

تعادل بازار برق دوطرفه با مصرف کنندگان استراتژیک

هانی رئوف شیبانی

آموزشکده فنی و حرفه‌ای سما، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد

مشهد، ایران

hani.raoof@gmail.com

مریم ولی‌زاده

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نیشابور

نیشابور، ایران

maryam.valizadeh68@gmail.com

مهدی ظریف

گروه برق، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی

مشهد، ایران

zarif.mahdi315@gmail.com

IEEE اعمال شده است و نتایج حضور استراتژیک مصرف‌کنندگان تحلیل شده است.

واژه‌های کلیدی — مصرف‌کنندگان استراتژیک؛ مدل تابع عرضه^۳؛ قیمت‌گذاری یکنواخت^۴؛ تمایل به پرداخت^۵

۱. مقدمه

در یک بازار رقابتی، ترکیب اقدامات تمامی مصرف‌کنندگان از یک سو و تمامی عرضه‌کنندگان از سوی دیگر است که قیمت را تعیین می‌کند. در بازارهای برق، بازیگران استراتژیک بدنبال بهبود رفتار خود برای بدست آوردن سود بیشتر هستند. بنابراین، کشف رفتار آن‌ها در بازار و قیمت تسویه‌ی بازار بسیار مهم است [۱]. در حال حاضر، بهینه‌سازی بیددهی استراتژیک یک موضوع کلیدی در بازارهای برق محسوب می‌شود [۲]. مصرف‌کنندگانی که بصورت مجموعه‌ای از فرصت‌های خرید فعالیت می‌کنند، مصرف‌کنندگان استراتژیک نامیده می‌شوند که رفتارشان به عنوان رفتار خرید استراتژیک شناخته می‌شود [۳]. در مراجع [۴] و [۵]، تاثیر پاسخ

چکیده — در طول سالهای متعددی شرکت‌های برق بر روی بهبود شرایط اقتصادی طرف تولید متمرکز بوده‌اند. در دو دهه اخیر با معرفی مفاهیم پاسخ سمت تقاضا در سیستم‌های تجدیدساختار یافته، بازارها شروع به شرکت دادن رفتار طرف تقاضا از طریق پیشنهاد قیمت مصرف‌کننده و با استراتژی‌های پیشنهاد قیمت سمت تقاضا کرده‌اند. بهره‌برداران مستقل سیستم‌های تجدیدساختار یافته^۱، برای اتخاذ تدابیر مربوط به تنظیم بازارهای برق، نیاز به دانستن نقطه کار بازار شامل قیمت، توان تولیدی هریک از تولیدکنندگان و همچنین میزان مصرف شبکه دارند. یکی از راههای رسیدن به این هدف، مطالعه سیستم تجدید ساختار یافته در نقطه تعادل نش^۲ آن است.

در بازارهای دوطرفه، رقابت مصرف‌کنندگان نیز در تعیین نقطه تعادل تأثیرگذار خواهد بود. بر این اساس، در این مقاله به دنبال یافتن نقطه تعادل بازار انرژی دو طرفه با در نظر گرفتن رقابت همزمان تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان می‌باشیم. مدل ارائه شده در این مقاله به شبکه ۳۰۰ باسه

³ Supply Function

⁴ Uniform

⁵ Willingness to pay

¹ Independent System Operator (ISO)

² Nash Equilibrium

قیمت‌گذاری یکنواخت، قیمت برق در بازار را تعیین می‌کند. در این بازار تولیدکننده i پیشنهاد خود را به صورت زیر به ISO ارائه می‌کند:

$$bid_i = \alpha_i + b_i Q_i^P \quad (1)$$

در رابطه فوق، α_i عرض از مبدا بید، Q_i^P میزان توان تولیدی تولیدکننده i در بازار، و b_i شیب خط بید است که برابر با شیب تابع هزینه حدی در نظر گرفته شده است. تابع هزینه حدی این تولیدکننده نیز بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$MC_i = a_i + b_i Q_i^P \quad (2)$$

که در آن، a_i عرض از مبدا تابع هزینه حدی تولیدکننده i است. در این بازار، مصرف‌کننده j نیز بصورت زیر پیشنهاد خود را به بهره‌بردار مستقل سیستم ارائه می‌کند:

$$bid_j = N_j - \gamma_j Q_j^D \quad (3)$$

که در آن، N_j عرض از مبدا بید، γ_j شیب خط بید و Q_j^D مقدار مصرف پذیرفته شده مصرف‌کننده j در بازار می‌باشد. بید ارائه شده توسط هر مصرف‌کننده مشابه منحنی بار الاستیک در بازارهای انرژی می‌باشد. بنابراین با این بید، هر مصرف‌کننده میزان کشش تقاضای خود را به بازار اعلام می‌کند. مسئله تعیین نقطه تعادل در این مقاله در سه حالت عدم وجود محدودیت در تولید و مصرف، وجود محدودیت میزان توان تولیدکننده و وجود محدودیت میزان مصرف توسط مصرف‌کننده بررسی می‌گردد.

