

مدیریت شیفت تقاضای مقید در برنامه‌ریزی نواحی انرژی با در نظر گرفتن تشکیل ائتلاف بهینه و تخصیص سود در سیستم‌های همسایه‌ای

فاطمه آذری‌نژادبان^۱، کارشناس ارشد؛ موسی مرزبند^۲، استادیار

۱- گروه مهندسی برق - واحد لاهیجان - دانشگاه آزاد اسلامی - لاهیجان - ایران - niloofar.azari@yahoo.com

۲- گروه مهندسی برق - واحد لاهیجان - دانشگاه آزاد اسلامی - لاهیجان - ایران - mousa_marzband@liau.ac.ir

چکیده: رقابت بین نواحی انرژی (ED^۱) و یا منابع توزیع‌شده انرژی (DER^۲) موجود در آن‌ها در شبکه‌های هوشمند جهت اخذ سود بالاتر یکی از مباحث مورد توجه محققان در سال‌های اخیر بوده است. برای نیل به این هدف، EDهای موجود در یک شبکه (و یا DERهای موجود در هر ED) می‌توانند با یکدیگر و نیز با EDهای دیگر (و یا DERهای موجود در EDهای شبکه همسایه‌ای) جهت کسب سود بالاتر همکاری داشته و برای دست‌یابی به این منظور ائتلاف^۳ تشکیل دهند. تخصیص سود ناشی از تشکیل ائتلاف بین EDها می‌تواند معیار مهمی جهت نشان دادن بهبود کارایی شبکه‌های هوشمند در افزایش میزان مشارکت EDهای موجود برای همکاری با یکدیگر به حساب آورده شود. علاوه بر این، نوسانات تقاضا و نیز تولید منابع تجدیدپذیر در سیستم‌های هوشمند می‌تواند توسط استراتژی‌های کنترل سمت تقاضا^۴ تحت نظارت قرار گیرد. در این راستا، شیفت تقاضا می‌تواند از طریق شیفت مقدار مشخصی از تقاضای بار از برخی دوره‌های زمانی به دوره‌های زمانی دیگر بر مبنای معیارهایی شامل پایین بودن مقدار تقاضای بار، پایین بودن قیمت تسویه بازار و نیز افزایش سود حاصل از مشارکت EDها صورت پذیرد. تأثیر شیفت تقاضای بار بر روی برنامه‌ریزی EDها و DERهای موجود در طول عملکرد مستقل و یا ائتلافی آن‌ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مربوطه همچنین مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این مقاله، متدولوژی‌ای بر پایه روش کلونی زنبور عسل جهت حداکثر نمودن سود در یک بازار رقابتی و نیز تخصیص سود ناشی از تشکیل ائتلاف مابین EDها که هر یک از آن‌ها نیز دارای DERهای مجزا می‌باشند؛ ارائه شده است. نشان داده شده است که به دلیل عدم ارتباط EDها جهت اخذ تصمیمات قیمت‌گذاری، با افزایش تجمیع تسهیلاتشان می‌توانند برای کسب سود بالاتر و جلوگیری از پرداخت هزینه ناشی از تولید مازاد و یا کم‌تر از حد تعیین‌شده، با یکدیگر همکاری^۵ داشته باشند. در نتیجه این همکاری، منفعت^۶ تک‌تک آن‌ها نیز متعاقباً افزایش یافته است. در نهایت، عملکرد الگوریتم پیشنهادی با الگوریتمی بر مبنای برنامه‌ریزی غیرخطی مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های هوشمند، بازار انرژی الکتریکی، تشکیل ائتلاف و رقابت، بار پاسخ‌گو، استراتژی قیمت‌گذاری.

Constrained Consumption Shifting Management in the Neighborhood System Scheduling Considering Coalition Formation and Profit Allocation

F. Azarnejadian¹, MSc; M. Marzband², Assistant Professor

1- Department of Electrical Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran, Email: niloofar.azari@yahoo.com

2- Department of Electrical Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran, Email: mousa_marzband@liau.ac.ir

Abstract: For enhancing competitiveness of energy district (ED) or distributed energy resources (DER) inside them in market, optimal operation of these has arisen as a relevant topic. With this objective, EDs (or DERs inside them) can collaborate with other EDs in the neighborhood system installed closer or far, forming coalitions for gaining competitiveness in the market. Profit allocation due to coalition between EDs is as an important issue for ensuring DER resources installation in smart grids. In addition, demand fluctuations and energy production based on renewable resources in the neighborhood systems for each ED independently can be accomplished by demand-side management strategies that try to establish mechanisms to allow for a flatter demand curve. In this regard, demand shifting potential can be tapped through the shifting of certain amounts of energy demand from some time periods to other time periods with lower expected demand, typically in response to price values, to help ensure that existing generation will remain available as well as to obtain the maximum profit with the coalition formation. The impact of the consumption shifting in the EDs and existing DERs schedule is also considered during the conduct of both independent and coalition operations. In this paper, a methodology based on artificial bee colony (ABC) is proposed to maximize the profit in a competitive market and allocate profit resulting from a coalition formation between multiple EDs encompassing DERs. The results obtained shown that the disconnection of DERs resulting from pricing decisions allows them to collaborate together with aggregated facilities to achieve higher profits due to excess production and avoid penalties due to shortages in production and demonstrated that significant increase in the profit may persuade the producers for forming a coalition. Eventually, performance of the proposed algorithm is compared with the developed algorithm based on non-linear programming.

Keywords: Smarts grid, electricity market, demand side management, coalition formation, demand respond, bidding strategy.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۰۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۰۴

نام نویسنده مسئول: موسی مرزبند

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

فهرست اصطلاحات

علائم اختصاری	توضیحات
electrical distribution system (EDS)	سیستم توزیع الکتریکی
energy district (ED)	نواحی انرژی
energy storage (ES)	ذخیره کننده انرژی
ES+/ES-	ES در طول عملکرد شارژ و دشارژ
fuel distribution system (FDS)	سیستم توزیع گاز
coefficient of performance (COP)	ضریب عملکرد
distributed energy resource (DER)	منبع توزیع شده انرژی
demand response (DR)	بار پاسخ گو
non-responsive load demand (NLD)	بار غیر پاسخ گو
DR+/DR-	مقدار تقاضای بار شیفت داده/ منتقل شده از بازه های زمانی دیگر به زمان t
conventional building (CB)	ساختمان سنتی
combined heat and power (CHP)	منبع ترکیبی توان الکتریکی و حرارت
wind turbine (WT)	توربین بادی
gas boiler (GB)	بویلر گازی
solar thermal panel (STP)	پانل حرارتی خورشیدی
electrical heat pump (EHP)	پمپ حرارتی بر مبنای مصرف توان الکتریکی
electrical boiler (EB)	بویلر الکتریکی
thermal energy storage (TES)	منبع ذخیره کننده حرارتی
market clearing price (MCP)	قیمت تسویه بازار
GR+, GR-	خرید و فروش توان از/ به ED #i شبکه بالادست
نمادها	توضیحات
@	تشکیل ائتلاف مابین ED #i و ED #M (M ≠ i)
{A@B} ≡ {AB}	تشکیل ائتلاف دوتایی مابین ED #A و ED #B
{A@B@C} ≡ {ABC}	تشکیل ائتلاف سه تایی مابین ED #A, ED #B و ED #C
{A}	عملکرد انفرادی ED #A
j → i	DER نصب شده در ED #A
اندیس ها	توضیحات
i+, i-	خرید و فروش توان از/ به ED #i / ED #M
e/h/D	الکتریکی/حرارتی/تقاضای بار غیر پاسخ گو
M	تمامی ED ها به جز ED #i
$\xi_e^{j,i} / \xi_h^{j,i}$	راندمان الکتریکی/حرارتی واحدهای حرارتی DER #j در ED #i (%)
$\bar{P}_e^{j,i}, \bar{P}_h^{j,i}$	حداکثر توان الکتریکی/حرارتی تولید شده توسط DER #j در ED #i (kW)
π^{ng}	پیشنهاد قیمت سوخت طبیعی (£/kWh)
ξ^{TES}	مقدار راندمان تلفات حرارتی (%)
$\underline{SOC}^x, \overline{SOC}^x$	حد پایین و بالای SOC در $x \in \{ES, TES\}$ (%)
$SOC_{INI}^{ES,i} / SOC_{INI}^{TES,i}$	مقدار اولیه SOC ES/TES در ED #i (%)
S	مساحت جمع کننده STP
a_1, a_2	ضرایب تلفات حرارتی مرتبه ۱ و ۲ (kWm^2 / k^0)
η_0	راندمان تلفات حرارتی صفر
κ	بخشی از مازاد/کمبود توان تولید شده/مورد نیاز ED #i/ شبکه بالادست
پارامترها	توضیحات
$\bar{p}_{t,h}^{STP,i}$	توان حرارتی پیش بینی تولید شده توسط STP در ED #i در بازه زمانی t (kW)
$\bar{p}_{t,e}^{WT,i}$	توان حرارتی پیش بینی تولید شده توسط WT در ED #i در بازه زمانی t (kW)
$\bar{p}_{t,e}^{D,i}, \bar{p}_{t,h}^{D,i}$	تقاضای بار الکتریکی/حرارتی پیش بینی در ED #i در بازه زمانی t (kW)
$\bar{\lambda}_t^{MCP}, \bar{\lambda}_t^{MCP}$	MCP الکتریکی/حرارتی در بازه زمانی t (£/kWh)
G_t^*	تشنش خورشیدی (kW/m^2)
Tem_t^c, Tem_t^a	دمای محیط/متوسط جمع کننده

متغیر تصمیم‌گیری	توضیحات
$P_{t,e}^{j,i}, P_{t,h}^{j,i}$	توان الکتریکی/حرارتی تولید/مصرف شده توسط DER #j در ED #i (kW)
$j \in \{ES-, WT, CHP, GB, STP, EHP, EB, TES-, GR-\}, i, M \in \{A, B, C\} M \neq i$	
$\pi_{t,e}^{j,i}, \pi_{t,h}^{j,i}$	پیشنهادهای قیمت الکتریکی/حرارتی DER #j در ED #i (£/kW)
$FU_t^{j,i}$	مقدار سوخت مصرفی DER #j در زمان t در ED #i (kW)
$X_t^{CHP,i}$	متغیر باینری، ۱ به معنی CHP روشن، در غیراین صورت خاموش
$p_{t,e}^{DR+,i}, p_{t,e}^{DR-,i}$	مقدار بار مصرفی DR اضافه‌شده در بازه زمانی t (DR+) و شیفت‌داده‌شده به بازه زمانی دیگر (DR-)
$\lambda_t^{MCP}, \Lambda_t^{MCP}$	مقدار MCP الکتریکی و حرارتی محاسبه‌شده توسط واحد ABC-1 در بازه زمانی t (£/kWh)
$\lambda_t^{MCP}, \Lambda_t^{MCP}$	مقدار MCP الکتریکی و حرارتی محاسبه‌شده توسط واحد ABC-2 در بازه زمانی t (£/kWh)
$p_{t,e}^{i+,m} / p_{t,h}^{i+,m}, p_{t,e}^{i-,m} / p_{t,h}^{i-,m}, \forall M \neq i$	مقدار توان الکتریکی/حرارتی تولیدشده/خریداری‌شده توسط/از DER #j به ED #M در بازه زمانی t (kW)
$P_{t,e}^{GR+,i}, P_{t,e}^{GR-,i}$	مقدار توان تولیدشده/خریداری‌شده توسط/از شبکه بالادست به ED #i در بازه زمانی t (kW)

۱- مقدمه

برای نیاز به کاهش مصرف می‌باشد در حالی که نگرانی [۱۶] برای توزیع توان DR و DER برای تدارکات انرژی و رزرو به‌طور همزمان می‌باشد. از نقطه نظر شبکه، کار ارائه‌شده در [۱۷] اثر شیفت بار بر روی شاخص قابلیت اطمینان نشان داده شده است. علاوه بر این، متدولوژی پیشنهادشده در [۱۰] اشاره به مشارکت DR در بهبود شاخص قابلیت اطمینان با هدف منظور نمودن عدم قطعیت مربوط به مصرف‌کنندگان می‌باشد.

