

ساختاری جدید مبتنی بر نظریه بازی استکلبرگ جهت مشارکت خرده‌فروشان در مدیریت تراکم براساس سیگنال‌های اقتصادی اپراتور مستقل بازار

محمدحسن مرادی^۱، دانشیار، علیرضا رئیسی^۲، دانشجو دکتری

۱- دانشکده مهندسی - دانشگاه بوعلی سینا - همدان - ایران - mh_moradi@yahoo.co.uk

۲- دانشکده مهندسی - دانشگاه بوعلی سینا - همدان - ایران - ali_reza_reisi@yahoo.com

چکیده: هدف این مقاله ارائه راه‌حلی جهت مدیریت تراکم از طریق تقویت همکاری بین اپراتور مستقل بازار (ISO) و خرده‌فروشان در اجرای پاسخ‌گویی بار است که در مقالات کم‌تر مورد بررسی قرار گرفته است. تقویت این همکاری از طریق سیگنال‌های اقتصادی انجام می‌شود که ISO برای خرده‌فروشان ارسال می‌کند تا آن‌ها براساس این سیگنال‌ها جهت کاهش بارشان از طریق تجمیع کنندگان پاسخ‌گویی بار (DRAs) اقدام کنند. جهت مدل‌سازی رفتار شرکت کنندگان در پاسخ‌گویی بار، از تئوری بازی استکلبرگ استفاده می‌شود که در آن خرده‌فروشان به‌عنوان بازیکن‌های پیشرو، بر اساس سیگنال‌های اقتصادی ISO مقادیر کاهش تقاضا و قیمت خرید پاسخ‌گویی بار را مشخص می‌کنند و DRAs به‌عنوان بازیکن‌های پیرو جهت پیشینه کردن سودشان بر اساس استراتژی خرده‌فروشان، باهم رقابت می‌کنند. همچنین جهت مشخص کردن تأثیر پاسخ‌گویی بار بر کاهش تراکم شبکه، مفهوم "الاستیسیته تراکم" تعریف شده و در محاسبه منفعت خرده‌فروشان استفاده می‌شود. نهایتاً عملکرد روش پیشنهادی برای یک سیستم قدرت و در سناریوهای مختلف بررسی می‌شود که نتایج نشان از کارایی روش پیشنهادی دارد.

کلمات کلیدی: مدیریت تراکم، پاسخ‌گویی بار، خرده‌فروشان، مکانیسم بازار

A Novel Game-Theoretic Framework for Recos Participation in Congestion Management Based on Economical Signals of ISO

M. H. Moradi, Assistant Professor¹, A. R. Reisi, PhD Student,

1- Faculty of Engineering, University of Bu Ali Sina, Hamedan, Iran, Email: mh_moradi@yahoo.co.uk

2- Faculty of Engineering, University of Bu Ali Sina, Hamedan, Iran, Email: ali_reza_reisi@yahoo.com

Abstract: The purpose of this paper is to address a shortfall in the literature in dealing with the congestion management problem through reinforcing a collaboration between ISO and Recos in implementing the DR program. Such reinforcement is developed based on defining some important economic signals which ISO submits to Recos for demand reduction when dealing with DRAs. A Stackelberg game is used to design a DR trade among Recos and DRAs, where Recos act as leaders, determining the values of demand reduction based on economical signals of ISO. DRAs as the follower of the game will compete based on Recos's strategy for maximizing their profits. In order to define the DR impact of each bus on congestion alleviation, the congestion elasticity concept is introduced and used in the Recos profit calculations. The performance of the proposed method is evaluated by using a test power system in different scenarios.

Keywords: Congestion management, demand response, recos, market mechanism.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۲۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۰۴

نام نویسنده مسئول: محمد حسن مرادی

نشانی نویسنده مسئول: دانشکده مهندسی - دانشگاه بوعلی سینا - همدان - ایران

۱- مقدمه

خرده‌فروشان که پل واسط بین بازار عمده‌فروشی و مصرف‌کنندگان می‌باشند، نقش برجسته‌ای در تشکیل بازار برق رقابتی دارند، چالش اصلی آن‌ها، خرید برق در قیمتی متغیر و فروش آن به قیمت ثابت است. در این فرآیند خرده‌فروشان با ریسک‌های مربوط به عدم قطعیت قیمت برق در بازار عمده‌فروشی و عدم قطعیت بار در سمت مصرف‌کنندگان روبه‌رو هستند. یکی از گزینه‌های خرده‌فروشان جهت مدیریت چنین ریسکی، اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار از طریق تجمیع‌کنندگان پاسخ‌گویی بار (DRAs) است که به نیابت از مصرف‌کنندگان کوچک در بازار خرده‌فروشی شرکت می‌کنند [۱ و ۲]. پاسخ‌گویی بار در روزهای اوج تقاضای سالانه که ریسک خرده‌فروشان به‌علت رخ دادن تراکم و افزایش قیمت برق بیشتر می‌شود، مؤثرتر است. پاسخ‌گویی بار همچنین توسط اپراتور مستقل سیستم (ISO) و از طریق DRAs، جهت مدیریت تراکم با هدف بهبود رفاه اجتماعی^۲ انجام شود.

برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در دو روش کنترل مستقیم بار ((DLC^۳ و مکانیسم بازار اجرا می‌شوند [۳ و ۴]، در روش اول بارهای قابل قطع به‌طور مستقیم کنترل می‌شوند [۵ و ۶]، در این روش مصرف‌کنندگان طی قراردادهایی (که شامل زمان، مقدار و هزینه می‌باشند) کاهش بارشان را به DRAs اطلاع می‌دهند و DRAs به نیابت از آن‌ها در بازار شرکت می‌کنند. در روش دیگر اجرای پاسخ‌گویی بار، کاهش بار بر اساس سیگنال‌های اقتصادی بازار و به‌طور غیرمستقیم انجام می‌شود [۷]، در این روش مصرف‌کنندگان با لحاظ کردن سیگنال‌های اقتصادی بازار و با محاسبه منفعتشان از کاهش بار، در پاسخ‌گویی بار شرکت می‌کنند.

پاسخ‌گویی بار اقدامی است که از یک‌طرف خرده‌فروشان، در کنار خرید برق از حوضچه، خرید برق از تولیدات پراکنده و غیره، برای مدیریت ریسک سبب قراردادشان از آن بهره می‌گیرند و از طرف دیگر ISO، به‌همراه دیگر اقدامات (برنامه‌ریزی مجدد تولید، بارزایی و ...)، جهت مدیریت تراکم شبکه از آن استفاده می‌کند. پاسخ‌گویی بار توسط هر دو نهاد با اهداف مختلف اجرا می‌شود و هیچ هماهنگی بین آن‌ها انجام نمی‌شود. در ادامه به مقالات مربوط به پاسخ‌گویی بار در دو موضوع: مدیریت ریسک قرارداد خرده‌فروشان و مدیریت تراکم پرداخته می‌شود.

• مدیریت ریسک سبب قرارداد خرده‌فروشان

روش‌های مختلفی برای مدیریت سبب قرارداد خرده‌فروشان بر اساس پاسخ‌گویی بار ارائه شده است [۸-۱۳]. در [۸] یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه جهت حل مسئله تصمیم‌گیری کوتاه‌مدت خرده‌فروشان ارائه شده است که هدف اول آن کاهش ریسک خرده‌فروشان با استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار تشویق محور است و هدف دوم آن بهینه کردن مشوق‌های مالی است که به مصرف‌کننده نهایی پیشنهاد می‌شود، کاهش پیک تقاضا و افزایش درآمد

خرده‌فروشان هدف دیگری است که در این مدل لحاظ شده است. در [۹] یک مدل دوسطحی برای قیمت‌گذاری برق و پخش بار از دیدگاه خرده‌فروشان پیشنهاد شده است که در سطح اول، پاسخ‌گویی بار مصرف‌کنندگان با توجه به قیمت‌های خرده‌فروشی و با استفاده از تئوری بازی انجام می‌شود و در سطح دوم ریسک عدم قطعیت قیمت برق توسط بهینه‌سازی مقاوم خطی^۴ مدل‌سازی می‌شود. در [۱۰] یک الگوریتم برنامه‌ریزی تصادفی^۵ جهت محدودسازی ریسک خرده‌فروشان در تعیین قیمت فروش برق ارائه شده است تا سودشان در سطح ریسک مشخصی، حداکثر شود. الگوریتم پیشنهادی، با لحاظ کردن الاستیسیته مشترکین در برابر قیمت فروش برق، بهبود داده شده است. در [۱۱] یک مدل دو سطحی مبتنی بر نظریه بازی استکلبرگ جهت مشارکت خرده‌فروشان و مصرف‌کنندگان در پاسخ‌گویی بار بر اساس قیمت‌های تصادفی ارائه شده است. در این مدل منفعت خرده‌فروشان (بازیکن‌های پیشرو) با تعیین قیمت فروش برق و منفعت مصرف‌کنندگان (بازیکن‌های پس‌رو) با برنامه‌ریزی بارهای قابل قطع بر اساس قیمت تعیین شده به‌دست می‌آید. در مقاله [۱۲]، آقای محمودی و همکارانش، الگوریتم جدیدی ارائه دادند که در آن پاسخ‌گویی بار به‌عنوان یک منبع انرژی برای خرده‌فروشان لحاظ شده است. بدین منظور برنامه‌های پاسخ‌گویی بار تشویق محور، به‌عنوان منابع لحظه‌ای پیشنهاد شده‌اند و مسئله بر اساس برنامه‌ریزی تصادفی مدل شده است. در این مدل عدم قطعیت برای متغیرهای قیمت برق حوضچه و تمایل مشارکت مصرف‌کنندگان در پاسخ‌گویی بار لحاظ شده است. آقای محمودی و همکارانش در مقاله دیگرشان [۱۳]، الگوریتم جدیدی از نقطه‌نظر خرده‌فروشان ارائه کرده‌اند که آن‌ها را جهت خرید بلندمدت و کوتاه‌مدت پاسخ‌گویی بار از تجمیع‌کنندگان و مصرف‌کنندگان کمک می‌کند.

