



Research Article

Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

(2026) 5(3):76-100

Energy Management of a Retailer in the Energy and Reserve Markets in the Presence of Microgrids Considering Demand Response Programs

Ayub Ahmadzadeh Moghaddam¹, Ph.D. Student, Salah Bahramara¹, Assistant Professor, Kazem Zare²
Professor, Hêmin Golpîra³, Associate Professor

¹ Department of Electrical Engineering, Sa.C., Islamic Azad University, Sanandaj, Iran

² Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

³ Department of Electrical Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Kurdistan, Iran

Abstract:

Restructuring of the electricity industry on one hand and development of the distributed energy resources (DERs) on the other hand, create two new players including retailers and microgrid (MG) operators in the active distribution networks. Retailers purchase energy from wholesale markets and sell it to the players in the distribution networks considering different strategies. Also, MG operators try to minimize the cost of supplying the under management demand through optimal operation of DERs and cooperation with retailers. The MGs can also provide reserve capacity for the system which this issue increases complexity of cooperation between retailer and MG operators. For this purpose, a bi-level optimization approach is used to model the decision-making strategy of the retailer and MG operators in this paper. Retailer is considered as a leader and the MG operators act as the followers. In this cooperation, a local energy and reserve market is cleared. In the proposed model, the retailer sends the local energy and reserve price to the MG operators and then these players decide about power trading with the retailer. This cooperation is continued until the Nash point is obtained. The proposed model is transformed into a linear and one level model using Karush-Kuhn-Tucker and dual theory. The results show the effectiveness of the proposed approach to model the cooperation of the retailer and MG operators.

Keywords: Retailer, Microgrids, Energy and reserve market, Bi-level optimization approach.

Received: 17 June 2025

Revised: 09 August 2025

Accepted: 22 September 2025

Corresponding Author: Dr. Salah Bahramara, s.bahramara@iau.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.1885851.1173>



مدیریت انرژی خرده‌فروش در بازارهای انرژی و رزرو در حضور ریزشکه‌ها با در نظر گرفتن برنامه‌های پاسخگویی تقاضا

ایوب احمدزاده مقدم^۱، دانشجوی دکتری، صلاح بهرام آرا^۱، استادیار، کاظم زارع^۲، استاد، هومن گل‌پیرا^۳، دانشیار

۱- گروه مهندسی برق، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- گروه مهندسی برق، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

چکیده: تجدید ساختار صنعت برق از یک سو و توسعه منابع انرژی گسترده از سوی دیگر باعث به وجود آمدن دو بازیگر جدید شامل خرده‌فروش‌ها و بهره‌برداران ریزشکه‌ها در سطح شبکه‌های توزیع شده است. خرده‌فروش‌ها انرژی الکتریکی را از بازارهای انرژی خریداری و با تعیین استراتژی‌های متفاوتی به بازیگران موجود در سطح شبکه توزیع می‌فروشند. همچنین ریزشکه‌ها با بهره‌برداری بهینه از منابع انرژی گسترده و تعامل با خرده‌فروش‌ها تلاش می‌کنند که بار مصرفی تحت مدیریت خود را با کمترین هزینه تأمین کنند. ریزشکه‌ها همچنین دارای پتانسیل فراهم کردن رزرو برای شبکه هستند که این مسئله نیز چالش‌های ارتباط بین خرده‌فروش‌ها و ریزشکه‌ها را افزایش می‌دهد. به همین منظور، در این مقاله مسئله تصمیم‌گیری خرده‌فروش‌ها و ریزشکه‌ها در چارچوب یک مسئله بهینه‌سازی دوسطحی مدل شده است. خرده‌فروش به عنوان رهبر و ریزشکه‌ها به عنوان پیرو مدل شده‌اند. در این تعامل یک بازار انرژی و رزرو محلی بین خرده‌فروش و ریزشکه‌ها شکل می‌گیرد. در مسئله دوسطحی ارائه شده ابتدا خرده‌فروش درباره قیمت‌های محلی انرژی و رزرو تصمیم‌گیری خواهد کرد و ریزشکه‌ها براساس آن درباره میزان توان مبادله شده با آن تصمیم خواهند گرفت. این تعامل تا زمانی که به نقطه تعادل نش مسئله دست پیدا کنیم ادامه پیدا خواهد کرد. برای تک‌سطحی کردن و خطی‌سازی مسئله بهینه‌سازی دوسطحی ارائه شده، از روش کروش - کان - تاکر و تئوری دوگان استفاده شده است. نتایج ارائه شده به خوبی کارای مدل به منظور تعامل میان خرده‌فروش و ریزشکه‌ها را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: خرده‌فروش، ریزشکه‌ها، بازارهای انرژی و رزرو، رویکرد بهینه‌سازی دو سطحی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۲۷

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

نویسنده مسئول: دکتر صلاح بهرام آرا، s.bahramara@iau.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.1885851.1173>