کارهای ارائه‌شده قبلی عمدتاً اشاره به معرفی پتانسیل DR و نفوذپذیری DER در سیستم‌های مجزا و در شبکه‌های هوشمند و یا تأثیر آن‌ها بر روی شرایط زیست‌محیطی دارد. متدولوژی پیشنهادشده در مقاله حاضر بیش‌تر بر روی امکان‌سنجی مشارکت مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان به منظور شرکت در برنامه DR برای کاهش همزمان قیمت برق و افزایش سود تولیدکنندگان تمرکز دارد. مدل ارائه‌شده همچنین به منابع DER موجود در هر ED این امکان را می‌دهد که به‌طور شایسته‌ای مقدار توان بهینه خود را در برنامه DR مدیریت نمایند. مشخصه‌های منابع DER و DR به‌عنوان پارامترهای ورودی و قیود مدل بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. علاوه بر این، راهکاری به منظور برنامه‌ریزی همزمان DERهای موجود در EDها و مصرف‌کنندگان برای مشارکت در برنامه DR توسعه داده شده است. در این راستا، منابع DER الکتریکی و حرارتی و DR مطابق با قیود عملکردشان و پیشنهاد قیمتشان مدیریت می‌شوند. مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی به حداکثر نمودن سود اخذشده توسط هر ED به‌طور انفرادی و یا عملکرد ائتلافی با سایر EDها و یا کمینه نمودن هزینه آن‌ها کمک می‌نماید. برای نیل به این هدف، دادن این امکان به EDها برای افزایش توان تولیدیشان و تأمین کمبود مورد نیازشان با اخذ تصمیم‌گیری‌های همکارانه با دیگر EDها به موجب داد و ستد توان مابین آن‌ها، مدنظر قرار گرفته است. به‌عنوان مثال، EDها می‌توانند با همکاری، توان مصرفی مصرف‌کنندگان خود را با قیمتی به مراتب پایین‌تر از زمانی که به‌طور مستقل عمل می‌نمایند، تغذیه نمایند. علاوه بر این، EDها می‌توانند پیشنهاد قیمت خود را با در نظر گرفتن استراتژی اتخاذشده توسط دیگر EDها جهت اخذ سود بیش‌تر تغییر

توسعه شبکه‌های هوشمند راه را برای افزایش کارایی، بهبود قابلیت اطمینان و مقاوم نمودن شبکه‌های قدرت بیش از پیش هموار نموده‌اند [۱-۳]. پیاده‌سازی شبکه‌های هوشمند، انقلابی در روش تولید و مصرف انرژی و تبادل انرژی بین تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان به‌وجود آورده است [۴]. یکی از مؤلفه‌های کلیدی شبکه هوشمند، نواحی انرژی (ED) نامیده می‌شود که دربرگیرنده منابع مختلف انرژی توزیع‌شده (DER) تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر و بارهای پاسخ‌گو و غیرپاسخ‌گو می‌باشند. به‌عبارت دیگر، EDها شبکه‌هایی شامل DERهای توزیع‌شده‌ای هستند که قابلیت تأمین توان برای مصرف‌کنندگان در حین امکان تبادل توان با شبکه بالادست و یا به‌طور مستقل را دارا می‌باشند [۵-۷]. در EDها، بار پاسخ‌گو (DR^y) معمولاً به صورت تغییرات الگوی مصرف توسط مصرف‌کنندگان نسبت به الگوی مصرف نرمالشان در پاسخ به تغییرات قیمت برق در طول زمان می‌باشد. تحت این شرایط، ممکن است پرداخت‌های تشویقی نیز در نظر گرفته شود تا مصرف‌کنندگان را ترغیب نماید تا مصرف خود را از بازه‌هایی با قیمت تسویه بازار (MCP^a) بالا به بازه‌هایی با قیمت MCP پایین‌تر منتقل نمایند [۸-۱۰]. مجموعه‌ای از EDها می‌توانند به منظور مشارکت در تأمین تقاضای بار مصرفی با یکدیگر و به شبکه بالادست در یک بازار محلی متصل شوند. در نتیجه، آن‌ها می‌توانند برای کاهش هزینه‌های تولید توان الکتریکی و یا حرارتی با دیگر EDها تشکیل ائتلاف دهند [۱۱-۱۳]. EDها ممکن است سود بیش‌تری از تشکیل ائتلاف به دست آورند و یا تصمیم به خارج شدن از ائتلاف نمایند؛ اگر چنانچه برآورد نمایند که سود ناشی از تشکیل ائتلاف کم‌تر از سود عملکرد انفرادی آن‌ها می‌باشد.

علاوه بر این، به منظور ترغیب مصرف‌کنندگان موجود در این EDها بایستی راهکارهایی برای مدیریت بهینه DRها اتخاذ شود؛ تا اینکه آن‌ها انگیزه لازم برای مشارکت بیش‌تر را داشته باشند. در این راستا، [۱۴] مروری بر استفاده از برنامه DR در شبکه‌های قدرت ضمن نشان دادن حالت‌های موفق و موانع موجود بر سر راه استفاده از آن ارائه داده است. تمرکز اصلی [۱۵] بر روی دیدگاه اپراتور شبکه توزیع

حد مطلوب تشکیل داده و نیز با افزایش تعداد EDها به راحتی می‌تواند خود را با شرایط جدید تطبیق دهد. علاوه بر این، برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، نتایج حاصله آن با نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم پیاده‌سازی شده برای EMS به روش برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP^{۱۱}) (نام‌گذاری شده به صورت EMS-NLP) مقایسه شده است. نوآوری‌های این مقاله در راستای پاسخ به سئوالات مطرح شده قبل، می‌تواند به صورت زیر خلاصه شوند:

۱- پیشنهاد ساختاری برای شبکه‌های همسایه‌ای برای بازیگران شرکت‌کننده در بازار استخری با پیشنهادی قیمت تابع عرضه^{۱۲}. این مدل یک مدل غیرخطی بوده که قادر است زمانی که بازیگران تمایل به تشکیل ائتلاف از خود نشان می‌دهند، مقدار توان و پیشنهاد قیمت بهینه منابع تولید و مصرف را تعیین نماید. برای این منظور، مدل ریاضی جامعی ارائه شده و نشان داده شده است که به راحتی قابل تعمیم به ساختارهای دیگر و انعطاف‌پذیر می‌باشد؛

۲- فرموله نمودن یک استراتژی مدیریت سمت تقاضای ویژه بر مبنای حل مسئله بهینه‌سازی برای حداکثر نمودن سود کل شبکه تحت مطالعه و متأثر از مقدار تقاضای بار و قیمت تسویه بازار.

۲- نمای کلی از ایده ارائه‌شده

مسئله مطرح‌شده بر روی یک شبکه همسایه‌ای پیاده‌سازی شده است. شبکه همسایه‌ای شبکه‌ای است که در آن چندین ED و نیز ساختمان‌های متداول (CB^{۱۳}) به یکدیگر و به شبکه سراسری متصل می‌باشند. تحت این شرایط، هر ED دارای یک جمع‌کننده^{۱۴} بوده و خرده‌فروش^{۱۵} این قابلیت را دارد که در بازه‌های زمانی مختلف در صورت مازاد توان به جمع‌کننده‌های دیگر، توان بفروشد و در صورت کمبود، نیاز خود را تأمین کنند. بارهای CB تنها خریداران توان هستند و بارهای مصرفی‌شان غیر قابل کنترل می‌باشد. این EDها به ارائه ساختار بازار محلی نیاز دارد که در آن حتی‌المقدور توانایی و پشتیبانی مقدار تقاضای بار داخلی خود با کم‌ترین مقدار هزینه برق برای مصرف‌کنندگان داخلی و نیز افزایش سود کسب‌شده برای صاحب ساختار تحت مطالعه را به دنبال داشته باشد. زمانی که یک ED مازاد تولید دارد، این ED قابلیت فروش توان به سایر EDها، شبکه بالادست و CBها را دارد. این توان مازاد می‌تواند برای تغذیه هر یک از این منابع بسته به پیشنهاد قیمت آن‌ها اختصاص داده شود. علاوه بر این، اگر چنان که ED با کمبود توانی مواجه شود، می‌تواند کمبود توان خود را با خرید از EDهای دیگر و یا شبکه بالادست بسته به پیشنهادی قیمتی که ارائه نموده‌اند، جبران نماید. عملکرد و مدیریت EDها می‌تواند توسط یک کنترلر مرکزی^{۱۶} کنترل بشود. هدف مهم این ساختارها، استفاده حداکثری از منابع تجدیدپذیر و موجود در ED و نیز مدیریت بهینه بارهای موجود در آن در حین برآورده شدن تابع منفعت برای هر دو طرف تولیدکننده و مصرف‌کننده می‌باشد. در ساختار پیشنهادی، متغیرهای تصمیم‌گیری هم از جنس کمیت^{۱۷} و هم

نمایند. برای به دست آوردن حداکثر سود در همکاری، توجه شده است که هر ED می‌تواند با مشارکت بخشی از DERهای خود و یا کل آن‌ها در ائتلاف شرکت نماید. آن‌ها می‌توانند تأثیر افزایش تعداد DERهای شرکت‌کننده در ائتلاف بر روی عدم تعادل، کارایی و سود اخذشده به‌طور توأمان نیز مورد بررسی قرار دهند. در این روش، مادامی که یک رویداد DR شناسایی شد (برای یک و یا چندین بازه زمانی ناشی از ظرفیت توان تولیدشده و یا پیشنهاد قیمت)، منابع قابل دسترس DER و DR به‌طور بهینه با لحاظ نمودن قیود پیاده‌سازی‌شده‌ای که بیانگر عملکرد کلی بازیگران تولیدکننده و مصرف‌کننده می‌باشند، برنامه‌ریزی می‌شوند. برنامه DR پیاده‌سازی‌شده بر مبنای مدل DR تشویقی، در حالتی که مصرف‌کنندگان بر مبنای کاهش مصرف واقعی خودشان تشویق شده‌اند، ارائه شده است. کارهای قبلی انجام‌شده تنها استفاده از DR برای بازه زمانی مشخص را بدون در نظر گرفتن شیفت مصرف‌کنندگان مابین بازه‌ها و در نتیجه صرف‌نظر از بررسی تأثیر شیفت مصرف در بازه‌هایی پیش‌بینی‌شده را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. علاوه بر این، اثرات در ارتباط با اتصال DERها و مشاهده اثرات تشکیل ائتلاف مابین EDها آدرس‌دهی نشده‌اند. در ساختار ارائه‌شده، عدم قطعیت‌های مربوط به DERهای تجدیدپذیر، تقاضای بارهای الکتریکی/حرارتی و قیمت تسویه بازار نیز توأمان مدنظر قرار گرفته شده است.

از آنجایی که برخی از EDها ممکن است مشارکت بیشتری در تشکیل ائتلاف نسبت به سایر EDها داشته باشند، سئوالات کلیدی زیر مطرح می‌شوند:

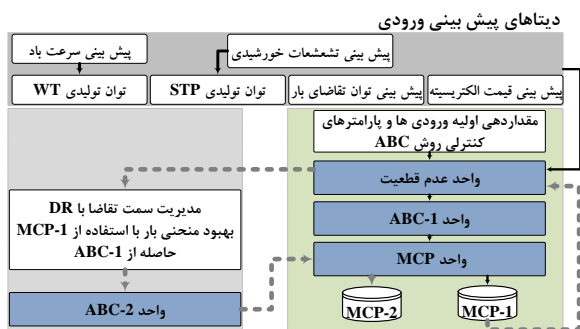
۱- توزیع نهایی توان مازاد تولیدشده توسط EDهای

شرکت‌کننده در هر ائتلاف به چه صورتی می‌باشد؟

۲- اهمیت میزان مشارکت هر ED در هر ائتلاف مشخص به چه صورتی می‌باشد؟

۳- چگونه می‌توان سود را مابین مشارکت‌کنندگان در تشکیل ائتلاف به‌طور عادلانه تقسیم نمود؟

نوآوری اصلی ارائه‌شده در این مقاله در طراحی استراتژی‌های همکاریانه بین EDها در شبکه توزیع بوده که اجازه مبادله توان با قیمتی پایین‌تر، کاهش عدم تعادل و افزایش کارایی برای دستیابی به حد بالای تولید انرژی را به سیستم می‌دهد. هر ائتلاف تشکیل‌شده شامل EDهایی است که دارای مازاد توانی هستند که می‌توانند آن را به EDهایی که برای پاسخ‌گویی به مصرف‌کنندگان خود نیاز به توان دارند، انتقال دهند و یا بفروشند. در داخل هر ائتلاف، EDها هماهنگی انتقال توان بین یکدیگر را از طریق یک سیستم مدیریت انرژی (EMS^{۱۸}) با استفاده از روش بهینه‌سازی بر پایه الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل (ABC^{۱۹}) (پیاده‌سازی‌شده در محیط نرم‌افزار MATLAB) از نقطه نظر تعیین سود حداکثر برای هر یک از EDها انجام می‌دهند. الگوریتم پیشنهادی (نام‌گذاری‌شده به صورت EMS-ABC) می‌تواند ائتلاف بهینه را به همراه دستیابی به حالت تعادل در



شکل ۲: ساختار پیشنهاد شده برای پیاده سازی EMS-ABC

شبه کد مربوط به این ساختار نیز در الگوریتم ۱ ارائه شده است.

