به ترتیب نشان‌دهنده محدودیت توان شارژ و دشارژ سیستم‌های ذخیره‌ساز را نشان می‌دهد، که $z_{i,t}$ برابر متغیر باینری نشان‌دهنده وضعیت شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز است، که اگر ۱ باشد نشان از شارژ باتری خواهد بود، $\overline{p}_{i,t}^{cha}$ برابر حداکثر توان شارژ و $\overline{p}_{i,t}^{dis}$ برابر حداکثر توان دشارژ می‌باشد.

$$0 \le p_{i,t}^{cha} \le \overline{p}_{i,t}^{cha} z_{i,t} \quad (۸)$$

$$0 \le p_{i,t}^{dis} \le \overline{p}_{i,t}^{dis}(1 - z_{i,t}) \quad (۹)$$

رابطه (۱۰) نشان دهنده محدودیت رزرو در نظر گرفته شده می‌باشد، که به صورت زیر تعریف می‌شود، همچنین r_t برابر مقدار رزرو بار در نظر گرفته شده در ساعت t ام می‌باشد.

$$\sum_{i\in N}\sum_{t\in T} g_{i,t}^{max} - g_{i,t} \ge r_t \quad (۱۰)$$

رابطه (۱۱) نشان‌دهنده قید تعادل توان در سیستم را نشان می‌دهد، که می‌بایست توان‌های تولیدی در شبکه برابر توان مصرفی باشد، که در اینجا، توان واحدها و توان دشارژ سیستم ذخیره‌ساز به عنوان توان تولیدی و بار سیستم و توان شارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی به عنوان توان مصرفی می‌باشد، در این رابطه p_t^d برابر توان بار سیستم در ساعت t ام می‌باشد.

$$\sum_{i\in N} g_{i,t} + \sum_{i\in M} p_{i,t}^{dis} = p_t^{dsm} + p_{i,t}^{dis} \quad (۱۱)$$

برنامه پاسخگویی بار در نظر گرفته شده به صورت روابط (۱۲) الی (۱۴) در نظر گرفته شده است.

$$\beta_t = \sigma p_t^d \quad (۱۲)$$

$$p_t^d - \beta_t \le p_t^{dsm} \le p_t^d + \beta_t \quad (۱۳)$$

$$\sum_{t\in T} p_t^{dsm} = \sum_{t\in T} p_t^d \quad (۱۴)$$

در رابطه (۱۲) σ برابر مقدار درصدی است که می‌بایست در برنامه پاسخگویی بار شیفت داده شود، p_t^d برابر بار در ساعت t ام می‌باشد و β_t برابر مقدار توانی است که از ساعت t ام قرار است شیفت داده شود. رابطه (۱۳) نشان می‌دهد که شیفت بار و یا تغییرات بار p_t^{dsm} باید بین اختلاف حداقل و حداکثر مقدار مجاز در نظر گرفته شده باشد و در نهایت رابطه (۱۴) تضمین می‌کند تا مجموع بار های تغییریافته در پاسخگویی بار برابر مجموع بارهای اولیه سیستم باشد، یا به عبارتی دیگر در پاسخگویی بار باری حذف نگردد که بخواهیم هزینه آن را در تابع هدف اضافه کنیم.

۲-۳- روش حل مسئله

در این بخش روش حل مسئله ارائه شده است. همانطور که در بخش تابع هدف و قیود مسئله ارائه شد، مدل پیشنهاد شده برای حل مسئله UC یک مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح (MILP) می‌باشد. به طور کلی حل یک مسئله بهینه‌سازی به فرم زیر خواهد بود.

$$\min f(x) \quad (۱۵)$$

$$s.t \quad A.x \le b \quad (۱۶)$$

$$Aeq.x = beq \quad (۱۷)$$

$$lb \le x \le ub \quad (۱۸)$$

$$x = integer \quad (۱۹)$$

لذا اگر مسئله بهینه‌سازی به فرم مسئله (۱۵) الی (۱۹) تبدیل گردد به شرطی که تابع f خطی و متغیر x از نوع باینری و پیوسته باشد با شرط قیود برابری و نابرابری می‌توان مسئله را با استفاده از نرم‌افزار های قدرتمند ریاضی که اخیرا توسط ریاضیدانان بزرگ ارائه شده است حل نمود و تضمین بخشید که جواب های بدست آمده بهینه سراسری خواهد بود. در این مقاله نیز حل مسئله MILP پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و حل‌کننده *Gurobi* انجام شده است. در این بخش به ارائه مدل‌سازی‌های مربوط به مسئله مانند، پخش‌بار، قیود و توابع هدف مسئله به همراه روش حل پیشنهادی پرداخته شد، در بخش سوم سیستم مورد مطالعه و همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی ارائه می‌شود.

۳- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است، بدین منظور دو سیستم متفاوت ۴ و ۱۰ واحدی برای تجزیه و تحلیل انتخاب شده است. که در بخش‌های جداگانه معرفی و ارائه شده است. همانطور که بیان گردید، پیاده‌سازی مدل بر روی MATLAB ورژن ۲۰۱۴ توسط حل‌کننده Gurobi ورژن ۹.۰.۲ و کامپیوتر رومیزی با پردازنده ۲.۲ گیگاهرتز و حافظه رم ۶ گیگابایت انجام شده است.