۱- مقدمه

۱-۱- هدف و انگیزه تحقیق

در سیستم‌های برق سنتی، تقاضای مصرف‌کنندگان در شبکه‌های توزیع تنها از طریق شرکت‌های توزیع^۱ تأمین می‌شود. شرکت‌های توزیع انرژی را از بازار عمده‌فروشی و از طریق پست‌های فوق توزیع دریافت کرده و به مصرف‌کننده‌ها تحویل می‌دهند. با تجدید ساختار سیستم‌های قدرت، یک بازیگر انرژی جدید در سطح شبکه‌های توزیع برای پاسخگویی به تقاضای مصرف‌کنندگان ظاهر گردیده که به عنوان خردفروش شناخته می‌شود. خردفروش انرژی را از بازارهای عمده‌فروشی خریداری می‌کند و آن را با قیمت‌های از پیش تعیین شده به مصرف‌کننده‌ها می‌فروشد. در چنین سیستم‌هایی، مصرف‌کننده‌ها این امکان را دارند که تأمین‌کنندگان خود را از طریق شرکت‌های توزیع و خردفروش‌های مختلف انتخاب کنند. بنابراین، مسئله تصمیم‌گیری خردفروش‌ها برای حضور در بازارهای مختلف انرژی عمده‌فروشی و قیمت آنها که به مصرف‌کننده‌ها ارائه می‌شود، به چالش جدیدی برای محققان معرفی می‌گردد. منابع انرژی گسترده^۲ به عنوان منابع انرژی جدید جهت برآورده کردن تعادل توان در سیستم‌های قدرت در حال ظهور هستند، این منابع شامل تولید پراکنده^۳، برنامه‌های پاسخگویی تقاضا^۴ و سیستم‌های ذخیره انرژی^۵ می‌باشند که عمدتاً به شبکه‌های توزیع متصل هستند، بطوری که این منابع برای تأمین تقاضای محلی از طریق ریز شبکه‌ها^۶ یکپارچه شده اند. بنابراین چارچوب تصمیم‌گیری شبکه‌های توزیع در حضور ریزشبه‌ها و منابع انرژی گسترده به طور کامل تغییر می‌کند. به این صورت که در حضور ریزشبه‌ها و استفاده آنها از برنامه‌های پاسخگویی بار (شیف بار) باعث می‌شود خردفروش‌ها علاوه بر تأمین برق از بازار انرژی عمده‌فروشی با ریزشبه‌ها نیز تجارت داشته باشند که این تبادل توان دو طرفه علاوه بر افزایش سود خردفروش و کاهش هزینه ریزشبه‌ها منجر به یک رویکرد بهینه‌سازی دو سطحی خواهد شد که یکی از اهداف این مقاله بررسی این موضوع است. همچنین خردفروش‌ها علاوه بر حضور در بازارهای انرژی، امکان حضور در بازارهای خدمات جانبی رزرو را نیز خواهند داشت و بخشی از رزرو مورد نیاز شبکه را تأمین می‌کنند. در واقع با توجه به اینکه تقاضا برای رزرو در شبکه بسیار کمتر از تقاضای انرژی الکتریکی است، بنابراین با توجه به ظرفیت کم شبکه‌های توزیع، به نظر می‌رسد مشارکت خردفروش‌ها در بازارهای رزرو بهتر و موثرتر باشد. به همین دلیل، سهم خردفروش‌ها در بازارهای انرژی و رزرو، چالش‌های تحقیقاتی جدیدی را ایجاد کرده است، که هدف اصلی و مورد بحث در این مقاله نیز این است که خردفروش بتواند با تعامل ریزشبه‌ها در بازارهای انرژی و رزرو شرکت کند.

۱-۲- مرور سوابق و مشارکت‌ها

در دو دهه اخیر و با تغییر ساختار سیستم قدرت و رفتن به سوی شبکه‌های توزیع فعال تغییرات زیادی در شبکه‌های انتقال و توزیع صورت گرفته است. این امر باعث شده است که نقش‌ها و وظایف جدیدی برای بهره‌برداران و بازیگران شبکه توزیع تعریف شود تا از حداکثر ظرفیت خود برای رسیدن به بهره‌برداری بهینه استفاده کنند. برای مثال سرمایه‌گذاران سیستم توزیع توجه ویژه‌ای به احداث منابع انرژی گسترده داشته‌اند زیرا این منابع نه تنها تلفات، هزینه‌های بهره‌برداری و آلودگی را کاهش داده، بلکه منجر به افزایش قابلیت اطمینان سیستم نیز می‌شوند [۱]. از طرف دیگر مشارکت فعال بازیگران شبکه‌های توزیع از جمله خردفروش‌ها در بازارهای انرژی و خدمات جانبی^۷ که یکی از اهداف این مقاله است منجر به افزایش سود این سیستم‌ها شده و انعطاف بیشتری را برای سیستم انتقال فراهم می‌کند. افزایش نفوذ منابع انرژی گسترده علی‌الرغم نکات مثبتی همچون کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه‌های بهره‌برداری ناچیز، منجر به افزایش عدم قطعیت‌های سیستم می‌شوند. یکی از روشهای بسیار موثر برای مقابله با این عدم قطعیت‌ها نصب سیستم‌های ذخیره‌ساز در کنار منابع انرژی گسترده است. سیستم‌های ذخیره‌ساز نه تنها مازاد توان تولیدی منابع تجدیدپذیر را در خود ذخیره کرده و از هدر رفتن آن جلوگیری می‌کنند، بلکه با تزریق توان در ساعت‌های پیک به تأمین بار شبکه نیز کمک می‌کنند [۲]. یکی از بهترین راه‌حل‌های استفاده از منابع انرژی گسترده، یکپارچه سازی آنها در قالب ریزشبه‌ها است. ریزشبه یک سیستم تحویل انرژی یکپارچه شده است که شامل منابع تولید پراکنده، بارهای قابل قطع و ذخیره‌سازها است که می‌تواند در دو حالت