الگوریتم ۱: الگوریتم EMS-ABC

دریافت اطلاعات مربوط به شبکه تحت مطالعه

While(t<=24) do

واحد عدم قطعیت

۱- تولید سناریوها به همراه احتمال وقوع مربوط به پارامترهای عدم قطعیت بارهای الکتریکی و حرارتی، منابع تجدیدپذیر (WT, STP) و قیمت‌ها (MCP, SBP, SSP) در طول عملکرد روزانه؛

واحد ABC-1

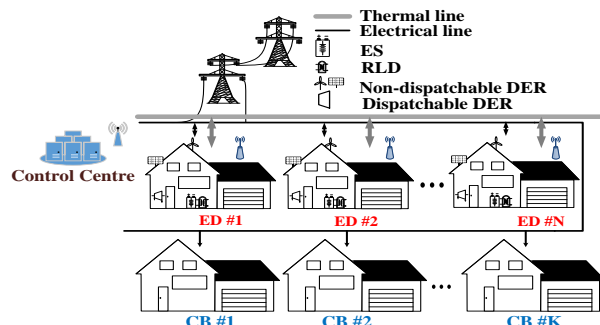
۲- مقداردهی اولیه تمامی متغیر تصمیم با توجه به قیود فنی و اقتصادی مربوط به منابع و EDها؛
 ۳- محاسبه مقادیر بهینه منابع و آفرهای پیشنهادی بهینه با ABC با هدف حداکثر نمودن سود (بسته به نوع ائتلاف شکل گرفته) برای ۲۴ ساعت یک روز؛
 ۴- محاسبه قیمت تمام شده برق و حرارت برای ۲۴ ساعت؛

واحد ABC-2

۵- مقداردهی اولیه تمامی متغیر تصمیم و نیز تقاضای بار جدید (بین ۵۰٪ بیشتر مقدار پیش‌بینی شده و ۴۰٪ کمتر از مقدار پیش‌بینی شده)؛
 ۶- محاسبه مقادیر بهینه DR با هدف کمینه نمودن قیمت MCP در طول عملکرد روزانه سیستم؛
 ۷- تشکیل جمعیت اولیه‌ای از توان خروجی منابع و آفرهای پیشنهادی (با در نظر گرفتن شکل بار جدید به طوری که قیود نیز برآورده شوند)؛
 ۸- محاسبه مقادیر بهینه منابع و آفرهای پیشنهادی بهینه با ABC با هدف حداکثر کردن سود (در عملکرد انفرادی و نیز ائتلافی EDها) برای ۲۴ ساعت یک روز؛
 ۹- محاسبه قیمت تمام شده برق و حرارت برای ۲۴ ساعت؛
 10- End while

در ادامه، وظیفه و عملکرد هر یک واحدهای موجود در ساختار پیشنهادی به اختصار تشریح شده است.

از جنس قیمت^{۱۸} (پیشنهادهای قیمت منابع تولید و مصرف) می‌باشند؛ در نتیجه از مدل تابع عرضه استفاده شده است. عملکرد EDها برای یک روز مشخص بر مبنای داده ساعتی و با این فرض است که برای هر روز عملکرد مشابهی می‌تواند در شبکه رخ دهد، صورت پذیرفته شده است. مسئله مطرح شده یک مسئله چندپروبودی بوده و برای اهداف زمان‌بندی و برنامه‌ریزی منابع تولید روزانه-ساعتی و نه زمان-حقیقی تحلیل شده است. اگرچه روش ارائه شده به راحتی می‌تواند برای اهداف زمان-حقیقی نیز تعمیم داده شود. شماتیک سیستم با شبکه‌های همسایه‌ای در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: ساختار کلی از شبکه همسایه‌ای

۳- پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی

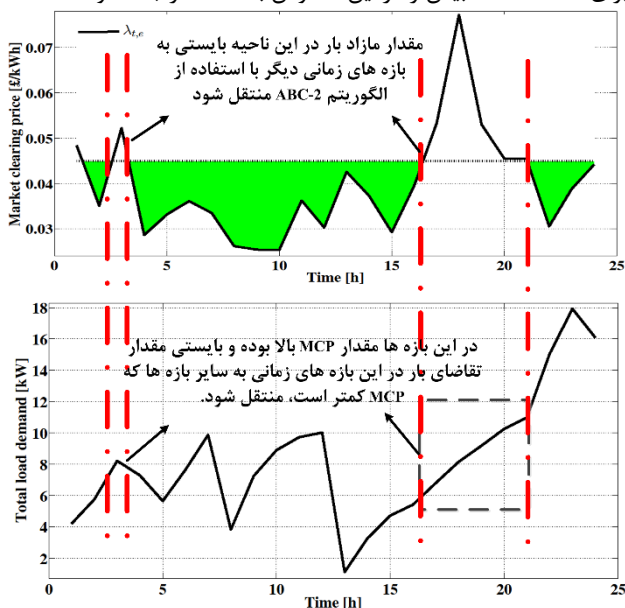
در این مقاله، یک سیستم مدیریت انرژی بر پایه روش کلونی زنبور عسل (به اختصار EMS-ABC نامیده شده است)، پیاده‌سازی شده است. نحوه پیاده‌سازی الگوریتم اصلاح شده ABC و وجه مشخصه آن با الگوریتم‌های متداول ABC در [4] به طور کامل تشریح شده است. ساختار پیشنهاد شده برای پیاده‌سازی EMS-ABC در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طوری که از شکل مشاهده می‌شود، این ساختار از واحدهایی شامل واحد عدم قطعیت، واحدهای ABC-1/2 و واحد MCP تشکیل شده است. در ابتدا، پس از مقداردهی اولیه ورودی‌ها، اخذ مشخصات ادوات نصب شده در سیستم و نیز پارامترهای کنترلی الگوریتم ABC، داده‌های پیش‌بینی شامل تشعشع خورشید، سرعت باد، توان تقاضای بار الکتریکی/حرارتی و قیمت پیش‌بینی الکتریکی به واحد عدم قطعیت ارسال می‌شود. سپس، واحد بهینه‌سازی ABC-1 به منظور تعیین مقدار MCP-1 (یعنی λ_t^{MCP} و Λ_t^{MCP}) اجرا می‌شود. با توجه به مقدار MCP-1 به دست آمده، مدیریت سمت تقاضا به منظور بهبود منحنی تقاضای بار و بهبود آن با توجه به تابع هدف تعریف شده در ABC-2 مجدداً اجرا می‌شود. پس از تسطیح منحنی تقاضای بار و اطمینان از کاهش MCP پس از اعمال برنامه DR، MCP-2 (یعنی λ_t^{MCP} و Λ_t^{MCP}) محاسبه شده و به اپراتور بازار اعلام می‌شود. در شکل ۲ خطوط سیاه و ممتد نشان‌دهنده روند اجرای ABC-1 بوده و خطوط خاکستری منقطع بیانگر اجرای ABC-2 برای تعیین MCP-2 می‌باشد. مقادیر پروفایل بارهای الکتریکی و حرارتی هر ED، قیمت‌های برق، توان پیش‌بینی تولید شده توسط منابع WT و STP در هر بازه زمانی در ضمیمه ارائه شده است.

۳-۱- واحد عدم قطعیت

مدیریت سمت تقاضای پیشنهاد شده توسط الگوریتم ABC-2 در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طوری که از شکل مشاهده می شود، موافقی که مقدار MCP از حد معینی بیش تر شده باشد، تقاضای بار در محدوده مورد نظر از آن بازه زمانی به بازه زمانی دیگر با MCP پایین تر شیفت داده می شود. تعیین مقدار و زمان تغذیه میزان مقدار تقاضای بار توسط الگوریتم ABC-2 تعیین می شود.

۳-۳- واحد MCP

در این واحد ساختار بازار استخری بر مبنای مناقصه دوسویه پیاده سازی شده است. اطلاعات مربوط به تمامی توان های الکتریکی/حرارتی و پیشنهادات قیمت منابع تولید/ مصرف به این واحد ارسال شده و بر مبنای ساختار بازار استخری محل تقاطع منحنی کمیت بر حسب پیشنهاد قیمت منابع تولید و مصرف، مقدار MCP را در اختیار اپراتور بازار می گذارد. نحوه محاسبه مقدار MCP و پیاده سازی بازار استخری بر پایه مناقصه دوسویه خارج از محدوده کاری این مقاله می باشد. به دلیل محدودیت صفحه از ذکر مطالبی در این خصوص اجتناب شده است. برای اخذ اطلاعات بیشتر در این خصوص به [۱۰] مراجعه شود.



شکل ۳: نحوه مدیریت سمت تقاضا بر پایه MCP در الگوریتم ABC-2

۴- پیاده سازی ریاضی مسئله

شبکه تحت مطالعه در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طوری که از شکل مشاهده می شود، منابع ذخیره کننده توان الکتریکی و حرارتی در ED های #A و #C به منظور ذخیره توان الکتریکی و حرارتی تولید شده مازاد در این ED ها تعبیه شده است. ظرفیت و تعداد تجهیزات نصب شده در هر ED در جدول ضمیمه ۱ ذکر شده است. در ابتدای بازه برنامه ریزی، عملگر هر ED برای عملگر انفرادی (یعنی {A}، {B}، {C} و {GRID})، تشکیل ائتلاف دودویی با دیگر ED ها (یعنی {AB}، {AC} و {BC})، تشکیل ائتلاف سه تایی (یعنی {ABC}) و نیز پیشنهاد قیمت برای خرید/فروش تصمیم می گیرد. علاوه بر این، پروفایل های بارهای الکتریکی و حرارتی ED ها و قیمت های برق برای

با توجه به تعداد بالای عدم قطعیت های موجود در محیط تجدید ساختاریافته، در چنین ساختاری نمی توان صرفاً از تجزیه و تحلیل حساسیت به متغیرهای بیرونی پیش بینی شده استفاده نمود [۳]. تجزیه و تحلیل سناریو روش مناسبی جهت در نظر گرفتن عدم قطعیت های موجود در شبکه تحت مطالعه می باشد [۲]. سناریوها به صورت اتفاقات محتمل مجموعه ای از متغیرهای بیرونی در بازه های زمانی مشخص شده می باشد. این سناریوها باید به گونه ای باشد که محتمل ترین اتفاقات را در نظر بگیرد؛ اما تعداد این سناریوها جهت سادگی نباید زیاد باشد. سناریوهای ایجاد شده جهت تجزیه و تحلیل استراتژی های مختلف استفاده می شود. بحث در خصوص چگونگی ایجاد سناریو و اعمال عدم قطعیت خارج از محدوده کاری این مقاله بوده و به دلیل محدودیت تعداد صفحات از ارائه آن خودداری شده است. برای اخذ اطلاعات بیشتر در رابطه با ایجاد سناریو و نحوه به دست آوردن احتمال هر سناریو به [۲] مراجعه شود.

۳-۲- واحدهای ABC-1/2

سیستم مدیریت انرژی ارائه شده در این مقاله در دو مرحله اجرا شده است که اهداف منظور شده برای هر یک از آن ها به شرح زیر می باشد:

ABC-1 - ۱

اطلاعات ورودی: $\tilde{\Lambda}_t^{MCP}$, $\tilde{\lambda}_t^{MCP}$, $\tilde{p}_{t,h}^{D,i}$, $\tilde{p}_{t,e}^{D,i}$, $\tilde{p}_{t,e}^{WT,i}$, $\tilde{p}_{t,h}^{STP,i}$.
متغیر تصمیم: توان الکتریکی/حرارتی تولید شده توسط منابع تولید، توان شارژ/دشارژ ES و TES، توان الکتریکی/حرارتی مبادله شده بین ED ها و شبکه بالادست، تمامی پیشنهادات قیمت خرید/فروش مربوط به DER ها، ED ها و مصرف کنندگان، MCP-1.

اهداف: تعیین مقادیر بهینه توان تولید شده منابع الکتریکی/حرارتی به نحوی که سود حاصله این منابع حداکثر شود. تابع هدف تعریف شده در این واحد از سه بخش مجزا شامل حداکثر نمودن سود (ناشی از عملکرد مستقل ED ها و یا عملکرد ائتلافی آن ها)، برقراری تعادل حرارتی و بهبود وضعیت SOC در ES و TES تشکیل شده است.