۳-۱- سیستم چهار واحدی

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم چهار واحدی ارائه می‌شود. در این سیستم چهار واحد ژنراتوری به همراه یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی در نظر گرفته شده است. جدول (۱) نشان‌دهنده پارامترهای مربوط به واحدهای تولیدی و جدول (۲) پارامتر های سیستم ذخیره‌ساز انرژی را نشان می‌دهد (Zhao and et al. 2018).

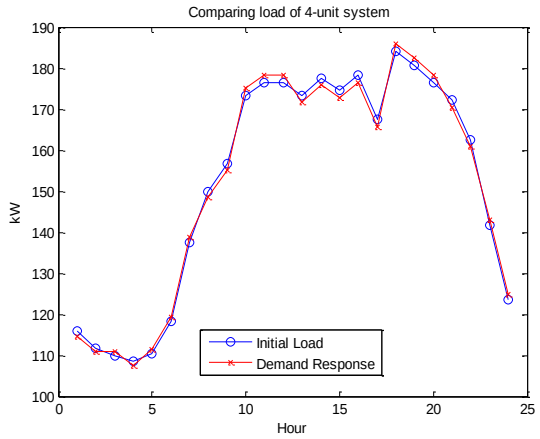
جدول (۱): پارامترهای واحدهای ژنراتوری

	واحد۱	واحد ۲	واحد ۳	واحد ۴
حداقل توان (kW)	۷۵	۶۰	۲۵	۲۰
حداکثر توان (kW)	۳۰۰	۲۵۰	۸۰	۶۰
شیب توان بالا (kW)	۴۰	۳۶	۳۰	۳۰
شیب توان پایین (kW)	۴۰	۳۶	۳۰	۳۰
حداقل زمان خاموشی (h)	۰	۱	۰	۱
حداقل زمان روشن (h)	۱	۰	۰	۱
هزینه ثابت ($)	۰.۰۰۲۱	۰.۰۰۴۲	۰.۰۰۱۸	۰.۰۰۳۴
	واحد۱	واحد ۲	واحد ۳	واحد ۴
هزینه متغیر ($)	۱۶.۸۳	۱۶.۹۵	۲۰.۴۷	۲۳.۶
هزینه سوخت ($)	۶۴۸.۷۴	۵۸۵.۶۲	۲۱۳	۲۵۲
هزینه راه‌اندازی ($)	۵۰۰	۱۷۰	۱۵۰	۲۳۰۰
هزینه خاموش‌سازی ($)	۱۱۰۰	۴۰۰	۳۵۰	۵۰۰۰
هزینه آلایندگی sox ($)	۰.۰۰۱	۰.۰۰۲۱	۰.۰۰۰۹	۰.۰۰۱۷
هزینه آلایندگی Nox ($)	۸.۴۱۵۰	۸.۴۷۵۰	۱۰.۳۷	۱۱.۸
هزینه آلایندگی CO_2 ($)	۳۲۴.۳۷	۲۹۲.۸۱	۱۰۶.۵	۱۲۶

جدول ۲: پارامترهای سیستم ذخیره‌ساز انرژی

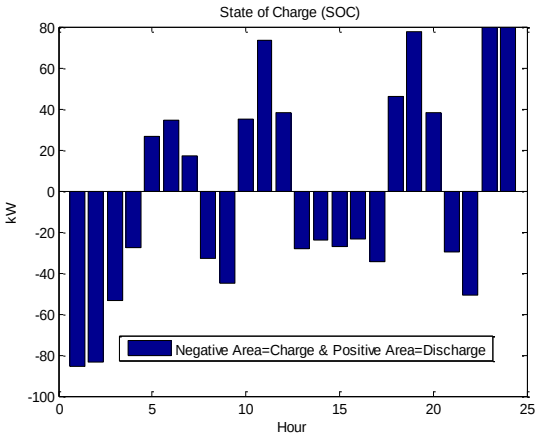
	سیستم ذخیره‌ساز
حداکثر توان شارژ (kW)	۱۰۰
حداکثر توان دشارژ (kW)	۸۰
ظرفیت (kWh)	۲۵۰
هزینه بهره‌برداری ($)	۲۰۰۰
راندمان (%)	۸۵

شکل (۱) مقایسه‌ای بین بار در حالت اولیه و پس از پاسخگویی بار در سیستم چهار واحدی را در مدت زمان ۲۴ ساعت نشان می‌دهد. مقدار شیفت بار در ساعت برابر ۱ درصد کل بار همان ساعت در نظر گرفته شده است.