۲.۲. عدم وجود محدودیت

۲.۲.۱. مسئله بهینه‌سازی بهره‌بردار مستقل سیستم

بهره‌بردار مستقل سیستم، بر اساس پیشنهادهای ارائه شده توسط تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان، میزان تولید و مصرف هر یک از بازیگران بازار انرژی و همچنین قیمت بازار را به نحوی تعیین می‌کند که رفاه اجتماعی بازار بیشینه شود. در این بازار، رفاه اجتماعی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$J_{ISO} = \sum_{m \in B} \int (N_m - \gamma_m Q_m^D) dQ_m^D - \sum_{k \in A} \int (\alpha_k + b_k Q_k^P) dQ_k^P \quad (4)$$

که در آن، J_{ISO} رفاه اجتماعی بازار انرژی است. براین اساس، مسئله بهینه‌سازی ISO بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\max_{Q_j^D, Q_i^P} J_{ISO} = \sum_{m \in B} \int (N_m - \gamma_m Q_m^D) dQ_m^D - \sum_{k \in A} \int (\alpha_k + b_k Q_k^P) dQ_k^P \quad (5)$$

s.t:

تقاضا روی قیمت‌های گره‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. در مرجع [۶]، مسئله برنامه‌ریزی و عملکرد یک تولیدکننده استراتژیک تحت یک بازار با رقابت ناکامل بررسی شده است. مرجع [۷]، تجارت بازار برق در یک حوضچه توان شامل یک تولیدکننده قدرت استراتژیک را بررسی می‌کند. مرجع [۸]، تعادل نش را در یک حوضچه توان با رقابت کورنات و با در نظر گرفتن محدودیت‌های انتقال بررسی می‌کند. در مرجع [۹]، مسئله‌ی بهینه‌سازی بیددهی ژنراتور زمانیکه فقط یک بار مصرفی غیرالاستیک وجود دارد بررسی شده است. این مسئله در حضور قید ظرفیت واحد و عدم حضور آن در نظر گرفته شده است. در نهایت با لحاظ نمودن هر یک از این موارد، وجود یکتایی نقطه تعادل نش بررسی شده است. در هیچیک از این مقالات، مصرف‌کننده بصورت یک بازیگر استراتژیک در بازار تعریف نشده است. در مرجع [۱۰]، حضور استراتژیک مصرف‌کنندگان در بازار برق مورد بررسی قرار گرفته است. در این مرجع، مسئله بهینه‌سازی تولیدکنندگان همزمان با مسئله بهینه‌سازی مصرف‌کنندگان در بازار انرژی در نظر گرفته نشده است. همچنین، برای یافتن نقطه تعادل، مجموع سود مصرف‌کنندگان در حل معادلات EPEC^۶ در نظر گرفته شده است، در حالیکه برای یافتن نقطه تعادل می‌بایست بهینه‌سازی سود تک تک مصرف‌کنندگان بطور همزمان مورد مطالعه قرار گیرد.

در این مقاله، بدنبال یافتن نقطه تعادل بازار برق دوطرفه با در نظر گرفتن تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان استراتژیک می‌باشیم. بدین منظور، ابتدا می‌بایست مسئله‌ی بهینه‌سازی مربوط به بهره‌بردار مستقل بازار، مسئله‌ی بهینه‌سازی تولیدکنندگان استراتژیک، و مسئله مصرف‌کنندگان استراتژیک مدل‌سازی شود. سپس با محاسبه‌ی شرایط KKT مربوط به هر یک از مسائل بهینه‌سازی فوق، دسته معادل EPEC حل شده و نقطه تعادل بازار محاسبه شود.

۲. بیان مسئله

۲.۱. فرضیه‌ها

بازار برق فیزیکی در نظر گرفته شده شامل تولیدکنندگان استراتژیک عضو مجموعه A و مصرف‌کنندگان استراتژیک عضو مجموعه B می‌باشد. بازیگران بازار براساس مدل تابع عرضه^۷ بیدهای خود را به ISO ارسال کرده و با یکدیگر رقابت می‌کنند. بهره‌بردار مستقل سیستم نیز براساس

^۶ Equilibrium Problem with Equilibrium Constraint

^۷ Supply function

توان تولیدی واحد i بر حسب بدهای تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان در بازار انرژی است. در این حالت، از محدودیت تولید صرف نظر شده است.

