

تبادل تأمین - تقاضا جهت مدیریت توان در شبکه هوشمند با رویکرد بازی استکلبرگ

نکات مهم :

- پیشنهاد یک مدل تقاضا - پاسخ مبتنی بر قیمت جهت تبادل عرضه و تقاضا.
- فرموله‌بندی فرآیند تجارت بازار برق به صورت یک بازی استکلبرگ.
- معرفی یک تابع قیمت‌گذاری به عنوان یک هماهنگ کننده در حین فرآیند تجارت.
- پیشنهاد یک الگوریتم با حلقه‌های تکرار شونده جهت تعیین میزان بهینه‌ای از تقاضاها و تولید.
- انجام پیک‌سایي میزان تقاضای بار و کاهش عدم تطابق عرضه - تقاضا.

چکیده

تقاضا - پاسخ (DR^1) به مثابه راه حلی نویدبخش برای شبکه‌های قدرت آینده به شمار می‌آید. ما در اینجا از یک رویکرد بازی استکلبرگ استفاده کرده و نیز جهت تجارت الکتریسیته بین یک شرکت برق و چندین مصرف‌کننده، یک مدل تقاضا-پاسخ جدیدی را توصیف می‌نماییم که این عمل با هدف متعادل نمودن میزان عرضه و تقاضا و همچنین هموارسازی بار انباشته شده در سیستم می‌باشد. تعاملات بین شرکت برق (پیشوا) و مصرف‌کنندگان (پیروان) به صورت یک بازی استکلبرگ با 1 پیشوا و N پیرو فرموله‌بندی می‌گردد که در آن مسائل بهینه‌سازی جهت کمک به انتخاب استراتژی بهینه، برای هر بازیکن تشکیل می‌گردند. یک تابع قیمت‌گذاری نیز جهت تنظیم بلادرنگ قیمت (RTP) اتخاذ می‌گردد که در آن صورت این تابع به عنوان یک هماهنگ‌کننده عمل کرده و شامل مصرف‌کنندگانی جهت پیوستن به بازی است. یک الگوریتم تکرارشونده جهت فراهم آمدن ترازمندی استکلبرگ مطرح گردیده که از طریق

آن، تولید توان و تقاضاهای توان بهینه به ترتیب برای شرکت برق و مصرف‌کنندگان تعیین می‌گردند. نتایج عددی نشان می‌دهند که روش پیشنهادی می‌تواند به طور چشمگیری تقاضاهای توان مصرف‌کننده را تغییر شکل دهد، و این عمل با پیک‌سایی توان‌های مورد تقاضا و پُر نمودن جای خالی کمترین حد توان‌های مورد تقاضا صورت گرفته و به میزان قابل توجهی عدم تطابق بین عرضه و تقاضا را کاهش می‌دهد.

1. مقدمه

شبکه‌های قدرت سنتی در حال مواجهه با چالش‌هایی از افزایش تقاضای توان، پایداری شبکه و آلودگی محیطی هستند [1، 2]. شبکه‌های هوشمند به عنوان سیستم‌های شبکه قدرت نوین در نظر گرفته می‌شوند که تلفیقی از زیرساخت اندازه‌گیری هوشمند بوده و قادر به دریافت و اندازه‌گیری میزان مصرف توان مشترکین هستند [3 – 5] و این امر در راستای با برنامه‌های تقاضا – پاسخ (DR) بوده که راه‌حلی را نیز جهت افزایش بازده شبکه‌های قدرت آینده نوید می‌دهند [6 – 8]. DR، تغییرات مصرف انرژی مصرف‌کنندگان، در پاسخ به تغییر قیمت‌های برق یا به پرداخت‌های تشویقی با هدف تعادل عرضه و تقاضا و نیز کاهش هزینه‌های تولید توان از طریق کاهش بار پیک و تغییر مکان میزان تقاضا از ساعات پُر باری به ساعات کم‌باری را در نظر می‌گیرد [9 – 11]. از اینرو انتظار می‌رود، بهره‌برداری بهتری از تولید توان و آوردن مزایای اقتصادی هم برای شرکت تأمین‌کننده برق و هم برای مصرف‌کننده حاصل گردد. با استفاده از یک برنامه DR، این امکان را برای شرکت تأمین‌کننده برق فراهم می‌کند که مصرف‌کنندگان را مشترکاً به پیک‌سایی منحنی تقاضا (بار) و تطبیق میزان عرضه و تقاضا [12، 13]، با تضمین پایداری شبکه تشویق نماید [14 – 17]. پارامترهای داده شده مربوط به همکاری بین نهادها و اشخاص مختلف در برنامه DR، نظریه بازی یک چارچوب مناسب طبیعی را جهت مدلسازی تعاملات بین شرکای مختلف و با اهدافی متفاوت، فراهم می‌آورد [18 – 20]. اخیراً، بازی‌های استکلبرگ، که برای مطالعه فرآیندهای سلسله مراتبی مبتنی بر تصمیم‌گیری از چندین تصمیم‌گیرنده استفاده می‌شوند، در طراحی برنامه‌های مدیریت انرژی توجیهاتی را به خود جلب نموده است [21]. بازی استکلبرگ با هدف به حداقل رساندن پرداختی‌های روزانه مشتری و در حالی که سود خرده فروش را توسط بهینه‌سازی قیمت‌های

برق به حداکثر می‌رساند، این بازی جهت مدلسازی تجارت برق بین خرده‌فروش و مصرف‌کنندگان مورد استفاده قرار گرفته است [22].

چن^۱ و همکاران [23] یک طرح برنامه زمانبندی توان مبتنی بر بازی استکلبرگ را بین یک سرویس‌دهنده و مشتریان مسکونی با اهداف مشابه مطرح نمودند؛ این هزینه نامناسب نیز که با تأخیر بارها به یک دوره ای با هزینه ارزانتر رخ می‌دهد، در کنار به حداقل رساندن قبوض برق در نظر گرفته شده است. یک تکنیک برنامه‌نویسی دو سطحی [24] جهت طراحی یک بازی استکلبرگ برای مدلسازی پاسخ به تقاضا در بازارهای خرده‌فروشی برق با هدف کاهش هزینه‌های رفاهی مصرف‌کنندگان و همچنین هزینه‌های خرید برق در مسائل کوچکتر مورد استفاده قرار گرفته است که این امر موضوعی برای مسائل بزرگتر خرده‌فروش ناشی از کاهش نامتعادلی‌های ایجاد شده توسط انحراف از میزان تولید برق بادی، از طریق پیش‌بینی برای روز بعد می‌باشد. کیلکی^۲ و همکاران [25] یک سناریویی از بازی استکلبرگ برای بازارهای برق پیشنهاد نمودند که در آن با هدف حداکثر نمودن میزان سود، خرده‌فروش به عنوان یک دورنمای اصلی پذیرفته می‌شود. یک فریم‌ورک شبیه‌سازی که شامل عدم قطعیت‌های مشتری نسبت به فضای ذخیره‌سازی برق مربوط به بارهای گرمایشی می‌باشد، طراحی شده است که بر اساس آن، با پیشنهاد تخفیف‌های بیشتر به مشتریان، این نامتعادلی جزئی نیز می‌تواند حذف گردد. ماهارجان^۳ و همکاران [26] یک فریم‌ورک مبتنی بر بازی استکلبرگی را معرفی نمودند که شامل چندین شرکت برق و مشتری با هدف حداکثر نمودن سود هر بازیکن می‌باشد.

به طور کلی، این بازیکنندگان در یک بازی، همراه با استراتژی‌های خود و توابع شرکت‌های برق، بر طبق مدل خاصی از سیستم با یکدیگر متفاوت می‌باشند [27]. اغلب مدل‌های DR بدون ملاحظه نوسانات بار در سیستم قدرت، بسیار به دور از هدف حداکثر نمودن میزان سود یک شرکت برق / خرده‌فروش / سرویس‌دهنده معرفی گشته‌اند [26، 24 - 22]. با این وجود، در عمل، جهت اجتناب از ایجاد ژنراتورهای پشتیبان گران‌قیمت برای جبران بار پیک، پیکسای

¹ Chen

² Kilkki

³ Maharjan

نمودن بارها در سیستم حائز اهمیت می‌باشد [28، 15] و یک بار پیک نیز که میزان آن کاهش یافته است، جهت حفظ پایداری شبکه قدرت سودمند و مقرون به صرفه می‌باشد [29].

در این مقاله، ما یک مدل تقاضا- پاسخ نوینی را بین یک شرکت برق و چندین مصرف‌کننده معرفی می‌نماییم. متفاوت با مطالعات قبلی، که منحصرأ با حداکثرسازی سود برای شرکت برق و حداقل‌سازی میزان هزینه برای مصرف‌کننده سر و کار داشته است، این مطالعه به دنبال متعادل نمودن عرضه و تقاضا و همچنین پیکسای بارهای متراکم در سیستم می‌باشد و این در حالی است که سود شرکت برق و مینیمم‌سازی هزینه برای مصرف‌کننده از طریق تعریف با دقت تابع هدف در هر طرف، تضمین می‌گردد. همکاری‌های این مقاله به شرح زیر می‌باشند.

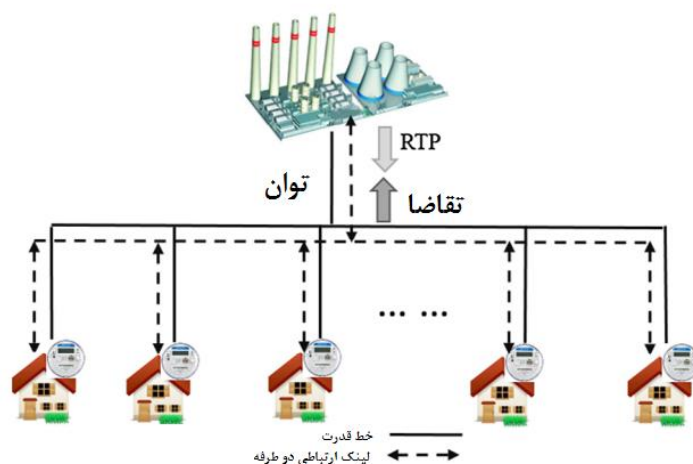
(1) یک مدل DR بر اساس قیمت، جهت مدلسازی فرآیند تجارت انرژی الکتریسیته بین شرکت برق و مصرف‌کنندگان با هدف تعادل عرضه و تقاضا و همچنین هموارسازی بار متراکم در سیستم، پیشنهاد می‌گردد.