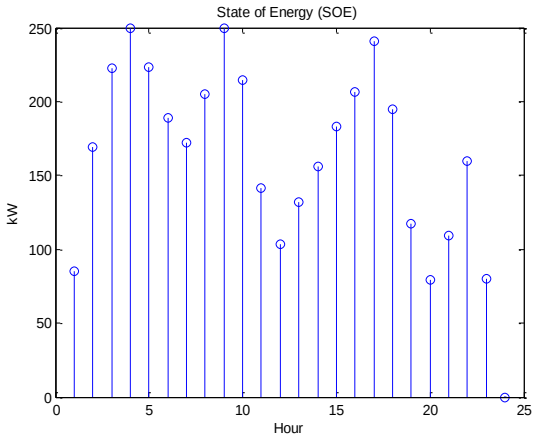
شکل (۱): مقایسه بار ۲۴ ساعته در سیستم چهار واحدی

شکل (۲) نشان‌دهنده نتایج شبیه سازی متعلق به وضعیت شارژ و دشارژ (SOC) سیستم ذخیره‌ساز انرژی در حل مسئله UC پیشنهادی می‌باشد. همانطور که از این شکل مشخص است ساعاتی که سیستم ذخیره‌ساز شارژ شده است در محور منفی y قرار دارد و زمان‌هایی که ذخیره‌ساز به سیستم توان تحویل می‌دهد یا دشارژ می‌شود در منطقه مثبت محور y نشان داده شده است.



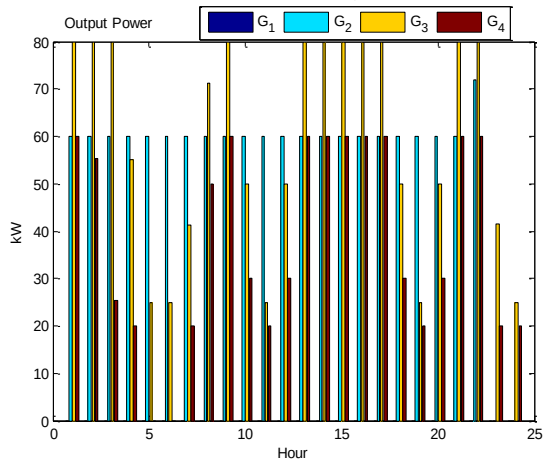
شکل (۲): وضعیت شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی در سیستم چهار واحدی

شکل (۳) نیز نشان‌دهنده وضعیت انرژی (SOE) در ذخیره‌ساز را پس از شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص است، برای نمونه تا ساعت ۴ ظرفیت انرژی مانده در ذخیره‌ساز زیاد شده است، لذا بدین معنی است که ذخیره‌ساز شارژ شده است، که این بخوبی در شکل (۲) هم پیدا است و همچنین در ساعت ۵ تا ۷ طبق شکل (۳) ظرفیت انرژی در ذخیره‌ساز کم شده است، در نتیجه بدین معنی است که ذخیره‌ساز دشارژ شده است، که این مهم بخوبی در شکل (۲) مشخص است.

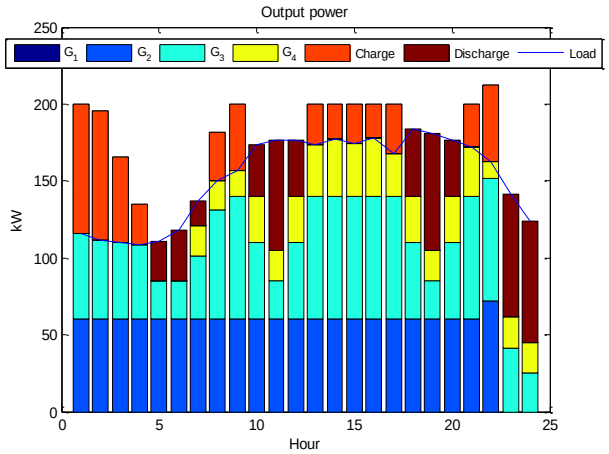


شکل (۳): وضعیت انرژی در سیستم ذخیره‌ساز در سیستم چهار واحدی

شکل (۴) نیز نشان‌دهنده توان خروجی بهینه واحدهای تولیدی در ۲۴ ساعت پیشرو را نشان می‌دهد. در این شکل بخوبی مشخص است که هر واحد در هر ساعت می‌بایست چه میزان را تولید نموده که هم بار شبکه تامین گردد و همچنین کمترین مقدار تابع هدف بدست آید. شکل (۵) نیز تمام متغیرهای توان موجود در سیستم را نشان می‌دهد، در این شکل توان واحدهای تولیدی، توان شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی و همچنین توان بار شبکه در مدت ۲۴ ساعت پس از اجرا شبیه‌سازی در سیستم چهار واحدی نشان داده شده است.



شکل (۴): توان خروجی واحدهای تولیدی در سیستم چهار واحدی



شکل (۵): توان خروجی واحدهای تولید به همراه بار و شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز در سیستم چهار واحدی