۲.۲.۲. مسئله بهینه‌سازی مصرف‌کنندگان

مصرف‌کننده j نیز با توجه به تابع حداکثر تمایل به پرداخت خود را ماکزیم می‌کند. بنابراین مسئله بهینه‌سازی مصرف‌کننده j بصورت زیر مدل‌سازی می‌شود:

$$\max_{N_j} \pi_j = \left(\bar{N}_j Q_j^D - \frac{1}{2} \gamma_j Q_j^{D^2} \right) - \lambda Q_j^D \quad (16)$$

s.t.:

$$\lambda = \frac{\sum_{m \in B} \left(\frac{N_m}{\gamma_m} \right) + \sum_{k \in B} \left(\frac{\alpha_k}{b_k} \right)}{\sum_{k \in A} \left(\frac{1}{b_k} \right) + \sum_{m \in B} \left(\frac{1}{\gamma_m} \right)} \quad (17)$$

$$Q_j^D = \frac{N_j \left(\sum_{k \in A} \left(\frac{1}{b_k} \right) + \sum_{m \in B} \left(\frac{1}{\gamma_m} \right) \right) - \left(\sum_{m \in B} \left(\frac{N_m}{\gamma_m} \right) + \sum_{k \in A} \left(\frac{\alpha_k}{b_k} \right) \right)}{\gamma_j \left(\sum_{k \in A} \left(\frac{1}{b_k} \right) + \sum_{m \in B} \left(\frac{1}{\gamma_m} \right) \right)} \quad (18)$$

در نهایت نقطه تعادل بازار دوطرفه با تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان استراتژیک براساس حل معادلات EPEC بدست آمده از شرایط KKT بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\partial \mathcal{L}_i^P}{\partial \alpha_i} = a_i D + b_i D^2 (\alpha_i - a_i) - C = 0, \quad \forall i \in A \quad (19)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}_j^D}{\partial N_j} = \bar{N}_j D + \gamma_j D^2 (N_j - \bar{N}_j) - C = 0, \quad \forall j \in B \quad (20)$$

که در این روابط D و C بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$D = \sum_{k \in A} \left(\frac{1}{b_k} \right) + \sum_{m \in B} \left(\frac{1}{\gamma_m} \right) \quad (21)$$

$$C = \sum_{k \in A} \left(\frac{\alpha_k}{b_k} \right) + \sum_{m \in B} \left(\frac{N_m}{\gamma_m} \right) \quad (22)$$

با حل دسته معادلات EPEC فوق، نقطه تعادل بازار دو طرفه بدون محدودیت تولید و مصرف بدست خواهد آمد.

۲.۳. وجود محدودیت تولید

در این حالت تولیدکننده i با قید محدودیت تولید زیر در تابع بهینه‌سازی خود روبرو است:

$$0 \leq Q_i^P \leq Q_i^{Pmax} \quad (23)$$

که در آن Q_i^{Pmax} حداکثر توان قابل تولید توسط تولیدکننده i است. با کمک رابطه (۱۵) می‌توان قید فوق را به دو قید زیر تفکیک نمود بگونه‌ای که محدودیت تولید بر اساس محدودیت بر روی بید تولید کننده i تعریف شود.

$$\sum_{m \in B} Q_m^D - \sum_{k \in A} Q_k^P = 0, \quad \lambda \quad (6)$$

که در آن λ متغیر دوگان قید تعادل تولید و مصرف در بازار انرژی و بیان کننده قیمت بازار است. شرایط KKT مربوط به مسئله بهینه‌سازی بهره‌بردار مستقل سیستم بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\lambda = N_j - \gamma_j Q_j^D \quad (7)$$

$$\lambda = \alpha_i + b_i Q_i^P \quad (8)$$

$$\sum_{k \in A} Q_k^P = \sum_{m \in B} Q_m^D \quad (9)$$

براساس روش پیشنهاد شده در مرجع [۱]، شرایط KKT مسئله بهینه‌سازی ISO را می‌توان با ساده‌سازی بصورت روابط (۱۰) تا (۱۲) در نظر گرفت.