• مدیریت تراکم

مدیریت تراکم یک مسئله بهینه‌سازی با متغیرهای فراوان از جمله پاسخ‌گویی بار است [۱۴]. امکان مدیریت تراکم بر اساس پاسخ‌گویی بار به الاستیسیته بار بستگی دارد و مقالات مختلفی این موضوع را بررسی کرده‌اند [۲۰-۱۵]. در [۱۵] آقای بوم‌پارد و همکارانش، تأثیرات الاستیسیته بار بر مدیریت تراکم و قیمت را بررسی کرده و نشان داده‌اند که اثر تراکم بر قیمت با افزایش الاستیسیته بار کاهش می‌یابد. در مقاله [۱۶] نشان داده شده است که تراکم منجر به جابه‌جایی بارهای حساس به قیمت، از بازه زمانی قیمت بالا به بازه زمانی قیمت پایین می‌شود، در [۱۷] الاستیسیته پاسخ‌دهی بار به‌عنوان یک متغیر تأثیرگذار بر مدیریت تراکم معرفی شده است، در [۱۸]، اثر الاستیسیته بار بر تراکم خطوط انتقال با یک روش تحلیلی بررسی شده است و در [۱۹] این اثر در پخش بار اقتصادی مدل شده است. در مقاله [۲۱] الگوریتمی جهت مدیریت تراکم با استفاده از ترکیب پاسخ‌گویی بار و ادوات FACTS ارائه شده است که در آن، بازار در دو مرحله تسویه می‌شود، در مرحله اول با هدف پیشینه کردن رفاه اجتماعی بازار تسویه

باس‌های مشخص تشویق و راهنمایی می‌کند. یکی از سیگنال‌های اقتصادی، ماتریس الاستیسیته تراکم است که مقدار کاهش تراکم شبکه به‌ازای پاسخ‌گویی بار در باس‌های مختلف را مشخص می‌کند. خرده‌فروشان با استفاده از این ماتریس می‌توانند منفعت‌شان از کاهش تقاضا در هر باس را محاسبه کنند. با توجه به این سیگنال‌های اقتصادی، خرده‌فروشان از طریق DRAs اقدام به کاهش تقاضایشان می‌کنند. سپس برای تقاضاهای جدید خرده‌فروشان، ISO تراکم شبکه را مجدداً بررسی می‌کند، این فرآیند چندین بار تکرار می‌شود تا نقطه تعادل نش که نشان‌دهنده مقدار بهینه کاهش تراکم و منفعت خرده‌فروشان است، به‌دست آید.

در ساختار پیشنهادی از نظریه بازی استکلبرگ جهت مدل‌سازی اثرات متقابل تصمیمات خرده‌فروشان و DRAs در اجرای پاسخ‌گویی بار، استفاده شده است. در این بازی استراتژی خرده‌فروشان، به‌عنوان بازیکن‌های پیشرو، تعیین کم‌ترین مقدار کاهش بار و قیمت خرید DR است. این قیمت بر اساس تابع سود خرده‌فروشان که با کاهش تراکم متناسب است و همچنین اطلاع آن‌ها از رفتار DRAs، تعیین می‌شود. استراتژی DRAs، به‌عنوان بازیکن‌های پیرو، تعیین مقدار کاهش بارشان است که بر اساس تابع سودشان که متناسب با قیمت پیشنهادی خرده‌فروشان است مشخص می‌گردد.

نوآوری‌های این مقاله به‌شرح زیر بیان می‌شود:

- ارائه مدلی مبتنی بر نظریه بازی‌ها برای کاهش تراکم شبکه بر اساس سازمان‌دهی خرده‌فروشان توسط ISO، برای شرکت در پاسخ‌گویی بار،
- فرمول‌بندی بازی بین خرده‌فروشان و DRAs به‌گونه‌ای که نقطه تعادل نش بازی، نقطه بهینه هر یک از آن‌ها باشد،
- معرفی ماتریس الاستیسیته تراکم برای مشخص کردن اثر پاسخ‌گویی بار در هر باس بر کاهش تراکم شبکه

۲- ساختار مسئله

۲-۱- ساختار بازار

ساختار بازار مورد مطالعه در این مقاله بر اساس بازار ملی برق استرالیا است [۲۲] که در آن قیمت برق روز پیشین، از طریق حراج^۷ پیشنهادهای خرید/فروش شرکت‌کنندگان در بازار تعیین می‌شود. در این بازار، تقاضاهای نهایی شرکت‌کنندگان (خریداران و فروشنده‌ها) برای روز بعد در همان روز مشخص می‌شود. برای آنکه زمان لازم برای انجام تحلیل‌های مختلف و اجرای موفق مدیریت تراکم وجود داشته باشد، خرده‌فروشان باید حداقل یک ساعت قبل از زمان بسته‌شدن بازار تقاضاهای خود را برای ISO بفرستند. بعد از مشخص شدن تقاضاهای اولیه، ISO جهت تشخیص تراکم، نخست بدون لحاظ کردن قیود شبکه و با اجرای برنامه پخش بار، قیمت‌های برق را مشخص می‌کند، بدیهی است که این نتایج بهینه‌ترین قیمت‌ها می‌باشند، در مرحله دوم ISO با لحاظ قیود شبکه قیمت‌های برق را دوباره محاسبه می‌کند. در صورتی که

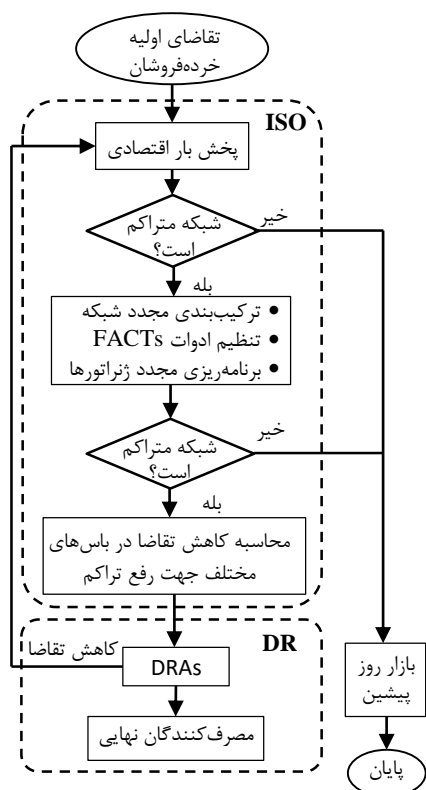
می‌شود. در مرحله دوم، اگر قیود شبکه نقض شده و تراکم رخ دهد، پس از انجام برنامه‌ریزی مجدد تولید و بهینه‌سازی هم‌زمان اجرای پاسخ‌گویی بار و عملکرد ادوات FACTs برای کاهش تراکم خطوط، تسویه بازار مجدداً انجام می‌شود.

مشارکت خرده‌فروشان در پاسخ‌گویی بار جهت کاهش ریسک تأمین برق است و آن‌ها استراتژی را دنبال می‌کنند که منجر به جابه‌جایی مصرف از پیک تقاضا (که قیمت برق زیاد است) به ساعات دیگر شود. به‌عبارت‌دیگر هدف خرده‌فروشان جهت اجرای پاسخ‌گویی بار کاهش قیمت برق نیست. رفع تراکم بر اساس پاسخ‌گویی بار به‌وسیله خرده‌فروشان، نیاز به هماهنگی آن‌ها با دیگر اقدامات انجام‌شده توسط ISO، همچون تنظیم ادوات FACTs، ترکیب‌بندی مجدد شبکه و برنامه‌ریزی مجدد تولید، دارد.

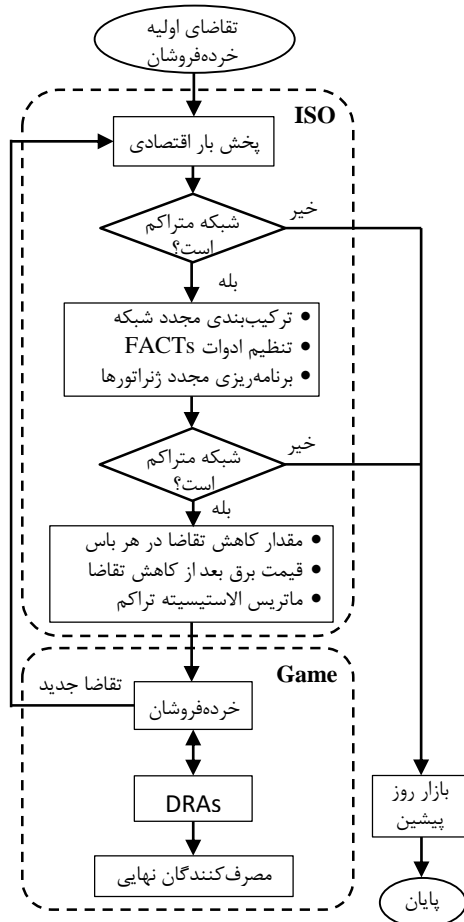
به‌عنوان یک مثال، ISO بازار استرالیا جهت مدیریت تراکم از پاسخ‌گویی بار استفاده می‌کند، این امر منجر به بهبود قابلیت اطمینان شبکه و کاهش قیمت برق خواهد شد؛ اما خرده‌فروشان منفعتی از این کاهش قیمت نخواهند داشت چون قیمت تسویه برای آن‌ها، همان قیمت برق قبل از اجرای پاسخ‌گویی بار (قیمت متناسب با تقاضای اولیه خرده‌فروشان) است و درآمد حاصل از اختلاف قیمت برق و قیمت تسویه خرده‌فروشان، صرف هزینه‌های اجرای پاسخ‌گویی بار می‌شود [۲۲]. از طرف دیگر، خرده‌فروشان در ارتباط مستقیم با مصرف‌کنندگان بوده و اگر اطلاعات لازم از طریق ISO با آن‌ها به اشتراک گذاشته شود بهتر می‌توانند مدیریت سمت مصرف و در نتیجه مدیریت تراکم و کاهش قیمت برق را انجام دهند. عدم هماهنگی و همکاری بین خرده‌فروشان و ISO منجر به عدم کسب درآمد از اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار برای خرده‌فروشان شده و این امر به‌نوبه خود منجر به افزایش هزینه برق مصرف‌کنندگان در بلندمدت خواهد شد، چون خرده‌فروشان جهت مدیریت ریسکشان و به دست آوردن حداقل درآمد قابل قبول، در قراردادهای آتی با مصرف‌کنندگان، تعرفه فروش برق را افزایش خواهند داد.