(2) معاملات بین شرکت برق و مصرف‌کنندگان به صورت یک بازی استکلبرگ با 1 پیشوا و N پیرو فرموله‌بندی می‌گردد، که در آن تابع قیمت‌گذاری برق برای تنظیم قیمت‌های آنی (RTP^1) اتخاذ می‌گردد و نیز به عنوان یک هماهنگ‌کننده عمل نموده تا اینکه مصرف‌کنندگان را وادار سازد به این بازی ملحق شوند.

(3) یک الگوریتم مبتنی بر تکرار بین شرکت برق و مصرف‌کنندگان مطرح می‌گردد که ترازمندی استکلبرگ را نتیجه دهد که از طریق آن، تولید توان و تقاضاهای بهینه به ترتیب برای شرکت برق و مصرف‌کنندگان تعیین گردند. ادامه این مقاله بدین صورت تنظیم شده است: در بخش 2، مدل سیستم به تفصیل و شامل فرموله‌بندی بازی استکلبرگ و توصیف یک الگوریتم مبتنی بر تکرار جهت دستیابی به خروجی بازی، معرفی و ارائه می‌شود. بخش 3 تجزیه و تحلیل عددی این روش پیشنهادی را در اختیار می‌گذارد. نتیجه‌گیری‌ها و کارهایی که بایستی در آینده انجام گیرند در بخش 4 ارائه می‌گردند.

2. مدل سیستم

شکل 1 مدل سیستم با زیرساخت‌های اندازه‌گیری پیشرفته شامل مخابرات دو طرفه بین یک شرکت برق و یک مجموعه N عضوی از چندین مشترک با تعداد $N = |N|$ را نشان می‌دهد. شرکت برق بایستی توان الکتریکی را برای مصرف‌کنندگان در قیمت‌های خاصی فراهم نماید و هر مصرف‌کننده $n \in N$ هنگام دریافت قیمت‌های اعلام شده از طرف شرکت برق، مصرف انرژی خود را مدیریت خواهند کرد.



شکل 1: مدل سیستم، بین شرکت برق و چندین مصرف‌کننده

1.2 مدل شرکت برق

اجازه دهید، برای شرکت برقی که مقداری از توان g_t را در مدت فرجه t تولید می‌کند، $C_t(g_t)$ تابع هزینه باشد ($t \in T, T = |T|$)، که این تابع هزینه، یک تابع صعودی یکنواختی از مقدار تولید بوده و اکیداً محدب و واگرا است [10]؛ مرسوم‌ترین تابع هزینه استفاده شده در این خصوص به شرح زیر است [9، 22، 30].

$$C_t(g_t) = \frac{a_t}{2} g_t^2 + b_t g_t + c_t \quad (1)$$

که در آن a_t ، b_t و c_t ضرایب تولید بوده که از قبل تعیین می‌گردند و ممکن است با فرجه‌های زمانی روز بسیار متفاوت باشند.

تابع هزینه مرزی (که در آن هزینه مرزی به عنوان تغییر در میزان هزینه تعریف می‌شود، و این امر در هنگامی است که مقدار توان تولید شده توسط یک واحد تغییر نماید) می‌تواند به صورت زیر تعریف گردد :

$$C'_t(g_t) = a_t g_t + b_t \quad (2)$$

همراه با برنامه‌های تقاضا - پاسخ مبتنی بر قیمت، شرکت برق جهت تنظیم آنی قیمت‌ها، مسئول این امر است که مصرف‌کنندگان را به شرکت کردن در برنامه تقاضا - پاسخ وادار نماید، به طوریکه برای کاستن اختلاف بین میزان تأمین و تقاضا، شرکت برق و مصرف‌کنندگان می‌توانند مشترکاً به محاسبه میزان توان تولید شده و همچنین میزان تقاضا کمک نمایند.

جهت تضمین سود شرکت برق، واضح است که قیمت‌های آنی استفاده شده برای صورتحساب مشترکین نبایستی کمتر از هزینه مرزی باشد. یک تابع قیمت‌گذاری مفید و سودبخش در [15] مطرح گردیده است، که به موجب آن شرکت برق، قیمت $p_t(g_t)$ را برای دوره زمانی t با ضرب یک ضریب سود وابسته به زمان $\lambda_t (\lambda_t \geq 1)$ در هزینه مرزی، تنظیم می‌نماید، برای مثال :

$$p_t(g_t) = \lambda_t C'_t(g_t) = \lambda_t (a_t g_t + b_t) \quad \lambda_t \geq 1 \quad (3)$$

تأثیر و کارایی تابع قیمت‌گذاری در (3) مورد تأیید قرار گرفته است و تعاملات بین شرکت برق و مشترکین را هماهنگ کرده و به حداقل رساندن هزینه تولید توسط شرکت برق کمک می‌نماید.

بنابر (3)، قیمت‌های روزانه می‌توانند به صورت $p(g) = [p_1(g_1), p_2(g_2), \dots, p_T(g_T)]$ یا $[p_t(g_t)]_{t=1}^T$ بیان گردند که در آن $g = [g_1, g_2, \dots, g_T]$ حاکی از بردار تولید توان در سرتاسر روز می‌باشد. سپس این قیمت‌ها برای تشویق مشترکین جهت تغییر مکان میزان تقاضای برق به ساعات کم‌باری مورد استفاده قرار می‌گیرد.

از نقطه نظر شرکت برق، در کنار ملاحظه کاهش در هزینه تولید، هموار ساختن میزان تولید در هر ساعت مطلوب می‌باشد [31، 15]، بنابراین از ایجاد ژنراتورهای پشتیبان گرانقیمت جهت جبران‌سازی بار پیک اجتناب می‌گردد. یک بار پیک کاهش یافته، برای باقی نگهداشتن پایداری شبکه قدرت سودمند می‌باشد [29، 15]. از اینرو، ما فرض می‌کنیم که هدف شرکت برق تعیین بردار تولید بهینه از طریق به حداقل رساندن تغییرات در میزان تولید می‌باشد [32، 29، 16] و این در هنگامی است که نیازهای مصرف‌کننده برآورده شده باشد [16] که در آن زمان تأمین و تقاضا می‌توانند با یکدیگر تطبیق گردند. برای این منظور، مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر فرموله‌بندی می‌گردد :

$$\min_{g_t} U_{UC}(g) = \sum_{t \in T} (g_t - \bar{g})^2 \quad (4a)$$

$$s.t. L_t \leq g_t \leq \min(g_t^+, L_t^{\max}) \quad (4b)$$

که در آن U_{UC} حاکی از تابع بهره‌وری از شرکت برق و $\bar{g}$ میانگین تولید توان در مدت روز را نشان می‌دهد؛ برای مثال : $\bar{g} = \sum_{t \in T} (g_t / T)$ و L_t مجموع میزان تقاضاهای توان از همه مشترکین در دوره زمانی t می‌باشد، برای مثال : $L_t = \sum_{n \in N} I_{n,t}$ و $I_{n,t}$ حاکی از میزان تقاضای توان مصرف‌کننده n در هنگام دوره زمانی t است. لازم به ذکر است که (4b) g_t را تنظیم کرده و بنابراین همواره برابر با L_t یا بزرگتر از آن خواهد بود؛ نخستین دلیل برای اتخاذ این قید، تضمین نمودن این موضوع است که میزان تولید بتواند در همه زمان‌ها، نیازهای مشترکین را برآورده سازد [16]. $L_t^{\max}$ بر حداکثر تقاضای توان همه مشترکین در دوره زمانی t دلالت دارد و g_t^+ حداکثر ظرفیت تولید شرکت برق در طول دوره زمانی t می‌باشد.

لازم به ذکر است که تابع هدف در (4a) با حداکثرسازی شود تعریف شده در [26 ، 24 – 22] متفاوت است؛ با این وجود، مدل پیشنهادی برای سود به طور غیر مستقیم به حساب آورده می‌شود، زیرا تابع قیمت‌گذاری در (3) جهت تضمین هزینه‌های پایین تولید توان معتبر دانسته شده است [15]. کاهش هزینه تا اندازه‌ای با افزایش سود معادل است. علاوه بر این، هدف تعریف شده در (4a) در کنار هموار نمودن میزان تولید در هر ساعت (یا کاهش دادن میزان تغییر و پراکندگی در تولید)، مزیت‌های بیشتری را با خود به همراه می‌آورد. در سیستم‌های قدرت، ضریب بار (LF^1) به عنوان یک معیاری از ضریب انتفاع و پُرکاری استفاده از انرژی الکتریسیته مورد استفاده قرار گرفته که این ضریب به صورت نسبتی از میانگین انرژی مورد تقاضا به حداکثر میزان تقاضای توان در طول مدت یک دوره تعریف می‌گردد. مقدار بزرگتری از LF میزان بهره‌وری و پُرکاری بالاتری در استفاده از انرژی را نشان می‌دهد. همانطور که در مطالعات پیشین به اثبات رسیده است [29 ، 33]، به حداقل رساندن میزان تغییر و پراکندگی در تولید در رابطه (4a) به طور خاص معادل با افزایش ضریب بار می‌باشد، که به صورت زیر تعریف می‌گردد :

$$LF = \frac{L_{avg}}{L_{max}} \quad (5)$$

که در آن $L_{avg} = \sum_{t \in T} (L_t / T)$ حاکی از میانگین بار در سیستم بوده و $L_{max} = \max L_t (\forall t \in T)$ بیانگر ماکزیمم بار در مدت دوره زمانی مجزا می باشد.