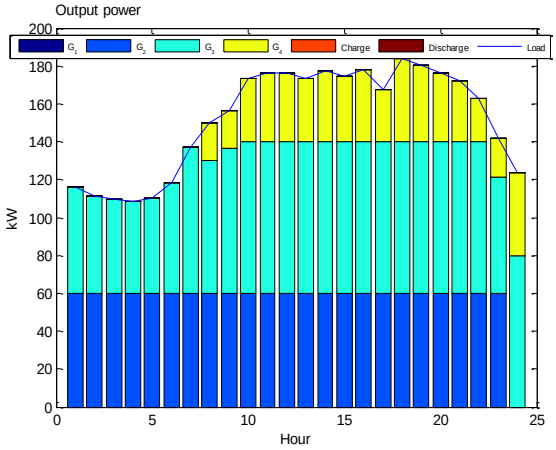
جدول (۳) نشان‌دهنده تابع چند هدف مسئله برای ۲۴ ساعت پیشرو می‌باشد، در این جدول تاثیر وجود سیستم ذخیره‌ساز انرژی در تابع هدف مسئله بخوبی نشان داده شده است. طبق این جدول مشاهده می‌شود که تابع هزینه در حالت با سیستم ذخیره‌ساز و پاسخگویی بار برابر ۱۷۲۷۳۱۰ دلار و تنها سیستم ذخیره‌ساز برابر ۱۷۳۷۵۰۰ دلار و در حالتی که ذخیره‌ساز در نظر گرفته نشود و پاسخگویی بار هم نباشد برابر ۲۰۸۳۳۴۰ دلار شده است، که این نشان می‌دهد در حدود ۱۷ درصد هزینه تابع هدف کل در حالت سیستم ذخیره‌ساز و پاسخگویی بار نسبت به حالت اولیه سیستم بهبود پیدا کرده است، که نشان دهنده تاثیر بسزای ذخیره‌ساز و پاسخگویی بار در شبکه هوشمند می‌باشد. شکل (۶) نتایج خروجی توان را بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز نشان می‌دهد. جدول (۴) نشان‌دهنده توان واحدهای تولیدی، توان شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز به همراه مقدار تابع هدف را نشان می‌دهد. برای نمونه در ساعت ۱ که بار شبکه ۱۱۵.۸ کیلووات می‌باشد، واحد ۱ خاموش است، واحد ۲، ۳ و ۴ به ترتیب مقدار ۶۰، ۸۰ و ۶۰ کیلووات را تولید می‌کنند، همچنین باتری به مقدار ۸۴.۲ کیلووات شارژ می‌شود، به همین ترتیب برای ۲۴ ساعت پیشرو مقدار بهینه هر کدام از متغیرهای تصمیم مسئله بدست آمده نشان داده شده است.

جدول (۳): نتایج شبیه‌سازی سیستم چهار واحدی

	بدون ذخیره‌ساز	با ذخیره‌ساز	با ذخیره‌ساز و پاسخگویی بار
تابع هدف هزینه ($)	۲۰۸۳۳۴۰	۱۷۳۷۵۰۰	۱۷۲۷۳۱۰

جدول (۴): نتایج شبیه‌سازی سیستم چهار واحدی

ساعت	بار (kW)	واحد ۱ (kW)	واحد ۲ (kW)	واحد ۳ (kW)	واحد ۴ (kW)	شارژ (kW)	دشارژ (kW)
1	115.8	0	60	80	60	84.2	0
2	111.6	0	60	80	55.4	83.8	0
3	109.8	0	60	80	25.4	55.6	0
4	108.6	0	60	55	20	26.4	0
5	110.4	0	60	25	0	0	25.4
6	118.2	0	60	25	0	0	33.2
7	137.4	0	60	41.3	20	0	16.1
8	150	0	60	71.3	50	31.3	0
9	156.6	0	60	80	60	43.4	0
10	173.4	0	60	50	30	0	33.4
11	176.4	0	60	25	20	0	71.4
12	176.4	0	60	50	30	0	36.4
13	173.4	0	60	80	60	26.6	0
14	177.6	0	60	80	60	22.4	0
15	174.6	0	60	80	60	25.4	0
16	178.2	0	60	80	60	21.8	0
17	167.4	0	60	80	60	32.6	0
18	184.2	0	60	50	30	0	44.2
19	180.6	0	60	25	20	0	75.6
20	176.4	0	60	50	30	0	36.4
21	172.2	0	60	80	60	27.8	0
22	162.6	0	72	80	60	49.4	0
23	141.6	0	0	41.6	20	0	80
24	123.6	0	0	25	20	0	78.6



شکل (۶): توان خروجی واحدها بدون در نظر گرفتن سیستم ذخیره-ساز انرژی در سیستم چهار واحدی

۲-۳- سیستم ده واحدی

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم ۱۰ واحدی ارائه می-شود. در این سیستم ۱۰ واحد ژنراتوری به همراه یک سیستم ذخیره-ساز انرژی در نظر گرفته شده است. جدول (۵) پارامتر های سیستم ذخیره‌ساز انرژی را نشان می‌دهد و جدول (۶) نشان‌دهنده پارامترهای مربوط به واحدهای تولیدی می‌باشد (Zhao and et al. 2018).