مجزا از شبکه اصلی و یا متصل به آن کار کند. مطالعات زیادی در زمینه بهره‌برداری ریزش شبکه‌ها و تأثیر آنها در شبکه‌های توزیع مورد بررسی قرار گرفته است. در شرایط بهره‌برداری نرمال، ریزش شبکه‌ها به شبکه متصل بوده و قادر به تبادل توان با آن هستند. در مقابل ریزش شبکه‌ها در شرایط مجزا و اضطراری قادر به بهره‌برداری در حالت جزیره ای^۸ هستند. لازم به ذکر است که در حالت جزیره‌ای ریزش شبکه باید بار مصرف کننده‌ها را از طریق منابع انرژی گسترده خود تأمین کنند [۳]. در مقاله [۴] اثرات فنی، اقتصادی و زیست محیطی تأثیر ریزش شبکه‌ها بر شبکه توزیع مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله هزینه عملیاتی، هزینه تعویق سرمایه‌گذاری و درآمد حاصل از کاهش تلفات و کاهش آلودگی محیط زیست به عنوان چهار تابع هدف در نظر گرفته شده است. یک استراتژی کنترل دینامیکی جدید برای کنترل توان اکتیو و راکتیو تولید پراکنده در شبکه توزیع در مقاله [۵] ارائه شده است. شبکه توزیع از چندین ریزش شبکه تشکیل شده است که هر کدام دارای سیستم مدیریت انرژی محلی خود هستند. روش ارائه شده با اعمال دستورات کنترلی، پروفایل ولتاژ و فرکانس در سیستم توزیع را بهبود می‌بخشد. الگوریتم انشعاب و کران در [۶] مدل‌سازی مدیریت انرژی چند ریزش شبکه که شامل سیستم‌های سرمایه‌گذاری، گرمایش و قدرت است، توسعه داده شده است. مدیریت انرژی هر ریزش شبکه ابتدا حل می‌شود و سپس ریزش شبکه‌ها می‌توانند انرژی را با یکدیگر مبادله کنند. در برخی دیگر از مقالات شبکه توزیع به صورت چند ریزش شبکه در نظر گرفته شده است و ارتباط بین ریزش شبکه‌ها مدل‌سازی شده است. در برخی دیگر از مطالعات ارتباط بین شرکت توزیع و ریزش شبکه‌ها مدل شده است. مدیریت انرژی و مسئله تجارت انرژی در یک شبکه توزیع با چندین ریزش شبکه در [۷] بررسی شده است. برای این منظور ابتدا مسئله مدیریت انرژی در هر ریزش شبکه حل شده و سپس تبادل انرژی بین ریزش شبکه‌ها با هدف به حداقل رساندن هزینه بهره‌برداری سیستم حل می‌شود. سپس این مدل با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها از طریق یک تکنیک بهینه‌سازی مقاوم در [۸] توسعه می‌یابد. یک فرمول ریاضی برای مدل‌سازی تجارت انرژی نظیر به نظیر در میان چند ریزش شبکه در [۹] توسعه داده شده است. برای این منظور، مسئله به دو سطح تقسیم می‌شود که در سطح اول، تبادل انرژی نظیر به نظیر در میان مصرف‌کنندگان در ریزش شبکه‌ها مدل‌سازی می‌شود و سپس تبادل انرژی در میان چند ریزش شبکه برای به حداقل رساندن رفاه محصول فرمول‌بندی می‌شود. از روش چانه‌زنی نش برای مدل‌سازی تعامل میان چندین ریزش شبکه برای تبادل انرژی با یکدیگر به منظور کاهش هزینه‌ها در مرجع [۱۰] استفاده شده است. نتایج نشان داده که روش ارائه شده نسبت به حالتی که ریزش شبکه‌ها به صورت مستقل عمل می‌کنند هزینه‌ها را تا ۴۱ درصد کاهش داده است. در مرجع [۱۱] از یک روش بهینه‌سازی تعاملی برای مدل‌سازی تعامل میان چندین ریزش شبکه با در نظر گرفتن تبادل کربن و به منظور کاهش آلاینده‌های زیست محیطی استفاده شده است. نتایج مدل ارائه شده به خوبی کاهش هزینه‌ها و کاهش آلاینده‌های زیست محیطی مدل ارائه شده را نشان داده است.

یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی در [۱۲] مسئله بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع فعال را با حضور دو تصمیم‌گیرنده شامل شرکت توزیع و ریزش شبکه‌ها در قالب یک ساختار سلسله مراتبی ارائه کرده است. برای مدل‌سازی این ساختار دو سطحی از روش بهینه‌سازی دو سطحی استفاده شده است، به طوری که شرکت توزیع به عنوان تصمیم‌گیرنده سطح بالا (رهبر) و ریزش شبکه‌ها به عنوان تصمیم‌گیرندگان سطح پایین (پیرو) در نظر گرفته می‌شوند. مسئله بدست آمده یک مسئله دو سطحی غیرخطی است که با استفاده از شرایط کروش - کان - تاکر و نظریه دوگان به یک مسئله تک سطحی و خطی تبدیل شده است. در این ساختار، تعامل ریزش شبکه‌ها و شرکت توزیع منجر به ایجاد یک بازار محلی شده است که در آن تصمیم‌گیرنده‌ها مبادلات خود را بر اساس قیمتی که آنها را به یکدیگر متصل می‌کند، انجام می‌دهند. در مقاله [۱۳] مسئله بهره‌برداری از شبکه توزیع فعال شامل شرکت توزیع و ریزش شبکه‌ها به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه حل شده است. در سطح بالای مسئله، تابع هدف شرکت توزیع و در سطح پایین تابع هدف ریزش شبکه بهینه خواهد شد. انرژی مبادله شده بین شرکت توزیع و ریزش شبکه‌ها با قیمت قطعی انجام می‌شود و فقط دستورات کنترلی از سوی شرکت توزیع برای ریزش شبکه‌ها ارسال می‌شود. در مرجع [۱۴] یک استراتژی مشارکتی برای تبادل نقطه به نقطه میان ریزش شبکه‌ها ارائه شده که برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های قیمت و بار از روش تصادفی استفاده شده است. تابع هدف مدل پیشنهادی حداقل سازی هزینه بهره‌برداری کل ریزش شبکه‌ها است. برای خطی سازی قسمت درجه دوم فرمول نویسی از روش تقریب درجه دوم مورب^۹ استفاده شده و نتایج نشان دهنده تأثیرگذاری استراتژی پیشنهادی هستند.