2.2 مدل مصرف کننده

تابع بهره‌وری برای هر مصرف کننده n بدین صورت تعریف می گردد :

$$U_n(I_n) = \sum_{t \in T} \varphi_{n,t}(I_{n,t}) - \sum_{t \in T} p_t(g_t) \cdot I_{n,t} \quad (6)$$

که در آن $I_n = [I_{n,1}, I_{n,2}, \dots, I_{n,T}]$ بیانگر بردار تقاضای توان مصرف کننده n و $p_t(g_t) \cdot I_{n,t}$ نیز بیانگر پرداختی مصرف کننده n بعلت مصرف توان $I_{n,t}$ در طول مدت زمان t می باشد که $p_t(g_t) (\forall t \in T)$ نیز مورد قبول از طرف شرکت برق می باشد. $\varphi_{n,t}(I_{n,t})$ دال بر بهره رضایتمندی مصرف کننده n به عنوان تابعی از توان $I_{n,t}$ مصرفی آن در دوره زمانی t می باشد. بدون از دست دادن کلیت موضوع، $\varphi_{n,t}(I_{n,t})$ تابع درجه دومی که به صورت زیر تعریف می شود را اتخاذ می کند [30 ، 34] :

$$\varphi_{n,t}(I_{n,t}) = \omega_{n,t} I_{n,t} - \frac{\theta_n}{2} I_{n,t}^2, \quad \omega_{n,t} > 0 \quad \theta_n > 0 \quad (7)$$

که در آن $\omega_{n,t}$ یک پارامتر دلخواهی از مصرف کننده است که نوع مصرف کننده را مشخص می کند، که این پارامتر بین مصرف کنندگان تغییر کرده و همچنین ممکن است با دوره های زمانی مختلف نیز تغییر نماید [34] و θ_n یک ثابت از پیش تعیین شده می باشد [14]. همانطور که توسط رابطه (7) نشان داده شد، یک مصرف کننده با $\omega_{n,t}$ بزرگتر، بنابر بهبود سطح رضایتمندی اش، ترجیح می دهد که $I_{n,t}$ بیشتری را مصرف نماید. هر مصرف کننده بایستی با به حداکثر رساندن تابع بهره‌وری خود، بردار تقاضای توان بهینه خود را فراهم کند.

$$\max U_n(I_n) = \sum_{t \in T} \varphi_{n,t}(I_{n,t}) - \sum_{t \in T} p_t(g_t) \cdot I_{n,t} \quad (8a)$$

$$s.t. I_{n,t}^- \leq I_{n,t} \leq I_{n,t}^+ \quad (8b)$$

که در آن $I_{n,t}^-(I_{n,t}^+)$ بیانگر مینیمم (ماکزیمم) توان مورد تقاضای مصرف کننده n در دوره زمانی t است.

علاوه بر این، یک مصرف کننده ممکن است به کاهش مصرف توان روزانه تمایلی نداشته باشد، اما ممکن است به جابجایی مصرف برق از زمان پیک به زمان کم باری راغب باشد [35، 30، 10]. بنابراین، قیدی که در (8c) موقتاً جفت شده است، برای محدود نمودن مصرف تجمعی یک مصرف کننده در مقداری مطلوب، می تواند برای همبسته و جفت نمودن مصرف توان در امتداد افق زمانی شامل و به حساب آورده شود (برای مثال: مصرف توان با هدف روزانه که به صورت L_n نشان داده می شود).

$$\sum_{t \in T} l_{n,t} = L_n \quad (8c)$$

3.2 فرموله بندی مسئله بین شرکت برق و مشترکین

در یک سیستم قدرت واقعی، انتظار می رود که همواره تولید و تقاضا با یکدیگر تطابق داشته باشند؛ اندازه گیری هوشمند و مخابرات دو طرفه، طرف های تأمین و تقاضا را قادر می سازد که توسط تبادل قیمت و اطلاعات تقاضا با یکدیگر تعامل داشته باشند. برای مثال، بردار قیمتی که توسط شرکت برق به اطلاع رسانده می شود، بر اینکه مصرف کنندگان چگونه تقاضاهای توان بهینه خود را تعیین می کنند، تأثیر خواهد گذاشت؛ بر خلاف این امر، تقاضاهای توان تنظیم شده از طرف مصرف کنندگان، بر برنامه تولید شرکت برق به طور وارونه تأثیر خواهد گذاشت، و این همچنان است که شرکت برق به تنظیم تولید بنابر برقراری تعادل تقاضا و تأمین تمایل دارد که بنابراین شرکت برق را به تنظیم بردار قیمت جدید سوق می دهد. در نتیجه، تقاضاهای توان تنظیم شده از یک مصرف کننده، به طور ذاتی بر اینکه دیگر مصرف کنندگان چگونه تقاضاهای توان خود را تنظیم می کنند، تأثیر می گذارد و این امر بواسطه بردار قیمت جدید می باشد. بنابراین، این عوامل طبیعتاً به تعاملاتی بین شرکت برق و مصرف کنندگان منجر می گردند.

بازی استکلبرگ به منظور نشان دادن مفهوم ماورای مدل سیستم ارائه شده ابزاری مناسب است، که شرکت برق به عنوان پیشوا عمل کرده و قیمت ها را به پیروان خود که شامل N مصرف کننده هستند را اطلاع می دهد. با ارائه آن قیمت ها، مصرف کنندگان با انجام یک بازی غیر تعاونی عکس العمل نشان خواهند داد و تصمیم هر مصرف کننده به طور ذاتی بر اینکه دیگر مصرف کنندگان چه تصمیمی می گیرند، اثر خواهد گذاشت.

تعریف رسمی یک بازی استکلبرگ با 1 پیشوا و N پیرو به شرح زیر است :

$$\xi = \langle \text{شرکت برق} \cup N, \{\Omega_{UC}\}, \{\Omega_n\}_{n \in N}, U_{UC}, U_n \rangle \quad (9)$$

• مجموعه بازیکن شامل $U \cup N$ شرکت برق

شرکت برق به عنوان پیشوا عمل نموده و مصرف کنندگان در مجموعه N در پاسخ به استراتژی شرکت برق، نقش پیروان را به خود می گیرند.

• مجموعه استراتژی Ω_{UC} و Ω_n :

که در آن $\Omega_{UC} = \{g \mid g \in R^T, L_t \leq g_t \leq \min(g_t^+, L_t^+)\}$ حاکی از مجموعه استراتژی محتمل شرکت برق با مراجعه به (4b) می باشد و این موضوع از این امر است که کدام شرکت برق استراتژی g را انتخاب می کند (بردار تولید توان روزانه) و هر مصرف کننده استراتژی I_n (تقاضاهای توان روزانه) را از مجموعه استراتژی محتمل $\Omega_{UC} = \{I_n \mid I_n \in R^T, I_{n,t} \leq I_{n,t} \leq I_{n,t}^+\}$ که با استفاده از استراتژی I_n انتخاب خواهد کرد.

• توابع بهره برداری U_n و U_{DC} :

این تابع بهره وری، استراتژی انتخاب شده از یک بازیکن را در بازی ارزیابی می نماید. U_{DC} حاکی از تابع بهره وری شرکت برق بوده که در (4a) و تعریف گشته، و تابع هدف هر مصرف کننده n (برای مثال U_n) تعریف می نماید. نتیجه مطلوب یک بازی داده شده مبتنی بر تصمیم گیری سلسله مراتبی از ترازمندی استکلبرگ (SE^1) گرفته می شود. تعریفی از یک استراتژی ترازمندی استکلبرگ (SES^2) همراه با SE برای یک بازی دو نفره در ضمیمه A داده شده است. جهت توسعه بیشتر موضوع، ترازمندی استکلبرگ از یک بازی با 1 پیشوا و N پیرو مطابق با این وضعیت است که پیشوا بهره وری خود را با مجموعه عکس العمل هایی از پیرو ها در هنگامیکه پیرو ها به تدبیری که از طرف پیشوا اطلاع رسانی شده است، پاسخ می دهند را افزایش می دهند و این عمل را با انجام بازی، مطابق با یک مفهوم ترازمندی

¹ Stackelberg Equilibrium
² Stackelberg Equilibrium Strategy

خاصی انجام می‌دهند [36]. تعریف بعدی 1 در ضمیمه A، یک SES برای پیشوا (شرکت برق) در بازی Γ بایستی رابطه زیر را برآورده سازد :

$$\max_{L \in R_N(g^*)} U_{UC}(g^*, L) = \min_{g \in \Omega_{UC}} \max_{L \in R_N(g)} U_{UC}(g, L) = U_{UC}^* \quad (10)$$

که در آن $L = [l_1, l_2, \dots, l_N]$ بیانگر شرح استراتژی همه مصرف کنندگان است و $R_N(g)$ حاکی از مجموعه بهترین پاسخ از N مصرف کننده به استراتژی $g \in \Omega_{UC}$ شرکت برق می باشد، به طور واضح $R_N(g)$ در مجموعه استراتژی مشترک همه مصرف کنندگان لحاظ می گردد، برای مثال : $R_N(g) \subseteq \Omega_1 \times \Omega_2, \dots, \Omega_N$. دو عبارت اخیر در (10) تأکید می کنند که، بسته به وضعیت SE، شرکت برق تغییرات توان تولید شده در پاسخ به مجموعه ای از همه مصرف کنندگان را مینیمم می کند، که در آن مجموعه عکس العمل ها، شامل همه بردارهای تقاضای توان مصرف کنندگان به عنوان پاسخ هایی به انتخاب های استراتژی شرکت برق می باشد.

علاوه بر این، اگر کمیت U_{UC}^* در (10) یک مقدار منحصر به فردی را به خود بگیرد، به معنای آن است که شرکت برق یک مقدار بهره‌وری که بزرگتر از U_{UC}^* باشد را نخواهد پذیرفت، که بنابراین سطح بهره‌وری امنی را برای شرکت برق مقرر می دارد.

مطابقاً، این SE برای بازی پیشنهادی می تواند به عنوان یک پروفیل استراتژی (g^*, L^*) تعریف گردد [36]، که در آن g^* یک SES برای برآورده ساختن شرکت برق می باشد و $L^* \in R_N(g^*)$ دال بر پروفیل یا شرح استراتژی است که در ترازمندی با g^* بوده و استراتژی های بهینه ای برای همه مصرف کنندگان فراهم می نماید.

در نظریه بازی مرسوم، یک کارایی و سودمندی مربوط به بازیکن، تابعی از هر دو استراتژی بازیکن می باشد (برای مثال : در یک بازی دو نفره) [37]. مطابقاً، در ادامه این مقاله، ما U_{UC} و U_N را به عنوان تابعی از هم استراتژی های شرکت برق و هم مصرف کنندگان می نویسیم، زیرا همانطور که در بالا نیز بیان گردید، تصمیم گرفته شده توسط هر یک از طرفین، بر اینکه طرف دیگر چه تدبیری را انتخاب می کند تأثیر خواهد گذاشت. با این وجود، لازم به ذکر است که حتی اگر ما U_N را به فرم $U_N(g, l_n, l_{-n})$ بنویسیم (که در آن l_{-n} نشان از همه استراتژی های مربوط به N-1

مصرف کننده به جز مصرف کننده N ام می باشد)، U_N توسط استراتژی g یا I_{-n} شرکت برق، مستقیماً تحت تأثیر واقع نمی شود، اما مستقیماً به بردار قیمت $p(g)$ شرکت برق می باشد (برای مثال : یک تابعی از استراتژی g شرکت برق همانطور که در (3) نشان داده شده است)، که در آن به طور طبیعی به عنوان هماهنگ کننده بین شرکت برق و مصرف کنندگان عمل می نماید. علاوه بر این، همانطور که پیش تر نیز شرح داده شده، به واسطه خصوصیت ذاتی بین مصرف کنندگان، استراتژی انتخاب شده توسط مصرف کننده n بر اینکه $N-1$ مصرف کننده دیگر چگونه تدابیرشان را انتخاب می کنند، تأثیر خواهد گذاشت. برای هماهنگی، ما فرم $U_n(g, I_n, I_{-n})$ را بکار برده و اظهار می کنیم که $U_n(g, I_n, I_{-n})$ توسط استراتژی g شرکت برق و همه استراتژی های I_{-n} مربوط به دیگر $N-1$ مصرف کننده، تحت تأثیر قرار می گیرد.