جدول ۵: پارامترهای سیستم ذخیره‌ساز انرژی

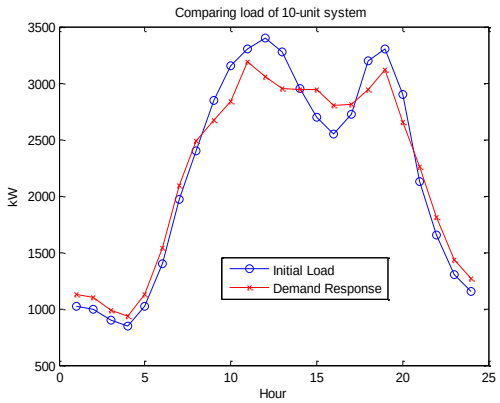
	سیستم ذخیره‌ساز
حداکثر توان شارژ (kW)	۳۰۰
حداکثر توان دشارژ (kW)	۲۸۰
ظرفیت (kWh)	۷۵۰
هزینه بهره‌برداری ($)	۲۰۰۰
راندمان (%)	۸۵

جدول ۶: پارامترهای واحدهای ژنراتوری

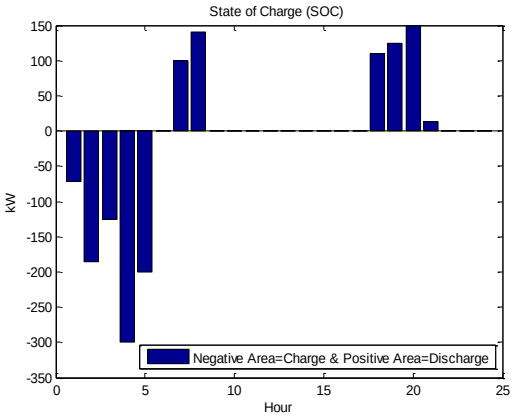
	واحد۱	واحد ۲	واحد ۳	واحد ۴	واحد ۵
حداقل توان (kW)	۳۰	۱۳۰	۱۶۵	۱۳۰	۲۲۵
حداکثر توان (kW)	۱۰۰	۴۰۰	۶۰۰	۴۲۰	۷۰۰
شیب توان بالا (kW)	۳۰	۱۳۰	۱۶۵	۱۳۰	۲۲۵
شیب توان پایین (kW)	۳۰	۱۳۰	۱۶۵	۱۳۰	۲۲۵
حداقل زمان خاموشی (h)	۱	۰	۱	۱	۰
حداقل زمان روشن (h)	۱	۱	۱	۱	۱
هزینه ثابت ($)	۰.۰۰۱۱۳	۰.۰۰۱۶	۰.۰۰۱۴۷	۰.۰۰۱۵	۰.۰۰۲۳۴
	واحد ۶	**واحد ۷**	**واحد ۸**	**واحد ۹**	**واحد ۱۰**
حداقل توان (kW)	۵۰	۲۵۰	۱۱۰	۲۷۵	۷۵
حداکثر توان (kW)	۲۰۰	۷۵۰	۳۷۵	۸۵۰	۲۵۰
شیب توان بالا (kW)	۵۰	۲۵۰	۱۱۰	۷۵	۲۵۰
شیب توان پایین (kW)	۵۰	۲۵۰	۱۱۰	۲۷۵	۷۵
حداقل زمان خاموشی (h)	۰	۱	۰	۰	۱
حداقل زمان روشن (h)	۱	۱	۱	۱	۱
هزینه ثابت ($)	۰.۰۰۵۱۵	۰.۰۰۱۳۱	۰.۰۰۱۷۱	۰.۰۰۱۲۸	۰.۰۰۴۵۲
	واحد۱	**واحد ۲**	**واحد ۳**	**واحد ۴**	**واحد ۵**
هزینه متغیر ($)	۹.۰۲۳	۷.۶۵۴	۸.۷۵۲	۸.۴۳۱	۹.۲۲۳
هزینه سوخت ($)	۸۲۰	۴۰۰	۶۰۰	۴۲۰	۵۴۰
هزینه راه‌اندازی ($)	۲۰۵۰	۱۴۶۰	۲۱۰۰	۱۴۸۰	۲۱۰۰
هزینه خاموش‌سازی ($)	۱۰۲۰	۷۳۰	۱۰۵۰	۷۴۰	۱۰۵۰
هزینه آلایندگی sox ($)	۰.۰۰۱	۰.۰۰۲۱	۰.۰۰۰۹	۰.۰۰۱۷	۰.۰۰۱
هزینه آلایندگی Nox ($)	۸.۴۱۵۰	۸.۴۷۵۰	۱۰.۳۷	۱۱.۸	۱۴.۱۲
هزینه آلایندگی CO_2 ($)	۳۲۴.۳۷	۲۹۲.۸۱	۱۰۶.۵	۱۲۶	۱۹۸
	واحد ۶	**واحد ۷**	**واحد ۸**	**واحد ۹**	**واحد ۱۰**
هزینه متغیر ($)	۷.۰۵۴	۹.۱۲۱	۷.۷۶۲	۸.۱۶۲	۸.۱۴۹
هزینه سوخت ($)	۱۷۵	۶۰۰	۴۰۰	۷۲۵	۲۰۰
هزینه راه‌اندازی ($)	۱۳۶۰	۲۳۰۰	۱۳۷۰	۲۲۰۰	۱۱۸۰
هزینه خاموش‌سازی ($)	۶۸۰	۱۱۵۰	۶۸۵	۱۱۰	۵۴۰
هزینه آلایندگی sox ($)	۰.۰۰۱	۰.۰۰۲۱	۰.۰۰۰۹	۰.۰۰۱۷	۰.۰۰۱
هزینه آلایندگی Nox ($)	۸.۴۱۵۰	۸.۴۷۵۰	۱۰.۳۷	۱۱.۸	۱۴.۱۲
هزینه آلایندگی CO_2 ($)	۳۲۴.۳۷	۲۹۲.۸۱	۱۰۶.۵	۱۲۶	۱۹۸

