

استراتژی قیمت‌گذاری استاتیکی بر پایه مفهوم انرژی انتقالی در سیستم‌های چند-ریزشبکه‌ای خانگی با استفاده از روش تئوری بازی غیرهمکارانه

معصومه جوادی^{۱، ۲}، کارشناسی ارشد؛ سیده سمانه قاضی‌میرسعید^۳، دانشجوی دکتری؛ موسی مرزبند^۴، استادیار

۱- گروه مهندسی برق- قدرت، پردیس علوم و تحقیقات گیلان، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران- javadi.masoomeh@gmail.com

۲- گروه مهندسی برق- قدرت، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران

۳- دانشگاه سالفورد، سالفورد، منچستر، انگلستان- s.s.ghazimirsaeid@edu.salford.ac.uk

۴- گروه مهندسی برق- قدرت، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران- mousa.marzband@liau.ac.ir

چکیده: به منظور استفاده هرچه بیشتر منابع انرژی غیرقابل کنترل توزیع شده و نیز افزایش مشارکت سمت تقاضا در بهره‌برداری سیستم قدرت ضمن حفظ تعادل مابین عرضه‌ی محلی و تقاضای بار، مفهوم انرژی انتقالی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله، مدل ابتکاری با هدف مدیریت بهینه انرژی انتقالی بر پایه پاسخ‌گویی بار به همراه استراتژی هوشمند قیمت‌گذاری استاتیکی منابع تولید و مصرف با استفاده از قابلیت الگوریتم رهاسازی و تابع نیکایدو-ایزودا در سیستم‌های چند-ریزشبکه‌ای خانگی در بازار خرده‌فروشی برق ارائه شده است. در ساختار پیشنهادی، ریزشبکه‌های خانگی متشکل از منابع انرژی توزیع شده، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و بارهای پاسخ‌گو به اشتراک و انتقال انرژی با ریزشبکه‌های همسایه و شرکت‌های خرده‌فروشی برق با هدف دستیابی به سود بیشتر و تأمین تقاضای بار داخلی خود می‌پردازند. علاوه بر این، از طریق الگوریتم پیشنهادی مصرف‌کنندگان با هدف حداقل‌سازی قیمت تسویه بازار و تولیدکنندگان با هدف حداکثرسازی سود در رسیدن به نقطه تعادل نش با یکدیگر همکاری می‌نمایند. به طوری که بر پایه این روش چندهدفه و با احتساب پارامترهای عدم قطعیت مرتبط با منابع غیرقابل کنترل، تقاضای بار و قیمت برق، میزان توان و قیمت بهینه مشارکت بازیگران در بازار جهت دستیابی به اهداف مذکور و نیز مقدار سود کسب شده توسط آن‌ها تعیین می‌شود. نتایج شبیه‌سازی موید قابلیت الگوریتم پیشنهادی در تشویق بازیگران برای مشارکت بیشتر و بهبود سود حاصله توسط آن‌ها می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ریزشبکه‌ی خانگی، مدیریت بهینه‌ی انرژی انتقالی، بازار خرده‌فروشی برق، تئوری بازی غیرهمکارانه، مدیریت سمت تقاضا، تابع نیکایدو-ایزودا و الگوریتم رهاسازی، تعادل نش، عدم قطعیت، استراتژی قیمت‌گذاری استاتیکی.

Static Bidding Strategy based on Transactive Energy Concept in Multiple Home Microgrid Systems by Using Non-Cooperative Game Theory Approach

Masoumeh Javadi^{1,2}, MSc; Seyedeh Samaneh Ghazimirsaeid³, PhD student; Mousa Marzband⁴, Assistant professor

1- Dep. of Electrical Power Engineering, Guilan Science and Research Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran

2- Dep. of Electrical Power Engineering, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran, Email: javadi.masoomeh@gmail.com

3- School of the Built Environment, University of Salford, 4th Floor, Maxwell Building Room 712 (THINKlab), Salford M5 4WT, Manchester, United Kingdom, Email: s.s.ghazimirsaeid@edu.salford.ac.uk

4- Dept. of Electrical Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran, Email: mousa.marzband@liau.ac.ir

Abstract: With the intense exploitation and expansion of distributed uncontrollable energy resources along with increasing demand side participation in modern distribution power systems and networks, the Transactive energy (TE) management framework has emerged as a topic of keen interest, in particular, addressing the concept of maintaining equilibrium state of system between the local power supply and load demand. In this paper, an innovative model is devised within an optimal framework of Transactive energy management based on load responsiveness in multi-functional home Microgrids in an electricity retail market, along with the smart static bidding strategy for the production and consumption resources by using the ability of relaxation algorithm based Nikaido-Isoda functional theory. In the proposed implementation, home Microgrids which consists of variable nature distributed energy resources, energy storage systems and responsive load devices, the transfer of energy with adjacent neighbouring Microgrids and electricity retail companies, with the aim of maximizing profits and sustaining internal load demand, is studied. Furthermore, the consumers would be able to cooperate with each other using the proposed algorithm in order to minimize market clearing price while maximizing their profit by reaching to the Nash equilibrium. Based on this multi-functional method that takes into account the functional objectives of uncertainty parameters related to uncontrollable energy resources, the load demand and electricity price, the amount of delivered power and optimum price of participating players in the market, the overall profit is determined. The simulation results highlights the effectiveness of the proposed algorithm as a global system of practice which can be used to progressively engage players for active participation and simultaneously improving the profits for home-type Microgrids.

Keywords: Home microgrid, optimal transactive energy management, retail electricity market, non-cooperative game theory, demand side management, nikaido-isoda function and relaxation algorithm, nash equilibrium, uncertainty, static bidding strategy.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۰۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۲

نام نویسنده مسئول: موسی مرزبند

نشانی نویسنده مسئول: ایران- لاهیجان- خیابان کاشف‌شرقی- انتهای خیابان شقایق- دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان- دانشکده فنی و مهندسی.

علائم اختصاری

نام کمیت	توضیحات
Dispatchable generation unit (DGU)	منابع تولید قابل کنترل
Distributed energy resource (DER)	منابع توزیع شده انرژی
Energy storage (ES)	ذخیره کننده انرژی
Energy management system (EMS)	سیستم مدیریت انرژی
Generator (GEN)	تولید کننده
Market clearing price (MCP)	قیمت تسویه بازار
Home microgrid (H-MG)	ریزشبکه‌ی خانگی
Market operator based on transactive energy (MO-TE)	اپراتور بازار بر مبنای انرژی انتقالی
Non-dispatchable unit (NDU)	منابع غیر قابل کنترل
Non-responsive load (NRL)	بار غیر پاسخگو
Prosumer (PR)	تولید کننده-مصرف کننده
Responsive load demand (RLD)	بار پاسخگو
Electricity retailer (ER)	خرده فروش برق
Nikaido-Isoda/Relaxation algorithm (NIRA)	تابع نیکایدو-ایزودا و الگوریتم رها سازی
State-of-charge (SOC)	وضعیت شارژ
System buy/sell price (SBP/SSP)	قیمت خرید/فروش سیستم
Taguchi's orthogonal array testing (TOAT)	تست آرایه متعامد تاگوچی
Transactive Energy (TE)	انرژی انتقالی
Unit commitment based on demand response (UCDR)	برنامه ریزی مشارکت واحدها بر پایه‌ی پاسخگویی بار
ER+, ER-	خرید/فروش توان توسط ER از/ به H-MG ها
RLD+, RLD-	اضافه شدن به / انتقال توان از RLD
ES+, ES-	شارژ/ دشارژ ES (باطری)
اندیس‌ها	توضیحات
n	تعداد کل H-MG ها / ER ها / DGU ها / NDU ها
j	شمارنده بازیگرها
i	شمارنده DGU ها
k	شمارنده NDU ها
مقادیر ثابت	توضیحات
Δt	بازه زمانی
N_s	تعداد سناریوهای عدم قطعیت
$\underline{SOC}^{ES,j}, \overline{SOC}^{ES,j}$	حداقل و حداکثر وضعیت شارژ ES در H-MG زام
$\underline{P}^{(\cdot),j}, \overline{P}^{(\cdot),j}$	حداقل/حداکثر توان خروجی (.) در H-MG زام (kW)
$\underline{E}^{ES,j}, \overline{E}^{ES,j}$	بازده ES در H-MG زام
$E_{Tot}^{ES,j}$	مقدار ظرفیت کل ES در H-MG زام (kWh)
k_g, k_l	ماکزیمم RLD+ / RLD- بین دو دوره‌ی متوالی برای تمامی دوره‌های زمانی (kW)
k_e, k_r	نرخ بین حداکثر RLD+ / RLD- و تقاضای ثابت NRL برای تمامی دوره‌های زمانی
توابع	توضیحات
$R_t^{(\cdot),j} / C_t^{(\cdot),j} / J_t^{(\cdot),j}$	تابع درآمد/ هزینه/ سود بازیگر زام از نوع (.) در زمان t (€)
$\mu_t^{(\cdot)}$	میانگین وزنی سناریوهای عدم قطعیت (.)
متغیرهای تصمیم‌گیری	توضیحات
$P_t^{(\cdot),j}, \pi_t^{(\cdot),j}$	توان خروجی/ پیشنهاد قیمت (.) در H-MG یا ER زام در زمان t (kW, €/kWh)
$P_{t,s}^{NDU,k,j}, \rho_{t,s}^{NDU,k,j}$	توان خروجی kام NDU در H-MG زام (kW) / احتمال وقوع آن در زمان t تحت سناریوی s
$P_{t,s}^{NRL,j}, \rho_{t,s}^{NRL,j}$	توان خروجی NRL در H-MG زام (kW) / احتمال وقوع آن در زمان t تحت سناریوی s
$\pi_{t,s}^\sigma, \rho_{t,s}^\sigma$	قیمت پیشنهادی σ (€/kWh) / احتمال وقوع آن در زمان t تحت سناریوی s
$\pi_t^{SBP,j}, \pi_t^{SSP,j}$	قیمت بهینه‌ی خرید/فروش الکتریسیته توسط ER زام از/ به H-MG ها (€/kWh)
$E_t^{ES,j}$	مقدار انرژی ذخیره شده در ES در H-MG زام در لحظه t (kWh)
$SOC_t^{ES,j}$	وضعیت شارژ ES در H-MG زام در لحظه t
$X_t^{ES+,j}$	متغیر باینری ES+ در H-MG زام در هر بازه زمانی
$X_t^{RLD-,j}, X_t^{RLD+,j}$	متغیر باینری RLD+ / RLD- در H-MG زام در هر بازه زمانی
X_t^{ER+}	متغیر باینری مجموعه ER ها در خرید توان از H-MG ها در هر بازه زمانی