مطالعه مقالات موجود نشان می‌دهد که چالش هماهنگی و همکاری بین خرده‌فروشان و ISO در اجرای پاسخ‌گویی بار و همچنین مشارکت مؤثر خرده‌فروشان در رفع تراکم کم‌تر در مقالات مورد بررسی قرار گرفته است. به‌عنوان تنها تلاش در این زمینه می‌توان به مقاله [۳] اشاره کرد که در آن مدیریت تراکم در شبکه توزیع بر اساس هماهنگی بین اپراتور سیستم توزیع و تجمیع‌کنندگان یا خرده‌فروشان جهت اجرا پاسخ‌گویی بار انجام شده است؛ اما در راستای مدیریت تراکم در شبکه سراسری هیچ راه‌حلی که منجر به مشارکت خرده‌فروشان در مدیریت تراکم شود ارائه نشده است.

در این مقاله روش جدیدی جهت مدیریت تراکم در شبکه سراسری بر اساس مکانیسم بازار ارائه شده است که در آن پاسخ‌گویی بار بر اساس هماهنگی و همکاری ISO و خرده‌فروشان انجام می‌شود. ISO از طریق سیگنال‌های اقتصادی، خرده‌فروشان را جهت کاهش تقاضا در



شکل ۱: الگوریتم استرالیا برای اجرای پاسخ‌گویی بار جهت رفع تراکم



شکل ۲: الگوریتم پیشنهادی جهت رفع تراکم بر اساس مکانیسم بازار

اختلاف بین نتایج این دو حالت کم باشد، قیمت‌های حالت دوم به‌عنوان نتیجه نهایی به بازار اعلام می‌شود اما اگر اختلاف بین نتایج زیاد باشد، تراکم رخ داده است؛ لذا مدیریت تراکم با هدف بهینه کردن رفاه اجتماعی اجرا می‌گردد. بدین منظور ISO در شبکه اقداماتی شامل: ترکیب‌بندی مجدد شبکه [۲۳] و تنظیم عملکرد ادوات FACTs [۲۴] و در بازار اقداماتی شامل: برنامه‌ریزی مجدد تولید^۱ [۲۵] و اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار [۲۲] را پیگیری می‌کند. شکل ۱، الگوریتم مدیریت تراکم در استرالیا را نشان می‌دهد که در آن ISO پاسخ‌گویی بار را به‌روش کنترل مستقیم بار (DLC) اجرا می‌کند. با اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به این روش، اگرچه قابلیت اطمینان و امنیت شبکه تأمین شده و قیمت برق کاهش می‌یابد، اما هیچ منفعتی نصیب خرده‌فروشان نخواهد شد چون قیمت تسویه برق با آن‌ها، قیمت برق قبل از اجرای پاسخ‌گویی بار است [۲۲]. در نتیجه، در قراردادهای بعدی، خرده‌فروشان سعی می‌کنند برای کاهش ریسکشان، تعرفه فروش برق را افزایش دهند.

در این مقاله الگوریتم جدیدی برای مدیریت تراکم بر اساس اجرای پاسخ‌گویی بار پیشنهاد شده که در آن نفع تمام شرکت‌کنندگان، از جمله خرده‌فروشان، لحاظ می‌شود. بر طبق الگوریتم پیشنهادی، شکل ۲، اگر تراکم اتفاق بیفتد، جهت اجرای پاسخ‌گویی بار، یک همکاری و هماهنگی بین ISO و خرده‌فروشان انجام می‌شود. در این حالت ISO کاهش تقاضا در باس‌های مختلف که منجر به رفع تراکم می‌شود را به‌همراه قیمت جدید برق هر باس (قیمت برق بعد از رفع تراکم) و همچنین ماتریس الاستیسیته تراکم محاسبه کرده و به‌عنوان سیگنال اقتصادی به خرده‌فروشان اعلام می‌کند.

خرده‌فروشان با لحاظ کردن این سیگنال، تقاضای خود را از بازار عمده‌فروشی را مجدداً محاسبه کرده و برای ISO می‌فرستند. در این حالت خرده‌فروشان با خرید پاسخ‌گویی بار از DRAs کاهش تقاضایشان را جبران می‌کنند. آن‌ها برای محاسبه تقاضاهایشان، از قیمت جدید برق و قیمت‌های خرید پاسخ‌گویی بار آگاه می‌باشند اما از تصمیم دیگر خرده‌فروشان بی‌اطلاع هستند، به‌عبارت‌دیگر از آنجا که سود هر خرده‌فروش وابسته به تصمیم دیگر خرده‌فروشان است و همچنین تصمیمات خرده‌فروشان نیز متأثر از رفتار DRAs است؛ لذا مشخص شدن تصمیم نهایی خرده‌فروشان بر اساس انجام یک بازی بین آن‌ها اتخاذ می‌گردد.

۲-۲- بازی بین خرده‌فروشان و DRAs

اگرچه منفعت کلی خرده‌فروشان در اجرای پاسخ‌گویی بار است، اما هر خرده‌فروش ضمن توجه به رفع تراکم، تلاش می‌کند که سهم کم‌تری از کاهش بار مشخص شده توسط ISO را داشته باشد چون بابت این کاهش، متعهد به پرداخت هزینه است. خرده‌فروشان جهت اجرای پاسخ‌گویی بار، باید تصمیم بگیرند چه مقدار و با چه قیمتی پاسخ‌گویی بار را بخرند تا بیش‌ترین سود را داشته باشند.

سود (Payoffs)، محاسبه مقادیر توابع سود خرده‌فروشان $S_d(y_n, y_{-n})$ DRAs و $S_k(x_k, x_{-k})$ که در آن x_{-k} نشان‌دهنده برداری شامل تمام خرده‌فروشان به جز خرده‌فروش k است، به همین ترتیب y_{-n} نیز برای DRAs تعریف می‌شود. با توجه به این که در بازی استکلبرگ بازیکن‌های پیشرو از استراتژی بازیکن‌های پیرو مطلع می‌باشند؛ لذا در ادامه نخست نحوه محاسبه سود DARS بیان می‌شود سپس نحوه محاسبه سود خرده‌فروشان بر اساس استراتژی DARS ارائه می‌شود.

• محاسبه سود DARS

DRAs بر اساس قیمت خرید پاسخ‌گویی بار توسط خرده‌فروشان و با لحاظ کردن ارزش قطع بار مصرف‌کنندگان (C_{DR}) سودشان از شرکت در پاسخ‌گویی بار را به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌کنند.

$$S_d(y_n) = u_n[\rho y_n - C_{DR}(y_n)] \quad (1)$$

$$C_{DR}(y_n) = ay_n^2 + b(1 - \theta_n)y_n \quad (2)$$

$$u_n = \begin{cases} 1 & \rho \geq b(1 - \theta_n) \\ 0 & \rho < b(1 - \theta_n) \end{cases} \quad (3)$$

که در آن a و b ضرایب ثابت به ترتیب برحسب $\$/MW^2$ و $\$/MW$ ، y_n مقدار پاسخ‌گویی بار می‌باشند و θ_n تمایل مشترک نام جهت شرکت در پاسخ‌گویی بار است که مقداری بین صفر تا یک دارد و u_n ضریب باینری است که نشان‌دهنده تصمیم DRAs جهت شرکت در پاسخ‌گویی بار است، مقدار یک، بیانگر سود-ده بودن و مقدار صفر بیانگر ضرر-ده بودن اجرای پاسخ‌گویی بار است، (اثبات در بخش پیوست‌ها). شکل ۴ منحنی‌های سود DRAs را نشان می‌دهد که اکیداً محدب می‌باشند؛ لذا؛ بر اساس [۲۶] نقطه تعادل نش DRAs، نقطه بهینه تابع سود آنها است، پس با مشتق‌گیری از تابع سودشان (S_d) و برابر صفر قرار دادن آن، نقطه تعادل نش بازی DRAs که بیانگر مقدار بهینه فروش پاسخ‌گویی بار DRAs است (اثبات در بخش پیوست‌ها)، با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

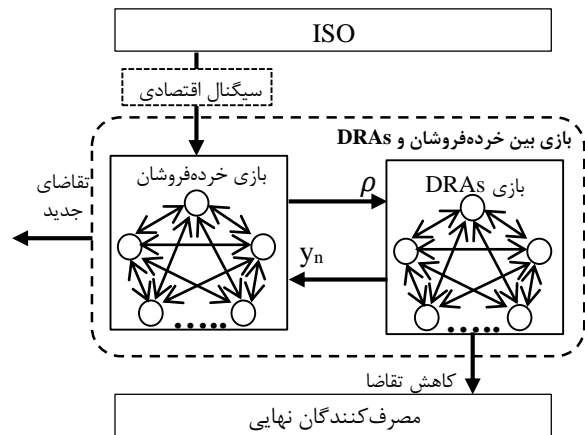
$$y_n^*(\rho) = \begin{cases} \frac{\rho - b(1 - \theta_n)}{2a} & \rho \geq b(1 - \theta_n) \\ 0 & \rho < b(1 - \theta_n) \end{cases} \quad (4)$$

با جمع مقادیر y_n^* ، تابع فروش مقدار پاسخ‌گویی بار برحسب قیمت خرید پاسخ‌گویی بار به دست می‌آید.

$$f(\rho) = \sum_n y_n^*(\rho) \quad (5)$$

شکل ۵ مقادیر نقطه تعادل DRAs بر اساس معادله (۴) را نشان می‌دهد، این مقادیر تابعی از قیمت خرید پاسخ‌گویی بار خرده‌فروشان می‌باشند. خرده‌فروشان بر اساس رابطه (۵) قیمت خرید پاسخ‌گویی بار (ρ^*) و مقادیر y_n^* را مشخص می‌کنند با جایگذاری این مقادیر در رابطه (۱)، مقادیر بهینه سود DRAs محاسبه می‌شود.