4.2 وجود ترازمندی استکلبرگ

در این قسمت، وجود SE بحث می گردد. همانطور که در بخش 3.2 نیز بیان گردید، هنگامیکه قیمت های شرکت برق در اختیار گذاشته می شود، مصرف کنندگان یک بازی غیر تعاونی را در عکس العمل با این قیمت ها بازی می کنند. نشان داده شده است که یک NE منحصر به فرد در یک بازی بسیار محکمی و همگرایی با N بازیکن، وجود دارد [38]. در ادامه، ما نشان می دهیم که یک بازی غیر تعاونی بین مصرف کنندگان معادل با یک بازی بسیار محکمی با N بازیکن می باشد.

در نخست، با مشاهده (6)، واضح است که U_n در Ω_n پیوسته و قابل تغییر است و بنابراین U_n می تواند به طور تحلیلی تشکیل گردد. به عنوان یک مثال با اتخاذ مصرف کننده n ، در هنگام دریافت بردار قیمت $p(g)$ از شرکت برق، تابع بهترین پاسخ می تواند با اتخاذ نخستین مشتق U_n نسبت به $I_{n,t}$ بدست آید، برای مثال :

$$\frac{\partial U_n}{\partial I_{n,t}} = \omega_{n,t} - \theta_n I_{n,t} - p_t(g_t) \quad (11)$$

با تنظیم (11) به مقدار صفر، تابع بهترین پاسخ به صورت زیر بدست می آید :

$$I_{n,t}(p_t(g_t)) = \frac{\omega_{n,t} - p_t(g_t)}{\theta_n} \quad (12)$$

علاوه بر این، اگر ماتریس هسیان¹ $H(U_n)$ کاملاً منفی باشد، سپس U_n کاملاً همگرا خواهد بود. با انجام دومین مشتق از U_n نسبت به I_n ما $H(U_n)$ را به صورت زیر بدست می آوریم :

$$\frac{\partial^2 U_n}{\partial I_{n,t} \partial I_{n,s}} = \begin{cases} -\theta_n & t = s \text{ هنگامیکه} \\ 0 & t \neq s \text{ هنگامیکه} \end{cases} \quad (13)$$

که در آن S بر هر دوره زمانی در افق زمانی T دلالت می کند. از رابطه (13)، ما ممکن است مشاهده کنیم که همه عناصر قطری $H(U_n)$ بواسطه (7) منفی و همه عناصر غیر قطری صفر باشند. از اینرو، $H(U_n)$ مطلقاً منفی است. دوم اینکه، ممکن است مشاهده شود که مجموعه استراتژی مصرف کننده $\Omega_n (\forall n \in N)$ محدب، بسته و محدود باشد، از اینرو مجموعه Ω_n نیز قبلاً به عنوان یک قید محدب تعریف گردید (بخش 3.2 را ببینید). با توجه به مطالب بالا، ما ممکن است نتیجه بگیریم که یک بازی غیر تعاونی در میان مصرف کنندگان معادل با یک بازی کاملاً محدب با N بازیکن بوده و در نتیجه آن، یک تعادل پایدار (تعادل نش²) منحصر به فردی در بین N مصرف کننده وجود دارد [38].

همانطور که در بالا نیز بیان گردید، هر زمانی که استراتژی شرکت برق آشکار گردد، یک NE منحصر به فردی در بین مصرف کنندگان نیز وجود خواهد داشت که بهترین پروفیل استراتژی پاسخ را برای مصرف کنندگان فراهم می آورد. در حضور این قبیل پروفیل استراتژی بدین شکل، شرکت برق جهت مینیمم ساختن (4a) استراتژی خود را تنظیم خواهد کرد. لازم به ذکر است که اگر پاسخ گروهی مصرف کنندگان (برای مثال : NE) به استراتژی شرکت برق که به اطلاع رسانده شده است، منحصر به فرد نباشد، سپس در هنگام انتخاب استراتژی خود در یک ابهامی نتیجه خواهد داد [39] که این امر مبنایی از آنالیز وجود SE را تشکیل می دهد.

در حضور پروفیل استراتژی، شامل استراتژی هایی با بهترین پاسخ از همه مصرف کنندگان، شرکت برق یک استراتژی $g \in \Omega_{UC}$ را با هدف مینیمم ساختن (4a) انتخاب می نماید، که در نتیجه آن (4a) - برای مثال : تغییر در توان تولید شده - هر بار یک استراتژی جدید انتخاب شده ای را کاهش داده یا بدون تغییر باقی می گذارد. به علاوه، دقت

¹ Hessian
² Nash Equilibrium

نمایید که مقدار شرکت برق در تشکیل (4a) محدوده پایین تری دارد (از اینرو مینیمم «تغییر» برابر با صفر است). بنابراین، مقدار بهره‌وری امن U_{UC}^* برای شرکت برق وجود دارد که رابطه (10) را برآورده می‌سازد. در ادامه تعریف SE در بخش 3.2، ما نتیجه می‌گیریم که برای بازی استکلبرگ با 1 پیشوا و N پیرو، یک SE نیز وجود دارد.

5.2 الگوریتم DR مبتنی بر تکرار برای SE

در بخش 4.2، NE جهت تأکید بر وجود SE، به طور تحلیلی مورد استفاده قرار گرفته است که در آن مصرف‌کنندگان بایستی در همان زمان برای استراتژی شرکت برق واکنش نشان دهند. با این وجود، در عمل، برای مصرف‌کنندگان مناسب نیست که فوراً به استراتژی شرکت برق پاسخ دهند، زیرا ممکن است تأثیر یکدیگر بر تقاضاهای جمع شده را خنثی نمایند. در عوض، هدف ما طراحی یک الگوریتم DR (تقاضا - پاسخ) مبتنی بر تکرار جهت دستیابی به SE در یک شیوه غیر همزمان می‌باشد؛ برای مثال، با فرض اینکه هیچ دو مصرف‌کننده‌ای تقاضاهای خود را در زمان مشابهی در دریافت قیمت‌های شرکت برق تنظیم نمی‌کنند و مهمتر اینکه، تبادل اطلاعات بین شرکت برق و یک مصرف‌کننده با پنهان نمودن اطلاعات خصوصی انجام می‌گیرد (به عنوان مثال، پارامتر ترجیحی و دلخواه مصرف‌کننده $\omega_{n,t}$).

الگوریتم 1 : یک الگوریتم DR مبتنی بر تکرار برای SE

1 : مقادیر اولیه دلخواه شرکت برق

$$g^0 = [g_1^0, g_2^0, \dots, g_T^0]$$

و محاسبات بر روی مقادیر اولیه

$$p^0 = [p_1^0, p_2^0, \dots, p_T^0]$$

بنابر رابطه (3)، بر $g^0 = g^*$ دلالت می‌کند.

2 : شرکت برق p^0 برای همه مصرف‌کنندگان می‌فرستد و هر مصرف‌کننده بردار تقاضای I_n^* خود را مطابق با رابطه زیر بروز می‌کند :

$$I_n^* = \arg \max_{I_n} \{U_n(g, I_n, I_{-n}) \text{ s.t. } I_{n,t}^- \leq I_{n,t} \leq I_{n,t}^+\}$$

هر مصرف‌کننده n، I_n^* را به شرکت برق باز پیس می‌فرستد. تکرار را با شاخص k برای همگرایی به SE آغاز نمایید :

4 : طبق I_n^* دریافتی از هر مصرف‌کننده، شرکت برق $g^{*,k}$ را با حل رابطه زیر بروز می‌کند :

$$\begin{aligned} g^{*,k} &= \arg \min U_{UC}(g^k, L^k) = \sum_{t \in T} (g_t - \bar{g})^2 \\ \text{s.t. } L_t^* &\leq g_t^k \leq \min (g_t^+, L_t^{\max}) \\ L_t^* &= \sum_{n \in N} l_{n,t}^* \quad \text{که در آن} \end{aligned}$$

5: بر طبق $g^{*,k}$ ، شرکت برق p^k را مطابق با (3) بروز کرده و تکرار k را به راه می‌اندازد: از هر یک مصرف کننده در هر زمان به ترتیب نمونه‌برداری می‌کند.

6: به طور مرتب یک مصرف کننده n را جهت ارسال p^k در هر زمان انتخاب کنید.

7: بر اساس p^k دریافتی، مصرف کننده n ، $l_n^{*,k}$ را مطابق با رابطه زیر بروز می‌کند:

$$l_n^{*,k} = \arg \max_{l_n} \{U_n(g, l_n, L_{-n}) \text{ s.t. } l_{n,t}^- \leq l_{n,t} \leq l_{n,t}^+\}$$

8: مصرف کننده n ، $l_n^{*,k}$ را در مورد $l_n^{*,k}$ بروز شده، به شرکت برق پس می‌فرستد و سپس شرکت برق $g^{*,k}$ را با حل معادله زیر بروز می‌کند:

$$\begin{aligned} g^{*,k} &= \arg \min U_{UC}(g^k, L^k) = \sum_{t \in T} (g_t^k - \bar{g}^k)^2 \\ \text{s.t. } L_t^* &\leq g_t^k \leq \min (g_t^+, L_t^{\max}) \\ \text{where } L_t^* &= \sum_{m=1}^{N-1} l_{m,t}^* + l_{n,t}^{*,k} \\ &\quad m \neq n \end{aligned}$$

9: شرکت برق p^k جدیدی را مطابقاً محاسبه نموده و مصرف کننده بعدی را نمونه‌برداری می‌کند.

اگر (if) نمونه برداری به پایان نمی‌رسد

به خط 6 برو

مگر (else)

شرکت برق SE را ارزیابی کرده و تکرار بعدی $k+1$ را موجب می‌شود، در موردی که SE هنوز وارد نشده یا نرسیده است (به خط 5 برو).

پایان if

10: مراحل 5 تا 9 را تکرار نمایید، مگر آنکه هیچ بازیکنی از استراتژی جاری (که نشان می‌دهد SE موفق شده است) منحرف نگردد.

11: شرکت برق به مشترکین اطلاع می‌دهد که SE موفق شده است.