ABC-2 - ۲

اطلاعات ورودی: Λ_t^{MCP} , λ_t^{MCP} , $p_{t,e}^{WT,i}$, $p_{t,h}^{STP,i}$, $p_{t,h}^{D,i}$, $p_{t,e}^{D,i}$.
متغیر تصمیم: $\pi_{t,e}^{z,i}$, $\pi_{t,h}^{z,i}$, $\pi_{t,h}^{+,M}$, $\pi_{t,e}^{+,M}$, $\pi_{t,h}^{-,M}$, $\pi_{t,e}^{-,M}$, $\pi_{t,h}^{z,i}$, $\pi_{t,e}^{z,i}$, Λ_t^{MCP} , λ_t^{MCP} , $p_{t,e}^{DR-,i}$, $p_{t,e}^{DR+,i}$, $FU_t^{z,i}$, $X_t^{CHP,i}$, $\pi_{t,h}^{z,i}$.

اهداف: تعیین میزان مشارکت مصرف کنندگان در برنامه DR و تعیین مقدار توان تولید شده توسط منابع تولید به نحوی که سودشان حداکثر شود. برای دستیابی به این اهداف، بهبود پروفایل تقاضای بار با استفاده از MCP-1 مدنظر قرار گرفته شده است. تحت این شرایط، تقاضای بار شیفت داده شده از یک بازه زمانی با MCP بالا به بازه زمانی دیگر (DR-) با MCP پایین تر در طول عملکرد ۲۴ ساعته سیستم معادل با بار اضافه شده (DR+) در بازه های زمانی با MCP پایین تر تعیین شده توسط الگوریتم ABC-2 در نظر گرفته شده است. عملکرد

منهای هزینه ناشی از خرید توان‌های الکتریکی/حرارتی از سایر ساختمان‌ها به منظور برآورده نمودن کامل توان مورد نیاز ساختمان نام می‌باشد. بخش آخر معادله نیز مقدار توان الکتریکی خریداری شده از شبکه بالادست برای تأمین تقاضای نام را نشان می‌دهد.

۲- سود ناشی از عملکرد ائتلافی ED #i و ED #M (M ≠ i)

$$\sum_{\forall t} \text{Pr ofit} = \sum_{\forall t} \text{Pr ofit}^i @ \sum_{\forall t} \text{Pr ofit}^M, \quad \forall M \neq i \quad (2)$$

۳- سود شبکه بالادست

$$\text{Profit}^{\text{GRID}} = \sum_{\forall t, i} \left(P_{t,e}^{\text{GR}+,i} \times \pi_{t,e}^{\text{GR}+,i} - P_{t,e}^{\text{GR}-,i} \times \pi_{t,e}^{\text{GR}-,i} \right) \quad (3)$$

۴-۱-۲- تابع هدف ABC-2

توابع هدف تعریف شده در این قسمت مسئله شبیه‌سازی دقیقاً مشابه با توابع هدف تعریف شده برای ABC-1 بوده با این تفاوت که مقدار سود ناشی از مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه DR نیز بایستی مدنظر قرار گیرد. از این‌رو، عبارت زیر به تمامی معادلات (۱)-(۳) بایستی اضافه شود:

$$P_t^{\text{DR}+,i} \times \pi_t^{\text{DR}+,i} - P_t^{\text{DR}-,i} \times \pi_t^{\text{DR}-,i} \quad (4)$$

۴-۲- قیود فنی و اقتصادی مسئله

۴-۲-۱- قیود پیشنهاد قیمت الکتریکی و حرارتی

$$\pi_{t,e/h}^{j,i} \leq \pi_{t,e/h}^{j,i} \leq \bar{\pi}_{t,e/h}^{j,i} \quad (5)$$

برای منابع تجدیدپذیر می‌تواند صفر در نظر گرفته شده و برای منابعی که سوخت مصرف می‌نمایند، می‌تواند با محاسبه مقدار هزینه حاشیه‌ای الکتریکی (MC^e) منبع مورد نظر تخمین زده شود. MC^e برای منبع مصرف‌کننده سوخت از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$MC_{t,e}^{j,i} = \frac{P_{t,e}^{j,i}}{\xi_{e}^{j,i}} \times \pi^{ng} \quad (6)$$

همچنین، می‌تواند معادل مقدار هزینه حاشیه‌ای حرارتی (MCh^h) در نظر گرفته شده و از رابطه زیر محاسبه شود:

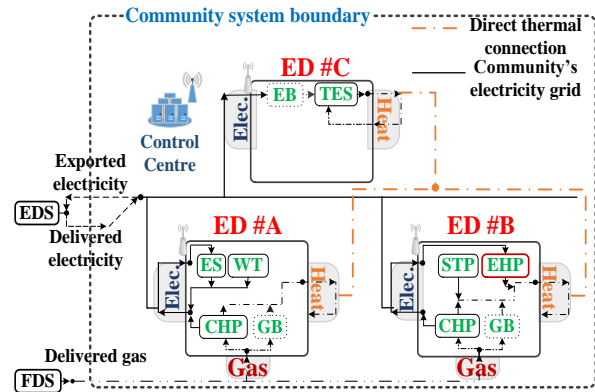
$$MC_{t,h}^{j,i} = \frac{P_{t,h}^{j,i}}{\xi_{h}^{j,i}} \times \pi^{ng} \quad (7)$$

۴-۲-۲- قیود توان الکتریکی/حرارتی تولیدشده/مصرفی توسط منابع

✓ قیده‌های ES و TES [۱۰]

$$-P_{t,e}^{\text{ES}} \leq P_{t,e}^{\text{ES},i} \leq \bar{P}_e^{\text{ES}} \quad (8)$$

خرید و فروش و شکل موج توان خروجی تولیدشده توسط WT و STP در شکل‌های ضمیمه ۱ و ۲ نشان داده شده است.



شکل ۴: شماتیک سیستم تحت مطالعه

در ادامه، مدل ریاضی هر یک از واحدهای شکل گرفته در ساختار پیشنهادی ارائه شده است.

۴-۱- توابع هدف

توابع هدف تعریف شده در هر دو ABC-2 و ABC-1 بر مبنای مسئله تصمیم‌گیری مربوط به حداکثر سود انفرادی هر ED در شرایط کار مستقل و یا سود ناشی از مشارکت آن‌ها در همکاری ائتلافی مابین یکدیگر، می‌باشد. با این تفاوت که مقدار سود ناشی از مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه DR در تابع هدف مسئله ABC-2 لحاظ شده است. در ادامه، مدل ریاضی مسئله مطرح شده در این مقاله ارائه شده است.

۴-۱-۱- تابع هدف ABC-1

سناریوهای مختلفی که برای تعریف توابع هدف در نظر گرفته شده است، عبارت‌اند از:

۱- سود ناشی از عملکرد مستقل ساختمان ED #i

$$\text{Pr ofit}_{|v_i}^i = \max \left(\sum_{\forall j \rightarrow i} \left(P_{t,e}^{j,i} \times \pi_{t,e}^{j,i} + P_{t,h}^{j,i} \times \pi_{t,h}^{j,i} \right) + \sum_{\forall M \neq i} \left(P_{t,e}^{i,M} \times \pi_{t,e}^{i,M} - P_{t,h}^{i,M} \times \pi_{t,h}^{i,M} \right) + P_{t,e}^{\text{GR}+,i} \times \pi_{t,e}^{\text{GR}+,i} - P_{t,e}^{\text{GR}-,i} \times \pi_{t,e}^{\text{GR}-,i} \right) \times \Delta t - \sum_{\forall j \rightarrow i} F U_{t,i}^{j,i} \times \pi^{ng} \quad (1)$$

بخش اول سمت راست معادله (۱) بیانگر مقدار درآمد ناشی از تولید توان‌های الکتریکی/حرارتی تولیدشده توسط DER #j موجود در ED #i می‌باشند. بخش دوم سمت راست این معادله معادل مقدار هزینه پرداخت شده برای تأمین سوخت مورد نیاز منابع حرارتی می‌باشد. بخش سوم در سمت راست معادله (۱) بیانگر درآمد ناشی از فروش توان‌های الکتریکی/حرارتی فروخته شده به سایر ساختمان‌ها

✓ **قید تعادل توان الکتریکی و حرارتی ED #i**

$$P_{t,e}^{D,i} + P_{t,e}^{ES+,i} + P_{t,e}^{EHP,i} + P_{t,e}^{EB,i} + \sum_{\forall M \neq i} P_{t,e}^{i+,M} + P_{t,e}^{GR-,i} = \sum_{\forall M \neq i} P_{t,e}^{i-,M} + P_{t,e}^{GR+,i} + P_{t,e}^{CHP,i} + P_{t,e}^{WT,i} \quad (27)$$

$$P_{t,h}^{D,i} + P_{t,h}^{TES+,i} + \sum_{\forall M \neq i} P_{t,h}^{i+,M} = \sum_{\forall M \neq i} P_{t,h}^{i-,M} + P_{t,h}^{CHP,i} + P_{t,h}^{GB,i} + P_{t,h}^{EHP,i} + P_{t,h}^{EB,i} + P_{t,h}^{TES-,i} \quad (28)$$

✓ **قید تعادل کل توان الکتریکی و حرارتی شبکه**

$$\sum_{\forall i} (P_{t,e}^{D,i} + P_{t,e}^{ES+,i} + P_{t,e}^{EHP,i} + P_{t,e}^{EB,i} + P_{t,e}^{GR-,i}) + \sum_{\forall M \neq i} P_{t,e}^{i+,M} = \sum_{\forall M \neq i} P_{t,e}^{i-,M} + \sum_{\forall i} (P_{t,e}^{GR+,i} + P_{t,e}^{CHP,i} + P_{t,e}^{WT,i}) \quad (29)$$

$$\sum_{\forall i} (P_{t,h}^{D,i} + P_{t,h}^{TES+,i}) + \sum_{\forall M \neq i} P_{t,h}^{i+,M} = \sum_{\forall M \neq i} P_{t,h}^{i-,M} + \sum_{\forall i} (P_{t,h}^{CHP,i} + P_{t,h}^{GB,i} + P_{t,h}^{EHP,i} + P_{t,h}^{EB,i} + P_{t,h}^{TES-,i}) \quad (30)$$

✓ **مدل DR**

$$P_{t,e}^{D,i} = \tilde{P}_{t,e}^{D,i} + P_{t,e}^{DR+,i} - P_{t,e}^{DR-,i}, \quad \forall P_{t,e}^{D,i} > 0 \quad (31)$$

$$\text{if } \lambda_t^{MCP} < \lambda_{t'}^{MCP} \left. \begin{matrix} \\ t \neq t' \end{matrix} \right\} \Rightarrow \begin{cases} P_{t,e}^{DR-,i} \leq \alpha \times \tilde{P}_{t',e}^{D,i} \\ P_{t,e}^{DR+,i} = -P_{t',e}^{DR-,i} \end{cases} \quad (32)$$

رابطه (۳۲) نشان می‌دهد که اگر چنان که مقدار قیمت تسویه بازار در بازه زمانی t کوچک‌تر از مقدار تسویه بازار در بازه زمانی t' باشد، می‌تواند بخشی از بار پیش‌بینی شده در بازه زمانی t' به بازه زمانی t شیفت داده شود.

$$\text{if } t = t' \Rightarrow P_{t,e}^{D,i} = \tilde{P}_{t,e}^{D,i} \quad (33)$$

رابطه (۳۳) نشان می‌دهد که در یک بازه زمانی معین نمی‌تواند شیفت بار و یا انتقال بار به همان بازه زمانی وجود داشته باشد.

۵- بحث و بررسی نتایج

ساختار پیشنهادی بر روی شبکه تحت مطالعه که شامل سه ED به نام‌های A، B و C که هر کدام از آن‌ها نیز دربرگیرنده انواع مختلفی از منابع تولید و مصرف الکتریکی و حرارتی می‌باشند، تست و ارزیابی شده است.