شکل (۷) مقیسه بار سیستم ده واحدی را در مدت زمان ۲۴ ساعت در حالت اولیه و پس از اجرای پاسخگویی بار نشان می‌دهد. در این شکل مشخص است که پیک بار متعلق به ساعت ۱۲ می‌با شد و ساعت ۴ کمترین بار در سیستم پیشنهادی می‌باشد، که پس از پا سخگویی بار

پیک بار در ساعات ۱۲ و ۱۹ کاهش پیدا کرده است. شکل (۸) نشان‌دهنده نتایج شبیه‌سازی متعلق به وضعیت شارژ و دشارژ (SOC) سیستم ذخیره‌ساز انرژی در حل مسئله UC پیشنهادی می‌باشد. همانطور که از این شکل مشخص است ساعاتی که سیستم ذخیره ساز شارژ شده است در محور منفی y قرار دارد و زمان‌هایی که ذخیره ساز به سیستم توان تحویل می‌دهد یا دشارژ می شود در منطقه مثبت محور y نشان داده شده است.

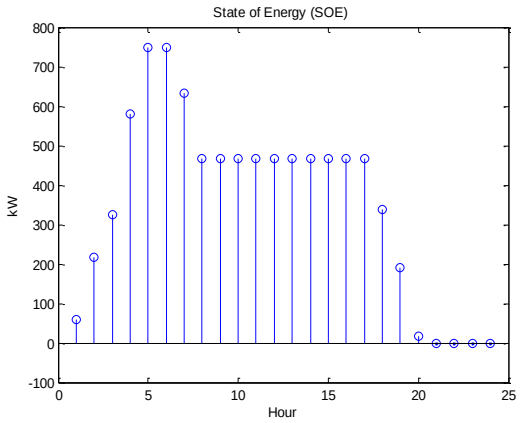


شکل (۷): مقایسه بار ۲۴ ساعته در سیستم ده واحدی

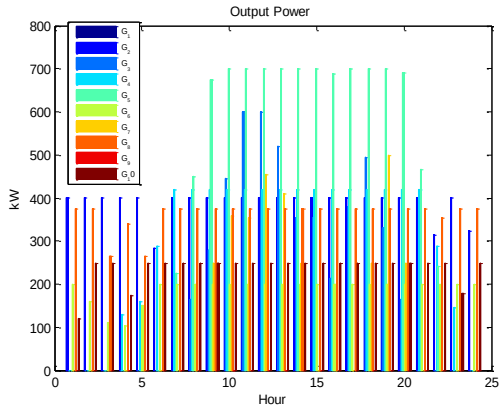


شکل (۸): وضعیت شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی در سیستم ده واحدی

شکل (۹) نیز نشان‌دهنده وضعیت انرژی (SOE) در ذخیره‌ساز را پس از شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص است، برای نمونه تا ساعت ۵ ظرفیت انرژی مانده در ذخیره ساز زیاد شده است، لذا بدین معنی است که ذخیره‌ساز شارژ شده است، که این بخوبی در شکل (۸) هم پیدا است و همچنین در ساعت ۷ تا ۲۴ طبق شکل (۹) ظرفیت انرژی در ذخیره‌ساز کم شده است، در نتیجه بدین معنی است که ذخیره‌ساز دشارژ شده است، که این مهم بخوبی در شکل (۸) مشخص است. شکل (۱۰) نیز نشان‌دهنده توان خروجی بهینه واحدهای تولیدی در ۲۴ ساعت پیشرو را نشان می‌دهد. در این شکل بخوبی مشخص است که هر واحد در هر ساعت می‌بایست چه میزان را تولید نموده که هم بار شبکه تامین گردد و همچنین کمترین مقدار تابع هدف بدست آید. شکل (۱۱) نیز تمام متغیر های توان موجود در سیستم را نشان می‌دهد، در این شکل توان واحدهای تولیدی، توان شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی و همچنین توان بار شبکه در مدت ۲۴ ساعت پس از اجرا شبیه سازی در سیستم ده واحدی نشان داده شده است.

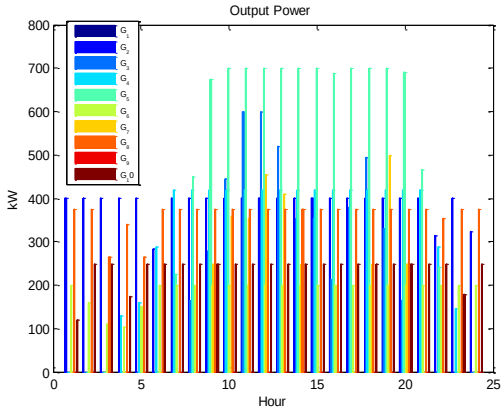


شکل (۹): وضعیت انرژی در سیستم ذخیره‌ساز در سیستم ده واحدی



شکل (۱۰): توان خروجی واحدهای تولیدی در سیستم ده واحدی

جدول (۷) نشان‌دهنده توان واحدهای تولیدی، توان شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز به همراه مقدار تابع هدف را نشان می‌دهد. برای نمونه در ساعت ۱ که بار شبکه ۱۰۲۵ کیلووات می‌باشد، واحد ۱ خاموش است، واحد ۲، ۳ و ۴ به ترتیب مقدار ۴۰۰، ۰ و ۰ کیلووات را تولید می‌کنند، همچنین باتری به مقدار ۷۱ کیلووات شارژ می‌شود، به همین ترتیب برای ۲۴ ساعت پیشرو مقدار بهینه هر کدام از متغیر های تصمیم مسئله بدست آمده نشان داده شده است.