الگوریتم 1 با شرکت برق که به طور دلخواهی به ترتیب بردار تولید $g^0 = [g_1^0, g_2^0, \dots, g_T^0]$ را مقداردهی اولیه نموده

است، آغاز می‌شود و بردار قیمت اولیه $p^0 = [p_1^0, p_2^0, \dots, p_T^0]$ را محاسبه می‌کند. در باب g^0 به عنوان بردار تولید

بهینه موقتی g^* ، سطر 1 را ببینید.

در هنگام مقداردی اولیه، شرکت برق از طریق لینک ارتباطی دو طرفه، p^0 را به همه مشترکین اعلام می نماید، و بر این اساس است که هر مصرف کننده بردار تقاضای I_n^* خود را با حل مسئله بهینه سازی (8) خود، بروز می کند؛ پس از آن، هر مصرف کننده I_n^* را به شرکت برق پس می فرستد، سطر 2 تا 3 را مشاهده نمایید.

در سطر 4، بر اساس I_n^* رسیده از طرف هر مصرف کننده، شرکت برق بردار تولید $g^{*,k}$ خود را با حل مسئله بهینه سازی خود (4) بروز خواهد کرد (k دال بر ایندکس تکرارهای الگوریتم است)، که در آن L_t بر اساس I_n^* که به تازگی از مشترکین رسیده است بروز می گردد.

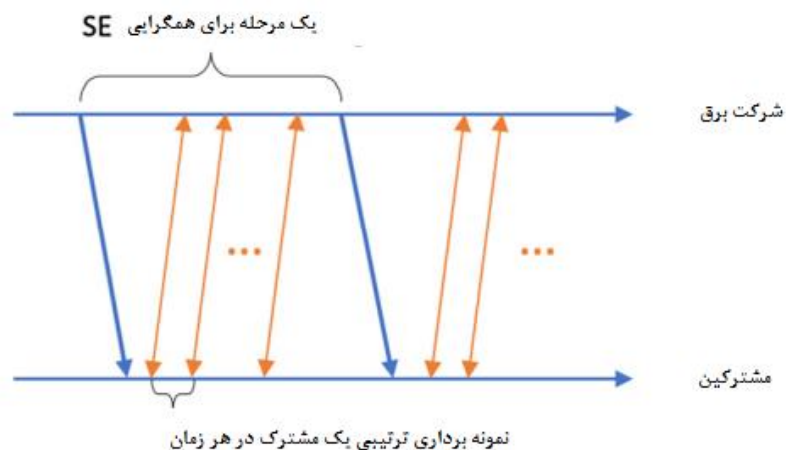
در سطر 5، بر طبق $g^{*,k}$ بدست آمده در سطر 4، شرکت برق بردار قیمت p^k خود را بروز خواهد کرد، سپس، شرکت برق k امین تکرار را برای تعامل با مشترکین آغاز می کند، برای مثال، شرکت برق از هر مصرف کننده در هنگام تکرار k نمونه برداری می نماید. شکل 2 تعاملات بین شرکت برق و مشترکین را در هنگام یک تکرار به تصویر می کشد، که در آن شرکت برق به ترتیب یک مصرف کننده غیر تکراری را (برای مثال مصرف کننده n) جهت ارسال p^k در هر زمان انتخاب می کند. با دریافت p^k ، مصرف کننده n، $I_n^{*,k}$ را با حل (8) بروز می کند، سطر 7 را مشاهده نمایید.

سپس، در سطر 8، مصرف کننده n، $I_n^{*,k}$ را به سمت شرکت برق باز پس می فرستد و شرکت برق نیز $g^{*,k}$ را با حل (4) بروز می کند. در اینجا، شایسته است یادآور شویم که قید پایین تر به $L_t^* = \sum_{m=1, m \neq n}^{N-1} (I_{m,t}^* + I_{n,t}^*)$ بروز می شود که در آن تنها $I_{n,t}^{*,k}$ به تازگی از مصرف کننده n رسیده است و همه بارهای جمع شده ساعتی دیگر N-1 مصرف کننده در هنگام تعامل با آخرین مصرف کننده نیز یکسان باقی می ماند.

در سطر 9، شرکت برق بر اساس $g^{*,k}$ بروز شده که در سطر 8 بدست آمده است، p^k جدید را محاسبه می کند و جهت نمونه برداری از مصرف کننده بعدی به خط 6 می رود. در موردی همه مشترکین نمونه برداری گردیده اند، شرکت برق SE را برای k امین تکرار ارزیابی خواهد نمود و اگر SE بدست نیامده است، تکرار بعدی k+1 را آغاز می کند (الگوریتم به سطر 5 می رود).

در این روش، سطر 5 تا سطر 9 تکرار می شوند تا اینکه SE حاصل آید، که در آن شرکت برق نمی تواند به میزان بیشتری تغییرات تولید را توسط بروزرسانی بردار تولید کاهش دهد، این نشان از این موضوع است که مقدار

بهره وری امن خود را بدست آورده است. بنابراین، شرکت برق به همه مصرف کنندگان اطلاع می دهد که SE بدست آمده است و هر مصرف کننده یک تدبیر بهینه ای که با بازی با شرکت برق انجام داده است را انتخاب می نماید.



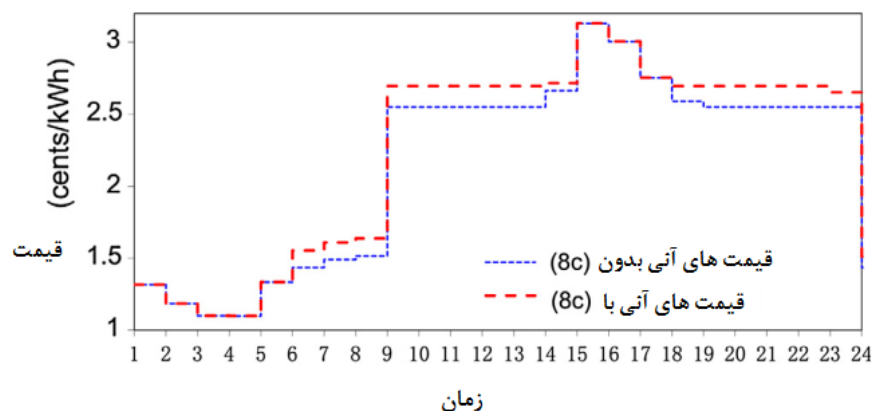
شکل 2: تعامل بین شرکت برق و مشترکین

در الگوریتم پیشنهادی، شرکت برق مشترکین را در یک روال غیرهمزمان انتخاب می کند، برای مثال: هیچ دو مشترکی استراتژی های خود را به طور همزمان بروز نمی کنند. این موضوع از این امر محقق می گردد که با فرض اینکه شرکت برق در هنگامیکه هر مشترک بایستی تدبیر خود را بروز کند، بتواند یک زمانی را تعیین نماید. لازم به ذکر است که در هر زمان اطلاع از قیمت جدید از شرکت برق دریافت می گردد و یک مشترک با کاهش تقاضا در هنگام دوره هایی با قیمت بالا این موضوع را پاسخ می دهد، و این در هنگامی است که افزایش تقاضا در مدت دوره هایی با قیمت پایین، در تقاضاهایی هموار شده نتیجه می دهد. این قبیل «تقاضاهایی هموار شده» که از مشترک به شرکت برق فرستاده می شود طبیعتاً برای کاهش تغییر تولید از نقطه نظر شرکت برق، شرکت داده می شوند، زیرا قید (4b) تقاضاهای جمع شده مشترکین و تولید و شرکت برق تولید را با تقاضاهای هموار شده مشترکین تنظیم می نماید. علاوه بر این، به عنوان هدف شرکت برق جهت کاهش تغییر تولید (معادل با حصول تولید هموار شده)، از طریق تعدادی تکرار، تغییرات تولید تدریجاً کاهش خواهد یافت و الگوریتم سرانجام به یک نقطه ثابتی همگرا می گردد. برای مثال به صفر یا به مرز پایین تری از میزان تغییر.

3. آنالیز عددی

این بخش آنالیز عددی ارائه نموده و کارایی الگوریتم پیشنهادی را بررسی می کند. جهت سهولت در نمایش، شبیه سازی های بر اساس یک شرکت برق و سه مشترک انجام می گردند. تمامی دوره زمانی به 24 دوره زمانی که 24 ساعت یک روز را نشان می دهند تقسیم می گردند. برای هزینه تولید، هزینه بار یکسان می تواند در زمان های متفاوتی از روز فرق نماید. به طور خاص، این هزینه ممکن است در شب در مقایسه با روز کمتر باشد [10]. برای سادگی، ما پارامترهای موجود در (1) را با $a_t = 0.02$ در هنگام روز تنظیم می کنیم. برای مثال از 8 تا 24 و $a_t = 0.01$ در بقیه ساعات، $b_t = 0.2$ و $c_t = 0$ و ضریب قیمت λ_t به مقدار 1.2 انتخاب شده است. [15]. برای تابع بهره وری مشترک، پارامتر θ_n به مقدار 0.1 برای همه مشترکین انتخاب شده و $\omega_{n,t}$ مقادیر مختلفی از 5، 5.5 و 6 به خود می گیرد. اثر این مقادیر مختلف بعداً در نتایج شبیه سازی بحث خواهند شد. تقاضای توان مورد هدف مشترکین 1 و 2 و 3 به صورت خط چین به ترتیب در شکل 4 a تا c نشان داده می شوند. که تقاضای توان مورد هدف به عنوان تقاضای توان یک مشترک بدون اتخاذ مدیریت پاسخ تقاضا تعریف می گردد. در این مطالعه، ما تقاضای توان مورد هدف را از یک بازار برق موجود بدست می آوریم که بارهای روزانه یا را برای نواحی محلی خاصی فراهم نموده است [40]. با این وجود، ما مرتبه دامنه از GW را به kW جهت محاسبه تعداد محدودی از مصرف کنندگان مشابه تغییر دادیم. مینیمم و ماکزیمم تقاضای هر مشترک به درصد خاصی از تقاضای توان مورد هدف تنظیم می گردد همانطور که در جدول 1 داده شده است [16]. جهت سادگی، ماکزیمم ظرفیت تولید برای با مجموع ماکزیمم تقاضای توان از همه مشترکین فرض شده است. [34]، از اینرو، ما برای همه $t \in T$ ، $g_t^+ = \sum_{n \in N} I_{n,t}^+$ را داریم. دذر این مورد به موجب آن، قید دوگانه موقتی در (8c) است شامل شده و ما فرض می کنیم که یک مشترک تمایل دارد که مقدار ثابتی از توان را برابر با مجموع تقاضاهای مورد هدف مصرف نماید.

شکل 3، قیمت های آنی را بدست آمده از الگوریتم 1 را با تمایز دو مورد نشان می دهد : با و بدون قید دوگانه موقتی در (8c). در ادامه کارایی با سناریوهای مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت.