در تعدادی دیگر از مقالات، عملکرد شبکه‌های توزیع فعال با در نظر گرفتن همزمان بازارهای انرژی و رزرو و نقش خردهفروش‌ها در این بازارها مورد بررسی قرار گرفته است. برگزاری بازارهای انرژی و خدمات جانبی رقابتی میان شبکه‌های انتقال و توزیع، یکی دیگر از مسائلی است که در طی دو دهه اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۱۵]. در مقاله [۱۶] رفتار استراتژیک شرکت توزیع در بازارهای رزرو انرژی و عمده‌فروشی را با روش بهینه‌سازی دوسطحی مدل‌سازی کرده‌اند. به طوری که مسئله بهره‌برداری شرکت توزیع در سطح اول و اپراتور مستقل سیستم در سطح پایین مدل‌سازی شده است. مسئله به دست آمده یک مسئله دو سطحی غیر خطی است که با استفاده از شرایط کروش کان تاکر و نظریه دوگان به مسئله تک سطحی و خطی تبدیل شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که رفتار استراتژیک شرکت توزیع در بازارهای انرژی و رزرو باعث کاهش هزینه‌های شرکت توزیع می‌شود. استراتژی‌های مناقصه یک خردهفروش در بازارهای انرژی روز پیش^{۱۰} و زمان واقعی^{۱۱} در [۱۷] مدل شده است که در آن تصمیمات خردهفروش برای خرید انرژی از این بازارها با توجه به مشخصات تقاضای مصرف کنندگان تعیین می‌شود. رفتار استراتژیک یک خردهفروش در بازار عمده‌فروشی انرژی روز پیش به عنوان یک رویکرد بهینه‌سازی دو سطحی تصادفی در [۱۸] مدل‌سازی شده است. استراتژیهای پیشنهادی خردهفروش در بازارهای روز پیش و زمان واقعی به عنوان یک مدل تصادفی در [۱۹] مدل‌سازی می‌شود که در آن می‌تواند انرژی را با یک تولیدکننده بادی از طریق یک قرارداد تعریف شده معامله کند. در [۲۰] بازارهای انرژی و خدمات جانبی میان شبکه‌های انتقال و توزیع را به صورت یک مسئله دو مرحله ای فرموله شده است که در سطح اول بازارهای انرژی و انعطاف پذیری مربوط به شبکه انتقال مدل شده و در سطح دوم بازار انرژی شبکه توزیع مدل می‌شود. در این تحقیق، از روش کروش - کان - تاکر^{۱۲} برای تبدیل فرمولاسیون دو سطحی به تک سطحی استفاده شده است. نویسندگان در [۲۱] مسئله خردهفروش برای تقاضای نیازهای الکتریکی، گازی و حرارتی مصرف‌کننده‌ها را از طریق مشارکت در بازارهای انرژی عمده‌فروشی مختلف به عنوان یک رویکرد بهینه‌سازی تصادفی مقاوم مدل‌سازی کرده‌اند. استراتژی - های مناقصه یک خردهفروش در بازارهای انرژی روز پیش و زمان واقعی در [۲۲] مدل شده است که در آن تصمیمات خردهفروش برای خرید انرژی از این بازارها با توجه به مشخصات تقاضای مصرف کنندگان تعیین می‌شود. در [۲۳] رفتار استراتژیک یک خردهفروش را در بازار انرژی روز پیش عمده‌فروشی به عنوان یک رویکرد بهینه‌سازی دو سطحی تصادفی مطرح کرده‌اند. نویسندگان در [۲۴] یک مدل دو سطحی را برای تصمیمات استراتژیک خردهفروش‌ها در بازارهای انرژی عمده‌فروشی و محلی مدل‌سازی کرده‌اند. مسئله تصمیم - گیری خردهفروش‌ها به عنوان مسئله سطح بالا^{۱۳} و مسئله مصرف کنندگان به عنوان مسئله سطح پایین^{۱۴} مدل می‌شود. هدف مسئله سطح پایین به حداکثر رساندن رفاه مصرف کنندگان از طریق تصمیم‌گیری بهینه برای خرید انرژی از خردهفروش‌ها است. استراتژی‌های مناقصه خردهفروش در بازارهای روز پیش و زمان واقعی به عنوان یک مدل تصادفی در [۲۵] مدل‌سازی شده‌اند که در آن می‌تواند انرژی را با یک تولیدکننده بادی از طریق یک قرارداد تعریف شده معامله کند. در بازارهای برق تجدیدساختار یافته استراتژی ریزشکده‌ها برای شرکت در بازار باید به گونه‌ای تعیین شود که نه تنها جنبه‌های اقتصادی، بلکه جنبه‌های فنی و امنیتی در آن نیز در نظر گرفته شوند. یکی از روش‌های مؤثر که منجر به ارتقای جنبه‌های فنی و اقتصادی می‌شود، اجرای برنامه‌های پاسخگویی تقاضا است. این برنامه‌ها در دسته‌های مبتنی بر قیمت و مبتنی بر تشویق دسته‌بندی شده و مشارکت در آنها می‌تواند اختیاری و یا اجباری باشد که برخی از پژوهشگران در این زمینه مطالعاتی داشته و نقش خردهفروش‌ها را نیز در این راستا مورد بررسی قرار داده‌اند. به طور کلی اجرای برنامه‌های پاسخگویی تقاضا منجر به ارتقای انعطاف پذیری بهره‌برداری می‌شود [۲۶]. نویسندگان در [۲۷] یک استراتژی پیشنهادی ارتقا یافته برای مشارکت ریزشکده‌ها در بازار روز بعد ارائه شده است که در آن برای حل مسئله برنامه‌ریزی از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده است. در مدل پیشنهادی مصرف کنندگان در یک برنامه پاسخگویی تقاضا مشارکت کرده و نتایج نشان می‌دهند که اجرای این برنامه‌ها منجر به کاهش هزینه بهره‌برداری و افزایش قابلیت اطمینان می‌شود. در [۲۸] یک چارچوب مدیریت انرژی برای برنامه‌ریزی روز بعد یک سیستم توزیع ۳۳ شینه متشکل از ریزشکده‌های متصل به هم ارائه شده که در آن ۱۲ درصد مصرف کنندگان قادر به مشارکت در یک برنامه پاسخگویی بار هستند. در [۲۹] خرید برق از یک خردهفروش برق که در برنامه‌های پاسخگویی تقاضا شرکت می‌کند که هدف آن کاهش هزینه‌های خرید برق است مدل‌سازی شده است. با توجه به ماهیت نامطلوب قیمت حوضچه و نوسان قیمت در بازارهای حوضچه، قیمت بازار