۱- مقدمه

افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر و رشد prosumer (PR^۱) باعث نگرانی اپراتورهای سیستم قدرت در به خطر افتان قابلیت اطمینان و عدم توزیع مناسب هزینه‌ها شده که نیازمند ارائه مکانیزیم‌های کنترل اقتصادی و فنی جدید در تضمین بهینه‌سازی بازار و قابلیت اطمینان شبکه است. انرژی انتقالی (TE^۲) به عنوان راه‌حلی بالقوه در پاسخ‌گویی به این نگرانی‌ها مطرح می‌شود؛ چراکه به تکنیک‌های اقتصادی و کنترلی در بهبود قابلیت اطمینان شبکه و بهره‌وری اشاره دارد. این تکنیک‌ها ممکن است برای بهینه‌سازی بهره‌برداری در حد توانمندی یک مشتری هم به کار گرفته شوند. از سوی دیگر سیستم‌های TE برای مدیریت پیش‌بینی، بهینه‌سازی توزیع، تجزیه و تحلیل بهره‌برداری‌های ریزشبکه و نیز سایر خدمات به تکنیک‌های کنترلی نیازمندند. مسئله کنترل انتقالی از حیث زمان و حداقل هزینه یک مسئله محاسباتی بسیار دقیق محسوب شده و مستلزم مدیریت می‌باشد، یعنی ممکن است نیاز باشد تا کنترل‌کننده سیستم TE بسیار سریع با توجه به تصمیم‌گیری خودکار به یک راه‌حل توزیع بهینه برای ورود به بازار پاسخ دهد. بر همین اساس، هزینه‌ها و مزایای تولیدات تجدیدپذیر برای تمامی شرکت‌کنندگان در بازار با استفاده از چهارچوب انرژی انتقالی طبقه‌بندی شده است [۱]. از طرفی با خصوصی‌سازی سیستم قدرت و به منظور بهبود بهره‌وری، کاهش قیمت برق، افزایش قابلیت اطمینان و ایجاد تنوع در بازار رقابتی، ساختار بازار خرده‌فروشی آزاد با الگوی چند خریدار و چند فروشنده از اهمیت خاصی برخوردار بوده بطوریکه نیازمند اصلاح استراتژی‌های رقابتی و مکانیزیم‌های بهره‌برداری علی‌الخصوص در سمت تقاضا می‌باشد و مستلزم توسعه یک سیستم تجارت کارآمد است. از این رو، مقالات بسیاری برای مطالعه رفتار و استراتژی عوامل شرکت‌کننده در بازار خرده‌فروشی الکتریسیته ارائه شده است [۷-۲]. در [۳] از طریق تکنولوژی شبکه‌های پتری رنگی و در [۷-۴] نیز از طریق روش‌های تئوری بازی با استفاده از روش الگوریتم رهاسازی و تابع نیکایدو-ایزودا (NIRA^۳)، ارزش شیلی و مدل کارنو به مدل‌سازی ارتباطات و هماهنگی عوامل بازار پرداخته شده؛ بطوریکه از لحاظ متدولوژی پیاده‌سازی شده، شبکه تحت مطالعه، کاربرد و نوع مدل بازار، متفاوت با ساختار ارائه شده در این مقاله است. با توجه به اهمیت بهینه‌سازی همزمان منافع تمامی شرکت‌کنندگان، طراحی سیستم چند-ریزشبکه‌ای از حیث طراحی بازار برق و توزیع توان به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه در [۸] با استفاده از راه‌حل بهینه‌سازی پارتو و در [۹] از طریق طرح تصمیم‌گیری سلسله مراتبی با استفاده از مدل بازی استکلبرگ ارائه شده است. در مقایسه با ساختار پیشنهادی در این مقاله، ساختار ارائه شده در [۹] تنها شامل دو دسته بازیگر متشکل از ریزشبکه‌های فروشنده به عنوان رهبر و ریزشبکه‌های خریدار به عنوان پیرو می‌باشد. انرژی به خریداران به نسبت پیشنهادهایشان و درآمد به فروشندگان به نسبت فروش آن‌ها اختصاص داده شده است. در چنین ساختارهایی تضمین بهره‌برداری ایمن، بهینه‌سازی توزیع و مدیریت سمت تقاضا مستلزم استفاده از تکنیک‌های

کنترل انرژی انتقالی است [۱۰]. [۱۱-۱۳] به ترتیب نمونه‌هایی از کاربرد کنترل انرژی انتقالی در توزیع اقتصادی بهینه‌ی ریزشبکه‌ها، بهینه‌سازی شارژ و مشارکت وسایل نقلیه الکتریکی می‌باشند. ساختارهای [۱۳، ۱۲] تنها شامل دو دسته بازیگر وسایل نقلیه الکتریکی و شبکه بالادست بوده که در [۱۲] هزینه شارژ وسایل نقلیه الکتریکی و تلفات توان در شبکه توزیع بهینه‌سازی شده و در [۱۳] شارژ وسایل نقلیه الکتریکی مبتنی بر پاسخ‌گویی قیمت مرتبط با سیگنال‌های قیمت زمان حقیقی سیستم قدرت مدل‌سازی شده و با استفاده از بهینه‌سازی پارتو، به دنبال تخصیص کارآمد ظرفیت عرضه و پاسخ تقاضا برای زمان‌های بعدی و کاهش هزینه بهره‌برداری می‌باشد. با این حال تحقیقات صورت‌گرفته فوق در مقایسه با مقاله ارائه‌شده دارای نواقصی به شرح زیر می‌باشند:

- ۱) عدم استفاده از مدل بازی تابع عرضه در مدل‌سازی بازار برق به منظور افزایش دقت تصمیم‌گیری و بهینه‌سازی در مسائل چندهدفه [۴-۶]؛
- ۲) عدم مشارکت خرده‌فروش‌های برق (ER^۴) در بازار و نیز قابلیت افزایش تعداد آن‌ها [۴-۶]؛
- ۳) عدم مدل‌سازی کارآمد ترکیب سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و مدیریت بار پاسخ‌گو ضمن لحاظ نمودن پارامترهای عدم قطعیت به منظور افزایش قابلیت اطمینان شبکه قدرت [۴-۶]؛
- ۴) عدم تعیین قیمت تسویه بازار (MCP^۵) برپایه نقطه تعادل نش یعنی همان ظرفیت بهینه‌ی مشارکت تمامی بازیگران (هم تولید و هم مصرف) در بازار و قیمت‌های پیشنهادی آن‌ها و براساس ساختار مناقصه دوسویه [۴-۶]؛
- ۵) عدم در نظر گرفتن سهمی برای مشارکت مشتریان مسکونی در بازار به عنوان PR و کسب درآمد توسط آن‌ها [۷، ۳، ۲]؛
- ۶) عدم امکان تبادل انرژی ریزشبکه‌های خانگی (H-MG^۶) با یکدیگر و یا ERها [۸، ۹]؛
- ۷) عدم ارائه راه‌حلی بر مبنای الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای پیاده‌سازی و تسویه بهینه فرآیند بازار [۱۱، ۱۰، ۷]؛
- ۸) عدم ارائه راه‌حلی برای رسیدن به منفعت جمعی و تخصیص عادلانه سود با وجود بازیگران با مالکیت‌های متفاوت و اهداف متضاد در بازار [۱۳، ۱۲، ۳]؛
- ۹) عدم کسب درآمد برای بازیگران تولیدکننده (GEN^۷) هر H-MG از طریق فروش مازاد توان تولیدشده توسط منابع توزیع‌شده انرژی (DER^۸) [۱۳، ۱۲].

بنابراین، با توجه به توضیحات فوق در این مقاله ساختار بازار خرده‌فروشی برای سیستم‌های چند-ریزشبکه‌ای برپایه یک مدل ابتکاری با هدف مدیریت بهینه TE مبتنی بر پاسخ‌گویی بار و به همراه استراتژی هوشمند قیمت‌گذاری استاتیکی منابع تولید و مصرف با استفاده از روش خاص تئوری بازی غیرهمکارانه (یعنی NIRA) ارائه شده است. چراکه سیستم مدیریت TE یک روش امیدبخش در توسعه پایدار و تشویق مشتریان مسکونی در مشارکت هرچه‌بیش‌تر به منظور دستیابی به

یکدیگر و یا از طریق ERها بارهای محلی خود را تغذیه نموده و با فروش مازاد تولید خود به درآمد دست یابند. بازیگران در این ساختار به سه دسته GEN، PR و ER تقسیم بندی می شوند؛ به طوری که مجموعه منابع تولید و مصرف هر H-MG با مالکیت های متفاوت به ترتیب در زمره بازیگران GEN و PR با یکدیگر در بازار خرده فروشی پیشنهادی به رقابت می پردازند. در راستای مدیریت بهینه سمت تقاضا و کنترل بارهای قابل توزیع، مجموعه RLD و NRL هر H-MG در این ساختار تحت عنوان بازیگر PR، قادر می باشد تا از طریق انتقال تقاضا و کاهش مصرف به درآمد دست یابند. در ساختار پیشنهادی، اپراتور بازار مبتنی بر انرژی انتقالی (MO-TE)^(۱۴) نیز در بالاترین سطح کنترل از سیستم چند H-MG قرار گرفته، به طوری که نقش قابل توجهی را در بهره برداری منابع ایفا می نماید. همان طوری که در شکل ۱ مشاهده می شود، ساختار پیشنهادی به ظرفیت توان پیشنهادی عوامل شرکت کننده در بازار حساس می باشد. از این رو، ابتدا یک برنامه ریزی اولیه در مورد ظرفیت مشارکت منابع تولید و مصرف هر H-MG از طریق سیستم مدیریت انرژی (EMS)^(۱۵) داخلی آن صورت گرفته و سپس این اطلاعات برای MO-TE فرستاده می شود. همچنین ERها هم اطلاعات مربوط به ظرفیت های پیشنهادی مشارکت خود در خرید و فروش توان را برای MO-TE ارسال می نمایند. MO-TE، ابتدا با توجه به اطلاعات دریافتی و با هدف ترغیب H-MGها در خصوص استفاده حداکثری از DERها در تغذیه محلی و پوشش دادن کم بودهای همسایگان خود به محدود نمودن ظرفیت مشارکت ERها اقدام نموده و در ادامه از طریق اجرای استراتژی قیمت گذاری استاتیکی، پیشنهادهای قیمت بهینه بازیگران را جهت حضور در بازار تعیین می نماید. در نهایت در این ساختار، فرآیند بهینه سازی تسویه بازار توسط MO-TE با استفاده از این پیشنهادهای قیمت بهینه و سیگنال های ظرفیت توان پیشنهادی بازیگران به منظور دستیابی به برنامه ریزی بهینه نقطه تنظیم توان و MCP اجرا می شود. در این ساختار بازیگران اطلاعات خود را در اختیار MO-TE قرار داده و مستقیم مصرف کننده یا فراهم کننده مورد نظر خود را انتخاب نمی نمایند. بلکه با توجه به این که، شرکت کنندگان با مالکیت های متفاوت در ساختار بازار (خریداران و فروشندگان) تا حدی یا کاملاً از منافع متضاد با یکدیگر برخوردار می باشند؛ دست یابی به منفعت جمعی از طریق ساختار پیشنهادی میسر شده است. فرآیند پیاده سازی ساختار بازار پیشنهادی در شکل ۲ نشان داده شده که شامل چهار مرحله به شرح زیر می باشد:

مرحله ۱: ورود داده های پیش بینی NDU و NRL در هر H-MG به انضمام دریافت قیمت پیش بینی شده MCP، قیمت پیش بینی شده خرید الکتریسیته توسط سیستم (SBP)^(۱۶) از H-MGها و قیمت پیش بینی شده فروش الکتریسیته توسط سیستم (SSP)^(۱۷) به H-MGها؛

مرحله ۲: تولید سناریوهای عدم قطعیت با توجه به داده های پیش بینی مرحله ۱ به همراه احتمال وقوع مربوطه؛

مرحله ۳: انتخاب میانگین وزنی توان ها و قیمت های الکتریسیته ی مرحله قبل، برنامه ریزی مشارکت واحدها، یافتن نقطه تعادل نش

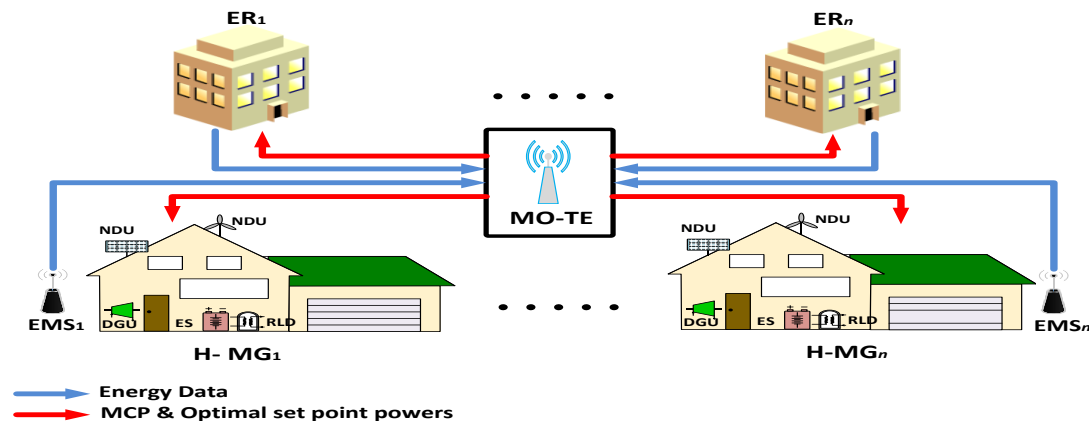
مزایای اقتصادی، زیست محیطی و مشتری مداری است. همچنین با توجه به اشتراک حداقل اطلاعات در رویکردهای مبتنی بر TE، این روش از امنیت بالایی برخوردار می باشد. در ساختار پیشنهادی H-MGها دربرگیرنده DER، سیستم ذخیره کننده انرژی (ES^(۱)) و بار پاسخگو (RLD^(۱۰)) می باشند؛ آن ها قادر خواهند بود که به عنوان PR در تولید، خرید و فروش برق مشارکت داشته باشند. آن ها می توانند با مدیریت سمت تقاضا هزینه های انرژی خود را کاهش داده و یا حتی با اشتراک و انتقال انرژی با H-MGهای همسایه به مزایای مادی دست یابند. در ساختار پیشنهادی H-MGها حتی قادر هستند بعد از تبادل با یکدیگر، مازاد انرژی باقی مانده خود را به ERها بفروشند [۱۴] و یا در صورت لزوم، کمبود انرژی خود را با خرید از آن ها جبران نمایند که در نتیجه از سیستم الکتریسیته قابل اطمینان، پایدار و کارآمد بهره مند خواهند شد. با آنالیز تحقیقات صورت گرفته در مقالات و بیان نقاط ضعف هریک از آن ها، نوآوری های این مقاله می تواند به صورت زیر خلاصه بشود:

- ۱) پذیرش گسترده شرکت کنندگان با مالکیت های متفاوت و اهداف متضاد؛
- ۲) حداقل سازی هزینه بهره برداری در کنار حداکثر سازی سود بازیگران شرکت کننده؛
- ۳) محاسبه MCP برپایه نقطه تعادل نش (ظرفیت بهینه مشارکت بازیگران در بازار)؛
- ۴) قابلیت عملکرد مستقل و اشتراکی هر یک از H-MGها؛
- ۵) بهبود و افزایش بهره وری اقتصادی H-MGها؛
- ۶) ارائه مکانیزمی برای استراتژی قیمت گذاری استاتیکی هر بازیگر با هدف اخذ ماکزیمم سود و مینیمم MCP. (در ساختار پیشنهادی به منظور ارائه طرح عادلانه ای که در آن هیچ بازیگری بر دیگری ارجعیت نداشته و تنها بر اساس استراتژی ها و توابع هدف خود عمل می نماید و همچنین با توجه به عدم همکاری بازیگرها با یکدیگر از استراتژی قیمت گذاری استاتیکی استفاده شده است؛ زیرا در بازی استاتیکی تمامی بازیگران به صورت مستقل در یک زمان تصمیم خود را اتخاذ نموده و در اخذ تصمیم خود از یکدیگر فیدبکی دریافت نمی نمایند.)

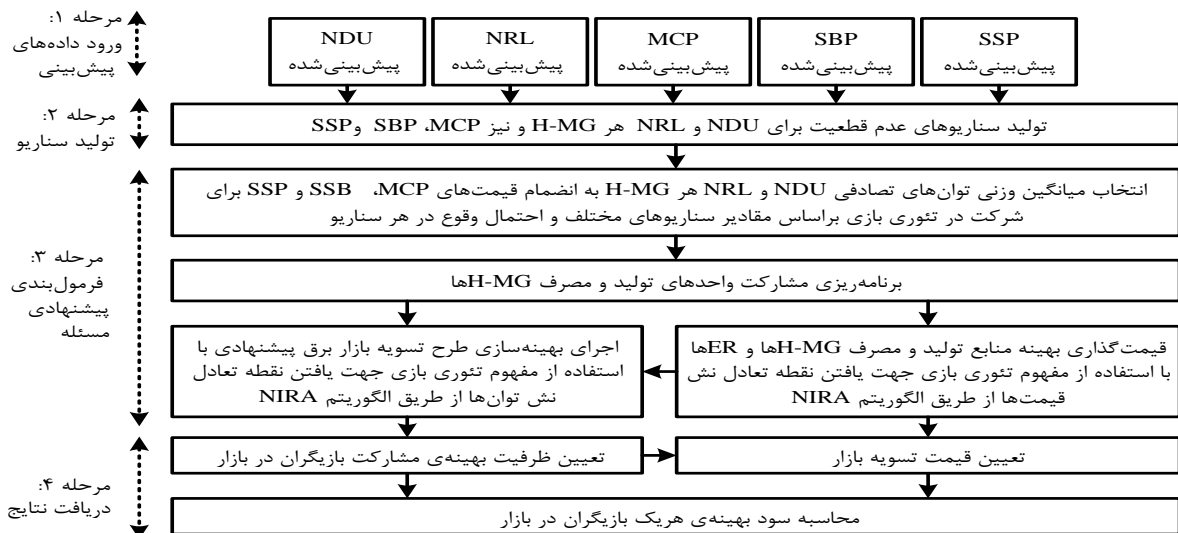
۲- ساختار پیشنهادی برای پیوستن بازیگران به بازار

ساختار بازار خرده فروشی پیشنهادی به منظور تشویق H-MGها جهت حضور هرچه بیشتر در بازار خرده فروشی و برآوردن نیازهایشان و حتی دستیابی به درآمد از طریق تبادل انرژی با یکدیگر ارائه شده است. نمای کلی این ساختار مطابق شکل ۱ می باشد. در ساختار پیشنهادی، H-MGها به عنوان مصرف کنندگان نهایی در بخش مشتریان مسکونی به صورت محلی دارای منابع DER شامل منابع تولید قابل کنترل (DGU^(۱۱))، منابع غیرقابل کنترل (NDU^(۱۲))، ES، RLD و بارهای غیرپاسخگو (NRL^(۱۳)) می باشند. H-MGها می توانند از طریق مشارکت با

قیمت ها و توان بازیگران از طریق اجرای طرح تسویه بازار با رویکرد بهینه سازی تصادفی مبتنی بر NIRA؛
مرحله ۴: تعیین ظرفیت بهینه بازیگران جهت شرکت در بازار، تعیین MCP نهایی و محاسبه تابع منفعت بازیگران.



شکل ۱: ارتباط بین شرکت کنندگان در ساختار MO-TE



شکل ۲: فرآیند پیاده سازی ساختار بازار MO-TE

۳- پیاده سازی ریاضی مسئله

در این بخش، فرمول بندی ریاضی مسئله با استفاده از مولفه های کلیدی در بازار خرده فروشی پیشنهادی (یعنی MO-TE) ارائه شده است. چهارچوب کلی به راحتی با دیگر سیستم های توزیع برق با سطوح بالای مشارکت مشتری ها قابل بسط و تنظیم می باشد.

۳-۱- توابع هدف و قیود مسئله

عناصر اصلی بازار ارائه شده دربرگیرنده ERها و H-MGها بوده که هر H-MG متشکل از دو بازیگر GEN و PR می باشد. توابع هدف برای هر یک از بازیگران به صورت زیر تعریف شده است.

۳-۱-۱- تابع هدف

GENها: این دسته از بازیگران در H-MGهای تحت مطالعه متشکل از منابع NDU، DGU و ES می باشند.

$$\max J_t^{GEN,j} = R_t^{GEN,j} - C_t^{GEN,j} \quad (1)$$

$t \in \{1, 2, \dots, 24\}, j \in \{1, 2, \dots, n\}$

$$R_t^{GEN,j} = \pi_t^{GEN,j} \times \left(\sum_{i=1}^n P_t^{DGU,i,j} + \sum_{k=1}^n P_t^{NDU,k,j} + P_t^{ES-,j} \right) \times \Delta t \quad (2)$$

$$0 \leq \pi_t^{GEN,i} \leq \mu_t^{MCP} \quad (3)$$

هر یک از بازیگران فوق‌الذکر تصمیمات خود را بسته به قیود فنی مربوط به منابع تولید موجود در هر H-MG و بارهای محلی متصل به آن‌ها و نیز قیود کلی شبکه‌های توزیع اتخاذ می‌نمایند. این قیود در ادامه تشریح شده است.

۳-۱-۲- قیود محلی و کلی

قیود تعادل

$$\sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^n P_t^{DGU,i,j} + \sum_{k=1}^n P_t^{NDU,k,j} + P_t^{ES-,j} \right) + \sum_{j=1}^n P_t^{ER-,j} = \sum_{j=1}^n \left(P_t^{NRL,j} + P_t^{ES+,j} \right) \quad (18)$$

$$+ \sum_{j=1}^n P_t^{ER+,j} + \sum_{j=1}^n P_t^{ER+,j} \quad \text{DGU} \quad (19)$$

$$P_t^{DGU,i,j} \leq P_t^{DGU,i,j}, \quad \forall t \quad \text{NDU} \quad (20)$$

$$0 \leq P_t^{NDU,k,j} \leq \mu_t^{NDU,k,j}, \quad \forall t \quad (21)$$

ES: الگوریتم پیشنهادی، ES را در زمان داده شده t با توجه به حالت شارژ $(X_t^{ES+,j} = 1)$ یا دشارژ $(X_t^{ES+,j} = 0)$ با رعایت قیود زیر مورد بهره‌برداری قرار می‌دهد [۱۶]:

$$0 \leq P_t^{ES+,j} \leq \bar{P}^{ES+,j} \times X_t^{ES+,j} \quad (22)$$

$$0 \leq P_t^{ES-,j} \leq \bar{P}^{ES-,j} \times (1 - X_t^{ES+,j}), \quad \forall t \quad (23)$$

برای جلوگیری از شارژ و تخلیه بیش از حد، وقتی که وضعیت شارژ ES (SOC^{ES}) به بالاترین و پایین‌ترین حد برسد، ES به حالت آماده‌باش، تغییر وضعیت می‌دهد. بنابراین، قیود زیر برای بهبود عمر ES در هر بازه زمانی توسط الگوریتم بررسی می‌شود [۱۷-۱۹]:

$$SOC_t^{ES,j} \leq SOC_t^{ES,j} \leq \overline{SOC}^{ES,j} \quad (24)$$

$$SOC_t^{ES,j} = \frac{E_t^{ES,j}}{E_{Tot}^{ES,j}} \quad (25)$$

$$SOC_{t+1}^{ES,j} - SOC_t^{ES,j} = \frac{(P_t^{ES+,j} - P_t^{ES-,j}) \times \Delta t}{\zeta_{ES,j} \times ES_{Tot}^{ES,j}} \quad (26)$$

RLD: با توجه به این‌که در هر بازه زمانی، تنها تغذیه RLD و یا انتقال آن امکان‌پذیر بوده و یا امکان دارد که هیچکدام میسر نباشد، لذا قیود زیر برای کنترل RLD توسط الگوریتم پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته شده است:

$$P_t^{RLD-,j} \leq k_\epsilon \times P_t^{NRL,j} \times X_t^{RLD-,j} \quad (27)$$

$$-k_\delta \leq P_t^{RLD-,j} - P_{t-1}^{RLD-,j} \leq k_\delta \quad (28)$$

به دلیل وجود سناریوهای عدم قطعیت قیمت الکتريسيته در بازار از مقدار میانگین وزنی سناریوها به عنوان حداکثر قیمت پیش‌بینی شده مجاز در قیود استفاده شده که طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_t^\sigma = \frac{\sum_{s=1}^{N_s} \rho_{t,s}^\sigma \times \pi_{t,s}^\sigma}{\sum_{s=1}^{N_s} \rho_{t,s}^\sigma}, \quad \sigma \in \{SBP, SSP, MCP\} \quad (4)$$

با توجه به ناچیز بودن هزینه تولیدات NDU در مقایسه با سایر منابع، از هزینه NDU صرف‌نظر شده است.

$$C_t^{GEN,j} = \left(\pi^f \times \sum_{i=1}^n P_t^{DGU,i,j} \times \Delta t \right) \quad (5)$$

$$+ \left(\pi_t^{ES+,j} \times P_t^{ES+,j} \times \Delta t \right) \quad (6)$$

در رابطه فوق، π^f قیمت سوخت گاز طبیعی برای DGU بر حسب £/kWh می‌باشد [۱۵].