$$Q_i^P = \frac{\sum_{m \in B} \left(\frac{N_m}{\gamma_m} \right) + \sum_{k \in A | k \neq i} \left(\frac{\alpha_k}{b_k} \right) - \alpha_i \left(\sum_{m \in B} \left(\frac{1}{\gamma_m} \right) + \sum_{k \in A | k \neq i} \left(\frac{1}{b_k} \right) \right)}{b_i \left(\sum_{k \in A} \left(\frac{1}{b_k} \right) + \sum_{m \in B} \left(\frac{1}{\gamma_m} \right) \right)} \quad (10)$$

$$Q_j^D = \frac{N_j \left(\sum_{k \in A} \left(\frac{1}{b_k} \right) + \sum_{m \in B} \left(\frac{1}{\gamma_m} \right) \right) - \left(\sum_{m \in B} \left(\frac{N_m}{\gamma_m} \right) + \sum_{k \in A} \left(\frac{\alpha_k}{b_k} \right) \right)}{\gamma_j \left(\sum_{k \in A} \left(\frac{1}{b_k} \right) + \sum_{m \in B} \left(\frac{1}{\gamma_m} \right) \right)} \quad (11)$$

$$\lambda = \alpha_i + b_i \left(\frac{\sum_{m \in B} \left(\frac{N_m}{\gamma_m} \right) + \sum_{k \in A | k \neq i} \left(\frac{\alpha_k}{b_k} \right) - \alpha_i \left(\sum_{m \in B} \left(\frac{1}{\gamma_m} \right) + \sum_{k \in A | k \neq i} \left(\frac{1}{b_k} \right) \right)}{b_i \left(\sum_{k \in A} \left(\frac{1}{b_k} \right) + \sum_{m \in B} \left(\frac{1}{\gamma_m} \right) \right)} \right) = \frac{\sum_{m \in B} \left(\frac{N_m}{\gamma_m} \right) + \sum_{k \in B} \left(\frac{\alpha_k}{b_k} \right)}{\sum_{k \in A} \left(\frac{1}{b_k} \right) + \sum_{m \in B} \left(\frac{1}{\gamma_m} \right)} \quad (12)$$

۲.۳.۱. مسئله بهینه‌سازی تولیدکنندگان

در بازار انرژی، تولیدکننده i بدنبال ماکزیم کردن سود خود در بازار است. بنابراین، مسئله بهینه‌سازی تولیدکننده i در بازار بصورت زیر مدل‌سازی می‌شود:

$$\max_{\alpha_i} \pi_i = \lambda Q_i^P - \left(a_i Q_i^P + \frac{1}{2} b_i Q_i^{P^2} \right) \quad (13)$$

s.t.:

$$\lambda = \frac{\sum_{m \in B} \left(\frac{N_m}{\gamma_m} \right) + \sum_{k \in B} \left(\frac{\alpha_k}{b_k} \right)}{\sum_{k \in A} \left(\frac{1}{b_k} \right) + \sum_{m \in B} \left(\frac{1}{\gamma_m} \right)} \quad (14)$$

$$Q_i^P = \frac{\sum_{m \in B} \left(\frac{N_m}{\gamma_m} \right) + \sum_{k \in A | k \neq i} \left(\frac{\alpha_k}{b_k} \right) - \alpha_i \left(\sum_{m \in B} \left(\frac{1}{\gamma_m} \right) + \sum_{k \in A | k \neq i} \left(\frac{1}{b_k} \right) \right)}{b_i \left(\sum_{k \in A} \left(\frac{1}{b_k} \right) + \sum_{m \in B} \left(\frac{1}{\gamma_m} \right) \right)} \quad (15)$$

که در آن، π_i سود تولیدکننده نام در بازار انرژی است. جمله اول تابع هدف (۱۳) درآمد تولیدکننده در بازار انرژی براساس قیمت‌گذاری یکنواخت را بیان می‌کند. جملات دوم و سوم نیز بیان کننده هزینه تولید این تولیدکننده در بازار انرژی روزانه است. قیود (۱۴) و (۱۵) مربوط به مسئله بهینه‌سازی بهره‌بردار مستقل سیستم است و به ترتیب بیان کننده قیمت بازار فیزیکی و

که در آن $\bar{\eta}_j$ و $\underline{\eta}_j$ به ترتیب متغیرهای دوگان مربوط به قیود ماکزیمم و مینیمم توان مصرفی مصرف‌کننده j هستند.