حوضچه^{۱۵} به عنوان نامعینی مطرح شده است که با در نظر گرفتن حد بالا و پایین قیمت حوضچه رویکرد بهینه‌سازی مقاوم^{۱۶} انجام شده است و در نهایت مسئله با روش برنامه ریزی خطی عددی ترکیبی^{۱۷} حل شده است. مشارکت یک خرده‌فروش در بازارهای انرژی و رزرو در [۳۰] مدل‌سازی شده است که در آن پیشنهادات خرده‌فروش به این بازارها از طریق برنامه‌ریزی بهینه بارهای پاسخگو و خودروهای الکتریکی تعیین می‌شود. در مقاله [۳۱] تبادل توان خرده‌فروش با چند ریزشبهه با در نظر گرفتن استراتژی شیفت بار^{۱۸} به عنوان یک مدل دوسطحی مقاوم ارائه شده است. مسئله به دست آمده یک مسئله دو سطحی غیر خطی است که با استفاده از شرایط فروش - کان - تاکر و نظریه دوگان به مسئله تک سطحی و خطی تبدیل شده است. استراتژی شیفت بار باعث شده تا ریزشبهه‌ها تقاضای خود را از ساعات با قیمت بالا به ساعات‌های با قیمت پایین تغییر دهند که این رفتار هزینه عملیات ریزشبهه‌ها را کاهش و سود خرده‌فروش را افزایش داده است. همچنین با افزایش پارامتر مقاوم، انحراف قیمت‌های بازار حوضچه از مقادیر پیش بینی شده آن افزایش پیدا کرده است بطوریکه خرده‌فروش با ریسک بالاتر تصمیم به خرید توان کمتری از این بازار می‌گیرد که در نتیجه تبادل توان با ریزشبهه‌ها نیز کاهش پیدا کرده است. در [۳۲] حضور برنامه‌های پاسخگویی تقاضا مدل‌سازی می‌شود که در آن نرخ شکست جزء آن با استفاده از مدل تصادفی مدل‌سازی می‌گردد. نویسندگان در [۳۳] یک مدل بهینه‌سازی مقاوم بین چندین خرده‌فروش در بازارهای عمده‌فروشی مورد بررسی قرار گرفته است که در آن خرده‌فروش می‌تواند انرژی را از برنامه‌های پاسخگویی بار در شبکه‌های توزیع با قیمت‌های ثابت خریداری کند. در مرجع [۳۴] از روشی مبتنی بر یادگیری تقویتی برای تعامل میان یک نهاد واسط و چندین ریزشبهه به منظور مشارکت در بازارهای انرژی عمده‌فروشی استفاده شده است. در جدول ۱، مدل ارائه شده در این مقاله با مطالعات قبلی مقایسه شده است. با توجه به مقایسه صورت گرفته در این جدول نوآوری‌های این مقاله به‌صورت زیر است:

- مدل‌سازی یک بازار محلی هم‌زمان انرژی و رزرو که در آن خرده‌فروش‌ها و ریزشبهه‌ها در تعامل و رقابت با یکدیگر قیمت انرژی و رزرو و میزان توان و رزرو مبادله‌ای را تعیین می‌کنند.
- ارائه یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی به منظور مدل کردن رقابت بین خرده‌فروش‌ها و ریزشبهه‌ها
- مدل کردن برنامه‌های شیفت بار در مسئله مدیریت انرژی ریزشبهه‌ها که با استفاده از آن ریزشبهه‌ها قادر خواهند بود توانایی خود در رقابت با خرده‌فروش و دیگر ریزشبهه‌ها در بازار محلی را افزایش دهند.

۳-۱- سازمان بندی مقاله

این مقاله به شرح زیر تنظیم شده است. در بخش ۲، شرح مسئله ارائه شده است. این مسئله به صورت ریاضی در بخش ۳ فرمول بندی شده است. در بخش ۴ مطالعات عددی بررسی شده و در نهایت نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- بیان مسئله

در این مقاله مسئله تعامل میان خرده‌فروش و ریزشبهه‌ها در یک بازار انرژی و رزرو محلی مدل شده است. به همین منظور از یک روش بهینه‌سازی دوسطحی برای فرمول‌بندی کردن مسئله بصورت زیر استفاده شده است.

مسئله سطح بالا:

تصمیم‌گیرنده: خرده‌فروش

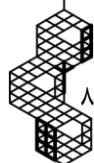
تابع هدف: ماکزیمم کردن سود

متغیرهای تصمیم‌گیری: میزان توان خریداری شده از بازار بالادست، میزان رزرو فراهم شده برای بازار بالادست، قیمت

پیشنهادی به ریزشبهه‌ها در بازار انرژی و رزرو محلی

مسئله سطح پایین:

تصمیم‌گیرنده: ریزشبهه‌ها





تابع هدف: مینیمم کردن هزینه

متغیرهای تصمیم‌گیری: میزان توان مبادله شده با خرده‌فروش، میزان رزرو فراهم شده برای خرده‌فروش، میزان توان تولیدی تولید پراکنده، میزان بار قطع شده، میزان شارژ/دشارژ باتری، میزان بار شیفت داده شده، میزان رزرو فراهم شده توسط تولید پراکنده و بار قابل قطع.

جدول (۱): مقایسه بین مدل پیشنهادی در این مقاله با دیگر مطالعات قبلی

مراجع	تصمیم گیرنده ها / منابع انرژی			استراتژی شیفت بار	مدل بهینه سازی	رزرو
	خرده فروش	منابع انرژی	ریز شبکه ها			
[۶]	-	-	✓	-	MILP	-
[۷]	-	-	✓	-	MILP	-
[۸]	-	-	-	-	RMILP	-
[۹]	-	-	✓	-	دو سطحی	-
[۱۰]	-	-	✓	-	روش نش	-
[۱۱]	-	-	✓	-	روش تکرار	-
[۱۲]	✓	-	✓	-	دو سطحی	-
[۱۶]	✓	-	-	-	دو سطحی	✓
[۱۹]	✓	✓	-	-	احتمالی	✓
[۲۱]	✓	-	-	-	روباست-تصادفی	-
[۲۲]	✓	-	-	-	تصادفی	✓
[۲۳]	✓	-	✓	-	دو سطحی-تصادفی	✓
[۲۴]	✓	-	-	-	دو سطحی	-
[۲۵]	✓	-	-	-	تصادفی	✓
[۲۷]	-	-	✓	-	ازدحام ذرات	✓
[۲۹]	✓	-	-	-	بهینه سازی مقاوم	-
[۳۰]	✓	-	-	-	احتمالی	✓
[۳۱]	✓	-	✓	✓	دو سطحی	-
[۳۲]	✓	✓	-	-	دو سطحی	-
[۳۳]	✓	✓	-	-	برنامه ریزی غیر خطی عدد صحیح مختلط	-
[۳۴]	✓	-	✓	-	الگوریتم تقویتی	-
مدل پیشنهادی	✓	-	✓	✓	دو سطحی	✓