در گام بعد DRAs که فراهم‌کنندگان پاسخ‌گویی بار می‌باشند، با توجه به تصمیم خرده‌فروشان، جهت بیشینه کردن سودشان باهم رقابت می‌کنند. در نگاهی وسیع‌تر می‌توان یک تقابل بین سود خرده‌فروشان و سود DRAs را نیز مشاهده کرد، یعنی سود خرده‌فروشان و همچنین سود DRAs به قیمت خرید و فروش پاسخ‌گویی بار وابسته است؛ لذا؛ مشخص شدن نقطه تعادل شرکت‌کنندگان در پاسخ‌گویی بار منجر به انجام بازی بین دسته‌ای از خرده‌فروشان و دسته‌ای از DARS می‌شود که شماتیک آن در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: شماتیک بازی بین خرده‌فروشان و DRAs

در این مقاله از نظریه بازی استکلبرگ، برای مدل کردن رفتار خرده‌فروشان و DRAs استفاده شده است. نظریه بازی استکلبرگ، یک الگو تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی بر اساس یک فرآیند متوالی از پیش تعیین‌شده، با دو دسته بازیکن پیشرو و پیرو، است، در این فرآیند نخست بازیکن‌های پیشرو، خرده‌فروشان، استراتژی‌شان که تعیین مقدار و قیمت خرید پاسخ‌گویی بار است را انتخاب می‌کنند. سپس بازیکن‌ها پیرو، DRAs، بر اساس تصمیم خرده‌فروشان جهت بیشینه کردن سودشان باهم رقابت می‌کنند و استراتژی‌شان، تعیین مقدار فروش پاسخ‌گویی بار را انتخاب می‌کنند. نقش اصلی DRAs به عنوان بازیکن پیرو، مدل‌سازی پاسخ‌گویی بار از دید خرده‌فروشان است چنانکه آنها بر اساس تصمیم خرده‌فروشان و جهت بیشینه کردن سودشان عمل می‌کنند و بر تصمیم خرده‌فروشان اثرگذار خواهند بود. در ادامه ساختار این بازی و چگونگی محاسبه نقطه تعادل آن شرح داده خواهد شد.

بازیکن‌ها: مجموعه‌ای از خرده‌فروشان (k) و مجموعه‌ای از DRAs (n) که در بازار پاسخ‌گویی بار ثبت‌نام کرده‌اند.

استراتژی‌ها: استراتژی خرده‌فروشان و DRAs به ترتیب انتخاب مقدار خرید (x_k) و فروش (y_n) پاسخ‌گویی بار در قیمت ρ است به گونه‌ای که اولاً رابطه $\sum_{k=1}^K x_k = \sum_{n=1}^N y_n$ برقرار باشد، دوماً سودشان بیشینه شود و سوماً شرط ISO برای رفع تراکم که کاهش تقاضا به مقدار مشخصی است، تأمین شود.

کاهش خواهند یافت لذا؛ تقاضا و قیمت جدید برق و درآمد حاصله از آن برای خرده‌فروش برابر خواهند شد با:

$$D_{ki,h}^{after} = D_{ki,h}^{before} - x_{ki,h} \quad (9)$$

$$\lambda \left(\sum_{k=1}^K D_{ki,h}^{after} \right) = \lambda \left(\sum_{k=1}^K D_{ki,h}^{before} \right) - \lambda_C \left(\sum_{k=1}^K x_{ki,h} \right) \quad (10)$$

$$B_{ki,h}^{after} (D_{ki,h}^{after}) = \left[\pi_{ki,h} - \lambda \left(\sum_{k=1}^K D_{ki,h}^{after} \right) \right] D_{ki,h}^{after} - \rho_{ih} x_{ki,h} \quad (11)$$

با جایگذاری روابط (۸) و (۱۱) در رابطه (۷) سود خرده‌فروش k ام، از اجرای پاسخ‌گویی بار، در باس i و ساعت h برابر خواهد شد با:

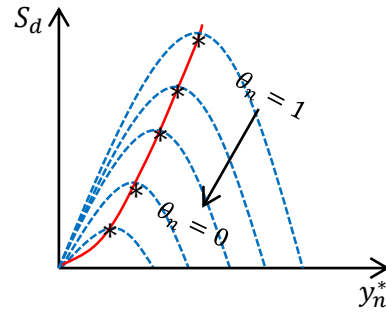
$$S_{ki,h} = D_{ki,h}^{before} \lambda_C \left(\sum_{k=1}^K x_{ki,h} \right) - \left[\pi_{ki,h} + \rho_{ih}^* - \lambda \left(\sum_{k=1}^K D_{ki,h}^{after} \right) \right] x_{ki,h} \quad (12)$$

۲-۳- ماتریس الاستیسیته تراکم شبکه

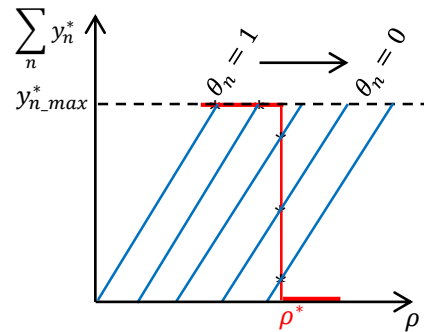
هنگامی که تراکم در خط بین دو باس رخ دهد، قیمت برق نه تنها در باس دریافت‌کننده توان بلکه در باس‌های دیگر مجاورش نیز افزایش می‌یابد، در این حالت پاسخ‌گویی بار در هر یک از باس‌هایی که قیمتشان افزایش یافته است، بر کاهش تراکم و در نتیجه کاهش قیمت دیگر باس‌ها نیز تأثیر خواهد داشت، میزان تأثیر پاسخ‌گویی بار هر یک از باس‌ها بر تراکم، با مقدار افزایش قیمت برق ناشی از تراکم در آن باس متناسب است [۱۸-۱۶]. در این حالت خرده‌فروشان برای مشارکت در پاسخ‌گویی بار، باید از تأثیر کاهش تقاضا در هر باس، بر تراکم آگاه باشند. در این مقاله جهت مدل کردن اثر پاسخ‌گویی بار در هر باس بر تراکم شبکه، ماتریس الاستیسیته تراکم معرفی می‌شود که نشان‌دهنده حساسیت کاهش قیمت برق نسبت به پاسخ‌گویی بار در هر باس است، این ماتریس به صورت رابطه (۱۳) تعریف می‌شود.

$$E_{ij} = \frac{D_j}{\lambda_C} \frac{\partial \lambda_C}{\partial D_j} \quad (13)$$

که در آن E_{ij} بیانگر کاهش قیمت باس i ام به‌ازای پاسخ‌گویی بار در باس j ام در یک شبکه با N باس است. چنانکه ذکر شد تأثیر پاسخ‌گویی بار بر قیمت در یک باس محدود نمی‌شود؛ لذا طبق این رابطه، تأثیر کاهش بار در باس j به مقدار X_j بر قیمت باس i برابر است با کاهش بار به مقدار $E_{ij} * X_j$ در باس i است. این مدل کردن اثر کاهش تراکم و در نتیجه کاهش قیمت در یک باس ناشی از کاهش تقاضا در باس‌های مختلف است. این ماتریس توسط ISO محاسبه می‌شود و بر اساس آن خرده‌فروسانی که معمولاً در چند باس حضور دارند، می‌توانند کاهش قیمت در یک باس، ناشی از کاهش تقاضایشان در باس‌های دیگر را نیز محاسبه کرده و آن را در سود نهایی‌شان لحاظ کنند. بر این اساس و با توجه به رابطه (۱۲)، سود خرده‌فروش k ام در باس i و در ساعت h از اجرای پاسخ‌گویی بار به مقدار $x_{ki,h}$ در باس i ام برابر خواهد شد با:



شکل ۴: منحنی‌های سود DRAs (----) و منحنی سود متناظر با نقطه تعادل نش DRA (—)



شکل ۵: منحنی‌های نقطه تعادل DRAs برحسب قیمت فروش

• محاسبه سود خرده‌فروشان:

هر خرده‌فروش با اطلاع از تابع قیمت پاسخ‌گویی بار برحسب مقدار آن (رابطه (۵)) و با دانستن استراتژی دیگر خرده‌فروشان، x_{-k} مقدار بهینه خرید پاسخ‌گویی بارش، x_k^* در هر ساعت، h و هر باس، i را چنان انتخاب می‌کند که سودش، رابطه (۶)، بیشینه شود.

$$\text{Maximize: } S_k(x_k, x_{-k}) = \sum_i \sum_h S_{ki,h} \quad (6)$$

$$\text{subject to: } \sum_{k=1}^K x_{ki,h} = \sum_{n=1}^N y_{n,h}^*$$

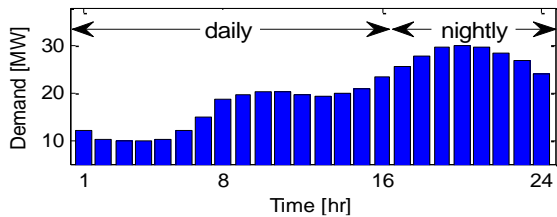
سود خرده‌فروشان در رابطه (۶) برابر با اختلاف درآمدشان قبل و بعد از اجرای پاسخ‌گویی بار است،

$$S_K = \sum_i \sum_h (B_{Ki}^{after}(D_{ki,h}^{after}) - B_{Ki}^{before}(D_{ki,h}^{before})) \quad (7)$$

درآمد خرده‌فروش k ام در باس i و در ساعت h ، B_{Ki}^{before} ، قبل از اجرای پاسخ‌گویی بار از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$B_{Ki,h}^{before}(D_{ki,h}^{before}) = \left[\pi_{ki,h} - \lambda \left(\sum_{k=1}^K D_{ki,h}^{before} \right) \right] D_{ki,h}^{before} \quad (8)$$

که در آن π تعرفه قیمت فروش برق به مشترکین، D^{before} تقاضای اولیه برق خرده‌فروش قبل از اجرای پاسخ‌گویی بار و $\lambda \left(\sum_{k=1}^K D_{ki,h}^{before} \right)$ قیمت نقدی برق (قیمت برق در بازار عمده‌فروشی) برای تقاضا در باس i و ساعت h می‌باشند. با اجرای پاسخ‌گویی بار، تقاضای خرده‌فروش k ام در ساعت h به مقدار $x_{ki,h}$ و قیمت برق به مقدار $\lambda_C \left(\sum_{k=1}^K x_{ki,h} \right)$



شکل ۷: منحنی تقاضای روز آینده

همچنین پارامترهای پاسخ‌گویی بار، مربوط به معادله (۳)، به صورت جدول ۴ می‌باشند.