شکل 3: قیمت های آبی با و بدون (8c)

1.3 تقاضاهای توان بهینه مشترکین

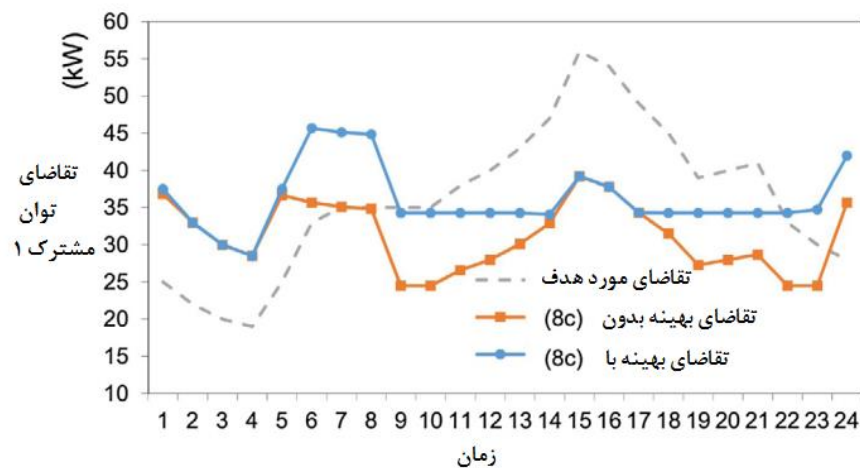
شکل 4 تقاضاهای توان هر مصرف کننده را با و بدون قید (8c) نشان می دهد که به ترتیب با خط آبی و نارنجی و همچنین در مقایسه با تقاضاهای مورد هدف هر مصرف کننده نشان داده می شوند. در کل، برای هر مورد (با یا بدون (8c))، یک مصرف کننده ای که توان بیشتری را نسبت به مقدار توان مورد هدف در زمان های غیر پیک تقاضا نموده است، و تقاضاهای خود را در هنگام زمان های پیک کاسته است، یک میزان بزرگی از تقاضا را نشان می دهد که از دوره های زمانی پیک به غیر پیک جابجا شده است.

به طور خاص، هنگامیکه (8c) بکار برده نشده است، با مقایسه توان مورد تقاضای مشترک که در شکل 4 نتیجه شده است، می توان مشاهده نمود که مشترک 1 ($\omega_{n,t} = 5$) تمایل بیشتری به شرکت در فرآیند پاسخ به تقاضا داراست و همچنانکه در مقایسه با دو مشترک دیگر، در زمان دوره با قیمت بیشتر، مقادیر بزرگی از تقاضا را کاهش داده است. این پدیده با معنی فیزیکی $\omega_{n,t}$ بیان شده در بخش 2 منطبق است، برای مثال یک مشترک با $\omega_{n,t}$ بزرگتر ترجیح می دهد که بنابر دستیابی به یک سطح رضایتمندی بالاتر و به عکس، $I_{n,t}$ بیشتری را مصرف نماید.

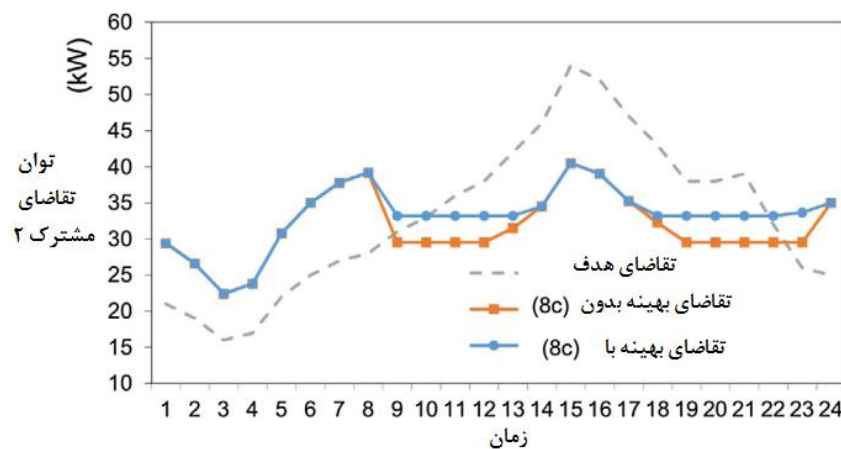
در موردی که (8c) بکار برده شده است، ما یافتیم که هر مشترک بنابر تکمیل هدف مصرف روزانه، توان بیشتری را نسبت به حالت بدون آن قید تقاضا می نماید، درحالیکه تقاضاهای اضافی در هنگام دوره های زمانی با قیمت پایین تر افزایش یافته است.

2.3 مقایسه تأمین و تقاضا

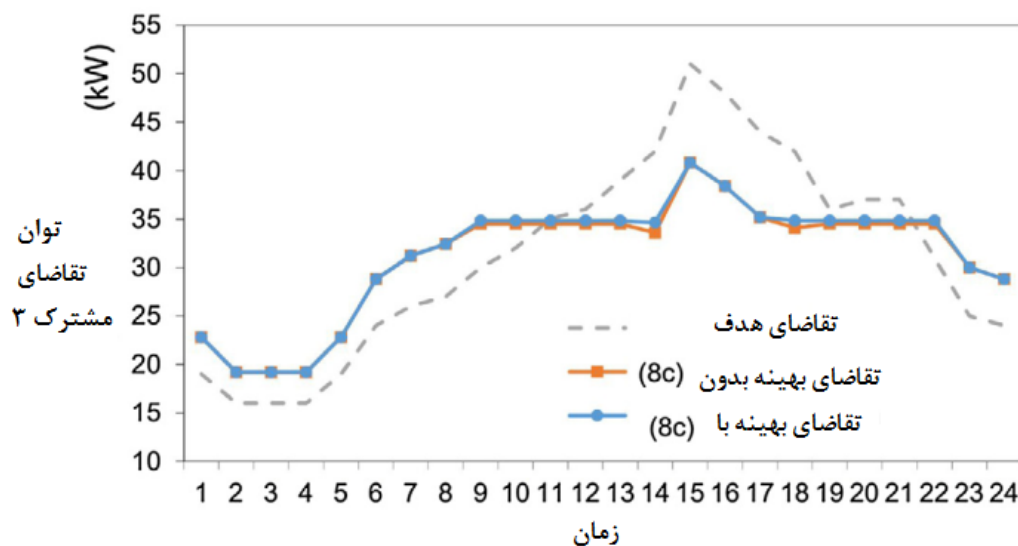
شکل های 5 و 6 نتایج تولید توان ساعتی (تأمین) را همراه با تقاضاهای جمع شده ساعتی مشترکین در مقایسه با موردی که در آن هیچ برنامه پاسخ به تقاضایی به کار برده نشده است، نشان می دهند، برای مثال با فرض اینکه تولید ساعتی در حد وسط بین مینیمم تقاضاهای جمع شده همه مشترکین ($\sum_{n \in N} I_{n,t}$) و ماکزیمم ظرفیت تولید (g_t^+) انتخاب گردد؛ هنگامیکه هر مشترک مقدار توان مورد هدفی را بدون ملاحظه هزینه انرژی تقاضا نموده است. بنابراین، در شکل های 5 و 6، «تقاضاهای جمع شده مشترکین بدون DR» برابر با مجموع تقاضاهای مورد هدف هر مشترک بوده که در شکل 4 به تصویر کشیده شده است.



(a) $w=5.0$ با ۱ مشترک



(b) $w=5.5$ با ۲ مشترک



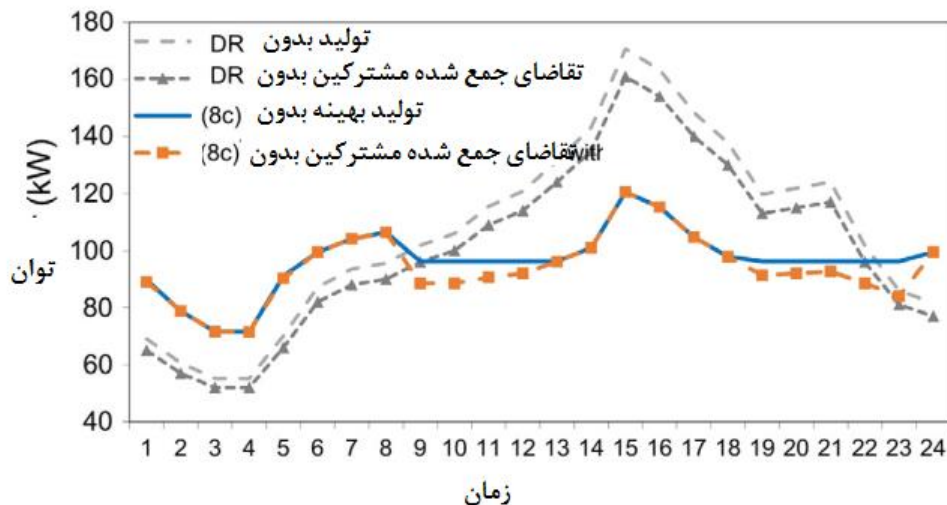
مشترک ۳ با $w=6.0$ (c)

شکل 4: تقاضاهای توان بهینه مشترکین با قیمت های آنی. مشترکهای 1 و 2 و 3

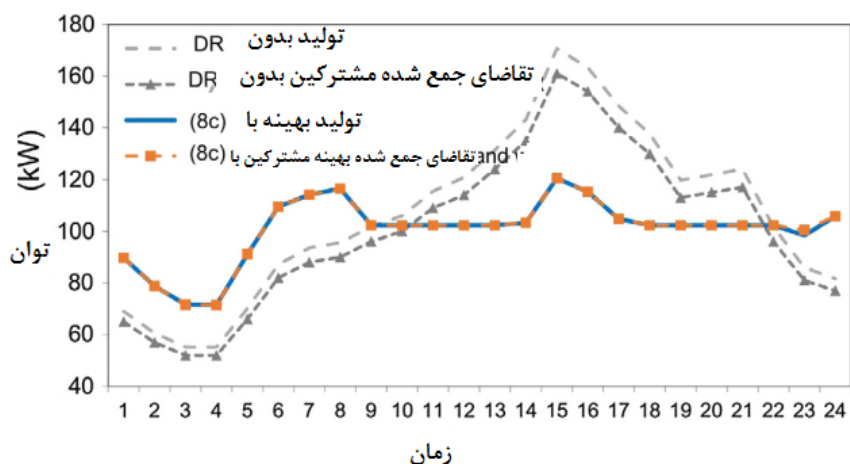
	مشترک 1 (%)	مشترک 2 (%)	مشترک 3 (%)
مینیمم تقاضا	70	75	80
ماکزیمم تقاضا	150	140	120

جدول 1: نواحی تقاضای توان مشترک

به طور آشکار، هنگامیکه پاسخ به تقاضایی بکار برده نمی شود، یک فاصله بزرگی بین تأمین و تقاضا وجود خواهد داشت. در موردی که برنامه پاسخ به تقاضا بکار برده شده است (بدون (8C) و با آن)، در آن مورد، تولید و تقاضاهای مشترکین را به طور چشمگیری تغییر می دهد که این امر شامل کاهش تقاضاهای پیک و پر کردن نواحی تهی دره های تقاضا می باشد. همانطور که در شکل های 5 و 6 نشان داده شده است، فاصله بین تأمین و تقاضا به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. علاوه بر این، بدون (8C) همانطور که در شکل 5 نشان داده شده است، این عدم تطابق نمی تواند به طور کامل حذف گردد. برای مقایسه، در هنگامیکه (8C) بکار برده شده است، در شکل 6 میزان تولید به خوبی با تقاضاهای مشترکین تطابق می کند. تجزیه و تحلیل های عددی عدم تطابق تأمین و تقاضا، در بخش بعدی مورد بحث قرار خواهند گرفت.