در این مسئله همان‌طور که بیان شده خرده‌فروش به عنوان رهبر (تصمیم‌گیرنده سطح بالا) و ریزشبكة‌ها به عنوان پیرو (تصمیم‌گیرنده‌های سطح پایین) هستند. متغیرهایی که این دو مسئله را به هم ارتباط می‌دهند قیمت پیشنهادی خرده‌فروش به ریزشبكة‌ها و سیگنال برگشتی آن از سمت ریزشبكة‌ها که توان مبادله‌ای و میزان رزرو است. در نقطه تعادل مسئله، قیمت‌های انرژی و رزرو محلی و همچنین میزان توان مبادله شده بین خرده‌فروش و ریزشبكة‌ها و میزان رزرو فراهم شده بوسیله ریزشبكة‌ها برای خرده‌فروش تعیین خواهد شد. همچنین خرده‌فروش در مورد نحوه مشارکت خود در بازارهای عمده‌فروشی تصمیم‌گیری خواهد کرد و ریزشبكة‌ها نیز نحوه استفاده از منابع موجود خود در طول دوره بهره‌برداری برای فراهم کردن انرژی و رزرو را تعیین خواهند کرد. چارچوب تصمیم‌گیری پیشنهادی برای خرده‌فروش و ریزشبكة‌ها در بخش بعدی فرمول نویسی شده است.

برای خرده‌فروش می‌توان از استراتژی‌های رایج قیمت‌گذاری مانند قیمت ثابت، قیمت زمان استفاده، قیمت پیک بحرانی و قیمت زمان واقعی استفاده کرد. از آنجاییکه تمامی این قیمت‌گذاری‌ها براساس بازار انرژی و رزرو عمده‌فروشی است هیچکدام از آنها تعامل با ریزشبكة را در نمی‌توانند مدل کنند. بنابراین در این مقاله از یک روش دوسطحی برای قیمت‌گذاری استفاده شده که همان‌طور که بیان شد این استراتژی به خوبی نشان می‌دهد که چگونه تصمیم‌گیری خرده‌فروش بر روی قیمت‌های محلی انرژی و رزرو بر روی تصمیمات ریزشبكة‌ها اثرگذار است.

چالش‌های ارتباطی بین خرده‌فروش و ریزشبكة‌ها را می‌توان از چند جنبه مورد بررسی قرار داد:

(۱) چالش‌های قیمت‌گذاری: از آنجایی که یک سقف قیمتی برای بازار محلی بین خرده‌فروش و ریزشبكة‌ها باید وجود داشته باشد (همانند سایر بازارهای انرژی)، این قیمت‌ها توسط نهاد قانون‌گذار باید تعیین شود.

(۲) چالش ارتباطات داده‌ای: یکی از نکات مهم در این تعامل میان خرده‌فروش و ریزشبكة‌ها داشتن بستر مناسب برای تبادل اطلاعات و داده‌های مورد نیاز است. به همین منظور می‌توان از استانداردهای لازم در شبکه‌های توزیع به منظور فراهم کردن بستر امن برای تبادل این اطلاعات استفاده کرد.

(۳) چالش تسویه حساب مالی: یکی از مهمترین چالش‌ها نحوه تسویه حساب مالی بین خرده‌فروش و ریزشبكة‌ها است. در بازارهای برق دنیا، زمان مشخصی را در نظر می‌گیرند که در آن باید بازیگران تسویه مالی خود را انجام دهند. این بخش نیز می‌تواند توسط همان نهاد قانون‌گذار تعیین شود.

۳- فرمول نویسی مسئله

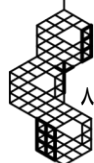
در این بخش مسئله توصیف شده در بخش قبلی به صورت ریاضی مدل‌سازی شده است.

۳-۱- مسئله خرده‌فروش

مدل تصمیم‌گیری خرده‌فروش به صورت معادلات (۱) الی (۵) بیان شده است.

$$\text{Max } PF^{\text{Ret.}} = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^I (\rho_t^E p_{i,t}^{\text{MG}} - \rho_t^{\text{MG_Res}} p_{i,t}^{\text{MG_Res}} - \rho_t^{\text{RT}} p_{i,t}^{\text{Res_MG}} \kappa_t^{\text{Res.}}) - \rho_t^M p_t^{\text{PM}} \right] + \lambda_t^{\text{Res.}} p_t^{\text{Res.}} + \rho_t^{\text{RT}} p_t^{\text{Res.}} \kappa_t^{\text{Res.}} \quad (1)$$

سود خرده‌فروش به صورت معادله (۱) بیان شده که بخش اول درآمد حاصل از تبادل توان و رزرو با ریزشبكة، بخش دوم هزینه توان خریداری شده از بازار انرژی، بخش‌های سوم و چهارم درآمد خرده‌فروش ناشی از مشارکت در بازار رزرو عمده‌فروشی است.