در این حالت، مسئله بهینه‌سازی ISO و تولیدکنندگان مشابه حالت وجود محدودیت تولید می‌باشد. در نهایت با در نظر گرفتن شرایط KKT تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان، مسئله EPEC برای حالت وجود محدودیت تولید و مصرف بصورت زیر بدست می‌آید.

$$\frac{\partial \mathcal{L}_i^P}{\partial \alpha_i} = a_i D + b_i D^2 (\alpha_i - a_i) - C + b_i^2 D^2 (\underline{\mu}_i - \bar{\mu}_i) = 0 \quad (33)$$

$$\left\{ \frac{\partial \mathcal{L}_i^P}{\partial \underline{\mu}_i} = \frac{C b_i - \alpha_i D b_i}{D b_i - 1} \geq 0 \right\} \perp \underline{\mu}_i \geq 0 \quad (34)$$

$$\left\{ \frac{\partial \mathcal{L}_i^P}{\partial \bar{\mu}_i} = \frac{\alpha_i D b_i - C b_i + Q_i^{Pmax} b_i^2 D}{D b_i - 1} \geq 0 \right\} \perp \bar{\mu}_i \geq 0 \quad (35)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}_j^D}{\partial N_j} = \bar{N}_j D + \gamma_j D^2 (N_j - \bar{N}_j) - C + \gamma_j^2 D^2 (\bar{\eta}_j - \underline{\eta}_j) = 0 \quad (36)$$

$$\left\{ \frac{\partial \mathcal{L}_j^D}{\partial N_j} = \frac{N_j D - C}{D} \geq 0 \right\} \perp \underline{\eta}_j \geq 0 \quad (37)$$

$$\left\{ \frac{\partial \mathcal{L}_j^D}{\partial \bar{\eta}_j} = \frac{(\bar{Q}_D \gamma_j - N_j) D + C}{D} \geq 0 \right\} \perp \bar{\eta}_j \geq 0 \quad (38)$$

نقطه تعادل بازار دو طرفه با محدودیت تولید و مصرف با حل دسته معادلات EPEC فوق بدست خواهد آمد.

۳. مطالعه موردی

برای مطالعه مدل ارائه شده در این مقاله، شبکه ۳۰۰ باسه IEEE در نظر گرفته شده است. برای هریک از چهار ناحیه این شبکه، یک ژنراتور در نظر گرفته شده است که برآیند ژنراتورهای موجود در آن ناحیه است. داده‌های ژنراتورهای این شبکه در جدول ۱ نشان داده شده است. در هریک از نواحی، یک بار مصرفی مستقل در نظر گرفته شده است. حداکثر قیمت قابل پرداخت، الاستیسیته و حداکثر توان مصرفی هر بار در جدول زیر نشان داده شده است. داده‌های مصرف‌کننده‌های این شبکه در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات تولیدکنندگان

تعداد تولیدکنندگان	مقادیر پارامترها		
	$a_i (\$/MWh)$	$b_i (\$/MWh)$	Generation Capacity (GW)
1	7.3137	0.003739	11.400
2	18.108	0.001483	12.000
3	19.066	0.001776	8.721
4	12.943	0.153700	5.500

$$\alpha_i \leq \frac{\sum_{m \in B} \left(\frac{N_m}{\gamma_m} \right) + \sum_{k \in A | k \neq i} \left(\frac{\alpha_k}{b_k} \right)}{\sum_{m \in B} \left(\frac{1}{\gamma_m} \right) + \sum_{k \in A | k \neq i} \left(\frac{1}{b_k} \right)}, \quad \underline{\mu}_i \quad (24)$$

$$\frac{\sum_{m \in B} \left(\frac{N_m}{\gamma_m} \right) + \sum_{k \in A | k \neq i} \left(\frac{\alpha_k}{b_k} \right) - Q_i^{Pmax} b_i \left(\sum_{k \in A} \left(\frac{1}{b_k} \right) + \sum_{m \in B} \left(\frac{1}{\gamma_m} \right) \right)}{\sum_{m \in B} \left(\frac{1}{\gamma_m} \right) + \sum_{k \in A | k \neq i} \left(\frac{1}{b_k} \right)} \leq \alpha_i, \quad \bar{\mu}_i \quad (25)$$

که در آن $\underline{\mu}_i$ و $\bar{\mu}_i$ به ترتیب متغیرهای دوگان مربوط به قیود ماکزیمم و مینیمم توان تولیدی واحد i هستند. در این حالت، مسئله بهینه‌سازی ISO و مصرف‌کنندگان مشابه حالت بدون محدودیت می‌باشد. در نهایت با در نظر گرفتن شرایط KKT تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان، مسئله EPEC برای حالت وجود محدودیت تولید بصورت زیر بدست می‌آید.