شکل 5: تأمین و تقاضاهای جمع شده بدون (8c).



شکل 6: تأمین و تقاضاهای جمع شده با (8c).

3.3 ارزیابی کارایی

ما کارایی این سه مورد را از جنبه های مختلف مورد ارزیابی قرار دادیم (بدون DR ، با DR و بدون (8c) و نیز DR و با (8c)). نتایج مقایسه عددی در جدول 2 لیست شده اند. ضریب بار (LF) [33] به صورت نسبت میانگین به بار پیک تعریف می گردد (رابطه (5) را ببینید)، که انتظار می رود تا جای ممکن بزرگ باشد.

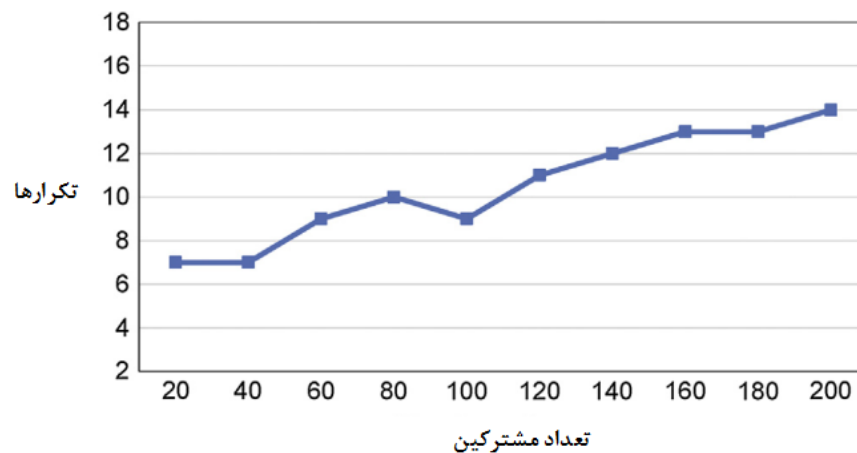
از جدول 2 مشاهده می گردد که تقاضای پیک با کمک به برنامه پاسخ به تقاضا، ظاهراً از 161 kWh (در ساعت) به 121 kWh (در ساعت) کاهش یافته است. همانطور که (8c) در مورد 2 در نظر گرفته نشده است، مجموع به میزان

160 kWh (در 24 ساعت) در مقایسه با موارد 1 و 3 کاهش یافته می یابد، اگرچه مورد 3 قادر است کمترین PAR و بالاترین LF را بدست آورد، که این امر برای شرکت برق در متعادل نمودن بارها در سیستم قدرت سودمند می باشد. در هنگام مقایسه میزان تولید و مجموع تقاضا، واضح است که تأمین و تقاضا به طور کلی تحت برنامه پاسخ تقاضا با یکدیگر تطابق می یابند اما یک فاصله بزرگی در مورد وجود دارد که می تواند در شکل های 5 و 6 دیده شود. الخصوص، تأمین و تقاضا در مورد 3 به درستی تطبیق یافته اند.

علاوه بر این، هم هزینه های تولید و هم پرداختی های مشترک در موارد 2 و 3 در مقایسه با مورد 1، بسیار کمتر بوده اند. مورد 2 پرداختی ها را نسبت به مورد 3 به میزان بیشتری کاهش داده است، با این وجود، این امر در هزینه از دست دادن تقاضاهای مورد هدف مشترکین بدست آمده است و به معنای آن است که برخی از وظایف روزانه ممکن است تکمیل نگردند. در آخر، می توان مشاهده نمود که تغییرات تولید در موارد 2 و 3 (جهت برآورده ساختن تقاضاهای مورد هدف مشترکین، مورد 3 در تغییرات کمی بیشتر از مورد 2 نتیجه می دهد) به طور قابل توجهی در مقایسه با مورد 1 کاهش یافته اند، که برای شرکت برق جهت باقی نگهداشتن پایداری شبکه قدرت سودمند می باشد.

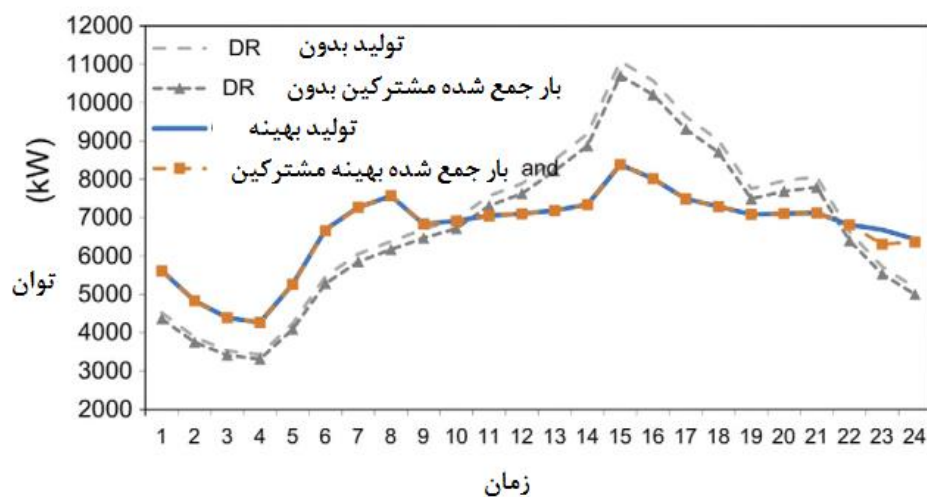
4.3 مقیاس پذیری

برای سه مشترک بالا این الگوریتم 7 تکرار را برای همگرایی SE اجرا نموده است. جهت بررسی مقیاس پذیری این الگوریتم، ما تعداد مشترکین را از 20 به 200 افزایش دادیم، که در آن $\omega_{n,t}$ بین 5 و 6 بطور تصادفی انتخاب گشته است و تقاضاهای ساعتی مورد هدف مشترکین به طور تصادفی از 14kWh تا 56kWh تنظیم شده اند (برای مثال، مینیمم و ماکزیمم تقاضای مورد هدف سه مشترک نمونه). شکل 7 تعداد تکرارهایی که با افزایش تعداد مشترک مورد نیاز است را نشان می دهد و در تکرار یک حالت خطی بیشتری را نسبت به نمایی نشان می دهد که این موضوع برای الگوریتم پیشنهادی جهت اجرای عملی در کاربرد شبکه هوشمند مفید می باشد.



شکل 7: تعداد تکرارها در جهت افزایش تعداد مشترکین

جهت بدست آوردن یک بینشی در مورد تأثیر الگوریتم DR پیشنهادی در حضور تعداد قابل توجهی از مشترکین، ما همچنین تأمین و تقاضای جمع شده بهینه منتهای را تحت مورد نامتعارفی از 200 مصرف کننده (مشترک) حاضر نمودیم. همانطور که در شکل 8 نشان داده شده است، با بکارگیری الگوریتم، میزان تولید و تقاضای جمع شده مشترکین زمانبندی مجدد گردیده و به طور عمومی تطبیق یافته اند و این امر در بارهای کلی هموار شده در سیستم نتیجه می دهد. در حالت خاص، ضریب بار از 0.62 (بدون DR) به 0.8 (با DR) افزایش داده شد و نشان می دهد که الگوریتم ارائه شده قادر به اجرا نمودن مسئله مدیریت توان بین یک شرکت برق و چندین مصرف کننده است.



شکل 8: بار تأمین شده و جمع شده ناشی از 200 مشترک.

Cases	پیک بار (kW h)	مجموع بار (kW h)	LF	مقدار تولید (kW h)	(per 24 h)	هزینه تولید (\$)	تولید	مجموع پرداختی (\$)
Case 1: No DR	161	2414	0.625	2560		32.3	1080	76.4
Case 2: DR بدون (8c)	121	2254	0.775	2314		23.5	141	49.3
Case 3: DR با (8c)	121	2414	0.833	2416		25.4	175	55.1

جدول 2 : ارزیابی عملکرد

نتایج و کار آینده

ما یک بازی استکلبرگ را مبتنی بر مدل تقاضا - پاسخ بین شرکت برق و چندین مشترک با هدف تعادل تأمین و تقاضا و همچنین هموار نمودن بارهای جمع شده در سیستم، توصیف نمودیم. فرآیند فرموله بندی این بازی به طور مفصل با یک آنالیز وجود ترازمندی و تعادل استکلبرگ توصیف شده است. یک الگوریتم مبتنی بر تکرار بین شرکت برق و مشترکین جهت ایجاد ترازمندی و تعادل استکلبرگ پیشنهاد گردیده است که تولید توان و تقاضای بهینه برای شرکت برق و مشترکین را فراهم می نماید. نتایج عددی نشان می دهند که روش پیشنهادی می تواند به هموار ساختن بارهای جمع شده در سیستم کمک نماید و به میزان قابل توجهی عدم تطابق بین تأمین و تقاضا را کاهش دهد. به عنوان یک بسطی از این کار جاری، منابع توان ادواری (شامل سلول های فتوولتاییک و توربین های بادی) ممکن است در نظر گرفته شوند، بنابراین جهت ایجاد سازگاری مدل موجود، مسائل دینامیکی پیرامون تغییر می یابند. همچنین به عنوان یک مطالعه آینده، الگوریتم پیشنهادی می تواند در شبکه توزیع با رویکردهای قیمت گذاری گره ای و آنالیزهای پخش توان مورد ارزیابی قرار گیرد.