در شکل ۵ سهم توان الکتریکی تولیدشده توسط هر یک از EDها و شبکه بالادست نسبت به توان کل الکتریکی تولیدشده نشان داده شده است. در شرایط کار مستقل EDها، مقدار بار مصرفی ساختمان A نسبت به زمانی که با دیگر ساختمان‌ها ائتلاف تشکیل می‌دهد

$$\underline{SOC}_t^{ES} \leq SOC_t^{ES} \leq \overline{SOC}_t^{ES} \quad (9)$$

$$SOC_t^{ES,i} = SOC_{t-1}^{ES,i} + \frac{P_{t,e}^{ES,i}}{P_e^{ES}} \quad (10)$$

$$SOC_{t=1}^{ES,i} = SOC_{INI}^{ES} \quad (11)$$

$$-P_h^{TES} \leq P_{t,h}^{TES,i} \leq \overline{P}_h^{TES} \quad (12)$$

$$\underline{SOC}_t^{TES} \leq SOC_t^{TES,i} \leq \overline{SOC}_t^{TES} \quad (13)$$

$$SOC_t^{TES,i} = SOC_{t-1}^{TES,i} \times \xi_h^{TES,i} + \frac{P_{t,h}^{TES,i}}{P_h^{TES}} \quad (14)$$

$$SOC_{t=1}^{TES,i} = SOC_{INI}^{TES} \quad (15)$$

✓ **قیدهای CHP در ED #i [۱۸]**

$$P_{t,e}^{CHP,i} \leq P_{t,e}^{CHP,i} \leq \overline{P}_e^{CHP,i} \quad (16)$$

$$P_{t,e}^{CHP,i} = FU_t^{CHP,i} \times \xi_{t,e}^1 + X_t^{CHP,i} \times \xi_{t,e}^2 \quad (17)$$

$$P_{t,h}^{CHP,i} = FU_t^{CHP,i} \times \xi_{t,h}^1 + X_t^{CHP,i} \times \xi_{t,h}^2 \quad (18)$$

✓ **قیدهای EHP در ED #i [۱۸]**

$$P_{t,h}^{EHP,i} = P_{t,e}^{EHP,i} \times COP_t \quad (19)$$

$$0 \leq P_{t,h}^{EHP,i} \leq \overline{P}_h^{EHP} \quad (20)$$

✓ **قیدهای GB در ED #i [۱۸]**

$$0 \leq P_{t,h}^{GB,i} \leq \overline{P}_h^{GB} \quad (21)$$

$$P_{t,h}^{GB,i} = \xi_h^{GB,i} \times FU_{t,h}^{GB,i} \quad (22)$$

✓ **قیدهای STP در ED #i [۱۸]**

$$P_h^{STP,i} = A \cdot G^* \left(\eta_0 - \frac{a_1(t_m - t_a)}{G^*} - \frac{a_2(t_m - t_a)^2}{G^*} \right) \quad (23)$$

✓ **قید WT**

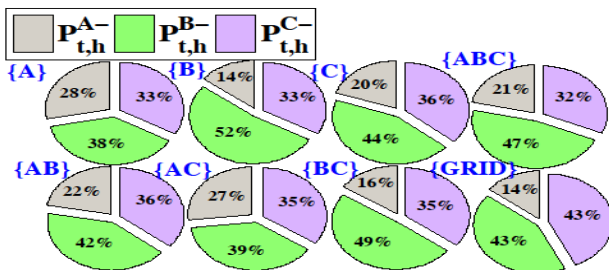
$$0 \leq P_t^{WT,i} \leq \overline{P}^{WT,i} \quad (24)$$

✓ **قید شبکه بالادست**

$$0 \leq P_{t,e}^{GR+} \leq \kappa \times \sum_{\forall i} P_{t,e}^{GR+,i} \quad (25)$$

$$0 \leq P_{t,e}^{GR-} \leq \kappa \times \sum_{\forall i} P_{t,e}^{GR-,i} \quad (26)$$

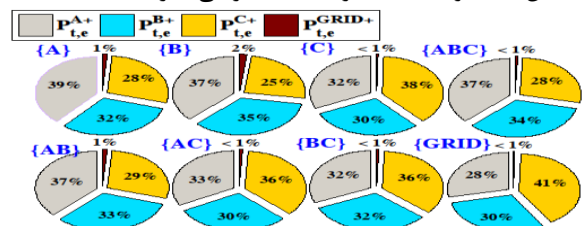
مقدار سهم توان حرارتی تولیدی ساختمان‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طوری که از شکل مشاهده می‌شود، حداکثر توان حرارتی تولیدشده توسط ED #A زمانی است که این ساختمان به‌طور مستقل به دنبال حداکثر نمودن سود خود باشد. به تدریج با تشکیل ائتلاف با دیگر ساختمان‌ها سهم تولید توان حرارتی در این ساختمان کاهش قابل ملاحظه‌ای نموده و در ائتلاف بزرگ به حداقل مقدار خود رسیده است. این شرایط برای ساختمان #B نیز صدق می‌نماید. این در حالی است که این رویه برای ساختمان #C کاملاً عکس شده است. زمانی که ساختمان #C مشارکت بیش‌تری در تأمین توان حرارتی مورد نیاز داشته است، تنها در حدود ۸٪ بازه‌های زمانی مقدار TES SOC بیش‌تر از ۵۰٪ بوده و در نهایت ساختمان #C با به سرویس آوردن TES سعی در تأمین توان حرارتی کل شبکه نموده است. این در حالی است که در سایر موارد در بیش‌تر از ۶۷٪ مواقع مقدار TES SOC بیش‌تر از ۵۰٪ بوده است.



شکل ۷: درصد سهم توان حرارتی تولیدشده توسط نواحی انرژی

در شکل ۸ مقدار SOC در ES و TES نشان داده شده است. مقدار ES SOC در تمامی سناریوهای کار مستقل ساختمان‌ها در حدود ۱۷٪ بیش‌تر از ۵۰٪ شده است. در سناریوی {AB} مقدار SOC در بیش‌تر از ۲۷/۵٪ مواقع بیش‌تر از ۵۰٪ بوده که بهترین شرایط را در بین سناریوهای اعمال شده دارا می‌باشد. این در حالی است که پس از تشکیل ائتلاف ساختمان #A با ساختمان #C مقدار ES SOC تنها در ۲۱٪ مواقع به بیش‌تر از ۵۰٪ رسیده است و این مورد باعث کاهش قابلیت اطمینان سیستم در مواجهه با تأمین توان مورد نیاز ساختمان #A زمانی که از سایر ساختمان‌ها و یا شبکه بالادست قطع شده است، می‌شود. نکته قابل ملاحظه این است که در سناریوی تشکیل ائتلاف بزرگ تنها در ۱۲/۵٪ بازه‌های زمانی مقدار ES SOC بیش‌تر از ۵۰٪ بوده و در سایر موارد ES در حالت دشارژ شدن عمل نموده است. در سناریوی {GRID} در تمامی بازه‌ها ES در حالت دشارژ شدن عمل نموده و همواره از مقدار SOC کاسته شده است. در خصوص TES SOC نیز همان‌طوری که از شکل مشاهده می‌شود، مقدارش در شرایط درگیر بودن ساختمان #C به شدت کاهش پیدا می‌نماید. در شرایطی که هدف حداکثر نمودن سود سایر ساختمان‌ها به جز #C می‌باشد، مقدار TES SOC در اکثر مواقع بیش‌تر از ۵۰٪ بوده و TES سهم کم‌تری در تأمین توان حرارتی مورد نیاز شبکه دارا می‌باشد.

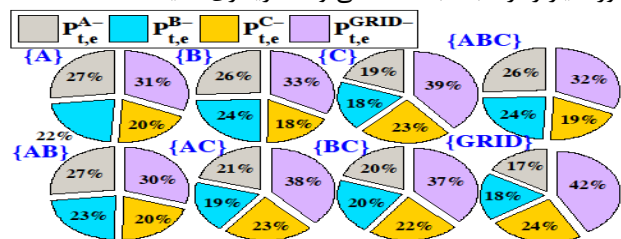
حداکثر شده است. علی‌رغم اینکه مقدار بار مصرفی در این ساختمان تحت تمامی شرایط در طول عملکرد روزانه سیستم تقریباً مشابه بوده و مقدار ES SOC تنها در حدود ۱۷٪ مواقع بیش‌تر از ۵۰٪ می‌باشد، از این‌رو مقدار افزایش توان بار مصرفی ساختمان #A ناشی از خرید توان از ساختمان‌های دیگر بوده است. پس از تشکیل ائتلاف ساختمان #A با دیگر ساختمان‌ها، مقدار توان فروخته‌شده از جانب ED #A کاهش محسوسی پیدا نموده و سهم توان تولیدی شریک این ED در تأمین توان مورد نیاز افزایش پیدا نموده است. میزان افزایش بار مصرفی ساختمان‌ها پس از مشارکت در مدیریت سمت تقاضا برای تمامی سناریوها در حدود ۹٪، ۸٪ و ۱۵٪ به ترتیب برای ساختمان‌های #A، #B و #C بوده است و تشکیل ائتلاف عمدتاً بر روی میزان فروش ساختمان‌های شرکت‌کننده در ائتلاف تأثیر می‌گذارد.



شکل ۵: درصد سهم هر ناحیه انرژی نسبت به میزان کل توان

تولیدشده در شبکه

در شکل ۶ سهم هر ساختمان در تأمین مقدار تقاضای بار مورد نیاز شبکه تحت مطالعه نشان داده شده است. همان‌طوری که از شکل مشاهده می‌شود، مقدار توان تولیدشده توسط ED #A در شرایط کار مستقل و در هنگام تشکیل ائتلاف با ساختمان #B حداکثر مشارکت را داشته ولی پس از تشکیل ائتلاف با #C مقدار آن کاهش محسوسی نموده است. در سناریوی {AC} علی‌رغم کاهش سهم تولید الکتریکی ساختمان #A با این وجود دیگر ساختمان‌ها و شبکه بالادست مقدار توان تولیدی آن‌ها نسبت به شرایط کار مستقل افزایش نشان داده است. همان‌طوری که از شکل مشاهده می‌شود، کمینه سهم تولید ED #A در شرایطی رخ می‌دهد که هدف حداکثر نمودن سود شبکه بالادست می‌باشد. این در حالی است که سهم توان تولیدی #B در حالی که هدف حداکثر نمودن سود #C می‌باشد، کمینه مقدار را دارا بوده و برای ساختمان C این مورد تحت شرایط {ABC} رخ داده است. به علاوه، این شکل نشان می‌دهد که تشکیل ائتلاف بزرگ مابین ساختمان‌ها منجر به تقسیم سهم تولید آن‌ها شده و مابه‌التفاوت توان مورد نیاز را از شبکه بالادست می‌تواند خریداری نمایند.

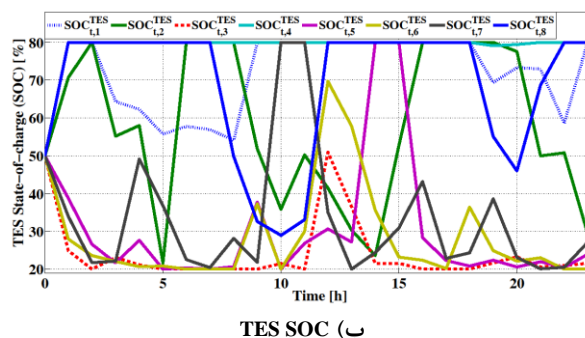
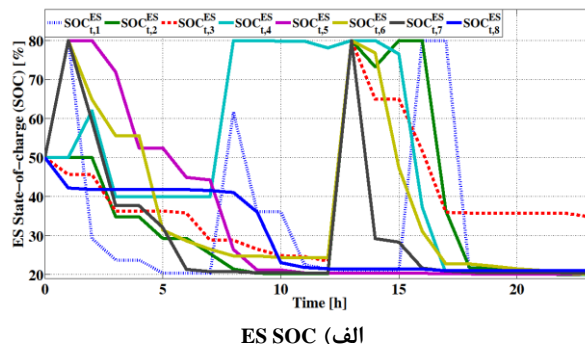