جدول (۲) : واژه نامه

مجموعه‌ها/ اندیس‌ها		$\rho_{i,t}^{CL}$	قیمت قطع بار
t/T	اندیس / مجموعه زمان	ρ_t^E	حداکثر مقدار قیمت تبادل توان
i/I	اندیس/ مجموعه ریزشبکه		متغیرها
N/HI	مجموعه قیدهای مساوی نامساوی	$p_t^{Res.}$	توان رزرو عمده فروشی
M/Ξ	مجموعه متغیرهای دوگان قیدهای مساوی / نامساوی	$p_{i,t}^{CL}$	مقدار قطع بار
پارامترها		$p_{i,t}^{B_{-}ch}$	توان شارژ باتری
$\overline{P}_i^{batt}$	توان ماکزیمم باتری	$p_{i,t}^{B_{-}dch}$	توان دشارژ باتری
k_t^{Res}	احتمال فراخوانی رزرو	$p_{i,t}^G$	توان تولیدی تولید پراکنده
$\rho_t^{Res.}$	قیمت رزرو عمده فروشی	p_t^{PM}	توان خریداری شده از بازار حوضچه
$\overline{p}_i^{CL}$	بیشترین مقدار قطع بار	$p_{i,t}^{MG}$	توان مبادله ای بین خرده فروش و ریزشبکه‌ها
$\underline{P}_i^G / \overline{P}_i^G$	کمترین / بیشترین توان تولیدی تولید پراکنده	$soc_{i,t}^B$	انرژی ذخیره شده در باتری
$P_{i,t}^L$	توان مصرفی ریزشبکه‌ها	$U_{i,t}$	متغیرهای باینری
$\overline{P}_i^R$	بیشترین توان مبادله ای بین خرده فروش و ریزشبکه‌ها	$p_{i,t}^{SL_{-}up}$	مقدار شیفت بار (بالا)
Q_i^B	توان باتری	$p_{i,t}^{SL_{-}down}$	مقدار شیفت بار (پایین)
RD_i^G / RU_i^G	شیب تولیدکاهشی/افزایشی تولید	$p_{i,t}^{MG_{-}Res.}$	مقدار توان رزرو ریزشبکه
Soc_i^{ini}	انرژی اولیه ذخیره شده در باتری	$\sigma_{i,t}^n$	متغیرهای دوگان قیود نامساوی
$\underline{SOC}_i$	کمترین انرژی ذخیره شده در باتری	$\delta_{i,t}^n$	متغیرهای دوگان قیود مساوی
$\overline{SOC}_i$	بیشترین انرژی ذخیره شده در باتری	$p_{i,t}^{CL_{-}R}$	مقدار قطع بار رزرو
β	درصد مشارکت بار در برنامه پاسخگویی تقاضا	$p_{i,t}^{G_{-}R}$	رزرو فراهم شده توسط تولید پراکنده
$\eta_i^{B_{-}dch} \eta_i^{B_{-}ch}$	بازدهی شارژ/دشارژ باتری		دیگر علائم
ρ_t^M	قیمت بازار حوضچه	$H_{i,t}$	قبود برابر
ρ_t^{RT}	قیمت زمان واقعی	$N_{i,t}$	قیود نابرابر
ρ_i^G	قیمت تولید، تولید پراکنده	$\mathcal{L}_m$	تابع لاگرانژ
$\overline{\rho}_t^{MG_{-}Res.}$	بیشترین مقدار قیمت رزرو ریزشبکه		

$$\sum_{i=1}^I p_{i,t}^{MG} = p_t^{PM} \quad , \quad \sum_{i=1}^I p_{i,t}^{MG_{-}Res.} = p_t^{Res.} \quad (2)$$





تبادل توان خردهفروش با ریزشبكة‌ها برابر است با توان خریداری شده از بازار توسط خردهفروش که در معادله (۲) نشان داده شده است. همچنین ظرفیت توان رزرو ارائه شده توسط خردهفروش برابر است با کل انرژی رزرو ذخیره شده توسط ریزشبكة‌ها که در بخش دوم معادله (۲) آورده شده است.

$$0 \leq p_t^{PM} \leq \bar{P}^R + p_t^{Res.} \quad (3)$$

$$0 \leq p_t^{Res.} \leq \bar{P}^R \quad (4)$$

توان خریداری شده از شبکه بالادست و همچنین توان خریداری شده از بازار حوضچه و رزرو عمده‌فروشی توسط خردهفروش به ترتیب توسط معادلات (۳) و (۴) محدود شده است.

$$0 \leq \rho_t^E \leq \bar{\rho}_t^E, \quad 0 \leq \rho_t^{MG_Res.} \leq \bar{\rho}_t^{MG_Res.} \quad (5)$$

قيود قيمت انرژی و رزرو پیشنهادی توسط خردهفروش به ریزشبكة‌ها توسط معادله (۵) نشان داده شده است.

۳-۲- مسئله ریزشبكة‌ها

مسئله ریزشبكة‌ها توسط معادلات (۶) الی (۲۱) فرمول نویسی شده است. تابع هدف هر ریزشبكة توسط معادله (۶) بیان شده است.

$$\text{Min } C^{MG} = \sum_{t=1}^T \left[\begin{aligned} &\rho_t^E p_{i,t}^{MG} + \rho_i^G p_{i,t}^G + \rho_{i,t}^{CL} p_{i,t}^{CL} \\ &+ \rho_i^G p_{i,t}^{G_R} \kappa_t^{Res.} + \rho_{i,t}^{CL} p_{i,t}^{CL_R} \kappa_t^{Res.} \\ &- \rho_t^{MG_Res.} p_{i,t}^{MG_Res.} - \lambda_t^{RT} p_{i,t}^{MG_Res.} \kappa_t^{Res.} \end{aligned} \right] \quad (6)$$

معادله (۶) هزینه تصمیم‌گیری ریزشبكة‌ها برای تأمین بار را نشان می‌دهد که شامل هزینه تبادل توان با خردهفروش، هزینه برق تولیدی توسط تولیدات پراکنده و هزینه قطع بار به ترتیب در بخش‌های اول تا سوم است. همچنین بخش‌های چهارم و پنجم هزینه فراهم کردن رزرو توسط تولید پراکنده و بار قابل قطع را نشان می‌دهد و دو بخش پایانی درآمد ریزشبكة ناشی از فراهم کردن رزرو برای خردهفروش است.

$$-\bar{P}_i \leq p_{i,t}^{MG} \leq \bar{P}_i : \sigma_{i,t}^1, \sigma_{i,t}^2 \quad \forall t \quad (7)$$

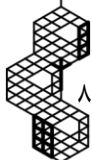
$$p_{i,t}^{MG_Res.} - p_{i,t}^{MG} \leq \bar{P}_i : \sigma_{i,t}^3, \quad p_{i,t}^{MG_Res.} \geq 0 : \sigma_{i,t}^4 \quad \forall t \quad (8)$$

محدودیت‌های مربوط به تبادلات انرژی و رزرو میان خردهفروش و ریزشبكة‌ها در معادلات (۷) و (۸) نشان داده شده است.