سپاسگزاری

این کار به طور جزئی توسط برنامه GRRC از ایالت Gyeonggi مورد حمایت واقع گردید (GRRC Hanyang 2015-B01 ، سیستم مدیریت انرژی کارخانه مبتنی بر IoT/CPS) و به طور بیشتری توسط برنامه منابع انسانی در تکنولوژی انرژی مؤسسه کره ای برنامه ریزی و ارزیابی تکنولوژی انرژی (KETEP) حمایت گردیده و از نظر منابع مالی، از وزارتخانه تجارت، صنعت و انرژی جمهوری کره گرنت شده است. (با شماره 20154030200730)

ضمیمه A

تعریف یک SES برای پیشوا

تعریف 1 : در یک بازی محدود دو نفره با یک بازیکن به عنوان پیشوا (بازیکن 2 به عنوان پیرو)، یک استراتژی $s_1^* \in S_1$ ، یک استراتژی تعادل و ترازمندی استکلبرگ (SES) را برای پیشوا فرا می خواند، اگر :

$$\max_{s_2 \in R_2(s_1^*)} u_1(s_1^*, s_2) = \min_{s_1 \in S_1} \max_{s_2 \in R_2(s_1)} u_1(s_1, s_2) = u_1^* \quad (A.1)$$

که در آن u_i تابع بهره وری بازیکن i و S_i مجموعه استراتژی بازیکن i است. $R_2(s_1)$ بیانگر بهترین مجموعه پاسخ بازیکن 2 جهت استراتژی $s_1 \in S_1$ از بازیکن 1 می باشد که به صورت زیر تعریف می گردد.

$$R_2(s_1) = \{s_2' \in S_2 : s_2' = \arg \max_{s_2 \in S_2} u_2(s_1, s_2)\} \quad (A.2)$$

کمیت u_1^* (A.1) بهره وری استکلبرگ برای پیشوا است که یک مقدار منحصر به فردی را در بازی مبتنی بر تصمیم گیری سلسله مراتبی با بازگشت به تئوری 9.3 در [36] روا می دارد. علاوه بر این، SES مربوط به s_1^* در (A.1) تضمین می کند که پیشوا یک بهره وری به میزان کمتر از u_1^* را دریافت نخواهد کرد، که بنابراین یک سطح بهره وری امنی را برای پیشوا ایجاد می کند. مطابقاً، ترازمندی استکلبرگ به صورت زیر تعریف می گردد :

تعریف 2 : اجازه دهید که $s_1^* \in S_1$ یک SES برای پیشوا باشد، برای مثال بازیکن 1 . سپس برای هر استراتژی $s_2^* \in R_2(s_1^*)$ که با s_1^* در ترازمندی و تعادل است (برآورده نمودن (A.1)) یک استراتژی بهینه ای برای پیروان بازیکن 2 وجود دارد . بنابراین این جفت (s_1^*, s_2^*) یک ترازمندی و تعادل استکلبرگ برای بازی دو نفره می باشد [36].

References

- [1] Siano P. Demand response and smart grids—a survey. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;30:461–78.
- [2] Gungor VC, Sahin D, Kocak T, Ergut S, Buccella C, Cecati C, et al. A survey on smart grid potential applications and communication requirements. *Indust Inf, IEEE Trans* 2013;9:28–42.
- [3] El-hawary ME. The smart grid—state-of-the-art and future trends. *Electr Power Comp Syst* 2014;42:239–50.
- [4] Joung M, Kim J. Assessing demand response and smart metering impacts on long-term electricity market prices and system reliability. *Appl Energy* 2013;101:441–8.
- [5] Vardakas JS, Zorba N, Verikoukis CV. A survey on demand response programs in smart grids: pricing methods and optimization algorithms. *Commun Surv Tutorials, IEEE* 2015;17:152–78.
- [6] Haiwang Z, Le X, Qing X. Coupon incentive-based demand response: theory and case study. *Power Syst, IEEE Trans* 2013;28:1266–76.
- [7] Erdinc O, Paterakis NG, Pappi IN, Bakirtzis AG, Catalão JPS. A new perspective for sizing of distributed generation and energy storage for smart households under demand response. *Appl Energy* 2015;143:26–37.
- [8] Nolan S, O'Malley M. Challenges and barriers to demand response deployment and evaluation. *Appl Energy* 2015;152:1–10.
- [9] Bo C, Jiming C, Zaiyue Y, Yan Z. Demand response management with multiple utility companies: a two-level game approach. *Smart Grid, IEEE Trans* 2014;5:722–31.
- [10] Mohsenian-Rad AH, Wong VWS, Jatskevich J, Schober R, Leon-Garcia A. Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid. *Smart Grid, IEEE Trans* 2010;1:320–31.
- [11] Erdinc O, Paterakis NG, Mendes TDP, Bakirtzis AG, Catalao JPS. Smart household operation considering bi-directional EV and ESS utilization by real-time pricing-based DR. *Smart Grid, IEEE Trans* 2015;6:1281–91.
- [12] Kai M, Guoqiang H, Spanos CJ. Distributed energy consumption control via real-time pricing feedback in smart grid. *Control Syst Technol, IEEE Trans* 2014;22:1907–14.
- [13] Kobus CBA, Klaassen EAM, Mugge R, Schoormans JPL. A real-life assessment on the effect of smart appliances for shifting households' electricity demand. *Appl Energy* 2015;147:335–43.
- [14] Jiang C, Bo Y, Xinping G. Optimal demand response scheduling with stackelberg game approach under load uncertainty for smart grid. In: *Smart grid communications (SmartGridComm), 2012 IEEE Third international conference on*; 2012. p. 546–51.
- [15] Chavali P, Peng Y, Nehorai A. A distributed algorithm of appliance scheduling for home energy management system. *Smart Grid, IEEE Trans* 2014;5:282–90.
- [16] Yang P, Tang G, Nehorai A. A game-theoretic approach for optimal time-of-use electricity pricing. *Power Syst, IEEE Trans* 2013;28:884–92.
- [17] Xue X, Wang S, Yan C, Cui B. A fast chiller power demand response control strategy for buildings connected to smart grid. *Appl Energy* 2015;137:77–87.
- [18] Fadlullah ZM, Duong Minh Q, Kato N, Stojmenovic I. GTES an optimized game-theoretic demand-side management scheme for smart grid. *Syst J, IEEE* 2014;8:588–97.
- [19] Yang J, Zhang G, Ma K. Real-time pricing-based scheduling strategy in smart grids: a hierarchical game approach. *J Appl Math* 2014;2014:8.
- [20] Saad W, Zhu H, Poor HV, Basar T. Game-theoretic methods for the smart grid: an overview of microgrid systems, demand-side management, and smart grid communications. *Signal Process Mag, IEEE* 2012;29:86–105.
- [21] Tushar W, Chai B, Yuen C, Smith DB, Wood KL, Yang Z, et al. Three-party energy management with distributed energy resources in smart grid. *Indust Electron, IEEE Trans* 2015;62:2487–98.
- [22] Meng F-L, Zeng X-J. A Stackelberg game-theoretic approach to optimal real-time pricing for the smart grid. *Soft Comput* 2013;17:2365–80.
- [23] Chen C, Kishore S, Snyder LV. An innovative RTP-based residential power scheduling scheme for smart grids. Presented at the *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), IEEE International Conference on*; 2011.
- [24] Zugno M, Morales González JM, Madsen H, Pinson P. Modeling demand response in electricity retail markets as a stackelberg game. Presented at the *12th IAAE European Energy Conference: Energy challenge and environmental sustainability*; 2012.

- [25] Kilkki O, Alahaivala A, Seilonen I. Optimized control of price-based demand response with electric storage space heating. *Indust Inf, IEEE Trans* 2015;11:281–8.
- [26] Maharjan S, Quanyan Z, Yan Z, Gjessing S, Basar T. Dependable demand response management in the smart grid: a Stackelberg game approach. *Smart Grid, IEEE Trans* 2013;4:120–32.
- [27] Tushar W, Chai B, Yuen C, Smith DB, Wood KL, Yang Z, et al. Three-party energy management with distributed energy resources in smart grid. *Indust Electron, IEEE Trans* 2015;62:2487–98.
- [28] Farzan F, Jafari MA, Gong J, Farzan F, Stryker A. A multi-scale adaptive model of residential energy demand. *Appl Energy* 2015;150:258–73.
- [29] Linni J, Honghong X, Guoqing X, Xinyu Z, Dongfang Z, Shao ZY. Regulated charging of plug-in hybrid electric vehicles for minimizing load variance in household smart microgrid. *Indust Electron, IEEE Trans* 2013;60:3218–26.
- [30] Ruilong D, Zaiyue Y, Jiming C, Asr NR, Mo-Yuen C. Residential energy consumption scheduling: a coupled-constraint game approach. *Smart Grid, IEEE Trans* 2014;5:1340–50.
- [31] Kahrobaee S, Rajabzadeh RA, Leen-Kiat S, Asgarpour S. A multiagent modeling and investigation of smart homes with power generation, storage, and trading features. *Smart Grid, IEEE Trans* 2013;4:659–68.
- [32] Safdarian A, Fotuhi-Firuzabad M, Lehtonen M. A distributed algorithm for managing residential demand response in smart grids. *Indust Inf, IEEE Trans* 2014;10:2385–93.
- [33] Sortomme E, Hindi MM, MacPherson SDJ, Venkata SS. Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicles to minimize distribution system losses. *Smart Grid, IEEE Trans* 2011;2:198–205.
- [34] Samadi P, Mohsenian-Rad A, Schober R, Wong VWS, Jatskevich J. Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid. In: *Smart grid communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE international conference on*; 2010. p. 415–20.
- [35] Mohsenian-Rad AH, Leon-Garcia A. Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments. *Smart Grid, IEEE Trans* 2010;1:120–33.
- [36] Han Z et al. *Game theory in wireless and communication networks*. Cambridge University Press; 2011.
- [37] Tirole DFJ. *Game theory*. Cambridge, MA: MIT Press; 1991.
- [38] Rosen JB. Existence and uniqueness of equilibrium points for concave N-person games. *Econometrica* 1965;33:520–34.
- [39] Basar T, Olsder GJ. *Dynamic noncooperative game theory: second edition: society for industrial and applied mathematics (SIAM, 3600 Market Street, Floor 6, Philadelphia, PA 19104)*; 1999.
- [40] FERC, MISO daily report, *Electric Power Markets: Midwest (MISO)*; 2011. <<http://www.ferc.gov/market-oversight/mkt-electric/midwest/miso-archives.asp>>.