شکل (۱۱): توان خروجی واحدهای تولید به همراه بار و شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز در سیستم ده واحدی

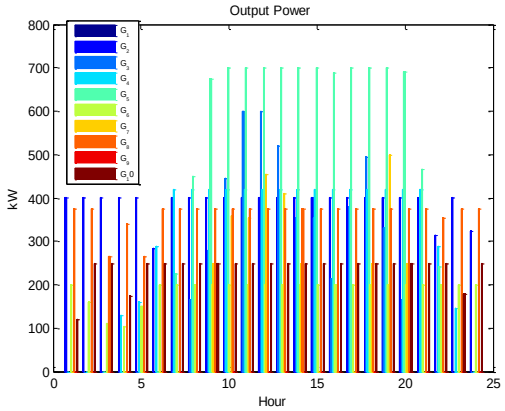
جدول ۷: نتایج شبیه‌سازی سیستم چهار واحدی

ساعت	بار (kW)	واحد ۱ (kW)	واحد ۲ (kW)	واحد ۳ (kW)	واحد ۴ (kW)	واحد ۵ (kW)	واحد ۶ (kW)	واحد ۷ (kW)	واحد ۸ (kW)	واحد ۹ (kW)	واحد ۱۰ (kW)	شارژ (kW)	دشارژ (kW)
1	1025	0	400	0	0	0	200	0	375	0	121	71	0
2	1000	0	400	0	0	0	160	0	375	0	250	185	0
3	900	0	400	0	0	0	110	0	265	0	250	125	0
4	850	0	400	0	130	0	103	0	341	0	175	300	0
5	1025	0	400	0	160	0	150	0	265	0	250	200	0
6	1400	0	284	0	290	0	200	0	375	0	250	0	0
7	1970	0	400	0	420	225	200	0	375	0	250	0	90
8	2400	0	400	165	420	450	200	0	375	0	250	0	140
9	2850	0	400	279	420	675	200	249	375	0	250	0	0
10	3150	0	400	444	420	700	200	359	375	0	250	0	0
11	3300	0	400	600	420	700	200	354	375	0	250	0	0
12	3400	0	400	600	420	700	200	454	375	0	250	0	0
13	3275	0	400	519	420	700	200	410	375	0	250	0	0
14	2950	0	400	354	420	700	200	250	375	0	250	0	0
15	2700	0	400	354	420	700	200	0	375	0	250	0	0
16	2550	0	400	214	420	690	200	0	375	0	250	0	0
17	2725	0	400	379	420	700	200	0	375	0	250	0	0
18	3200	0	400	495	420	700	200	250	375	0	250	0	110
19	3300	0	400	330	420	700	200	500	375	0	250	0	125
20	2900	0	400	165	420	691	200	250	375	0	250	0	149
21	2125	0	400	0	420	466	200	0	375	0	250	0	14
22	1650	0	314	0	290	241	200	0	353	0	250	0	0
23	1300	0	400	0	146	0	200	0	375	0	178	0	0
24	1150	0	324	0	0	0	200	0	375	0	250	0	0

جدول (۸) نشان‌دهنده تابع چند هدف مسئله برای ۲۴ ساعت پیـ شرو می‌باشد، در این جدول تاثیر وجود سیستم ذخیره ساز ا نرژی در تابع هدف مسئله بخوبی نشان داده شده است. طبق ا ین جدول م شاهده می‌شود که تابع هزینه در حالت با سیستم ذخیره‌ساز و پاسخگویی بار برابر ۳۳۸۰۳۱۰۰ دلار و تنها سی ستم ذخ یره ساز برا بر ۳۴۰۹۵۰۰۰ دلار و در حالتی که ذخیره‌ساز در نظر گرف ته ن شود ۳۴۱۸۶۰۰۰ دلار شده است، که این نشان می‌دهد در حدود ۳۸۲۹۰۰ هزار دلار هزی نه تابع هدف کل کاهش پیدا کرده است، که نشان ده نده تاثیر ب سزای ذخیره‌ساز و پاسخگویی بار در شبکه هوشمند را نشان می‌د هد. شکل (۱۲) نتایج خروجی توان را بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز نشان می‌دهد.