$$\frac{\partial \mathcal{L}_i^P}{\partial \alpha_i} = a_i D + b_i D^2 (\alpha_i - a_i) - C + b_i^2 D^2 (\underline{\mu}_i - \bar{\mu}_i) = 0 \quad (26)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}_i^P}{\partial \underline{\mu}_i} = \left\{ \frac{C b_i - \alpha_i D b_i}{D b_i - 1} \geq 0 \right\} \perp \underline{\mu}_i \geq 0 \quad (27)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}_i^P}{\partial \bar{\mu}_i} = \left\{ \frac{\alpha_i D b_i - C b_i + Q_i^{Pmax} b_i^2 D}{D b_i - 1} \geq 0 \right\} \perp \bar{\mu}_i \geq 0 \quad (28)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}_j^D}{\partial N_j} = \bar{N}_j D + \gamma_j D^2 (N_j - \bar{N}_j) - C = 0 \quad (29)$$

با حل دسته معادلات EPEC فوق، نقطه تعادل بازار دو طرفه با محدودیت تولید بدست خواهد آمد.

۲.۴. وجود محدودیت تولید و مصرف

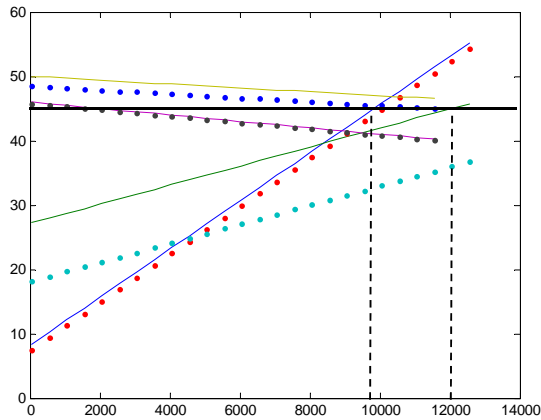
مصرف‌کنندگان استراتژیک در بازارهای دو طرفه، حداکثر میزان مصرف خود برای حضور در بازار انرژی را مشخص می‌کنند. در این حالت، علاوه بر قید محدودیت تولید، قید محدودیت مصرف نیز بصورت زیر در مسئله بهینه‌سازی مصرف‌کنندگان در نظر گرفته می‌شود.

$$0 \leq Q_j^P \leq Q_j^{Pmax} \quad (30)$$

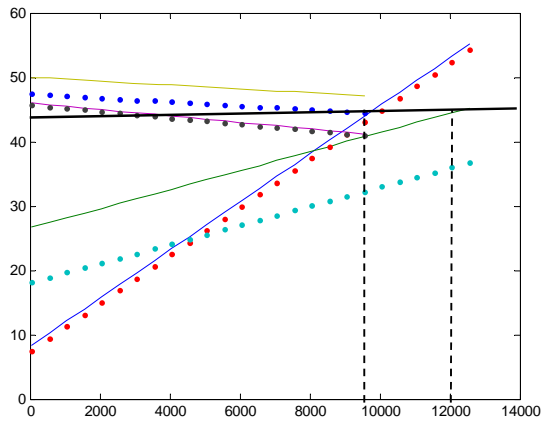
که در آن Q_j^{Pmax} حداکثر توان مصرفی مصرف‌کننده j است. مشابه بخش قبل، با کمک رابطه (۱۱) می‌توان قید فوق را به دو قید زیر تفکیک نمود بگونه‌ای که محدودیت مصرف بر اساس محدودیت بر روی بید مصرف‌کننده j تعریف شود.

$$N_j \geq \frac{\sum_{m \in B} \left(\frac{N_m}{\gamma_m} \right) + \sum_{k \in A} \left(\frac{\alpha_k}{b_k} \right)}{\sum_{k \in A} \left(\frac{1}{b_k} \right) + \sum_{m \in B} \left(\frac{1}{\gamma_m} \right)}, \quad \underline{\eta}_j \quad (31)$$

$$N_j \leq \frac{\sum_{m \in B} \left(\frac{N_m}{\gamma_m} \right) + \sum_{k \in A} \left(\frac{\alpha_k}{b_k} \right) + Q_j^{Pmax} \gamma_j \left(\sum_{k \in A} \left(\frac{1}{b_k} \right) + \sum_{m \in B} \left(\frac{1}{\gamma_m} \right) \right)}{\sum_{k \in A} \left(\frac{1}{b_k} \right) + \sum_{m \in B} \left(\frac{1}{\gamma_m} \right)} : \bar{\eta}_j \quad (32)$$