جدول ۱: امیدانس خطوط

From bus	To bus	R (p.u)	X (p.u)	C _{max} (MW)
۱	۲	۰/۰۲۲	۰/۲۲	۱۰
۱	۴	۰/۰۱۷	۰/۱۷	۱۰
۱	۳	۰/۰۲	۰/۲	۱۰
۲	۴	۰/۰۲۲	۰/۲۲	۱۰
۳	۴	۰/۰۲	۰/۲	۱۰

جدول ۲: ضرایب تابع هزینه ژنراتورها

	C ₂	C ₁	C ₀	P _{max}
G1	۰/۹	۵۴	۲۰۰	۳۰ MW
G2	۱/۴۴	۷۸	۳۰۰	۱۰ MW

جدول ۳: خرده‌فروشان و مشترکین در قراردادشان در هر باس

خرده‌فروش	شماره باس			
	IV	III	II	I
	مصرف‌کنندگان			
۱	۱۵-۲۰	۶-۱۰	-	-
۲	۲۱-۲۵	۱۱-۱۴	۱-۳	-
۳	۲۶-۳۰	-	۵ و ۴	-

جدول ۴: پارامترهای پاسخ‌گویی بار

متغیر	مقدار	واحد / محدود
a	۱۵۰	\$/MWh
b	۲۲۰	\$(MWh)^2
θ_n in II	$(n-1)/5$	$1 \leq n \leq 5$
θ_n in III	$(n-1)/14$	$6 \leq n \leq 14$
θ_n in IV	$(n-1)/30$	$15 \leq n \leq 30$

۳-۱- اجرای الگوریتم پیشنهادی

بر اساس ساختار بازار بیان‌شده در بخش ۲-۱، ISO بر اساس تقاضاهای خرده‌فروشان و با اجرای پخش بار اقتصادی (OPF) قیمت برق را محاسبه می‌کند، در این مقاله این قیمت با استفاده از نرم‌افزار Matpower.4 و تابع پخش بار اقتصادی AC، محاسبه شده است. شکل ۸ قیمت برق هر باس را با و بدون در نظر گرفتن قید حداکثر ظرفیت خط انتقال (۱۰ MW) نشان می‌دهد. اختلاف زیاد قیمت باس‌ها در پیک‌بار نشان‌دهنده تراکم خطوط است. با توجه به این‌که، باس ۴ بیش‌ترین و باس ۱ کم‌ترین قیمت را دارند، تراکم در خط انتقال بین این دو باس رخ داده است.

$$S_{ki,h} = D_{ki,h}^{before} \lambda_{ci} \left(\sum_{k=1}^K X_{ki,h} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N E_{ij} \sum_{k=1}^K X_{kj,h} \right) \quad (14)$$

$$- \left[\pi_{ki,h} + \rho_{ih}^* - \lambda \left(\sum_{k=1}^K D_{ki,h}^{after} \right) \right] X_{ki,h}$$

در این رابطه، برای محاسبه مقدار λ_{ci} مشارکت تمام خرده‌فروشان و همچنین تأثیر کاهش تقاضای آن‌ها در باس‌های دیگر نیز با استفاده از ماتریس E_{ij} لحاظ شده است. نهایتاً سود خرده‌فروش k ام از پاسخ‌گویی بار در کل شبکه برابر $S_k = \sum_i S_{ki}$ خواهد شد.

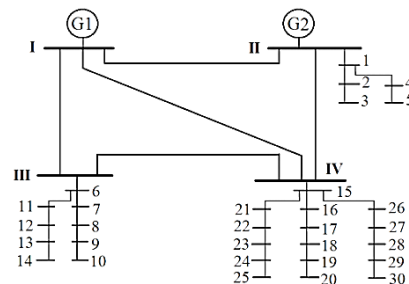
الگوریتم ۱ نحوه محاسبه نقطه تعادل نش را بر اساس توابع سود هر یک از بازیکن‌های پیشرو و پیرو نشان می‌دهد.

الگوریتم ۱: محاسبه نقطه تعادل نش بازی استکلبرگ

مقداردهی اولیه	
۱:	$x_k^* = 0 \rightarrow \rho = 0$
۲:	$y_n^*(\rho) = 0$
۳:	ϵ را تنظیم کن.
۴:	مقادیر x_k و x_{-k} تصادفی انتخاب شوند.
مراحل زیر را تکرار کن	
۵:	$x_k = x_k + \epsilon$
۶:	معادله (۵) و (۶) را جهت محاسبه ρ^* و x_k^* حل کن.
۷:	اگر: $P_R(x_k^*, x_{-k}^*) \geq P_R(x_k, x_{-k}^*)$
۸:	انجام بده: $x_k^* = x_k$
۹:	پایان اگر
۱۰:	تکرار را تا زمانی که $P_R(x_k, x_{-k}^*) < 0$ انجام دهید.

۳-۲- شبیه‌سازی و نتایج

در این بخش جهت ارزیابی روش پیشنهادی، سیستم قدرت ارائه شده در مقاله [۲۷] استفاده می‌شود، شکل ۶ این سیستم شامل سه بخش تولید، انتقال و توزیع است که به ترتیب از دو ژنراتور G1 و G2، پنج خط انتقال و تعداد ۳۰ مشترک با بار مساوی تشکیل شده‌اند. پروفایل بار شبکه در شکل (۷) نشان داده شده است، همچنین اطلاعات خطوط شبکه و تابع هزینه ژنراتورها $Cost(P) = C_2 P^2 + C_1 P + C_0$ در جداول ۱ و ۲ داده شده است. در این شبکه، سه خرده‌فروش حضور دارد که مصرف‌کنندگان طبق جدول ۳، در قرارداد با آن‌ها می‌باشند. تعرفه فروش برق توسط خرده‌فروشان در دوره شبانه برای ۲۰ مصرف‌کننده اول $120 \$/MWh$ و برای ۱۰ مصرف‌کننده آخر $125 \$/MWh$ لحاظ شده است.



شکل ۶: شبکه مورد مطالعه

نتایج شبیه‌سازی آن در جداول ۵ و ۶ و شکل‌های ۱۰ تا ۱۱ ارائه گردیده است، مقادیر B^0 درآمد خرده‌فروشان بدون لحاظ قیود خطوط است، طبق نتایج، درآمد خرده‌فروش دوم بیش‌تر از بقیه است که علت آن تأمین تقاضای بیش‌تر است، (۴۰٪ کل مصرف شبکه) و همچنین بخشی از مصرف‌کنندگان در قرارداد با این خرده‌فروش در باس‌های ۲۱ تا ۲۵ که تعرفه فروش برق بیش‌تری دارند، می‌باشند.

مقادیر B^1 درآمد خرده‌فروشان بر اساس الگوریتم بازار برق استرالیا، شکل ۱، است که در آن کاهش قیمت برق پس از رفع تراکم برای خرده‌فروشان لحاظ نمی‌شود، در این حالت هنگام تراکم، ضرر بیش‌تری متوجه خرده‌فروشان اول و سوم می‌شود (به ترتیب ۳۴٪ و ۳۳٪ از درآمدشان کم شده است)، دلیل آن این است که بیش‌تر مصرف‌کنندگان در قرارداد با این دو خرده‌فروش، در باس چهارم قرار دارند که هنگام تراکم جهش قیمت بیش‌تری را تجربه می‌کند.

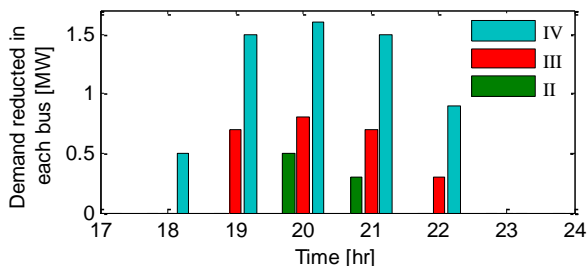
مقادیر B^2 درآمد خرده‌فروشان بر اساس الگوریتم پیشنهادی، شکل ۲، است. در این حالت خرده‌فروشان بخشی از تقاضایشان از بازار عمده‌فروشی را با خرید پاسخ‌گویی بار از DRAs، کاهش می‌دهند. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب مقادیر پاسخ‌گویی بار خریداری شده در هر باس و قیمت‌های آن را برای ساعت‌های مختلف نشان می‌دهد. اگرچه قیمت خرید پاسخ‌گویی بار کم‌تر از قیمت خرید برق است، اما باید توجه شود که در اجرای پاسخ‌گویی بار، خرده‌فروشان مصرف‌کننده نهایی می‌باشند، این یعنی کل هزینه خرید پاسخ‌گویی بار به‌صورت عبارت منفی در تابع درآمد خرده‌فروشان لحاظ می‌شود.

جدول ۵: درآمد و سود خرده‌فروشان در حالت‌های مختلف

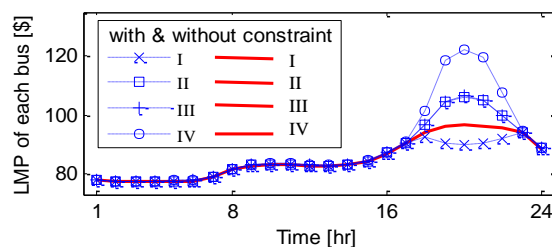
خرده‌فروشان	بدون لحاظ قیود		با لحاظ قیود	
	درآمد (\$)	سود (\$)	درآمد (\$)	سود (\$)
۱	۲۰۸۹/۴	۱۳۹۴/۱	۱۷۶۴/۲	۱۳۹۴/۱
۲	۲۴۰۸/۶	۱۸۰۲/۹	۲۱۳۴/۷	۱۸۰۲/۹
۳	۱۶۱۲/۵	۱۰۱۵/۹	۱۳۷۲/۳	۱۰۱۵/۹

جدول ۶: کاهش تقاضا، سود و هزینه خرده‌فروشان

خرده‌فروشان	کاهش تقاضا (KW)	سود (\$)	هزینه (\$)
۱	۳۳۹۹	۳۷۰/۱	۲۹۹/۱
۲	۲۴۵۳	۳۳۱/۸	۲۱۹/۵
۳	۲۸۲۲	۳۵۶/۴	۲۲۴/۷



شکل ۱۰: مقدار خرید پاسخ‌گویی بار در هر باس

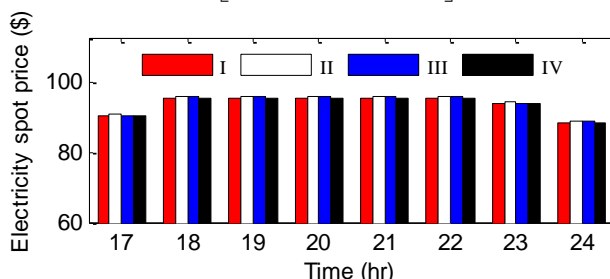


شکل ۸: قیمت نقدی برق هر باس در دو حالت با و بدون قیود خطوط

ISO جهت اجرای پاسخ‌گویی بار مقدار کاهش تقاضا که منجر به رفع تراکم می‌شود و همچنین ماتریس الاستیسیته تراکم و قیمت برق پس از رفع تراکم را محاسبه کرده و به‌عنوان سیگنال‌های اقتصادی به سه خرده‌فروش اعلام می‌کند، این مقادیر به‌ترتیب با ماتریس X ، ماتریس E و شکل ۹ داده شده‌اند. در ماتریس X ، هر سطر مربوط به یک باس و هر ستون مربوط به یک ساعت است، جهت محاسبه این ماتریس از تحلیل حساسیت استفاده شده است و برای محاسبه ماتریس E مقدار $\partial D_i = 1 MW$ قرار داده شد سپس مقادیر $\partial \lambda_i$ برای باس‌های مختلف (۱، ۲، ۳، ۴) محاسبه شدن و با جایگذاری در رابطه (۱۳) ماتریس E محاسبه شده است.