شکل ۶: درصد توان مصرفی هر ناحیه انرژی نسبت به کل توان

مصرفشده در شبکه

#C به طرز چشم‌گیری افزایش یافته است به نحوی که مقادیر GB و GC در تمامی سناریوها (به جز {GRID}) نسبت به {C} کاهش قابل ملاحظه‌ای بیش‌تر از ۲۱٪ را نشان داده است. برخلاف EDهای #A و #B که تشکیل ائتلاف منجر به کاهش مقدار DR+ نسبت به DR- شده است، در #C ED این رویه معکوس شده است. بدین معنی که با تشکیل ائتلاف به میزان ۳۷٪ تغذیه DR+ کاسته شده است. این شرایط عمدتاً نشأت‌گرفته از کاهش خرید توان از شبکه بالادست بوده است. مقادیر MCPهای ۱ و ۲ به‌دست‌آمده از واحدهای ABC-1 و ABC-2 در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طوری که از شکل مشاهده می‌شود، اعمال مدیریت سمت تقاضا با استفاده از الگوریتم ABC-2 تأثیر به‌سزایی بر روی کاهش مقدار MCP در تمامی بازه‌های زمانی داشته است. نکته قابل توجه، بررسی تأثیر تشکیل ائتلاف مابین EDها بر روی مقدار MCP می‌باشد. مواقعی که EDها به‌طور مستقل کار می‌نمایند، در بیش‌تر از ۹۶٪ بازه‌های زمانی مقدار MCP-1 از MCP-2 بیش‌تر می‌باشد. این در حالی است که پس از تشکیل ائتلاف مابین EDها به‌ویژه در {AB} و {ABC} این مقدار به ترتیب به ۷۹٪ و ۹۲٪ بازه‌های زمانی رسیده است. در {GRID} حتی کاهش بیش‌تری داشته و تنها به ۳۳٪ بازه‌های زمانی رسیده است. در سایر موارد همان ۹۶٪ صادق می‌باشد. نکته قابل ذکر این است که مقادیر بیشینه و کمینه MCPها در تمامی سناریوها کاهش چشم‌گیری داشته است. به نحوی که مقدار حداکثر MCP-2 از ۴٪ تا ۲۸٪ نسبت به MCP-1 تحت سناریوهای مختلف کاهش یافته است. علاوه بر این، کمینه مقدار MCP-2 نیز بین ۱۷٪ تا ۹۶٪ نسبت به MCP-1 در تمامی سناریوها کاهش نشان داده است. تشکیل ائتلاف‌های دودویی مابین EDها تأثیر شگرفی بر روی مقادیر حداکثر MCP داشته و کاهش قابل ملاحظه‌ای نسبت به عملکرد مستقل EDها مشاهده شده است. با این وجود، ائتلاف بزرگ باعث شده حداکثر مقدار MCP به میزان ناچیزی افزایش یابد ولی مقدار کمینه آن را به طرز محسوسی کاهش داده است. با مقایسه شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود که در تمامی سناریوهای زمانی که MCP حداکثر مقدار خود را دارا می‌باشد، الگوریتم پیشنهادی سعی در شیفت بار به بازه‌های زمانی با مقادیر MCP پایین‌تر نموده است. در خصوص مقدار کمینه MCP-1 ذکر این نکته حائز اهمیت می‌باشد که در تمامی سناریوها مقدار کمینه در ساعات ابتدایی روز اتفاق افتاده است؛ به جز {AB} که در ساعات پایانی روز کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقدار MCP-1 مشاهده شده است. این در حالی است که هیچ روند مشخصی برای کمینه مقدار MCP-2 وجود نداشته و الگوریتم با توجه به عملکرد شیفت‌دهی بار و بسته به مقدار مصرف و تولید، بهترین شرایط ممکنه برای تغذیه مصرف‌کنندگان را برگزیده است.

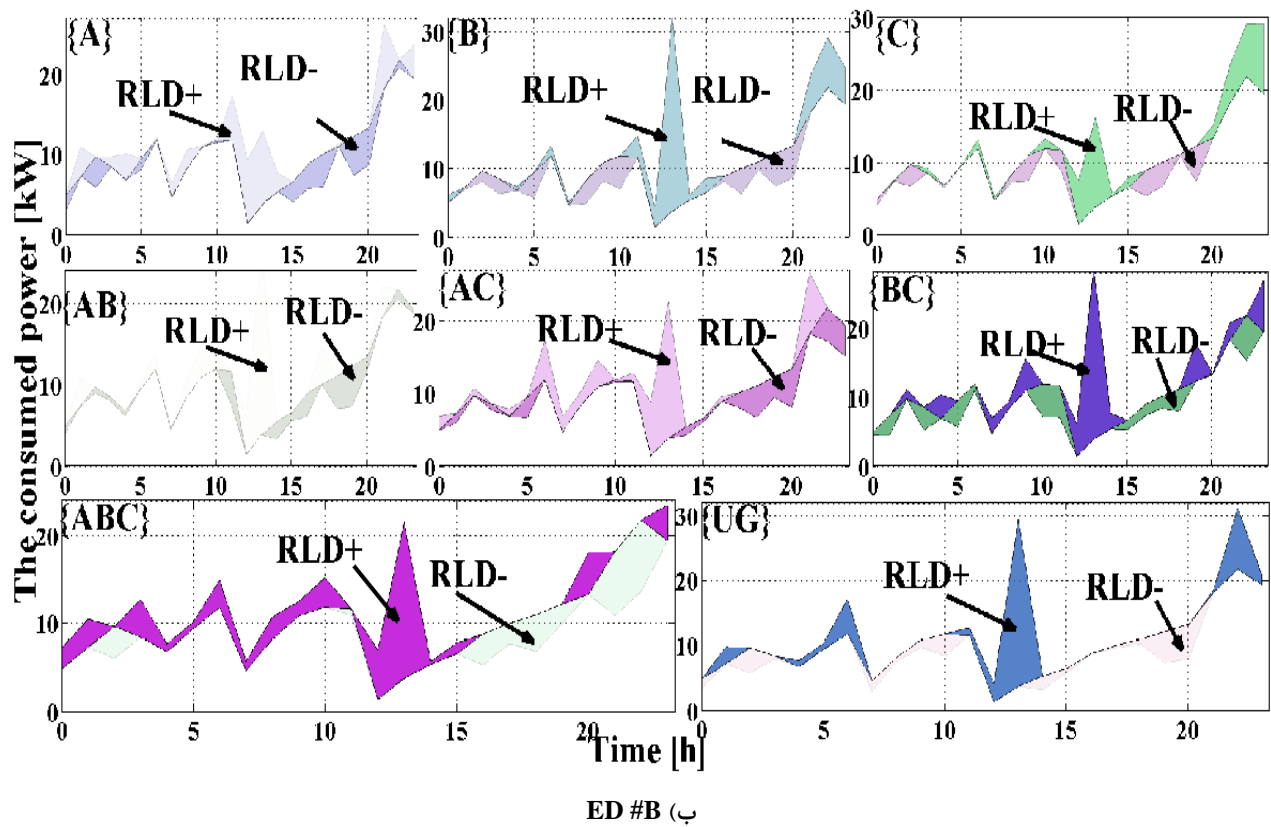
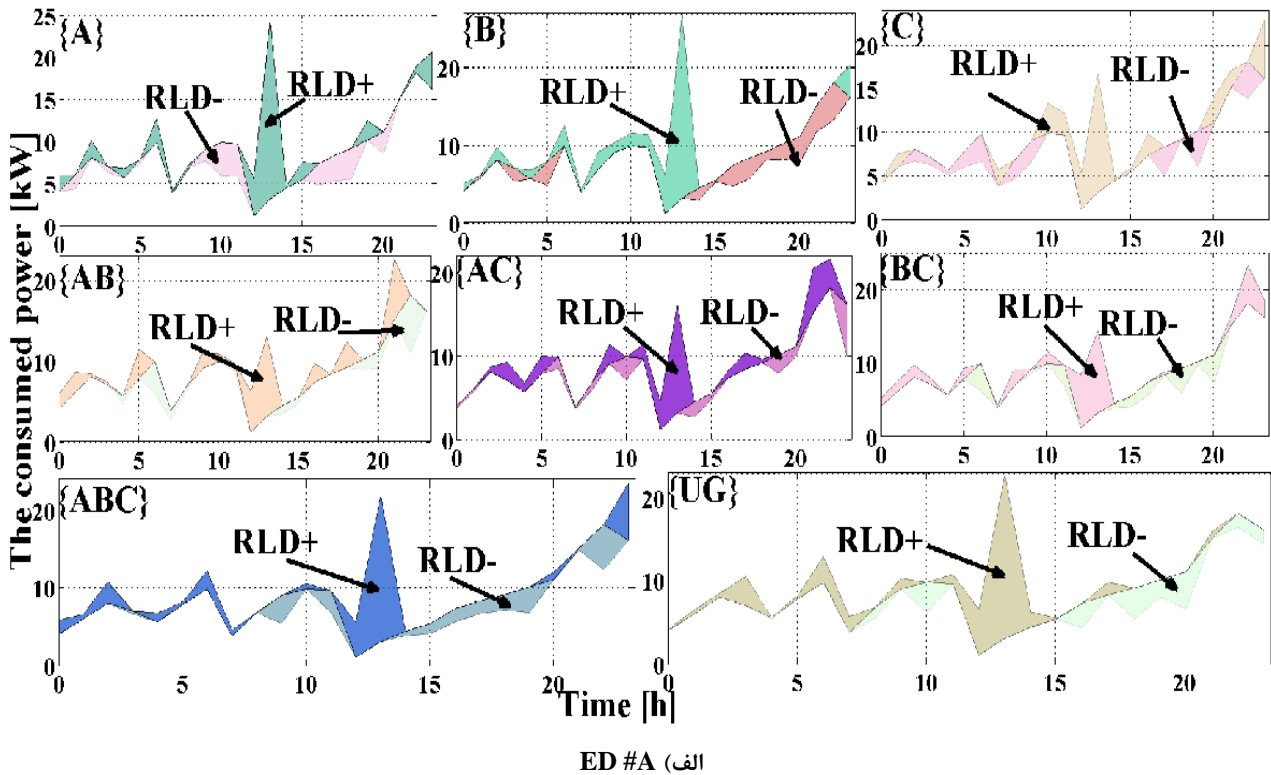
مقدار سود حاصله توسط هر ED و شبکه بالادست تحت سناریوهای مختلف در جدول ۱ نشان داده شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، #A ED در شرایط کار مستقل بالاترین سود را کسب نموده است. پس از آن با تشکیل ائتلاف با #B مقدار سود بالاتری

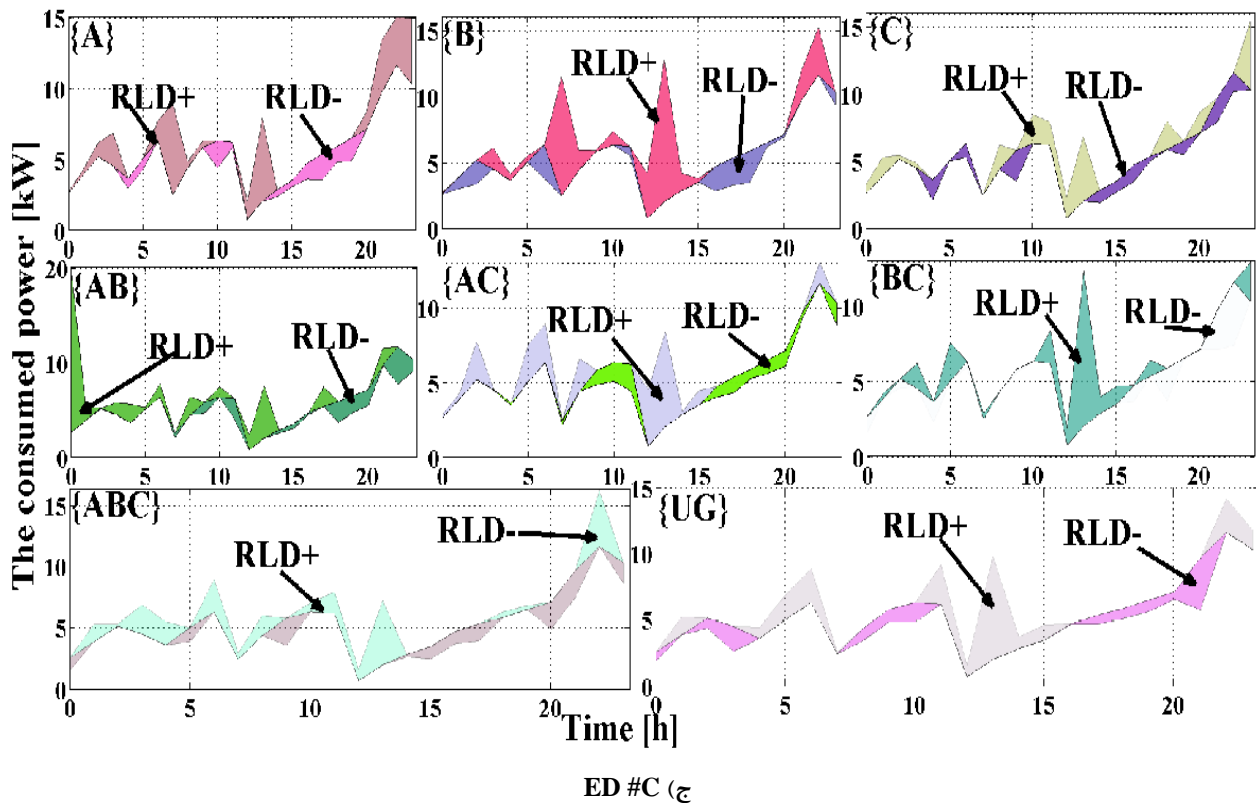


شکل ۸: وضعیت ES SOC و TES SOC در هر بازه زمانی در عملکرد ۲۴ ساعته سیستم

در شکل ۹ مقدار بار مصرفی الکتریکی ساختمان‌ها تحت سناریوهای مختلف نشان داده شده است. همان‌طوری که در شکل ۹ (الف) مشاهده می‌شود، پروفایل بار مصرفی ساختمان #A در تمامی سناریوها متفاوت بوده است. در شرایطی که ممکن است در یک سناریو DR+ وجود داشته باشد؛ ممکن است در همان بازه زمانی DR- تحت سناریوی دیگر رخ بدهد. در ساعت ۱۳:۰۰ به حداکثر مقدار خود رسیده است و آن ناشی از خرید توان قابل ملاحظه‌ای از شبکه بالادست بوده است. علی‌رغم اینکه در این بازه زمانی مقدار MCP خیلی پایین نبوده با این وجود الگوریتم تصمیم به تغذیه بار DR+ برای ساختمان #A نموده است. تحت این شرایط، علاوه بر کسب سود بالاتر توسط منابع تولید موجود در این ساختمان، مصرف‌کنندگان در این ساختمان نیز در طول عملکرد روزانه سیستم منفعت برده‌اند. مقدار کل DR+ در طول عملکرد ۲۴ ساعته سیستم در تمامی سناریوها بیش‌تر از ۴۳٪ مقدار کل DR- بوده و در سناریوی {AC} به حداکثر مقدار خود (یعنی ۵۳٪) رسیده است. در ائتلاف {AC} منابع تولید موجود در #A سهم بیش‌تری از توان نسبت به {A} به منظور تأمین توان مورد نیاز #C تولید می‌نمایند. در این صورت، با توجه به تولید تصادفی توان توسط این منابع، مازاد تولید در #A نیز می‌تواند برای تغذیه DR+ مورد استفاده قرار گیرد. افزایش مقدار DR+ در #B نسبت به DR- در طول عملکرد روزانه تقریباً مشابه بوده (در حدود ۴۱٪) با این تفاوت که حداکثر مقدار تفاوت مابین این دو کمیت در سناریوی {C} رخ داده است (یعنی در حدود ۵۱٪). دلیل آن این است که در این سناریو مقدار خرید توان از شبکه بالادست توسط EDهای #B و