PRها: این دسته از بازیگران شامل بار بحرانی (NRL)، RLD+ و RLD- در هر H-MG بوده که تحت عنوان بازیگر PR نامگذاری شده‌اند؛ چراکه از طریق انتقال تقاضا مانند یک تولیدکننده می‌توانند درآمد کسب نمایند. از این رو هدف این بازیگران، حداقل نمودن هزینه بهره‌برداری از طریق مدیریت بارهای قابل توزیع $(X_t^{RLD+,j} = 1)$ و افزایش درآمد از طریق انتقال تقاضای آن‌ها $(X_t^{RLD-,j} = 1)$ است.

$$\max J_t^{PR,j} = R_t^{PR,j} - C_t^{PR,j}, \quad j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (7)$$

$$R_t^{PR,j} = \pi_t^{RLD-,j} \times P_t^{RLD-,j} \times X_t^{RLD-,j} \times \Delta t \quad (8)$$

$$0 \leq \pi_t^{RLD-,j} \leq \mu_t^{MCP} \quad (9)$$

$$C_t^{PR,j} = \left(\pi_t^{RLD+,j} \times P_t^{RLD+,j} \times X_t^{RLD+,j} \right) \times \Delta t \quad (10)$$

$$+ \mu_t^{MCP} \times P_t^{NRL,j} \quad (11)$$

$$0 \leq \pi_t^{RLD+,j} \leq \mu_t^{MCP} \quad (11)$$

$$P_t^{NRL,j} = \mu_t^{NRL,j} = \frac{\sum_{s=1}^{N_s} \rho_{t,s}^{NRL,j} \times P_{t,s}^{NRL,j}}{\sum_{s=1}^{N_s} \rho_{t,s}^{NRL,j}} \quad (12)$$

ERها: این دسته از بازیگران دربرگیرنده میزان مشارکت ERها در خرید توان مازاد از H-MGها $(X_t^{ER+,j} = 1)$ و نیز فروش توان به آن‌ها در صورت رویارویی‌شان با کم‌بود $(X_t^{ER+,j} = 0)$ می‌باشد.

$$\max J_t^{ER,j} = R_t^{ER,j} - C_t^{ER,j} \quad (13)$$

$$j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (14)$$

$$R_t^{ER,j} = \pi_t^{SSP,j} \times P_t^{ER-,j} \times (1 - X_t^{ER+,j}) \times \Delta t \quad (15)$$

$$0 \leq \pi_t^{SSP,j} \leq \mu_t^{SSP} \quad (16)$$

$$C_t^{ER,j} = \pi_t^{SBP,j} \times P_t^{ER+,j} \times X_t^{ER+,j} \times \Delta t \quad (17)$$

$$0 \leq \pi_t^{SBP,j} \leq \mu_t^{SBP} \quad (17)$$

(۳) پیاده سازی واحد TOAT [۲۰-۲۲]

- تولید سناریوهای عدم قطعیت توان های NDU و NRL برای هر H- MG و نیز تولید سناریوهای عدم قطعیت قیمت های MCP, SBP و SSP با احتمال وقوع مربوطه از طریق روش تست آرایه متعامد تاگوچی (TOAT^{۱۹}) با استفاده از توابع توزیع.

(۴) پیاده سازی واحد میانگین وزنی [۲۳]

- محاسبه میانگین وزنی متغیرهای توان NRL و NDU هر H-MG طبق روابط (۱۲) و (۲۰)؛
- محاسبه میانگین وزنی قیمت های پیش بینی شده MCP, SBP و SSP طبق رابطه (۴).

(۵) پیاده سازی واحد UCDR^{۲۰} [۲۳]

- اجرای برنامه ریزی مشارکت واحدها مبتنی بر مقادیر میانگین وزنی سناریوهای عدم قطعیت واحد (TOAT, NDU, NRL و MCP)؛
- تعیین $P_t^{RLD+,j}, X_t^{RLD-,j}, P_t^{RLD-}, X_t^{ES+,j}, P_t^{ES-,j}$ و مقدار کم بود یا مازاد تولید برای H-MG زام.

(۶) اختصاص بردار صفر به عنوان بردار شروع (x) برای بهینه سازی قیمت از طریق NIRA

(۷) پیاده سازی واحد NIRA به منظور اجرای استراتژی قیمت گذاری استاتیکی و تعیین قیمت های بهینه بازیگران

- تعریف پارامترهای مورد نیاز الگوریتم MO-TE شامل بردار ابعاد بازیگران قیمت، کران بالا و پایین فعالیت بازیگران قیمت، تفرانس دقت پاسخ، حداکثر تعداد تکرارهای مجاز الگوریتم، انتخاب روش تعیین گام بهینه سازی α ، تفرانس اتمام برنامه مربوط به نقص قیود قیمت ها، مقدار تابع و X [۲۰]؛

- تعریف توابع هدف (Φ_i) برای بازیگران قیمت طبق روابط (۱)، (۷) و (۱۳) (قیمت متغیری مجهول و توان پارامتری ثابت در بازی است)؛

- تعریف توابع قیود برای بازیگران قیمت؛
- تشکیل تابع نیکایدو ایزودا $(\Psi(x, y))$ طبق رابطه زیر [۲۰]:

$$\Psi(x, y) = \sum_{i=1}^n [\Phi_i(y_i | x) - \Phi_i(x)] \quad (38)$$

- محاسبه نقطه نش با رعایت قیود طبق رابطه زیر [۲۰]:
$$\Phi_i(x^*) = \max_{(x_i|x) \in X} \Phi_i(x_i | x) \quad (39)$$

- بیشینه سازی $\Psi(x, y)$ و تشکیل تابع پاسخ بهینه $(Z(x))$ طبق رابطه زیر [۲۰]:

$$Z(x) = \arg \max_{y \in X} \Psi(x, y) \quad (40)$$

- اعمال الگوریتم رهاسازی و بهبود $Z(x)$ تا برقراری شرط $\max \psi(x^*, y) = 0$ طبق روابط زیر [۲۰]:

$$x^{k+1} = (1 - \alpha_k)x^k + \alpha_k Z(x^k), k = 0, 1, 2, \dots \quad (41)$$

$$P_t^{RLD+,j} \leq k_e \times P_t^{NRL,j} \times X_t^{RLD+,j} \quad (29)$$

$$-k_t \leq P_t^{RLD+,j} - P_{t-1}^{RLD+,j} \leq k_t \quad (30)$$

ER: الگوریتم پیشنهادی با هدف ترغیب H-MG ها در خصوص استفاده حداکثری از DER های خود در تغذیه محلی و نیز پوشش دادن کم بود همسایگان شان، با رعایت قیود زیر به محدود نمودن ظرفیت مشارکت ER ها اقدام نموده است. ΔP در روابط زیر بیانگر مازاد تولید باقی مانده از مجموعه GEN ها پس از تبادل و تغذیه مجموعه PR ها در سیستم چند H-MG همسایه ای بوده که توسط MO-TE برای فروش به ER ها عرضه می شود.

$$0 \leq P_t^{ER+,j} \leq \tilde{P}_t^{ER+,j} \times X_t^{ER+} \quad (31)$$

$$0 \leq P_t^{ER+,j} \leq \Delta P \times X_t^{ER+} \quad (32)$$

$$\sum_{j=1}^n P_t^{ER+,j} \leq \Delta P \times X_t^{ER+} \quad (33)$$

$$\Delta P = \sum_{j=1}^n \left(\begin{matrix} \sum_{i=1}^n P_t^{DGU,i,j} + \sum_{k=1}^n P_t^{NDU,k,j} \\ + P_t^{ES-,j} - P_t^{NRL,j} - P_t^{ES+,j} \\ - P_t^{RLD+,j} + P_t^{RLD-,j} \end{matrix} \right) \quad (34)$$

$$0 \leq P_t^{ER-,j} \leq \tilde{P}_t^{ER-,j} \times (X_t^{ER+} - 1) \quad (35)$$

$$0 \leq P_t^{ER-,j} \leq \Delta P \times (X_t^{ER+} - 1) \quad (36)$$

$$\sum_{j=1}^n P_t^{ER-,j} \leq \Delta P \times (X_t^{ER+} - 1) \quad (37)$$

$\tilde{P}_t^{ER+,j}$ و $\tilde{P}_t^{ER-,j}$ به ترتیب ظرفیت های پیشنهادی ER زام جهت مشارکت در خرید و فروش در ساختار بازار پیشنهادی است که برای ورود به بازار در اختیار MO-TE قرار می دهد.

۴- پیاده سازی الگوریتم MO-TE

فلوچارت پیشنهادی برای پیاده سازی الگوریتم MO-TE در شکل ۳ ارائه شده است. همان طوری که در شکل مشاهده می شود، این فلوچارت از پنج واحد اصلی بنام های واحد TOAT، واحد میانگین وزنی، واحد UCDR، واحد NIRA و واحد MCP تشکیل شده است. نحوه پیاده سازی هر یک از این واحدها به همراه وظیفه و هدف پیاده سازی آن ها در ادامه تشریح شده است. شبه کد مربوطه در الگوریتم ۱ ارائه شده است.

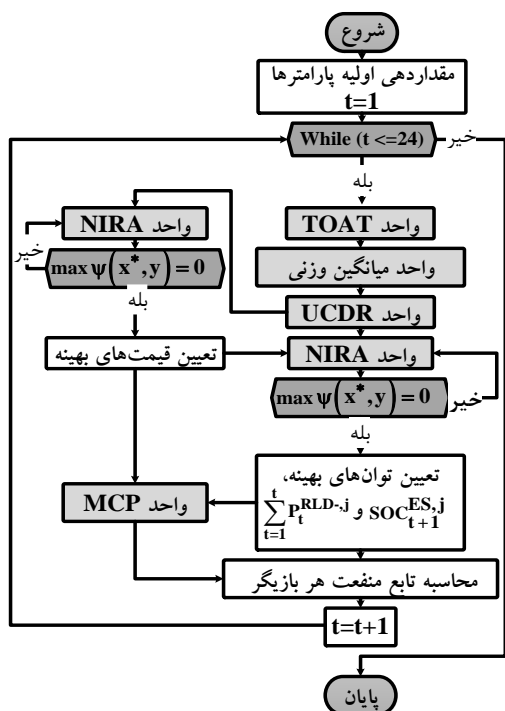
الگوریتم ۱: شبه کد مربوط به الگوریتم MO-TE

۱) شروع

۲) مقاردهی اولیه پارمترها

- قیمت های پیش بینی ساعتی MCP, SBP و SSP؛
- داده های پیش بینی ساعتی NDU و NRL مربوط به هر H-MG؛
- قیمت سوخت π^f ، $SOC_{i=1}^{ES,j}$ ، $\overline{SOC}^{ES,j}$ ، $\underline{SOC}^{ES,j}$ ، $\underline{P}^{DGU,i,j}$ و $\overline{P}^{DGU,i,j}$ ، $\overline{P}^{ES+,j}$ ، $\overline{P}^{ES-,j}$

while t ≤ 24



شکل ۳: الگوریتم پیشنهاد شده برای پیاده سازی MO-TE

۴-۲- واحد میانگین وزنی

از طریق این واحد مقدار میانگین وزنی سناریوهای عدم قطعیت توان و قیمت محاسبه می شود. در واقع با توجه به تولید سناریوهای عدم قطعیت تولید شده توسط TOAT، برای هر مؤلفه توان و قیمت چندین مقدار وجود دارد. به منظور فرآیند بهینه سازی در مراحل بعدی، به انتخاب یک مقدار به عنوان مقدار بهینه و مؤثر نیاز است.

۴-۳- واحد UCDR

از این واحد برای برنامه ریزی اولیه مشارکت منابع تولید و مصرف هر H-MG استفاده شده است. در حقیقت این واحد با توجه به بررسی μ_t^{MCP} در هر بازه زمانی و همچنین برپایه پاسخ گویی RLD هر H-MG مقادیر اولیه را برای تمامی متغیرهای تعریف شده هر H-MG براساس قیود فنی و اقتصادی مربوط به هر المان برای واحد NIRA تعیین می نماید. علاوه بر این، بر اساس اطلاعات به دست آمده از واحد UCDR، وضعیت متغیرهای باینری مسئله مشخص شده و در طول فرآیند بهینه سازی توسط واحد NIRA در هر بازه زمانی، این مقادیر باینری ثابت باقی می ماندند. توضیحات بیش تر در این خصوص در [۲۳] ارائه شده است.