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.43 & 1.97 & 2.14 & 1.99 & 0.71 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 & -0.015 & -0.037 & -0.103 \\ 0 & 0.134 & 0.224 & 0.882 \\ 0 & 0.135 & 0.248 & 0.876 \\ 0 & 0.217 & 0.396 & 1.706 \end{bmatrix}$$



شکل ۹: قیمت برق در هر باس پس از کاهش تقاضا

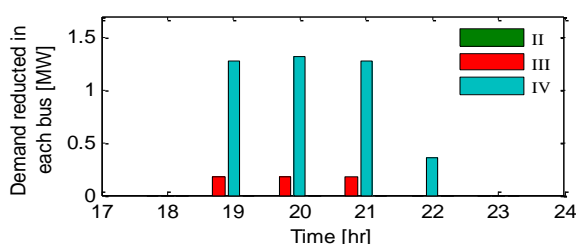
در دوره شبانه که تراکم رخ می‌دهد، منفعت خرده‌فروشان و DARS از اجرای پاسخ‌گویی بار به‌ترتیب از روابط (۱۴) و (۲) محاسبه می‌شوند، در رابطه دوم برای DRAs قیدهای حداکثر کاهش بار در هر ساعت $\sum_h u_{n,h} \leq 3$ و حداکثر تعداد شرکت در پاسخ‌گویی بار $\gamma_{n,h}^* \leq 0.2$ لحاظ شده است. در ادامه الگوریتم پیشنهادی در سه سناریو ارزیابی خواهد شد، در سناریو اول الاستیسیته بار و الاستیسیته تراکم محاسبه شده دارای مقادیر هستند که تراکم کاملاً رفع می‌شود، در سناریوهای دوم و سوم با تغییر پارامترهای شبکه، الگوریتم پیشنهادی به‌ترتیب برای الاستیسیته بار کم‌تر و الاستیسیته تراکم کم‌تر ارزیابی شده است.

• سناریو اول

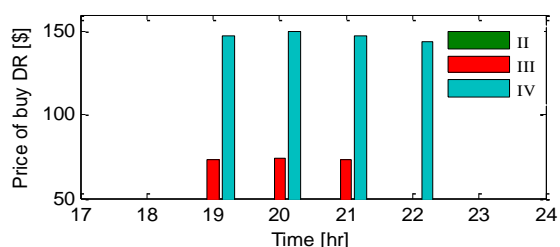
قیمت پاسخ‌گویی بار کم است پس شاهد آن هستیم که در نقطه تعادل نش، تراکم کاملاً رفع شده است، اما در منحنی سناریو دوم شیب افزایش قیمت پاسخ‌گویی بار زیاد است لذا تراکم به‌طور کامل رفع نشده است.

جدول ۷: درآمد و سود خرده‌فروشان در الاستیسیته بار کم

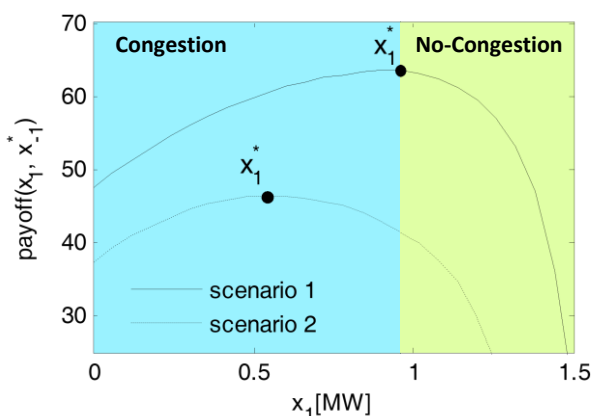
خرده‌فروشان	سناریو اول		سناریو دوم	
	الاستیسیته بار بیشتر ($\frac{\sum y_n}{\sum C_{DR}^{Nash}} = 0.197$)	سود (\$)	الاستیسیته بار کم‌تر ($\frac{\sum y_n}{\sum C_{DR}^{Nash}} = 0.056$)	سود (\$)
۱	۱۷۶۴/۲	۳۷۰/۱	۱۵۱۵/۳	۱۲۱/۲
۲	۲۱۳۴/۷	۳۳۱/۸	۱۸۷۸/۳	۷۵/۴
۳	۱۳۷۲/۳	۳۵۶/۴	۱۱۲۹/۵	۱۱۳/۶



شکل ۱۳: مقدار خرید پاسخ‌گویی بار در هر باس در الاستیسیته بار کم



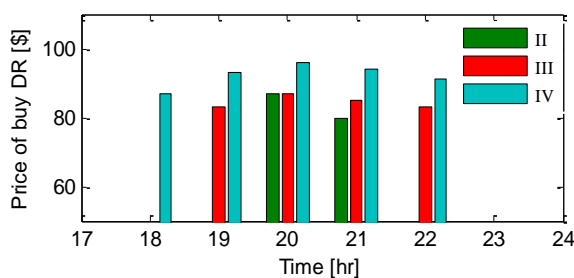
شکل ۱۴: قیمت خرید پاسخ‌گویی بار در الاستیسیته بار کم



شکل ۱۵: منحنی سود خرده‌فروش اول برحسب x_1 در x_1^* و ساعت ۲۰

• سناریو سوم: الاستیسیته تراکم کم

جهت کاهش مقادیر ماتریس الاستیسیته تراکم، در این حالت فرض می‌شود که در باس سوم یک نیروگاهی وجود دارد که قیمت تولید برق

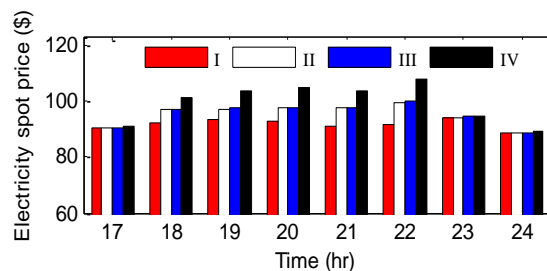


شکل ۱۱: قیمت خرید پاسخ‌گویی بار

• سناریو دوم: الاستیسیته بار کم

در این حالت فرض شده است که الاستیسیته بار کم است، لذا تمایل مصرف‌کنندگان نسبت به کاهش یا تغییر زمان مصرفشان کم است، پس قیمت خرید پاسخ‌گویی بار زیاد است، در نتیجه، هزینه اجرای پاسخ‌گویی بار در این سناریو زیادتر است، بدین منظور ضرایب a و b دو برابر حالت قبل (یعنی به ترتیب، $a = 440 \$/MWh^2$ ، $b = 30 \$/MWh$) لحاظ شده‌اند.

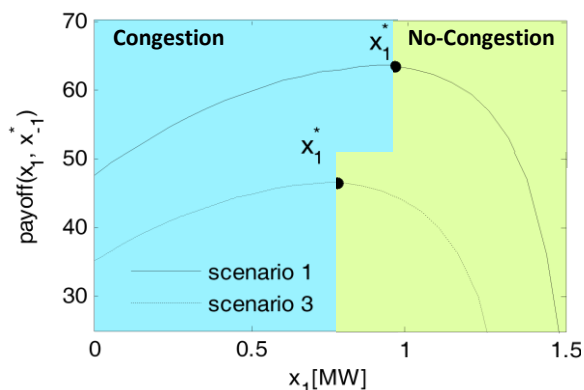
نتایج اجرای الگوریتم پیشنهادی شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ و در جدول ۷ ارائه شده است. اختلاف قیمت باس‌ها در نقطه تعادل، شکل ۱۲، بیانگر این است که در این حالت تراکم شبکه کامل رفع نشده است. چنانکه مشاهده می‌شود در این حالت، درآمد (B^2) و سود خرده‌فروشان نسبت به حالت قبل مقدار کم‌تری است، علت آن افزایش هزینه اجرای پاسخ‌گویی بار است، شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مقادیر پاسخ‌گویی بار خریدشده در هر باس و قیمت آن نشان می‌دهند، چنانکه مشاهده می‌شود، قیمت خرید پاسخ‌گویی بار بسیار زیاد شده است در نتیجه مقادیر خریداری کم‌تر شده‌اند.



شکل ۱۲: قیمت برق پس از اجرای الگوریتم پیشنهادی در الاستیسیته بار کم

شکل ۱۵ منحنی سود خرده‌فروش اول، $s_1 = P_1(x_1, x_1^*)$ ، در ساعت ۲۰ را برحسب مقدار خرید پاسخ‌گویی بار x_1 نشان می‌دهد، این منحنی برای سناریو اول و دوم رسم شده است، با توجه به محدب بودن این منحنی‌ها و با استفاده از [۲۶] ثابت می‌شود که نقاط بهینه این منحنی‌ها، تنها نقطه تعادل نش بازی می‌باشند.

در این منحنی‌ها با افزایش x_1 قیمت خرید پاسخ‌گویی بار افزایش و قیمت برق کاهش می‌یابد، اما باید توجه شود که شیب کاهش قیمت برق پس از رفع تراکم کم می‌شود چنانکه افزایش x_1 تأثیر کمی بر کاهش قیمت برق خواهد داشت. در منحنی سناریو اول، شیب افزایش



شکل ۱۸: payoff خرده فروش اول بر حسب x_1 در x_{-1}^* در ساعت ۲۰

• سود DRAs در سناریوهای مختلف

DRAs در اجرای پاسخ گویی بار، نقش خرده فروش در بازار عمده فروشی را بازی می کنند، یعنی آن ها با واسطه گری پاسخ گویی بار سود می برند، در جدول ۹ مقادیر سود DRAs بر اساس الگوریتم پیشنهادی، برای سناریوهای مختلف، ارائه شده است، از مقایسه دو سناریو اول و دوم مشخص می شود که تمایل مشترکین در اجرای پاسخ گویی بار بر سود DRAs تأثیر گذار است و به عبارت دیگر کاهش الاستیسیته بار علاوه بر سود خرده فروشان، سود DRAs را نیز کاهش می دهد. بررسی نتایج همچنین نشان می دهد که کاهش الاستیسیته تراکم بر سود DARS، سناریو سوم، هم تأثیر مثبت و هم تأثیر منفی داشته است، چنانکه در باس چهارم سود آن ها بیش تر شده است اما در باس دوم و سوم کاهش داشته است که علت آن تأثیر کم تر پاسخ گویی بار در این باس ها بر تراکم، نسبت به دیگر سناریوهای است.