نسبت به سناریوهای دیگر کسب نموده است ولی با تشکیل ائتلاف‌های {AB} و {AC} مقدار سود ED #A به ترتیب به میزان حدود ۳۰٪ و ۴۱٪ کاهش یافته است. پس از تشکیل ائتلاف بزرگ نیز سود ED #A در حدود ۵۵٪ کاهش نشان داده است.



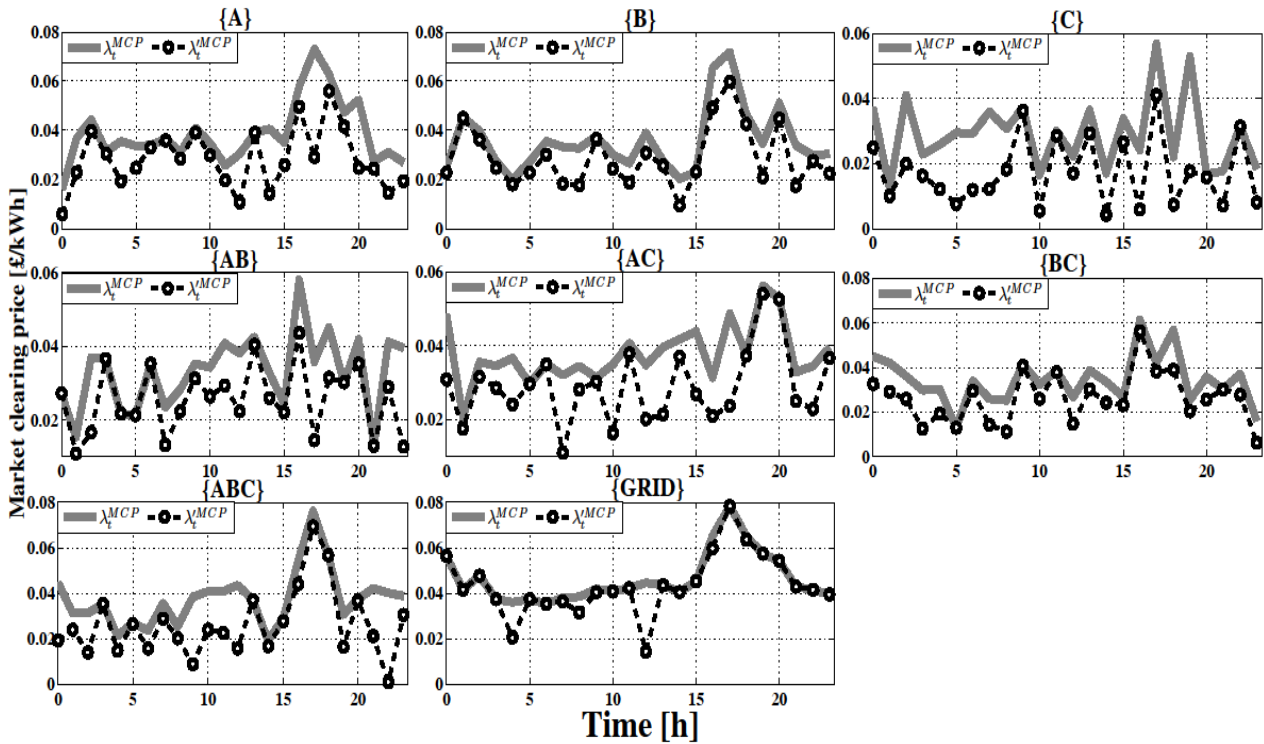


شکل ۹: پروفایل بار مصرفی ناحیه انرژی‌های A، B، و C تحت شرایط کار مستقل یا ائتلافی EDها و شبکه بالادست

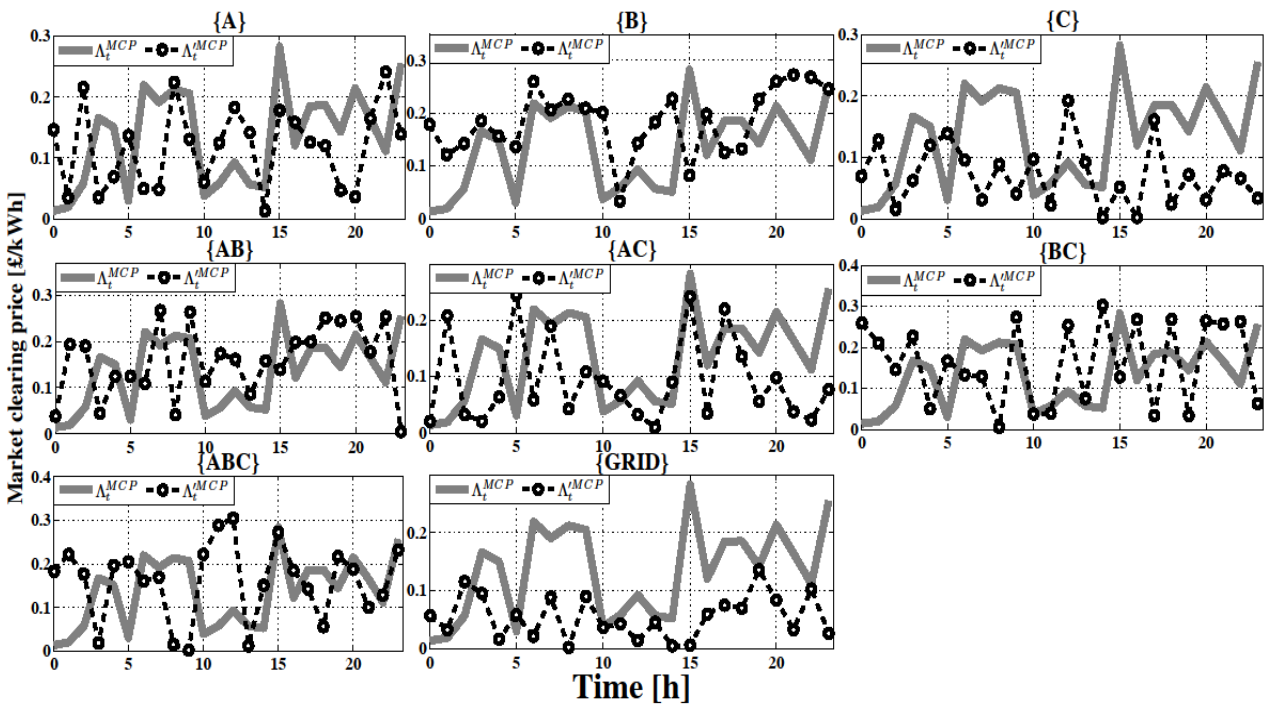
تولیدکننده دخیل در آن منجر به بهبود در سود حاصله شده است، علاوه بر این برای بازیگران مصرف‌کننده نیز در نهایت پرداخت مبلغ پایین‌تری برای برق به دنبال داشته است. در خصوص شبکه بالادست ذکر این نکته حائز اهمیت است که مقدار سود حاصله از تشکیل ائتلاف برای شبکه بالادست کم‌تر از شرایط کاری انفرادی EDها شده است. این موضوع بیانگر این است که در هنگام تشکیل ائتلاف EDها از شبکه بالادست توان کم‌تری خریداری نموده و حتی‌المقدور توان مورد نیاز خود را از شریک خود تأمین می‌نمایند. برای بررسی جواب‌های حاصله از الگوریتم پیشنهادی، یک EMS مبتنی بر روش NLP (نام‌گذاری‌شده به صورت EMS-NLP) در نرم‌افزار GAMS (با استفاده از سولور IDIOPT) پیاده‌سازی شده است. همان‌طوری که از جدول ۱ مشاهده می‌شود، سود حاصله توسط EDها در شرایط عملکرد انفرادی و ائتلافی در برخی مواقع در الگوریتم EMS-ABC بهبود قابل ملاحظه‌ای نسبت به الگوریتم EMS-NLP نشان داده است. علی‌رغم افزایش سود توسط EDهای A و B (به ترتیب ۱۱٪ و ۷٪) در الگوریتم EMS-ABC در طول عملکرد انفرادی نسبت به الگوریتم EMS-NLP، با این حال ۸٪ کاهش سود برای ED #C مواجه شده است. علی‌رغم افزایشی در حدود ۵٪ توسط الگوریتم EMS-ABC در میزان سود ED #A در {AB}، با این وجود کاهش قابل ملاحظه‌ای در اشکال دیگر ائتلاف (یعنی {AC}، {BC} و {ABC}) برای این ED در این الگوریتم حاصل شده است. بدین معنی است که الگوریتم‌های

نکته مهم این است که مجموع سود ساختمان‌های A و B پس از تشکیل ائتلاف {AB} نیز ۲۶٪ کاهش یافته است. از این‌رو، تشکیل ائتلاف {AB} نه تنها سود تک‌تک ساختمان‌های A و B را افزایش نداده است، بلکه همچنین سود کلی حاصله را نیز کاهش داده است. با این حال، پس از تشکیل ائتلاف مقدار MCP در بیش‌تر از ۵۸٪ بازه‌های زمانی نسبت به حالتی که به‌طور مستقل EDهای A و B کار می‌کنند، کم‌تر شده است. این نشان می‌دهد که تشکیل ائتلاف {AB} تأثیری منفی بر روی سود حاصله از ساختمان‌های A و B داشته ولی با این حال بر روی مقدار MCP تأثیر مثبت گذاشته است. بازیگران مصرف‌کننده در این شرایط منفعت بیشتری را کسب می‌نمایند. در ائتلاف بزرگ نیز شرایطی مشابه رخ داده است و شاهد کاهش ۵۷ درصدی در مقدار سود کل حاصله از تشکیل ائتلاف خواهد شد. تحت این شرایط نیز در ۵۰٪ بازه‌های زمانی مقدار MCP در {ABC} کم‌تر از مقدارش در حالتی که ساختمان‌ها مستقل عمل می‌نمایند، می‌باشد. در خصوص ائتلاف‌های {BC} و {AC} وضعیت معکوس شده است. بدین معنی که سود کل حاصله از تشکیل ائتلاف در {AC} و {BC} به ترتیب در حدود ۴۰٪ و ۶۰٪ نسبت به عملکرد مستقل EDها افزایش یافته است. این در حالی است که مقدار MCP نیز پس از تشکیل ائتلاف‌های {AC} و {BC} به ترتیب در حدود ۴۶٪ و ۵۸٪ بازه‌های زمانی نسبت به عملکرد مستقل EDها کاهش پیدا نموده است. در نتیجه، تشکیل ائتلاف نه‌تنها برای بازیگران

بهینه‌سازی رفتارهای متفاوتی در خصوص EDها و با توجه به معیارها و قیودی که تعریف شده است، از خود نشان می‌دهند. چنین عملکردی در رابطه با دیگر EDها در هر دو الگوریتم مشاهده شده است. در مجموع، با توجه به نتایج حاصله بسیار نزدیک به یکدیگر می‌توان هر دو الگوریتم پیشنهادی را برای پیاده‌سازی EMS در کنترلر مرکزی پیشنهاد نمود.