جدول ۸: نتایج شبیه‌سازی سیستم چهار واحدی

	با ذخیره‌ساز و پاسخگویی بار	با ذخیره‌ساز	بدون ذخیره‌ساز
تابع هدف هزینه ($)	۳۳۸۰۳۱۰۰	۳۴۰۹۵۰۰۰	۳۴۱۸۶۰۰۰



شکل (۱۲): توان خروجی واحدها بدون در نظر گرفتن سیستم ذخیره‌ساز انرژی در سیستم ده واحدی

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله حل مسئله مشارکت واحدها در شبکه‌های هوشمند با در نظر گرفتن کاهش هزینه‌های اقتصادی، کاهش مسائل زیست محیـ طی مدل‌سازی و پیشنهاد شد. در این مطالعه حل م سئله UC در شبکه‌های هوشمند با مدل سازی یک تابع چ ند هد فه و در ن ظر گرفتن سیستم ذخیره‌ساز انرژی (ESS) و مسئله پاسخگویی بار ارائه شد. مدل انتخاب شده یک مدل برنا مه‌ر یزی خ طی آمیخ ته با عدد صحیح (MILP) بود، که به من ظور صحت سنجی عملـ کرد مدل و روش پیشنهادی دو سیستم چهار و ده واحدی به ه مراه م نابع ذخ یره ساز آزمایش شد، که نتایج ن شان از عملـ کرد مط لوب مدل پیـ شنهادی را نشان داد.

مراجع

S. Saranya, B. Saravanan,(2020)" Effect of emission in SMES based unit commitment using modified Henry gas solubility optimization", Journal of Energy Storage, Volume 29, 101380.

Junkai Liang, Wenyuan Tang, (2020) "Interval based transmission contingency-constrained unit commitment for integrated energy systems with high renewable penetration", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 119, 105853.

Dimbalita Deka, Dilip Datta, (2019) "Optimization of unit commitment problem with ramp-rate constraint and wrap-around scheduling", Electric Power Systems Research, Volume 177, 105948.

Linfeng Yang, Wei Li, Guo Chen, Beihua Fang, Chunming Tang, (2020) "A quick center-point algorithm for unit commitment with carbon emission trading," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 120, 105996.

Shuang Yuan, Chaohua Dai, Ai Guo, Weirong Chen, (2019) "A novel multi-objective robust optimization model for unit commitment considering peak load regulation ability and temporal correlation of wind powers," Electric Power Systems Research, Volume 169, Pages 115-123.

Jatinder Singh Dhaliwal, J.S. Dhillon, (2019)" Profit based unit commitment using memetic binary differential evolution algorithm," Applied Soft Computing, Volume 81, 105502.

Ying Wang, Zhile Yang, Monjur Mourshed, Yuanjun Guo, Qun Niu, Xiaodong Zhu, (2019) "Demand side management of plug-in electric vehicles and coordinated unit commitment: A novel parallel competitive swarm optimization method," Energy Conversion and Management, Volume 196, Pages 935-949.

Himanshu Anand, Nitin Narang, J.S. Dhillon, (2019) "Multi-objective combined heat and power unit commitment using particle swarm optimization," Energy, Volume 172, Pages 794-807.

Lázaro Alvarado-Barrios, Álvaro Rodríguez del Nozal, Juan Boza Valerino, Ignacio García Vera, Jose L. Martínez-Ramos, (2020) "Stochastic unit commitment in microgrids: Influence of the load forecasting error and the availability of energy storage," Renewable Energy, Volume 146, Pages 2060-2069.

Hamid Reza Nikzad, Hamdi Abdi, (2020) "A robust unit commitment based on GA-PL strategy by applying TOAT and considering emission costs and energy storage systems," Electric Power Systems Research, Volume 180, 106154.

Lokesh Kumar Panwar, Srikanth Reddy K, Ashu Verma, B.K. Panigrahi, Rajesh Kumar, (2018) "Binary Grey Wolf Optimizer for large scale unit commitment problem," Swarm and Evolutionary Computation, Volume 38, Pages 251-266.

Fatemeh Barani, Mina Mirhosseini, Hossein Nezamabadi-pour, Malihe M. Farsangi, (2017) "Unit commitment by an improved binary quantum GSA," Applied Soft Computing, Volume 60, Pages 180-189.

Masahiro Furukakoi, Oludamilare Bode Adewuyi, Hidehito Matayoshi, Abdul Motin Howlader, Tomonobu Senjyu, (2018) "Multi objective unit commitment with voltage stability and PV uncertainty," Applied Energy, Volume 228, Pages 618-623.

Mohammad Javad Feizollahi, Mitch Costley, Shabbir Ahmed, Santiago Grijalva, (2015) "Large-scale decentralized unit commitment," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 73, Pages 97-106.

Jia Li, Feng Liu, Zuyi Li, Shengwei Mei, Guangyu He, (2018) "Impacts and benefits of UPFC to wind power integration in unit commitment," Renewable Energy, Volume 116, Part A, Pages 570-583.

Seyed Masoud Moghaddas Tafreshi, Hassan Ranjbarzadeh, Mehdi Jafari, Hamid Khayyam, (2016) "A probabilistic unit commitment model for optimal operation of plug-in electric vehicles in microgrid," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 66, Pages 934-947.

J. Zhao, S. Liu, M. Zhou, X. Guo and L. Qi, (2018) "An Improved Binary Cuckoo Search Algorithm for Solving Unit Commitment Problems: Methodological Description," IEEE Access, vol. 6, pp. 43535-43545.