۴-۴- واحد NIRA

این واحد در ساختار پیشنهادی در دو مرحله (۱) اجرای استراتژی قیمت گذاری استاتیکی و (۲) فرآیند بهینه سازی توزیع توان بازیگران مورد استفاده واقع شده است. بطوریکه در هر مرحله، این واحد دو وظیفه مهم دربرگیرنده دو زیر مسئله شامل ۱- بیشینه کردن تابع $\Psi(x, y)$ ، ۲- اعمال الگوریتم رهاسازی و بهبود $Z(x)$ را برعهده دارد. هر دوی

$$\alpha_k^* = \arg \min_{0 < \alpha_k \leq 1} \left[\max_{y^k \in X} \psi(x^{k+1}(\alpha_k), y^k) \right] \quad (42)$$

- تعیین نقطه تعادل نش (x^*) مربوط به قیمت های بهینه خرید/فروش / تأمین الکتریسیته.
- (۸) تعریف بردار x برای بهینه سازی توان با توجه به نتایج گام ۵.
- (۹) پیاده سازی واحد NIRA به منظور بهینه سازی فرایند توزیع توان و تعیین توان بهینه بازیگران
- تعریف پارامترهای مورد نیاز الگوریتم MO-TE شامل بردار ابعاد بازیگران توان، کران بالا و پایین فعالیت بازیگران توان، ترانس دقت پاسخ، حداکثر تعداد تکرارهای مجاز الگوریتم، انتخاب روش تعیین گام بهینه سازی α ، ترانس اتمام برنامه مربوط به نقص قیود توان ها، مقدار تابع و X [۲۰]؛
- تعریف Φ_i برای بازیگران توان طبق روابط (۱)، (۷) و (۱۳) (توان متغیر مجهول و قیمت پارامتر ثابت در بازی است)؛
- تعریف توابع قیود برای بازیگران توان طبق روابط (۱۸) الی (۳۷)؛
- تشکیل $\Psi(x, y)$ طبق رابطه (۳۸) [۲۰]؛
- محاسبه نقطه نش با رعایت قیود طبق رابطه (۳۹) [۲۰]؛
- بیشینه سازی $\Psi(x, y)$ و تشکیل $Z(x)$ طبق رابطه (۴۰) [۲۰]؛
- اعمال الگوریتم رهاسازی و بهبود $Z(x)$ تا برقراری شرط $\max \psi(x^*, y) = 0$ طبق روابط (۴۱) و (۴۲) [۲۰]؛

- تعیین x^* مربوط به ظرفیت بهینه ی منابع تولید و مصرف هر H-MG و ER در بازار؛
- تعیین $SOC_{t+1}^{ES,j}$ ؛
- محاسبه $\sum_{t=1}^t P_t^{RLD-j}$ ؛
- (۱۰) پیاده سازی واحد MCP [۲۳]
- تعیین MCP بر پایه نتایج به دست آمده ی قیمت های بهینه در گام ۷ و توان های بهینه در گام ۹.
- (۱۱) تعیین داده های خروجی
- محاسبه مقادیر سود بازیگران برپایه مقادیر توان های بهینه از گام ۹ و MCP به دست آمده از گام ۱۰.

پایان حلقه While

(۱۲) پایان.

۴-۱- واحد TOAT

این واحد با تضمین حداقل تعداد سناریوی بهینه برای لحاظ نمودن عدم قطعیت در بازار با استفاده از روش TOAT پیشنهاد شده است. توضیحات بیش تر در این خصوص در [۲۳-۲۰] ارائه شده است. در این مطالعه تولید سناریوهای عدم قطعیت از طریق TOAT به ترتیب با استفاده از توابع توزیع و بیبول برای تولیدات بادی، تابع تابش برای تولیدات انرژی خورشیدی و همچنین توزیع نرمال برای NRL و قیمت های الکتریسیته همراه با احتمال وقوع مربوطه صورت گرفته است.

- سناریوی #3 کاهش ناگهانی (به میزان ۱۰٪) در مقدار توان تولیدی توسط NDUها در سیستم سه H-MG با حضور یک ER؛
- سناریوی #4 عملکرد نرمال سیستم سه H-MG با حضور دو ER؛
- سناریوی #5 عملکرد نرمال سیستم تک H-MG با حضور یک ER.

- این وظایف مکرراً توسط واحد NIRA دنبال می شود تا زمانی که اختلاف $Z(x)$ بین دو تکرار مجاور به اندازه کافی کوچک شود [۲۰]. اگر مقادیر $\Psi(x, y)$ به صفر برسد، هیچ بازیگری نمی تواند به طور یک جانبه تابع منفعت خود را بهبود ببخشد. بنابراین، یک پاسخ متعادل (تقریبی) برای تسویه بازار برق با رعایت قیود کلی و محلی یافت می شود. توضیحات پیش تر در این خصوص در [۲۳-۲۰] ارائه شده است.

۴-۵- واحد MCP

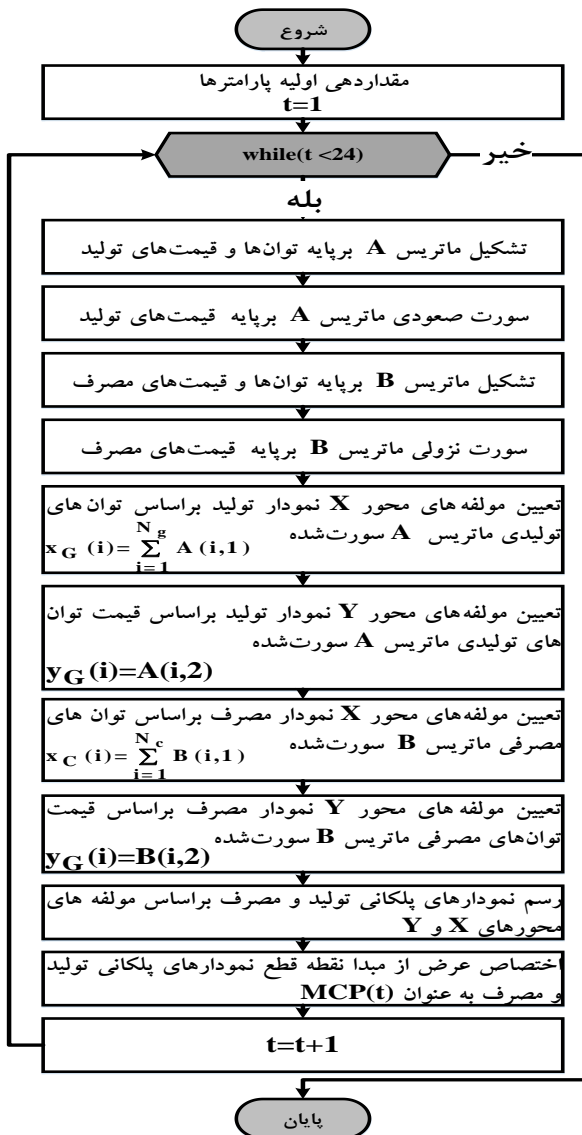
این واحد با استفاده از نقطه تعادل نش قیمت ها و توان های بازیگران که از طریق واحد NIRA حاصل شده و براساس ساختار مناقصه دوسویه، تعیین مقدار MCP را ممکن می سازد. فرایند این واحد مطابق با فلوچارت شکل ۴ پیاده سازی شده است. در این فلوچارت N_g و N_c به ترتیب برابر با تعداد عوامل تولیدکننده و مصرف کننده در بازار الکتریسیته می باشند.

۵- شبکه قدرت تحت مطالعه

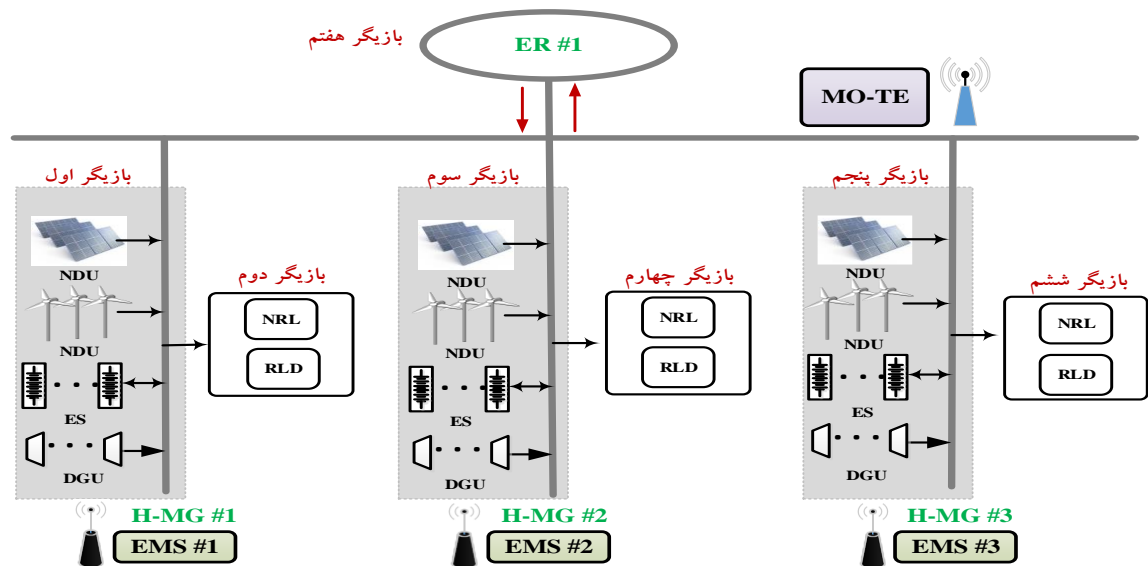
شکل ۵ پیکربندی سیستم تحت مطالعه استفاده شده در این مقاله را نشان می دهد که از چندین H-MG و ER تشکیل شده و هر H-MG متشکل از دو بازیگر GEN و PR می باشد. هر H-MG تحت مطالعه دربرگیرنده مجموعه ای از منابع تولید (توربین بادی و پنل فتوولتاییک در این مطالعه)، DGU (میکروتوربین در این مطالعه) و ES و نیز مصرف کنندگان شامل NRL و RLD می باشد. تعداد H-MG ها و نیز ERهای متصل شده، قابل گسترش تا n مقدار می باشند. به منظور تست قابلیت روش پیشنهادی، سیستم مطالعه ای موردی این مقاله شامل سه بازیگر GEN، سه بازیگر PR و یک بازیگر ER در محیط شبیه سازی نرم افزار MATLAB توسعه داده شده است. مشخصات کل سیستم و اصول طرح کنترلی هر یک از DERها به طور مفصل در [۲۴، ۲۵، ۱۶] تشریح شده و اطلاعات پیش بینی مربوط به توان تولید شده توسط NDUها و نیز مقدار NRL در هر H-MG از [۲۵] اخذ شده است.

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم MO-TE، تحلیل حساسیت با اعمال سناریوهای زیر بر روی شبکه تحت مطالعه انجام شده است (مقدار اولیه ی SOC در تمامی سناریوها برابر ۵۰٪ تنظیم شده است):

- سناریوی #1 عملکرد نرمال سیستم سه H-MG با حضور یک ER؛
- سناریوی #2 افزایش ناگهانی (به میزان ۱۰٪) در مقدار توان تولیدی NDUها در سیستم سه H-MG با حضور یک ER؛



شکل ۴: واحد MCP



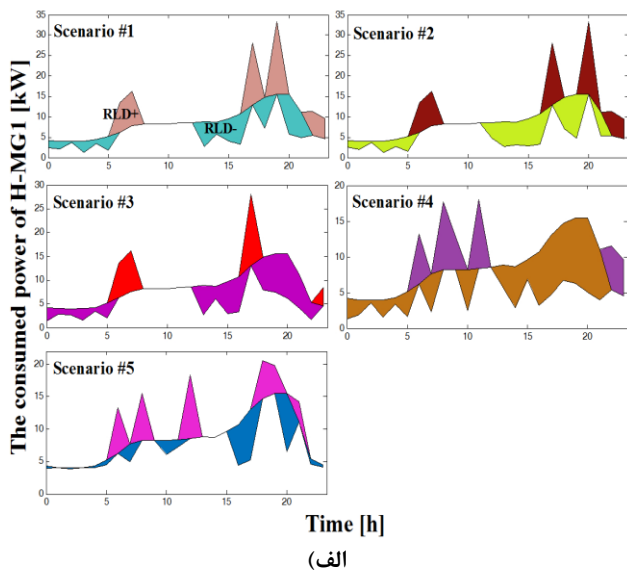
شکل ۵: سیستم تحت مطالعه

۶- بحث و بررسی نتایج

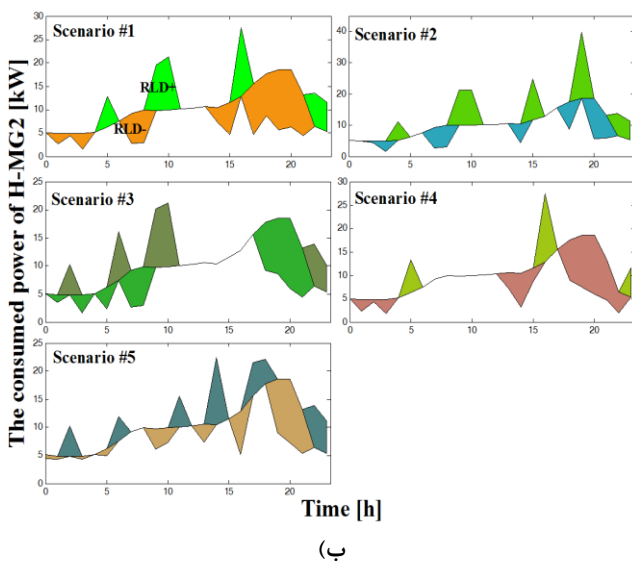
پروفایل تقاضای بار هر H-MG در طول عملکرد ۲۴ ساعته سیستم تحت حالت‌های مورد مطالعه در شکل‌های ۶ (الف)-(ج) نشان داده شده است. RLD+ و RLD- در طول روز مطابق شکل ۶ (الف)-(ج)، برای سناریوهای #1، #2 و #3 هر H-MG، تقریباً در ساعات یکسانی رخ داده و تنها مقدار و اندازه آن‌ها تحت سناریوهای مختلف تغییر کرده است.