شکل ۲- نقطه تعادل وجود محدودیت تولید



شکل ۳- نقطه تعادل وجود محدودیت تولید و مصرف

تا کنون نشان داده‌ایم که در تعادل بازار، رفتار مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان با هم سازگار است. می‌توان نشان داد که این نقطه، یک نقطه تعادل پایدار است و بازار در آن تسویه می‌شود. رفاہ اجتماعی کل در بازار به صورت زیر تعریف می‌شود:

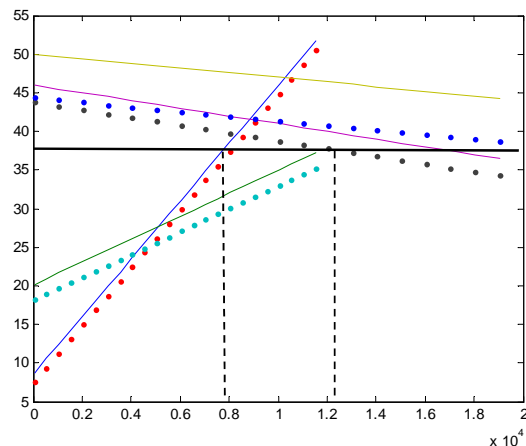
$$\sum_{j \in B} \int (\bar{N}_j - \gamma_j Q_j^D) dQ_j^D - \sum_{i \in A} \int (a_i + b_i Q_i^P) dQ_i^P \quad (36)$$

در جدول ۳، تولید برنده شده واحدها، مصرف برنده شده مصرف-کنندگان استراتژیک، و قیمت بازار روز بعد در مدل‌های بدون محدودیت تولید و مصرف، با محدودیت تولید، و با محدودیت تولید و مصرف نشان داده شده است. با کمک جدول ۳، می‌توان نتایج شبیه‌سازی مدل‌های مختلف ارائه شده در این مقاله را با یکدیگر مقایسه نمود.

جدول ۲- مشخصات مصرف‌کنندگان

تعداد مصرف‌کنندگان	مقادیر پارامترها		
	$\bar{N}_j (\$/MWh)$	$\gamma_j (\$/MWh)$	Consumer Capacity (GW)
1	46	0.0005	100000
2	50	0.0003	10
3	48	0.0004	100000
4	53	0.0006	11

در این بخش، نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی مدل‌های ارائه شده برای بیددهی چهار بازیگر بررسی شده است. در شکل ۱ نقطه تعادل حالت عدم محدودیت تولید و مصرف نشان داده شده است. خط تیره افقی نشان دهنده‌ی قیمت تسویه بازار، خطوط عمودی نشان دهنده مقادیر توان برنده شده تولیدکنندگان اول و دوم (Q_i^P)، خطوط نقطه چین نشان دهنده هزینه حدی، و خطوط توپر نشان دهنده بید هریک از تولیدکنندگان می‌باشد. زمانیکه هر کدام از بازیگران از نقطه تعادل دور شوند، بازدهی آنها کاهش می‌یابد. در شکل ۲ بازیگران در حالت وجود محدودیت تولید تولیدکنندگان بررسی شده‌اند. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، با ایجاد محدودیت در مقدار تولید تولیدکنندگان، علاوه بر تغییر کردن تولید واحدها، میزان مصرف واحدها نیز تغییر کرده است. در شکل ۳ بازیگران در حالت وجود محدودیت مقدار تولید تولیدکنندگان و مقدار مصرف مصرف‌کنندگان بصورت همزمان بررسی شده‌اند. در صورتیکه یکی از بازیگران استراتژی بیددهی خود را تغییر دهد، روی استراتژی سایر بازیگران تاثیر می‌گذارد. بصورتی که اگر میزان مصرف دو مصرف‌کننده محدود شود، علاوه بر تغییر در مصرف سایر بازیگران، تولید واحدها نیز تغییر می‌کند.