جدول ۹: سود DRAs و مقدار کاهش بار انجام شده در هر سناریو

سناریو سوم		سناریو دوم		سناریو اول		باس
y_n (kw)	P_D (\$)	y_n (kw)	P_D (\$)	y_n (kw)	P_D (\$)	
۲۴۲	۷/۲	۰	۰	۶۴۰	۲۰/۹	۲
۱۹۲۰	۴۹/۶	۳۵۴	۹/۹	۲۴۰۹	۷۳/۲	۳
۶۴۷۳	۲۳۱/۸	۲۵۹۳	۱۳۲/۸	۵۸۲۵	۱۹۷/۸	۴
۸۶۲۵	۲۸۸/۶	۲۹۲۷	۱۴۲/۷	۸۸۷۴	۲۹۱/۹	کل

۲-۲- بحث

• الاستیسیته تراکم

در این مقاله مفهوم الاستیسیته تراکم، تأثیر پاسخ گویی بار در باس های مختلف بر رفع تراکم شبکه، معرفی شد، مقدار الاستیسیته تراکم به آرایش شبکه وابسته است، اگر مقدار الاستیسیته تراکم شبکه ای بزرگ باشد، یعنی حالتی که بخشی از بار باس های دیگری توسط خط در تراکم تأمین می شود و یا خطوط دیگری از ژنراتورهای با تولید برق ارزان تر به باس های مجاور خط در تراکم وجود نداشته باشد، در این حالت، مشارکت خرده فروشان جهت پاسخ گویی بار بر سود آن ها تأثیر بیش تری می گذارد به عبارت دیگر در این حالت تراکم سبب افزایش قیمت برق در باس های بیش تری می شود پس کاهش تقاضا بین باس های بیش تری تقسیم خواهد شد لذا؛ در این حالت رقابت بیش تری

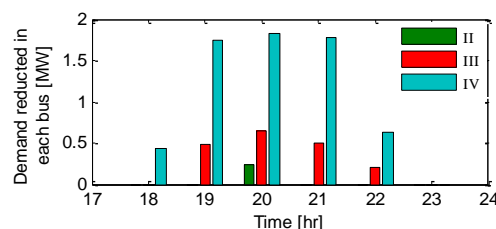
آن از نیروگاه باس دوم نیز گران تر است و ضرایب تابع تولید آن برابر با: $C_0=300, C_1=102, C_2=1/68$. این نیروگاه فقط هنگام تراکم که قیمت برق بسیار زیاد می شود، بهره برداری می شود و فقط بخشی از تقاضا برق باس سوم را تأمین می کند. در این حالت ماتریس الاستیسیته تراکم شبکه برابر خواهد شد با:

$$E = \begin{bmatrix} 0 & -0.000 & -0.000 & -0.017 \\ 0 & 0.051 & 0.124 & 0.672 \\ 0 & 0.058 & 0.248 & 0.876 \\ 0 & 0.135 & 0.258 & 1.520 \end{bmatrix}$$

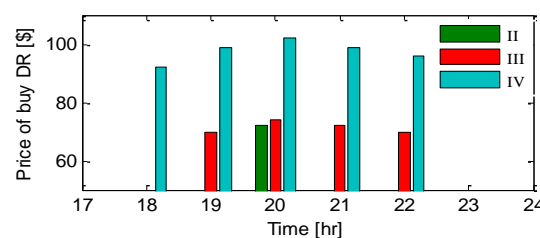
نتایج اجرای الگوریتم پیشنهادی در جدول ۸ نشان داده شده است، چنانکه مشاهده می شود کاهش الاستیسیته تراکم تأثیر منفی بر درآمد خرده فروشان، B^2 ، داشته است و مقادیر B^2 در این سناریو کم تر از سناریو اول شده است، در این حالت بیش ترین کاهش تقاضا در باس چهارم انجام شده است، شکل ۱۶، چراکه الاستیسیته تراکم شبکه کم است و پاسخ گویی بار در باس های دیگر تأثیر کمی بر رفع تراکم دارد و این سبب شده قیمت خرید پاسخ گویی بار در این باس زیاد شود، شکل ۱۷. از مقایسه نتایج این سناریو با سناریو اول، شکل ۱۸، مشخص می شود که با کاهش الاستیسیته تراکم، اگرچه مقادیر کل کاهش تقاضا جهت رفع تراکم کمی کم تر شده اما هزینه اجرای پاسخ گویی بار افزایش بیش تری یافته است که نتیجه نهایی آن افزایش هزینه اجرای پاسخ گویی بار و کاهش سود خرده فروشان خواهد شد.

جدول ۸: درآمد و سود خرده فروشان در الاستیسیته تراکم کم

خرده فروشان	سناریو اول		سناریو سوم	
	سود (\$)	B^2 (\$)	سود (\$)	B^2 (\$)
۱	۱۷۶۴/۲	۳۷۰/۱	۱۶۷۷/۷	۲۸۲/۶
۲	۲۱۳۴/۷	۳۳۱/۸	۱۹۷۸/۷	۱۷۵/۸
۳	۱۳۷۲/۳	۳۵۶/۴	۱۲۷۶/۸	۲۶۰/۹



شکل ۱۶: مقدار خرید پاسخ گویی بار هر باس در الاستیسیته تراکم کم



شکل ۱۷: قیمت خرید پاسخ گویی بار در الاستیسیته تراکم کم

سپس DRAs به‌عنوان بازیکن‌های پیرو، با توجه به قیمت خرید پاسخ‌گویی بار، جهت حداکثر کردن سودشان باهم رقابت می‌کنند. در این مقاله همچنین جهت تعیین تأثیر پاسخ‌گویی بار در باس‌های مختلف بر تراکم، ماتریس الاستیسیته تراکم معرفی شد که امکان محاسبه منفعت خرده‌فروشان که در چند باس حضور دارند و در پاسخ‌گویی بار باس‌های مختلف شرکت می‌کنند، فراهم گردید. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که مشارکت خرده‌فروشان در مدیریت تراکم بر اساس سیگنال‌های اقتصادی ISO سبب بهبود درآمدشان خواهد شد همچنین با بررسی این نتایج در سناریوهای مختلف مشاهده شد که الاستیسیته بار و الاستیسیته تراکم تأثیر مستقیمی بر سود خرده‌فروشان دارند.

پیوست‌ها

- زمانی که مقدار رابطه (۳) مثبت باشد یعنی اجرای پاسخ‌گویی بار از دیدگاه DARS سود ده است، این شرط به‌صورت زیر محاسبه شده است:

$$S_d(Y_n) = [\rho y_n - C_{DR}(Y_n)] > 0$$

$$\rho y_n - a y_n^2 - b(1 - \theta_n) y_n > 0$$

$$y_n(-a y_n + \rho - b(1 - \theta_n)) > 0$$

در این رابطه با توجه به مثبت بودن مقدار y_n ، پس عبارت داخل پرانتز نیز باید مثبت باشد لذا خواهیم داشت:

$$y_n < \frac{\rho - b(1 - \theta_n)}{a}$$

با توجه به مثبت بودن مقدار a ، بنابراین مقدار صورت کسر نیز باید مثبت باشد پس:

$$\rho - b(1 - \theta_n) > 0 \rightarrow \rho > b(1 - \theta_n)$$

این حالت مربوط به $u_n = 1$ است. بدیهی است چنانکه $\rho < b(1 - \theta_n)$ باشد سود DRAs منفی می‌شود و لذا پاسخ‌گویی بار اجرا نخواهد شد، در این حالت $u_n = 0$ است، بنابراین به‌طور کل خواهیم داشت:

$$u_n = \begin{cases} 1 & \rho \geq b(1 - \theta_n) \\ 0 & \rho < b(1 - \theta_n) \end{cases}$$

- قیمت خرید پاسخ‌گویی بار از یک طرف تابعی از مقدار تقاضا آن است و از طرف دیگر وابسته به تابع سود DRAs، (یعنی S_d)، است پس باید مقدار پاسخ‌گویی باری که سود DRAs را بیشینه می‌کند مشخص شود تا قیمت نیز مشخص شود، بدین منظور با گرفتن مشتق از تابع S_d نسبت به مقدار پاسخ‌گویی بار و برابر صفر قرار دادن آن، مقدار بهینه فروش پاسخ‌گویی بار بر حسب قیمت خرید پاسخ‌گویی بار مشخص می‌شود بنابراین خواهیم داشت:

$$S_d(Y_n) = u_n[\rho y_n - C_{DR}(Y_n)]$$

$$u_n = 1 :$$

$$S_d(Y_n) = -a y_n^2 + (\rho - b(1 - \theta_n)) y_n$$

بین DRAs وجود خواهد داشت؛ اما اگر مقدار الاستیسیته تراکم کم است، یعنی حالتی که تراکم در یکی از خطوط، فقط بر قیمت باس متصل به آن خط تأثیرگذار باشد؛ لذا؛ کاهش تقاضا بر عهده خرده‌فروشان حاضر در همان باس است در این حالت سود خرده‌فروشان از مشارکت در پاسخ‌گویی بار جهت رفع تراکم کم‌تر از حالت قبل است ولی DRAs سود بیش‌تری خواهند داشت چراکه خرده‌فروشان گزینه‌های مختلفی برای خرید پاسخ‌گویی بار ندارند و لذا رقابت کم‌تری بین آن‌ها خواهد بود.

• توسعه الگوریتم

با توجه به اینکه رفع تراکم علاوه بر خرده‌فروشان نفع سایر نهادهای بازار را نیز در بردارد و همچنین اجرای پاسخ‌گویی بار بر دیگر خدمات جانبی، مانند انرژی‌های نو، تأثیر متقابل دارد؛ لذا؛ الگوریتم پیشنهادی را می‌توان به سطوح بیش‌تری گسترش داد. در بازار عمده‌فروشی رفع تراکم علاوه بر کاهش هزینه تأمین برق، منجر به افزایش قابلیت اطمینان شبکه نیز می‌شود، پس می‌توان الگوریتم پیشنهادی را گسترش داد و قابلیت اطمینان را نیز در آن لحاظ کرد و شرکت‌های دیگر ذی‌نفع از رفع تراکم را همراه با خرده‌فروشان در دسته اول بازیکن‌ها لحاظ کرد، شرکت‌های بهره‌بردار از شبکه از جمله این شرکت‌ها می‌باشند که منفعت آن‌ها از رفع تراکم افزایش قابلیت اطمینان شبکه است.