همان‌طوری که از شکل ۶ (الف)-(ج) مشاهده می‌شود، در ساعات اولیه شروع فعالیت روزانه در تمام سناریوهای تحت مطالعه که مقدار MCP پایین بوده (مطابق شکل ۸) و نیز میزان توان تولیدی توسط NDUها رو به افزایش است، برای بازیگران PR، RLD+ اتفاق افتاده که نتیجه این عمل کاهش قابل‌ملاحظه‌ای را در قیمت الکتریسیته پرداخت‌شده توسط PRها به‌دنبال داشته است. همچنین در تمام سناریوهای تحت مطالعه، عمدتاً در ساعتی از روز که مقدار MCP بالا بوده (در طول غروب تا نیمه‌شب مطابق شکل ۸)، الگوریتم برای هر سه H-MG مقداری از بار مصرفی را به بازه‌های دیگر انتقال داده و RLD- رخ داده است. این عمل مطابق شکل ۶ (ج)، برای بازیگر PR#3 که نسبت به دو بازیگر PR دیگر از میزان NRL بیش‌تری برخوردار بوده، مشهودتر می‌باشد.

از سوی دیگر مطابق شکل ۶ (الف)-(ج)، مقدار بار مصرفی برای هر سه بازیگر PR در مجموع عملکرد ۲۴ ساعته سیستم در سناریوی #5 نسبت به سناریوی #1 به ترتیب با ۶/۳٪، ۱۴/۱۷٪ و ۲٪ افزایش روبرو بوده و این در حالی است که در مقایسه پروفایل تقاضای بار سناریوی #1 و #4 همین سه H-MG، میزان بار مصرفی‌شان در راستای مدیریت مصرف، با وقوع RLD- بیش‌تر و RLD+ کم‌تر؛ به ترتیب با ۲۳٪، ۴٪ و ۲٪ کاهش مواجه شده است؛ این امر بیان‌گر تأثیر افزایش تعداد بازیگران در افزایش رقابت و در نتیجه بهبود مدیریت مصرف است.



الف

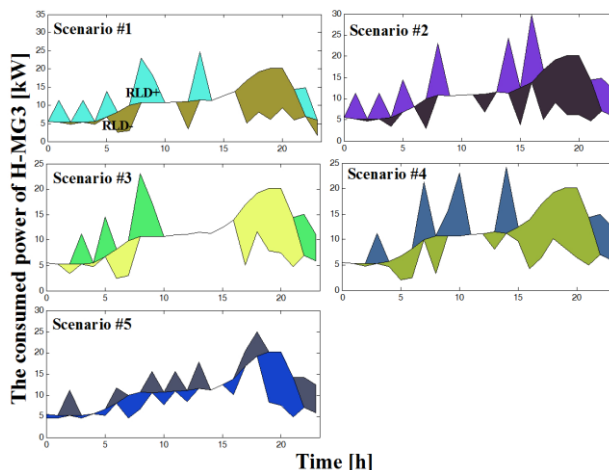


ب

مورد بهره‌برداری واقع شده‌اند؛ به طوری که مطابق با شکل ۱۰ (الف) مجموع منفعت حاصله توسط هر سه GEN در سناریوی #3 نسبت به سناریوی #1 با افزایش ۱/۰۴٪ روبرو بوده و همینطور PRها هم مطابق با شکل ۱۰ (ب) در سناریوی #3 نسبت به سناریوی #1 به خاطر کاهش مصرف خود در مجموع با ۳/۸۸٪ کاهش هزینه روبرو بوده‌اند که در نتیجه تمامی این عوامل مطابق با شکل ۱۰ (ج)، منجر به افزایش هزینه ۴۳/۱۶٪ ERها در سناریوی #3 نسبت به سناریوی #1 شده است.

در واقع الگوریتم پیشنهادی تنها به دنبال دستیابی به منافع یک بازیگر خاص نیست، بلکه به دنبال رسیدن به حداکثر منفعت جمعی از طریق فرایند تصمیم‌گیری پراکنده می‌باشد و این میزان هزینه برای ER#1، حداقل میزان ضرردهی ممکنه در ساختار مشارکت بهینه چند H-MG می‌است. همچنین لازم به ذکر است که در راستای افزایش مشارکت H-MGها در بازار و نیز با توجه به برنامه‌ریزی بهینه صورت گرفته توسط الگوریتم پیشنهادی، بازیگران ER در وضعیت خرید از H-MGها در شبکه تحت مطالعه مورد بهره‌برداری واقع شده‌اند.

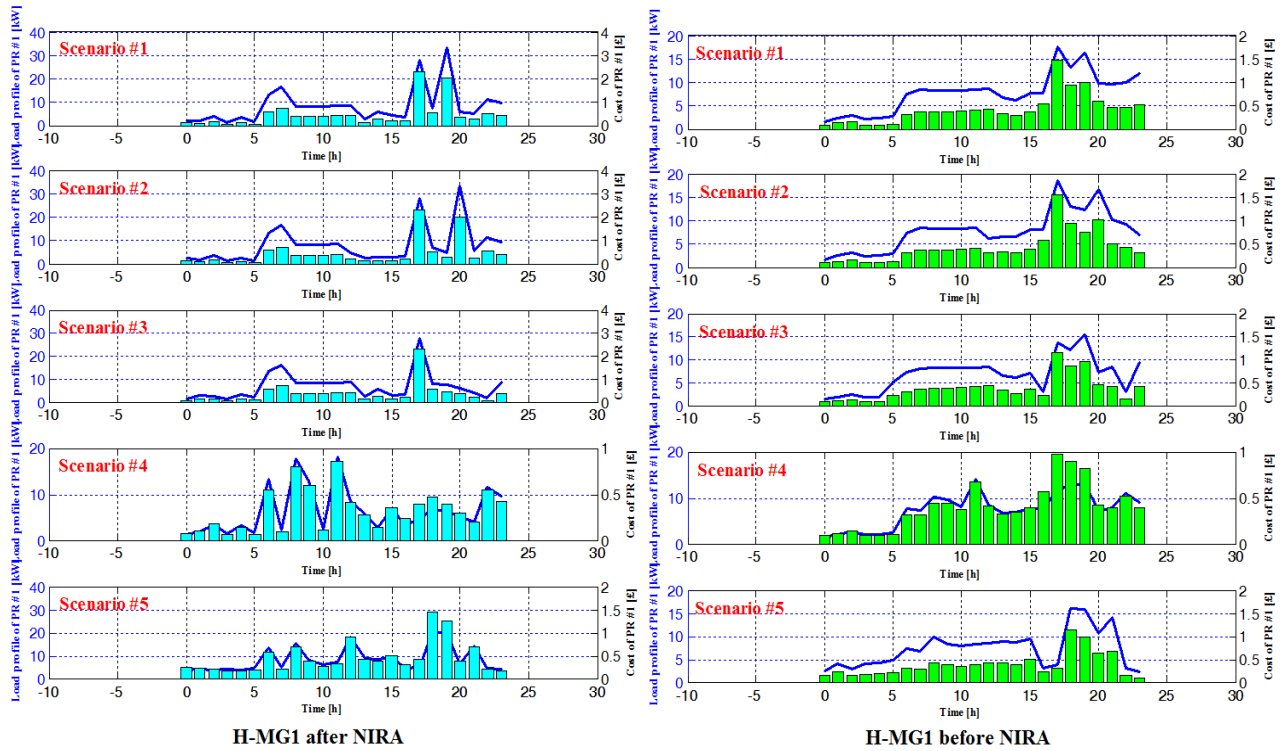
از سوی دیگر مطابق با شکل ۱۰ (الف)، مقادیر سود حاصله توسط GENها در سناریوی #4 کم‌تر از سایر سناریوها بوده، به طوری که در مقایسه با عملکرد نرمال در سناریوی #1 به ترتیب در H-MGهای اول تا سوم، بازیگران GEN با ۸/۷۳٪، ۷/۸۸٪ و ۱۱/۰۳٪ کاهش سود مواجه بوده‌اند. این حالت ناشی از افزایش رقابت بین بازیگران با توجه به افزایش تعداد بازیگرها در بازار می‌باشد. همچنین مقدار سود حاصله توسط بازیگر GEN در هر سه H-MG در سناریوی #5 (در عملکرد انفرادی) به ترتیب نسبت به سناریوی #1 از افزایش ۱۸/۶۱٪، ۲۹/۵۵٪ و ۱۴/۲۲٪ برخوردار بوده است. علاوه بر این با توجه به مقایسه نتایج سناریوی #4 و #5، بازیگران GEN در عملکرد انفرادی H-MGها به ترتیب با رشد سود ۲۹/۹۵٪، ۴۰/۶۶٪ و ۲۸/۳۸٪ روبرو شده‌اند که این حالت مصداق تأثیر تعداد بازیگران در افزایش رقابت می‌باشد. در واقع در عملکرد انفرادی H-MGها، بازیگران PR از انتخاب‌های کم‌تری در تأمین انرژی خود برخوردار بوده‌اند و این مسئله باعث شده، هر بازیگر GEN در عملکرد انفرادی از سهم بیش‌تری در فروش توان به بازار بهره‌مند شود و در نتیجه سود بیش‌تری را کسب نماید. از طرفی موضوع افزایش رقابت باعث شده که PRها در سناریوی #4 از طریق مدیریت مصرف و انتقال تقاضا در کاهش هزینه خود موفق‌تر عمل نمایند؛ بطوریکه مطابق با شکل ۱۰ (ب)، PRهای #1 الی #3 در سناریوی #4 نسبت به سناریوی #1 به ترتیب از کاهش هزینه ۳۰/۳٪، ۰/۱۷۳٪ و ۳/۱۴٪ برخوردار بوده‌اند و PR#1 نیز در این بین نسبت به سایر PRها و در مقایسه با سناریوهای دیگر بهتر عمل نموده است. علاوه بر این مقدار تابع منفعت ER#1 (حداقل هزینه ممکنه) در سناریوی #4 به واسطه وجود دو ER در بازار و در نتیجه افزایش رقابت نسبت به سایر سناریوها از بهبود قابل توجهی برخوردار می‌باشد. به طوری که ER#1 در سناریوی #5 و با حضور H-MG#1 در مقایسه با سناریوی #1 با کاهش هزینه ۲۴/۳۶٪ روبرو بوده اما در سناریوی #4 نسبت به سناریوی #1 از کاهش هزینه ۴۰/۰۵٪ بهره‌مند شده است.