الف) MCP-1 و MCP-2 الکتریکی



ب) MCP-1 و MCP-2 حرارتی

شکل ۱۰: مقادیر MCP-1 و MCP-2 های الکتریکی حرارتی تحت شرایط کار مستقل یا ائتلافی EDها و شبکه بالادست

جدول ۱: مقایسه مقدار سود حاصله توسط هر ناحیه انرژی و شبکه بالادست تحت شرایط کار انفرادی و یا ائتلافی EDها در الگوریتم‌های EMS-ABC و EMS-NLP

سناریو	درآمد					
	ED #A		ED #B		ED #C	
	EMS-NLP	EMS-ABC	EMS-NLP	EMS-ABC	EMS-NLP	EMS-ABC
{A}	۳۱/۱۲	۳۴/۹۰	۲/۹۸	۴/۱۳	-۲۰/۸۷	-۲۶/۷۰
{B}	۳/۹۶	۳/۱۵	۳۱/۲	۳۳/۵۳	-۲۳/۴۵	-۲۵/۵۷
{C}	۰/۹۸	۱/۰۱	-۳/۷۶	-۴/۶۷	۶/۱۴	۵/۱۲
{AB}	۲۳/۲	۲۴/۴۰	۲۷/۳	۲۶/۰۳	-۲۸/۶	-۳۱/۴۰
{AC}	۲۴/۳	۲۰/۵۳	-۸/۷	-۹/۶۳	۴/۳	۳/۶۲
{BC}	-۰/۶۵	-۰/۸۴	۲۳/۱	۱۹/۶۲	۶/۱۲	۴/۱۶
{ABC}	۱۷/۳	۱۵/۶۰	۱۸/۲	۱۶/۵۲	-۰/۱۹	-۰/۱۷

قبیل مذاکرات برای تمامی اجزاء عادلانه‌تر باشد و استراتژی‌های مختلف در نظر گرفته شوند.

مراجع

- [۱] نرگس پرهیزی، موسی مرزبند، سیدمازیار میرحسینی مقدم، بهنام محمدی ایواتلو، فاطمه آذری‌نژادیان، «پیاده‌سازی عملی یک سیستم مدیریت انرژی برای یک ریزشبکه متصل به شبکه سراسری با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری چندبعدی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۱، صفحه ۲۵-۴۰، ۱۳۹۵.
- [۲] معصومه جوادی، سیدمازیار میرحسینی مقدم، موسی مرزبند، «مدیریت بهینه انرژی ریزشبکه‌ها 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، ۱۳۹۵.
- [3] M. Marzband, N. Parhizi, M. Savaghebi and J. M. Guerrero, "Distributed smart decision-making for a multimicrogrid system based on a hierarchical interactive architecture," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. PP, no. 99, pp. 1–12, 2015.
- [4] M. Marzband, F. Azarnejadian, 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.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–11, 2015.
- [5] M. Marzband, E. Yousefnejad, A. Sumper and J. L. Domínguez-García, "Real time experimental implementation of optimum energy management system in stand-alone microgrid by using multi-layer ant colony optimization," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 75, pp. 265–274, 2016.
- [6] 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.
- [7] M. Marzband, N. Parhizi and J. Adabi, "Optimal energy management for stand-alone microgrids based on multi-period imperialist competition algorithm considering uncertainties: Experimental validation," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 30, no. 1, pp. 122–131, 2015.
- [8] M. Marzband, A. Sumper, A. Ruiz-álvarez, J. L. Domínguez-García and B. Tomoiagă, "Experimental

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، الگوریتمی برای شکل‌گیری ساختار ائتلافی بر مبنای الگوریتم ABC پیاده‌سازی شده که ممکن است ارزش یک ائتلاف، تحت تأثیر تنظیمات همکارانه سایر بازیگران قرار بگیرد و تغییر نماید. علاوه بر این، رابطه ساختارهای مختلف تشکیل ائتلاف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و بر روی یک شبکه نمونه اعمال شده است. بر طبق سناریوهای لحاظ‌شده، می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم ارائه‌شده در مدل‌سازی بازیگران بازار و شبیه‌سازی بهره‌برداری آن‌ها در بازار توانمند عمل نموده است. چون بازیگران بازار، نهادهای پیچیده‌ای با ویژگی‌ها و نیازهای خاص خودشان هستند و هر یک اهداف منحصربه‌فرد خود را دنبال می‌نمایند، هر یک بایستی تصمیمات خود را در حین تعامل با دیگر بازیگران اتخاذ نمایند. از این‌رو، از یک معماری چندعاملی کارآمد استفاده شده است که شامل آموزش قابلیت‌ها بوده به‌طوری که بازیگران قادرند مجدداً استراتژی‌های خود را با توجه به تجربه گذشته خود و با توجه به رفتار و استراتژی دیگر بازیگران مشخص نمایند.

تمرکز اصلی این مقاله بر شکل‌گیری یک بازار محلی با تجمیع تولیدکنندگان برق موجود در نواحی انرژی با احتساب بهره‌گیری از مزیت‌های ساختار پیشنهادی و نیز مطالعه و پیاده‌سازی برخی از استراتژی‌های اتخاذشده در بازار توسط بازیگران بوده است. بدین ترتیب شبیه‌سازی این ساختار، بهره‌بردار را در پیش‌بینی میزان تولید و مصرف در هنگام تشکیل ائتلاف به‌ویژه در بهره‌برداری زمان-حقیقی، پیش از تسویه بازار و پس از آن توانا می‌سازد. این در حالی است که بایستی منابع دخیل در تشکیل ائتلاف برای مجموعه‌ای از وظایفشان از جمله مدیریت ذخیره توان الکتریکی، قیمت‌گذاری استراتژیک و پرداخت تولیدکنندگان پاسخگو باشند. در باب ساختار پیشنهادی، یعنی طبقه‌بندی و مدیریت تشکیل ائتلاف، ثابت شده است که روش پیشنهادی ویژگی‌ای ارائه می‌دهد که در محیط عدم قطعیت، بازیگران انتخاب‌های بیش‌تری را در جهت بهبود مقدار تابع منفعت خود دارا باشند.

از مطالعات صورت‌گرفته نسبت به استراتژی‌های اتخاذشده توسط بازیگران برای مذاکره در بازار، می‌توان نتیجه گرفت که استراتژی‌هایی برای بازیگران وجود دارد که در نهایت منجر به دستیابی به نتایج مطلوب‌تر برای این بازیگران خواهد شد و آن‌ها را قادر به تأثیرگذاری بر روی پیشنهاد قیمت دیگر بازیگران و در نهایت قیمت بازار خواهد نمود. در این راستا، بهبود مذاکرات در داخل ائتلاف نیز مدنظر قرار گرفته و این موضوع اجازه می‌دهد که با امکان تغییر در اعضای ائتلاف، این

[13] D. Ray, *A Game-Theoretic Perspective on Coalition Formation*, New York: Oxford University Press, 2007.

[14] P. Faria and Z. Vale, "Demand response in electrical energy supply: An optimal real time pricing approach," *Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 5374–5384, 2011.

[15] P. Faria, T. Soares, Z. Vale and H. Morais, "Distributed generation and demand response dispatch for a virtual power player energy and reserve provision," *Renew. Energy*, vol. 66, pp. 686–695, 2014.

[16] D. Huang and R. Billinton, "Effects of load sector demand side management applications in generating capacity adequacy assessment," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 1, pp. 335–343, 2012.

[17] H. G. Kwag and J. O. Kim, "Reliability modeling of demand response considering uncertainty of customer behavior," *Appl. Energy*, vol. 122, pp. 24–33, 2014.

[18] T. Capuder and P. Mancarella, "Techno-economic and environmental modelling and optimization of flexible distributed multi-generation options," *Energy*, vol. 71, pp. 516–533, 2014.

[9] 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.

[10] M. Marzband, *Experimental Validation of Optimal Real-Time Energy Management System for Microgrids*, Ph.D. Dissertation, Dept. d'Enginyeria Elèctrica, EU d'Enginyeria Tècnica Ind. de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain, 2013.

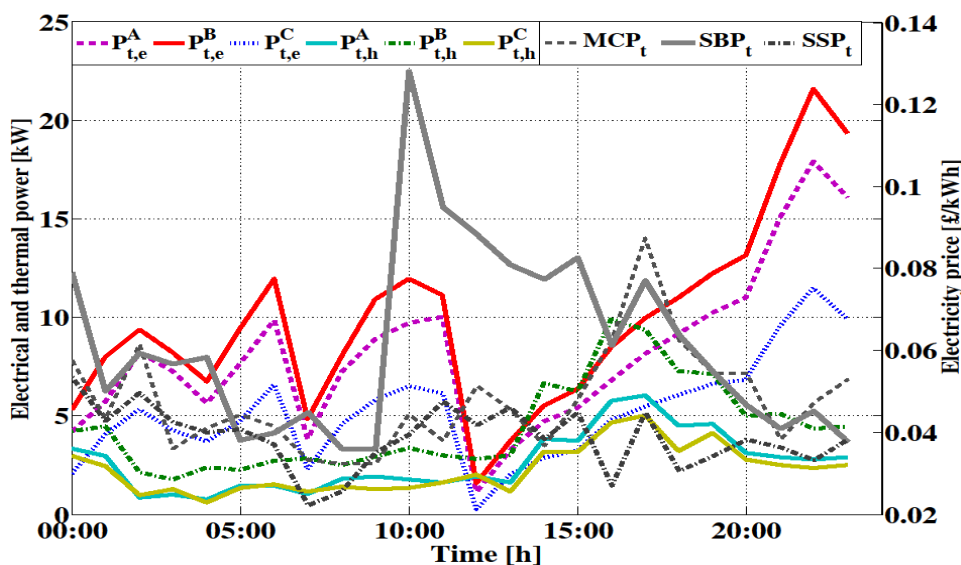
[11] M. Fathi and H. Bevrani, "Statistical cooperative power dispatching in interconnected microgrids," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, pp. 586–593, 2013.

[12] H. Zolezzi, J. M. and Rudnick, "Transmission cost allocation by cooperative games and coalition formation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, no. 4, pp. 1008–15, 2002.

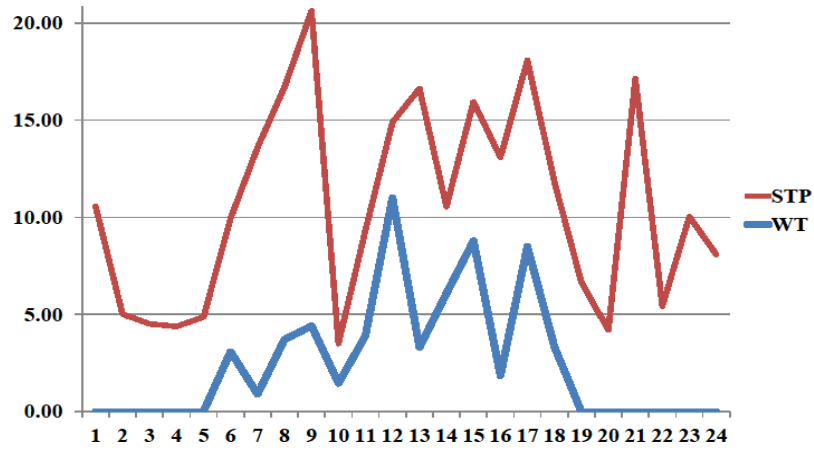
ضمایم

جدول ضمیمه ۱: ظرفیت و تعداد تجهیزات نصب شده در هر ED

	ED #A	ED #B	ED #C
CHP			
Electrical output (kW _{ele})	142	207	-
Thermal output (kW _{th})	104	140	-
EHP (kW _{th})	-	700	-
WT (kW _{ele})	50	-	-
STP (kW _{ele})	-	600	-
ES (kW _{ele}) (2kWh)	-	500	-
TES (m ³)	-	-	4
GB (kW _{th})	2*150	2*150	-
EB (kW _{th})	-	-	2*100



شکل ضمیمه ۱: پروفایل‌های بارهای الکتریکی و حرارتی EDها و قیمت‌های برق برای خرید و فروش



شکل ضمیمه ۲: شکل موج توان خروجی تولیدشده توسط WT و STP

زیرنویس‌ها

- ¹ Energy district
- ² Distributed energy resources
- ³ Coalition
- ⁴ Demand side management
- ⁵ Cooperate
- ⁶ Pay-off
- ⁷ Demand response
- ⁸ Market clearing price
- ⁹ Energy management system
- ¹⁰ Artificial bee colony
- ¹¹ Non-linear programming
- ¹² Supply function
- ¹³ Conventional building
- ¹⁴ Aggregator
- ¹⁵ Retailer
- ¹⁶ Control centre
- ¹⁷ Quantity
- ¹⁸ Offer
- ¹⁹ Electrical marginal cost
- ²⁰ Thermal marginal cost