در سطح بازیکن‌های پیرو هم می‌توان سطوح بازی را افزایش داد و علاوه بر پاسخ‌گویی بار تولیدات پراکنده، انرژی‌های نو و خودروهای برقی را نیز لحاظ کرد که این امر منجر به انجام بازی‌های دیگر جهت مشخص شدن نقطه تعادل این بازیکن‌ها خواهد شد.

۴- نتیجه‌گیری

منفعت اجرای پاسخ‌گویی بار هنگام تراکم برای خرده‌فروشان، کاهش قیمت برق است؛ اما از آنجا که امکان منحصر کردن این نفع به خرده‌فروشان شرکت‌کننده در پاسخ‌گویی بار نیست لذا سازمان‌دهی (مشارکت) تمام خرده‌فروشان ذی‌نفع از اجرای پاسخ‌گویی بار ضروری است، بدین منظور در این مقاله پیشنهاد شد که اجرای پاسخ‌گویی بار با نظارت و هدایت ISO و بر اساس مکانیسم بازار صورت گیرد. بدین منظور از دیدگاه خرده‌فروشان ساختاری پیشنهاد شد که در آن نخست ISO جهت رفع تراکم، مقدار کاهش تقاضا و قیمت جدید برق در هر باس را به‌عنوان سیگنال اقتصادی به خرده‌فروشان اطلاع می‌دهد، سپس خرده‌فروشان با توجه به سیگنال اقتصادی دریافتی در پاسخ‌گویی بار از طریق DRAs اقدام می‌کنند و مقدار کاهش تقاضایشان را بر اساس منفعتشان مشخص کرده و تقاضای جدیدش را به ISO اعلام می‌کنند. در این مقاله جهت مدل‌سازی رفتار متقابل خرده‌فروشان و DRAs در اجرای پاسخ‌گویی بار از تئوری بازی استکلبرگ استفاده شده است که در آن استراتژی خرده‌فروشان به‌عنوان بازیکن‌های پیشرو، تعیین کاهش تقاضایشان در هر باس است. با مشخص استراتژی خرده‌فروشان، قیمت خرید پاسخ‌گویی بار در هر باس مشخص می‌شود،

Demand Response” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 5, pp. 2219 – 2228, 2014.

[7] J. Ma, J. Deng, L. Song and Z. Han, “Incentive Mechanism for Demand Side Management in Smart Grid Using Auction”, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 3, pp. 1379 - 1388, 2014.

[8] M. A. F. Ghazvini, J. Soares, N. Horta, R. Neves, R. Castro and Z. Vale, “A multi-objective model for scheduling of short-term incentive-based demand response programs offered by electricity retailers” *Applied Energy*, vol. 151, no. 3, pp. 102–118, 2015.

[9] W. Wei, F. Liu and S. Mei, “Energy Pricing and Dispatch for Smart Grid Retailers Under Demand Response and Market Price Uncertainty,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 3, pp. 1364 - 1374, 2015.

[10] M. Zugno, J. M. Morales, P. Pinson and H. Madsen, “A bilevel model for electricity retailers’ participation in a demand response market environment,” *Energy Economics* vol.36, pp. 182–197, 2013.

[11] M. Carrion, A. J. Conejo and J. M. Arroyo, “Forward Contracting and Selling Price Determination for a Retailer”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, No. 4, pp. 2105 – 2114, 2007.

[12] N. Mahmoudi, M. Eghbal and T. K. Saha, “Employing demand response in energy procurement plans of electricity Retailers” *Electrical Power and Energy Systems* vol. 63, pp. 455- 460, 2014.

[13] N. Mahmoudi, T. K. Saha and M. Eghbal, “A new demand response scheme for electricity retailers,” *Electric Power Systems Research*, vol. 108, pp. 144– 152, 2014.

[14] S. Surender Reddy, “Multi-Objective based Congestion Management using Generation Rescheduling and Load Shedding” , *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 12, no. 99, pp. 1 – 11, 2016.

[15] E. Bompard, E. Carpaneto, G. Chicco and G. Gross, “The role of load demand elasticity in congestion management and pricing” *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, pp. 2229– 2234, July 2000.

[16] K. Singh, N. P. Padhy and J. Sharma, “Influence of price responsive demand shifting bidding on congestion and LMP in pool-based day-ahead electricity markets”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol 26, no. 2, pp. 886–896, 2011.

[17] T. S. Chung, D. Z. Fang and X. Y. Kong, “Power market congestion management incorporating demand elasticity effects”, *WSEAS Trans. Power Syst.*, vol. 1, no. 7 , pp. 1378–1382, 2006.

[18] S. M. Sadr and H. R. Mashhadi, “Evaluation of price-sensitive loads’ impacts on transmission network congestion using an analytical approach”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 9, no. 6, pp 523 – 530, 2015.

[19] S. Jadid and N.A Amoli, “Factoring the price elasticity of demand in the optimal power flow”. *Power Eng. Conf.*, IPEC, pp. 12–17, 2007.

[20] A. Yousefi, T.T. Nguyen, H. Zareipour and O.P. Malik, “Congestion management using demand response and FACTS devices” *Electrical Power & Energy Systems*, vol.37, no.1, pp. 62-75, 2012.

[21] AEMO, “Demand Response Mechanism And Ancillary Services Unbundling High Level Market Design, 30 July 2013, <http://www.aemo.com.au/Electricity/National-Electricity-Market-NEM/Security-and-reliability/-/media/F56D1616F51343CDBE7B7E5449E55999.ashx>

[22] <https://www.aemo.com.au/Electricity/National-Electricity-Market-NEM>

[23] M. Heidarifar and Ha. Ghasemi, “A Network Topology Optimization Model Based on Substation and Node-Breaker Modeling”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 247 – 255, 2016.

[۲۴] حسن براتی، عباس فتاحی می آبادی، مهدی احسان و سید حسین حسینی، «جایابی و تنظیم پارامترهای کنترل گر یکپارچه عبور توان (UPFC) جهت مدیریت پرشدگی خطوط انتقال در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار شده»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۳۹، شماره ۲، صفحات ۱–۱۰، سال ۱۳۸۸.

[25] Luis S. Vargas, Gonzalo Bustos-Turu and Felipe Larraín, “Wind Power Curtailment and Energy Storage in Transmission

$$\frac{dS_d(y_n)}{dy_n} = -2ay_n + \rho - b(1 - \theta_n)$$

$$\frac{dS_d(y_n)}{dy_n} = 0 \rightarrow y_n^* = \frac{\rho - b(1 - \theta_n)}{2a}$$

$u_n = 0$:

$$S_d(y_n) = 0$$

$$\frac{dS_d(y_n)}{dy_n} = 0$$

$$\frac{dS_d(y_n)}{dy_n} = 0 \rightarrow y_n^* = 0$$

با توجه به قيود تابع u_n و نتایج مشتق‌گیری به‌طور کل خواهیم داشت:

$$y_n^* = \begin{cases} \frac{\rho - b(1 - \theta_n)}{2a} & \rho \geq b(1 - \theta_n) \\ 0 & \rho < b(1 - \theta_n) \end{cases}$$

پس از مشخص شدن مقدار خرید پاسخ‌گویی بار خرده‌فروشان و با توجه به این‌که مقدار خرید پاسخ‌گویی بار با مقدار فروش، $\sum_{k=1}^K x_k = \sum_{n=1}^N y_n$ برابر است، بنابراین برای $\rho \geq b(1 - \theta_n)$ خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} f(\rho) &= \sum_{k=1}^K x_k = \sum_n y_n^* \\ &= \frac{\rho - b(1 - \theta_1)}{2a} + \frac{\rho - b(1 - \theta_2)}{2a} + \dots \\ &= \frac{\rho - b(1 - \theta_1) + \rho - b(1 - \theta_2) + \dots}{2a} \end{aligned}$$

بنابراین قیمت بهینه از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\rho = f^{-1}\left(\sum_n y_n^*\right) = f^{-1}\left(\sum_{k=1}^K x_k\right)$$

مراجع

[۱] میلاد ضیایی، احد کاظمی، محمود فتوحی فیروزآباد و مسعود پروانیا، «تأمین پاسخ تقاضا از طریق پیاده‌سازی کنترل مستقیم بارهای تهویه مطبوع خانگی توسط خرده‌فروشان توان»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۲، شماره ۱، صفحات ۲۷–۳۸، سال ۱۳۹۱.

[2] S. Nojavan, B. Mohammadi-Ivatloo and K. Zare, “Optimal bidding strategy of electricity retailers using robust optimisation approach considering time-of-use rate demand response programs under market price uncertainties,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 9, no. 4, pp. 328 – 338, 2015.

[3] W. Liu, Q. Wu, F. Wen and J. Østergaard, “Day-Ahead Congestion Management in Distribution Systems Through Household Demand Response and Distribution Congestion Prices,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 6, pp. 2739 – 2747, 2014.

[4] P. Palensky and D. Dietrich, “Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads,” *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 7, no. 3, Aug. 2011.

[5] C. M. Chu and T. L. Jong, “A novel direct air-conditioning load control method,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1356–1363, Aug. 2008.

[6] Chen Chen, Jianhui Wang and Shalinee Kishore, “A Distributed Direct Load Control Approach for Large-Scale Residential

- [27] D. T. Nguyen, M. Negnevitsky and M. d. Groot, "Market-Based Demand Response Scheduling in a Deregulated Environment", *IEEE Trans. smart grid*, vol. 4, no. 4, pp. 1948 – 1956, 2013.
- Congestion Management Considering Power Plants Ramp Rates" *IEEE Trans. Power Syst*, vol. 30, no. 5, September 2015.
- [26] J. B. Rosen, "Existence and uniqueness of equilibrium points for concave n-person games," *Econometrica*, vol. 33, pp. 347–351, 1965.

زیر نویس ها

- ¹ Demand response aggregator
- ² Social welfare maximization
- ³ Direct load control
- ⁴ Linear robust optimization
- ⁵ Stochastic programming
- ⁶ Scenario-based participation factor
- ⁷ Auction
- ⁸ Generation re-dispatch