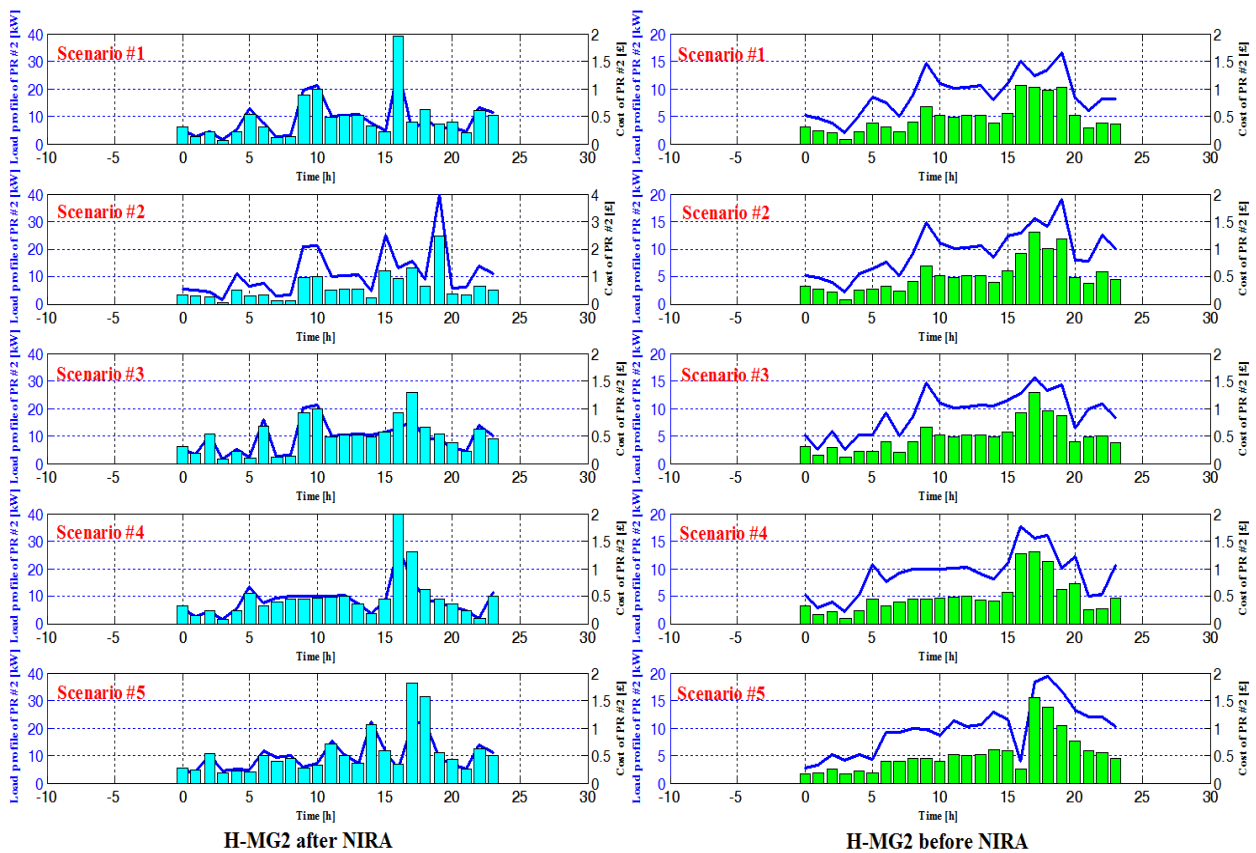
(ج)

شکل ۶: پروفایل تقاضای بار بازیگر PR در؛ الف) H-MG#1، ب) H-MG#2 و H-MG#3، تحت سناریوهای اعمال شده در طول عملکرد ۲۴ ساعته سیستم

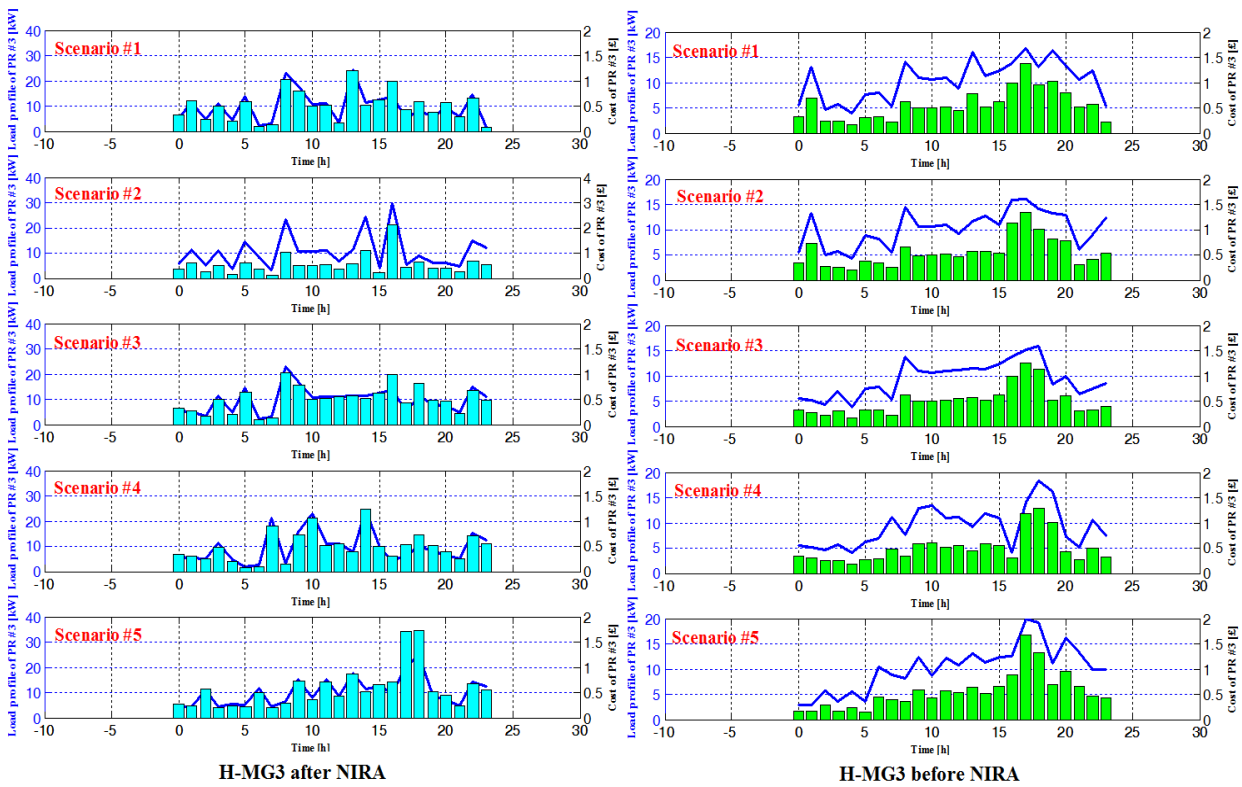
نمودارهای تغییرات منحنی بار و هزینه بازیگر PR برای هر H-MG در طی ۵ سناریوی تحت مطالعه قبل و بعد از فرآیند بهینه‌سازی به روش NIRA، در شکل‌های ۹-۷ نشان داده شده است. همان طوری که از شکل‌ها مشاهده می‌شود، در اکثر بازهای زمانی تغذیه مقدار تقاضای بار بیش‌تری با هزینه کم‌تر توسط الگوریتم ارائه شده، پیشنهاد شده است. در نتیجه، با توجه به اینکه مصرف‌کنندگان هزینه کم‌تری برای تغذیه بارهای خود پرداخت می‌نمایند، این منجر به تشویق آن‌ها برای مشارکت بیش‌تر در ساختار بازار MO-TE به عنوان یک بازیگر فعال و نیز ترغیب آن‌ها برای شرکت در برنامه RLD خواهد شد. مقادیر تابع منفعت بازیگران GEN و PR هر H-MG و همچنین بازیگران ER در مجموع یک شبانه‌روز تحت حالت‌های مورد مطالعه در شکل‌های ۱۰ (الف)-(ج) نشان داده شده است. همان طوری که در شکل ۱۰ (الف) مشاهده می‌شود، GENها در سناریوی #2 به واسطه افزایش ۱۰٪ در تولیدات NDU، نسبت به سایر حالت‌های عملکرد چند H-MG از افزایش سود برخوردار بوده‌اند. به طوری که تنها در مقایسه با سناریوی #1، سود بازیگران GEN در H-MGهای اول تا سوم به ترتیب ۱۰/۷٪، ۱۳٪ و ۷/۸٪ رشد یافته است. از طرفی این رشد تولید در سناریوی #2 منجر به افزایش توان مصرفی PRها شده، بطوریکه مطابق شکل ۱۰ (ب) باعث شده PR#2 و PR#3 هزینه بیش‌تری را در تأمین برق متحمل شوند. در عین حال ER#1 در سناریوی #2 به واسطه همین افزایش مصرف PRها و تغذیه آن‌ها از طریق تولیدات محلی H-MGها، با کاهش هزینه ۱۳/۲۲٪ نسبت به سناریوی #1 روبرو بوده و سهم توان کم‌تری از تولیدات GENها را از بازار خریداری نموده است. اما در مقابل، کاهش ۱۰٪ در مقدار توان تولیدی NDUها در سناریوی #3 به نفع ER#1 نبوده و در مقایسه با سایر حالت‌های عملکرد مطابق با شکل ۱۰ (ج) هزینه بیش‌تری را برای خرید از بازار متحمل شده است. زیرا این مقدار کاهش تولیدات NDU تأثیر چندانی در نقطه تنظیم توان بهینه GENها توسط الگوریتم پیشنهادی نداشته و این منابع تقریباً نزدیک به عملکرد نرمال



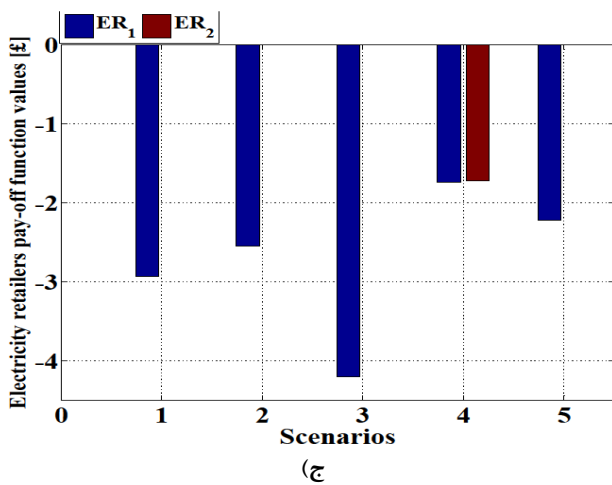
شکل ۷: تغییرات منحنی بار و هزینه بازیگر PR#1 تحت سناریوی تحت مطالعه قبل و بعد از فرآیند بهینه سازی به روش NIRA



شکل ۸: تغییرات منحنی بار و هزینه بازیگر PR#2 تحت سناریوی تحت مطالعه قبل و بعد از فرآیند بهینه سازی به روش NIRA

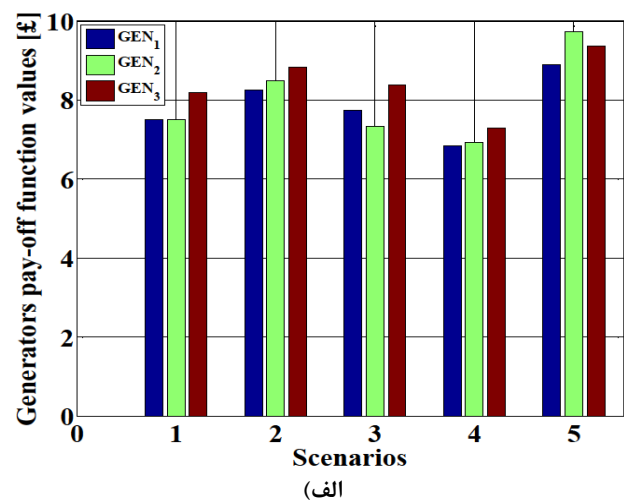


شکل ۹: تغییرات منحنی بار و هزینه بازیگر PR#3 تحت سناریوی تحت مطالعه قبل و بعد از فرآیند بهینه‌سازی به روش NIRA