شکل ۱- نقطه تعادل عدم محدودیت تولید و مصرف

جدول ۳- نتایج بدست آمده

حالت‌های موجود	مقادیر پارامترها								
	$\lambda (\$/MWh)$	$Q_1^p (GW)$	$Q_2^p (GW)$	$Q_3^p (GW)$	$Q_4^p (GW)$	$Q_1^D (GW)$	$Q_2^D (GW)$	$Q_3^D (GW)$	$Q_4^D (GW)$
عدم وجود محدودیت	38.425	7995.704	12350.454	10003.799	165.635	10722.763	19792.829	15193.892	18376.294
محدودیت تولید و مصرف	44.393	9675.958	12000.000	8721.000	204.497	2630.715	10000.000	6970.740	11000.000
محدودیت تولید	44.948	9820.883	12000.000	8721.000	208.108	1721.730	11742.052	5897.553	11388.656

۵. مراجع

- [1] Liu, Y. F., Y. X. Ni, and F. F. Wu. "Impacts of suppliers' learning behaviour on market equilibrium under repeated linear supply-function bidding." IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution 153.1 (2006): 44-50.
- [2] Zhang, Guangquan, et al. "Competitive strategic bidding optimization in electricity markets using bilevel programming and swarm technique." Industrial Electronics, IEEE Transactions on 58.6 (2011): 2138-2146.
- [3] He, Li, and Zhang Yu-lin. "Optimal pricing in the presence of strategic consumer behavior risk." Service Systems and Service Management (ICSSSM), 2012 9th International Conference on. IEEE, 2012.
- [4] Wu, Lei. "Impact of price-based demand response on market clearing and locational marginal prices." IET Generation, Transmission & Distribution 7.10 (2013): 1087-1095.
- [5] Kirschen, Daniel S., et al. "Factoring the elasticity of demand in electricity prices." IEEE Transactions on Power Systems 15.2 (2000): 612-617.
- [6] Kazempour, S. Jalal, Antonio J. Conejo, and Carlos Ruiz. "Strategic generation investment using a complementarity approach." IEEE Transactions on Power Systems 26.2 (2011): 940-948.
- [7] Ruiz, Carlos, and Antonio J. Conejo. "Pool strategy of a producer with endogenous formation of locational marginal prices." IEEE Transactions on Power Systems 24.4 (2009): 1855-1866.
- [8] Hobbs, B. E. "Linear complementarity models of Nash-Cournot competition in bilateral and POOLCO power markets." IEEE Transactions on power systems 16.2 (2001): 194-202.
- [9] Couchman, Paul, et al. "Gaming strategy for electric power with random demand." Power Systems, IEEE Transactions on 20.3 (2005): 1283-1292.
- [10] Kazempour, S. Jalal, Antonio J. Conejo, and Carlos Ruiz. "Strategic Bidding for a Large Consumer." Power Systems, IEEE Transactions on 30.2 (2015): 848-856. K. Elissa, "Title of paper if known," unpublished.

با مقایسه اعداد بدست‌آمده در جدول ۳ مشاهده می‌گردد، با ایجاد

محدودیت در مقدار تولید و مصرف واحدها، علاوه بر تغییر استراتژی بیددهی تولید و مصرف، قیمت تسویه بازار نیز تغییر می‌کند و بازار در قیمتی بالاتر نسبت به حالت عدم وجود محدودیت تسویه می‌گردد. این درحالی است که مدلسازی مصرف‌کنندگان استراتژیک باعث کاهش در قیمت بازار انرژی گردیده است. علاوه براین، در صورت ایجاد محدودیت در مقدار تولید و مصرف، میزان مصرف پذیرفته‌شده برای واحدها کاهش می‌یابد.

۴. نتایج

در یک بازار رقابتی، ترکیب پیشنهاد خرید مصرف‌کنندگان از یک سو و پیشنهاد تولید تولیدکنندگان از سوی دیگر است که قیمت نامقید بازار را تعیین می‌کند. بهره‌برداران مستقل بازارهای انرژی، برای تخمین شرایط بازار از مفهوم شرایط تعادل نش در بازارهای انرژی استفاده می‌کنند. در این مقاله مدلی برای نقطه تعادل بازارهای انرژی الکتریکی ارائه شده است که در آن شرایط بیددهی مصرف‌کنندگان استراتژیک نیز مدل شده است. بنابراین، نقطه تعادل بدست آمده شرایط واقعی‌تری از بازارهای دو طرفه انرژی الکتریکی را بیان می‌کند.

شبیه‌سازی انجام شده در این مقاله نشان می‌دهد که در نظر گرفتن مصرف‌کنندگان استراتژیک در بازار انرژی الکتریکی باعث تغییر در شرایط تعادل بازار انرژی می‌گردد، بطوریکه مدلسازی مصرف‌کنندگان استراتژیک باعث کاهش قیمت بازار انرژی در شرایط تعادل بازار می‌شود. این امر، لزوم مدلسازی دقیق‌تر مصرف‌کنندگان استراتژیک در بازارهای انرژی را یادآوری می‌کند.