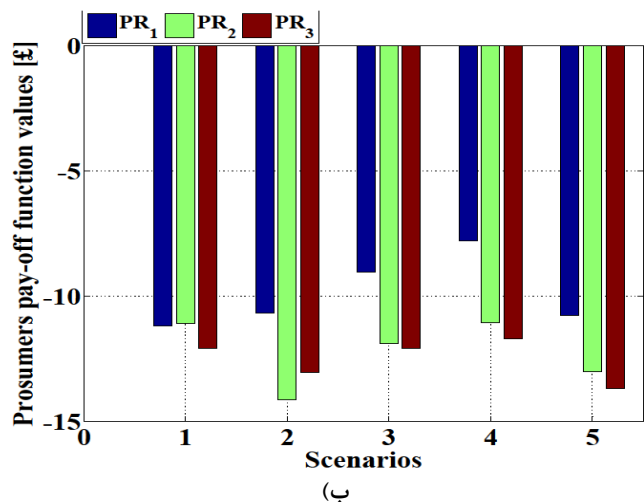


(ج)

شکل ۱۰: تابع منفعت مربوط به: الف) GENها، ب) PRها و ج) ERها تحت سناریوهای اعمال شده در کل یک شبانه‌روز



(الف)



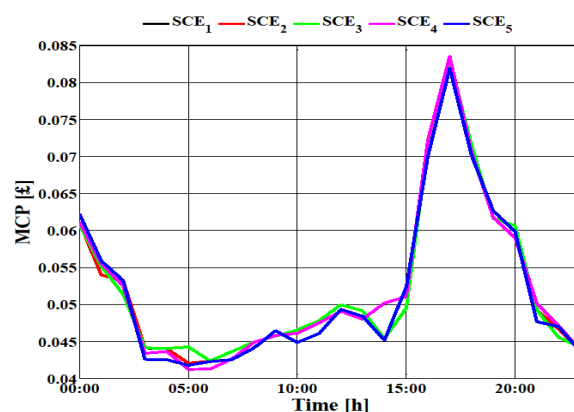
(ب)

در شکل ۱۱ مقدار MCP در هر بازه زمانی در طول عملکرد ۲۴ ساعته سیستم، تحت سناریوهای مختلف نشان داده شده است. مقدار MCP مطابق با شکل ۱۱ در سناریوی #2 و #3 تقریباً با سناریوی #1 یکسان می‌باشد اما مقدار MCP در سناریوی #4 تقریباً در بیش‌تر ساعات برابر یا کم‌تر از سناریوی #1 بوده به طوری که فقط ۲۹/۲٪ از بازه‌های زمانی مقدار MCP سناریوی #4 بیش‌تر از سناریوی #1 شده است. این موضوع بیان‌گر تأثیر افزایش رقابت به واسطه افزایش تعداد بازیگران بر روی MCP بوده و نیز حاکی از عملکرد مناسب استراتژی قیمت‌گذاری استاتیکی و توزیع توان الگوریتم پیشنهادی است. در واقع با افزایش یک

مراجع

- [1] T. Sahin and D. Shereck, "Renewable energy sources in a transactive energy market," in The 2014 2nd International Conference on Systems and Informatics (ICSAI 2014), 2014, pp. 202–208.
- [2] J. Song, "Research of retail electricity market operation mechanism based on user's side," in 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), 2016, pp. 1–5.
- [3] Jing Yu, Jian-Zhong Zhou, Jun-Jie Yang, Wei Wu, Bo Fu and Rong-Tao Liao, "Agent-based retail electricity market: modeling and analysis," in Proceedings of 2004 International Conference on Machine Learning and Cybernetics (IEEE Cat. No.04EX826), vol. 1, pp. 95–100.
- [4] W. Su and A. Q. Huang, "A game theoretic framework for a next-generation retail electricity market with high penetration of distributed residential electricity suppliers," Appl. Energy, vol. 119, pp. 341–350, 2014.
- [5] N. Zhang, Y. Yan and W. Su, "A game-theoretic economic operation of residential distribution system with high participation of distributed electricity prosumers," Appl. Energy, vol. 154, pp. 471–479, 2015.
- [6] N. Zhang, Y. Yan, S. Xu and W. Su, "Game-theory-based electricity market clearing mechanisms for an open and transactive distribution grid," in 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2015, pp. 1–5.
- [7] H. Yang, R. Zhou and J. Xin, "Dynamic cournot game behavior of electric power providers in retail electricity market," in IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005, pp. 544–549.
- [8] W. Y. Chiu, H. Sun and H. Vincent Poor, "A Multiobjective Approach to Multimicrogrid System Design," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 6, no. 5, pp. 2263–2272, 2015.
- [9] J. Lee, J. Guo, J. K. Choi and M. Zukerman, "Distributed Energy Trading in Microgrids: A Game Theoretic Model and Its Equilibrium Analysis," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 62, no. 6, pp. 1–1, 2015.
- [10] A. Ipakchi, "Demand side and distributed resource management — A transactive solution," in 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011, pp. 1–8.
- [11] S. A. Chandler, J. H. Rinaldi, R. B. Bass and L. Beckett, "Smart grid dispatch optimization control techniques for transactive energy systems," in 2014 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech), 2014, pp. 51–54.
- [12] J. Hu, G. Yang, H. W. Bindner and Y. Xue, "Application of Network-Constrained Transactive Control to Electric Vehicle Charging for Secure Grid Operation," IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. PP, no. 9, pp. 1–1, 2016.
- [13] S. Behboodi, D. P. Chassin, C. Crawford and N. Djilali, "Electric Vehicle Participation in Transactive Power Systems Using Real-Time Retail Prices," in 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), 2016, pp. 2400–2407.
- [14] "Power Ledger - A New Decentralized Energy Marketplace - Power Ledger - Where Power meets Blockchain." [Online]. Available: powerledger.io.
- [15] CEN, "Biomass Energy Centre," CEN/TC 335 biomass standards, 2007. [Online]. Available: <http://www.biomassenergycentre.org.uk>.
- [16] M. Marzband, A. Sumper, J. L. Domínguez-García and R. Gumara-Ferret, "Experimental validation of a real time energy management system for microgrids in islanded mode using a local day-ahead electricity market and MINLP," Energy Convers. Manag., vol. 76, pp. 314–322, 2013.
- [17] M. Marzband, E. Yousefnejad, A. Sumper and J. L. Domínguez-García, "Real time experimental implementation of optimum energy management system in standalone Microgrid by using multi-layer ant colony optimization," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 75, pp. 265–274, Feb. 2016.
- [18] M. Marzband, F. Azarinejadian, M. Savaghebi and J. M. Guerrero, "An Optimal Energy Management System for Islanded Microgrids Based on Multiperiod Artificial Bee Colony Combined With Markov Chain," IEEE Syst. J., vol. PP, no. 99, pp. 1–11, 2015.
- [19] M. Marzband, "Experimental validation of optimal real-time energy management system for Microgrids," Ph.D. dissertation,

ER در سناریوی #4؛ بازیگران PR هر H-MG با مدیریت و انتقال تقاضا از بازه‌های زمانی با مقدار MCP بالا به بازه‌هایی با MCP پایین و تنها از طریق تولیدات GENها، برق موردنیاز خود را تأمین کرده‌اند و این حالت منجر شده ERها در وضعیت خرید از بازار منطبق با تصمیم الگوریتم پیشنهادی نسبت به سایر سناریوها با بهبود منفعت روبرو شوند. از طرفی مطابق با شکل ۱۱، در سناریوی #5 هم در ۷۵٪ بازه‌های زمانی مقدار MCP کم‌تر از سناریوی #1 شده است. زیرا با توجه به کاهش تعداد بازیگران در سناریو #5 رقابت فشرده شده و بازیگر #1 PR مجبور بوده تا تقاضای خود را از بازه‌های زمانی با مقدار MCP بالا به بازه‌هایی با MCP پایین انتقال داده و بدین ترتیب تا حدودی هزینه برق خود را نسبت به سناریوی #1 مطابق شکل ۱۰ (ب) بهبود ببخشد.



شکل ۱۱: مقدار MCP در طول عملکرد ۲۴ ساعته سیستم در سناریوهای مختلف

۷- نتیجه گیری

در این مقاله، ساختار جدیدی برای پیاده‌سازی بازار خرده‌فروشی برق برپایه مدیریت TE و با استفاده از روش خاص تئوری بازی غیرهمکارانه (یعنی NIRA) برای سیستم‌های چند H-MG با حضور بازیگرانی با مالکیت‌های متفاوت و اهداف متضاد معرفی شده است. در ساختار پیشنهادی مدیریت تقاضا برپایه پاسخ‌گویی بار و انتقال تقاضا با توجه به MCP به انضمام استراتژی قیمت‌گذاری استاتیکی لحاظ شده و همچنین تأثیر تعداد بازیگران در افزایش رقابت و بهبود منفعت بین سیستم‌های چند H-MG با استفاده از طریق MO-TE با ERها در ارتباط می‌باشند، مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. بر طبق سناریوهای اعمال شده، می‌توان نتیجه گرفت که از طریق ساختار پیشنهادی توسعه پایدار از یک سو و انگیزه‌های تشویقی برای H-MGها از سوی دیگر جهت حضور روزافزون در بازار خرده‌فروشی و برآوردن نیازهایشان و حتی دستیابی به درآمد از طریق تبادل انرژی با یکدیگر و کاهش هزینه برق فراهم شده است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم ارائه‌شده در مدل‌سازی بازیگران و شبیه‌سازی بهره‌برداری آن‌ها در بازار کارآمد بوده زیرا با وجود اینکه هر یک از این بازیگران در بازار به‌طور یک‌جانبه به دنبال حداکثرسازی سود خود از طریق فرآیند تصمیم‌گیری پراکنده می‌باشند؛ اما بر پایه این روش چندهدفه، راه‌حلی برای توزیع بهینه توان، دستیابی به منفعت جمعی و تخصیص عادلانه سود میسر شده است.

انرژی برپایه الگوریتم سلسه‌مراتبی تعاملی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۳، صفحه ۱۰۷-۱۲۰، پاییز ۱۳۹۵.

[۲۳] معصومه جوادی، موسی مرزبند، سیدمازیا میرحسینی مقدم، «مدیریت بهینه ریزشبه‌ها به همراه استراتژی قیمت‌گذاری برپایه روش تئوری بازی با در نظر گرفتن ائتلاف منابع تولید»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۴، صفحه ۹۵-۱۰۷، زمستان ۱۳۹۵.

[24] M. Marzband, M. Ghadimi, A. Sumper and J. L. Domínguez-García, "Experimental validation of a real-time energy management system using multi-period gravitational search algorithm for microgrids in islanded mode," *Appl. Energy*, vol. 128, pp. 164-174, 2014.

[25] M. Marzband, A. Sumper, A. Ruiz-álvarez, J. L. Domínguez-García and B. Tomoiagă, "Experimental evaluation of a real time energy management system for stand-alone microgrids in day-ahead markets," *Appl. Energy*, vol. 106, pp. 365-376, 2013.

Dept. d'Enginyeria Elèctrica, EU d'Enginyeria Tècnica Ind. de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain, 2013.

[20] M. Marzband, M. Javadi, J. L. Domínguez-García and M. Mirhosseini Moghaddam, "Non-cooperative game theory based energy management systems for energy district in the retail market considering DER uncertainties," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 12, pp. 2999-3009, Sep. 2016.

[۲۱] معصومه جوادی، سیدمازیا میرحسینی مقدم، موسی مرزبند، «مدیریت بهینه انرژی ریزشبه‌ها در بازار خرده‌فروشی بر پایه روش تئوری بازی غیرهمکارانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۱، صفحه ۶۳-۷۴، بهار ۱۳۹۵.

[۲۲] معصومه جوادی، موسی مرزبند، سیدمازیا میرحسینی مقدم، «مدیریت بهینه انرژی در سیستم‌های چند-ریزشبه‌ای در بازار خرده‌فروشی

زیر نویس‌ها

^{۱۱} Dispatchable generation unit

^{۱۲} Non-dispatchable unit

^{۱۳} Non-responsive load

^{۱۴} Market operator based on Transactive energy

^{۱۵} Energy management system

^{۱۶} System buy price

^{۱۷} System sell price

^{۱۸} State-of-charge

^{۱۹} Taguchi's orthogonal array testing

^{۲۰} Unit commitment based on demand response

^۱ Procumer

^۲ Transactive energy

^۳ Nikaido-Isoda/Relaxation algorithm

^۴ Electricity retailer

^۵ Market clearing price

^۶ Home Microgrid

^۷ Generator

^۸ Distributed energy resource

^۹ Energy storage

^{۱۰} Responsive load demand