$$p_{i,t}^G \geq 0 : \sigma_{i,t}^5, \quad p_{i,t}^{G_R} \geq 0 : \sigma_{i,t}^6, \quad (9)$$

$$p_{i,t}^G + p_{i,t}^{G_R} - \underline{p}_{i,t}^G \geq 0 : \sigma_{i,t}^7, \quad \bar{p}_{i,t}^G - p_{i,t}^G - p_{i,t}^{G_R} \geq 0 : \sigma_{i,t}^8 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} p_{i,t}^G + p_{i,t}^{G_R} - p_{i,t-1}^G &\leq RU_i^G : \sigma_{i,t}^9 \quad \forall t > 1 \\ p_{i,t}^G + p_{i,t}^{G_R} - p_i^{DG,ini} &\leq RU_i^G : \sigma_{i,t}^{10} \quad \forall t = 1 \end{aligned} \quad (11)$$





$$\begin{aligned} p_{i,t-1}^G + p_{i,t-1}^{G-R} - p_{i,t}^G &\leq RD_i^G : \sigma_{i,t}^{11} \quad \forall t > 1 \\ p_i^{G,ini} + p_i^{G-R,ini} - p_{i,t}^G &\leq RD_i^G : \sigma_{i,t}^{12} \quad \forall t = 1 \end{aligned} \quad (12)$$

قیود مربوط به تولیدات پراکنده جهت تأمین انرژی و رزرو با در نظر گرفتن قیود مربوط به شیب افزایشی و کاهشی در معادلات (۹) الی (۱۲) بیان شده است.

$$p_{i,t}^{CL} \geq 0 : \sigma_{i,t}^{13}, \quad p_{i,t}^{CL-R} \geq 0 : \sigma_{i,t}^{14}, \quad p_{i,t}^{CL} + p_{i,t}^{CL-R} \leq \bar{p}_{i,t}^{CL} : \sigma_{i,t}^{15} \quad \forall t \quad (13)$$

محدودیت‌های قطع بار برای تأمین انرژی و رزرو در معادله (۱۳) مدل‌سازی شده‌اند.

$$0 \leq p_{i,t}^{B_{-}ch} \leq \bar{p}_i^{batt} : \sigma_{i,t}^{16}, \sigma_{i,t}^{17} \quad \forall t, \quad 0 \leq p_{i,t}^{B_{-}dch} \leq \bar{p}_i^{batt} : \sigma_{i,t}^{18}, \sigma_{i,t}^{19} \quad \forall t \quad (14)$$

$$soc_{i,t}^B = soc_{i,t-1}^B + \frac{\eta_i^{B_{-}ch} p_{i,t}^{B_{-}ch} - p_{i,t}^{B_{-}dch} / \eta_i^{B_{-}dch}}{Q_i^B} : \delta_{i,t}^1 \quad \forall t > 1 \quad (15)$$

$$soc_{i,t}^B = soc_i^{ini} + \frac{\eta_i^{B_{-}ch} p_{i,t}^{B_{-}ch} - p_{i,t}^{B_{-}dch} / \eta_i^{B_{-}dch}}{Q_i^B} : \delta_{i,t}^2 \quad \forall t = 1 \quad (16)$$

$$\underline{SOC}_i \leq soc_{i,t}^B \leq \overline{SOC}_i : \sigma_{i,t}^{20}, \sigma_{i,t}^{21} \quad \forall t \quad (17)$$

محدودیت‌های مربوط به توان شارژ و دشارژ باتری به صورت (۱۴) مدل شده است. حالت شارژ باتری به ترتیب برای گام زمانی بزرگتر از یک و برابر یک به ترتیب در معادلات (۱۵) و (۱۶) مدل‌سازی شده است. همچنین حداقل و حداکثر محدودیت انرژی ذخیره شده در باتری در معادله (۱۷) مدل شده است.

$$0 \leq p_{i,t}^{SL_{-}up} \leq \beta P_i^L : \sigma_{i,t}^{22}, \sigma_{i,t}^{23} \quad \forall t, \quad 0 \leq p_{i,t}^{SL_{-}down} \leq \beta P_i^L : \sigma_{i,t}^{24}, \sigma_{i,t}^{25} \quad \forall t \quad (18)$$

$$\sum_{t=1}^T p_{i,t}^{SL_{-}up} = \sum_{t=1}^T p_{i,t}^{SL_{-}down} : \delta_i^3 \quad \forall i \quad (19)$$

قیود مربوط به استراژی شیفت بار در معادله (۱۸) که در آن حداکثر مقدار شیفت بالا و شیفت پایین بار بوسیله β محدود شده است. همچنین قید تعادل توان شیفت بالا و شیفت پایین بار نیز توسط معادله (۱۹) مدل شده است.

$$p_{i,t}^{MG} + p_{i,t}^G + p_{i,t}^{CL} + p_{i,t}^{B_{-}dch} + p_{i,t}^{SL_{-}down} = p_{i,t}^{B_{-}ch} + p_{i,t}^{SL_{-}up} + P_{i,t}^L : \delta_{i,t}^4 \quad \forall t \quad (20)$$

مجموع تبادل توان با خردهفروش، توان تولیدی تولیدات پراکنده، مقدار قطع بار، توان دشارژ باتری و مقدار بار شیفت داده شده به سمت پایین برابر است با توان شارژ باتری، مقدار بار شیفت داده شده به سمت بالا و بار مصرفی ریزشبکه‌ها که در معادله (۲۰) مدل‌سازی شده است.

$$p_{i,t}^{MG_{-}Res.} = p_{i,t}^{G-R} + p_{i,t}^{CL-R} : \delta_{i,t}^5 \quad \forall t \quad (21)$$

مقدار رزرو فراهم شده توسط ریزشبکه برای خردهفروش برابر مقدار رزرو فراهم شده توسط تولید پراکنده و بار قابل قطع است که در معادله (۲۱) این موضوع نشان داده شده است.



برای بهینه کردن جواب مسئله دوسطحی باید نقطه تعادل نش بین تصمیم‌گیرنده سطح بالا و تصمیم‌گیرنده‌های سطح پایین به دست آید. نقطه نش نقطه‌ای است که در آن بازیگران از نتایج به دست آمده ناشی از تعامل با یکدیگر رضایت کامل دارند و حاضر به تغییر تصمیمات خود نیستند. برای حل مسئله بهینه‌سازی دوسطحی می‌توان از دو روش به صورت کلی استفاده کرد:

(۱) با استفاده از روش کروش - کان - تاکر و تئوری دوگان، مسئله بهینه‌سازی دوسطحی غیرخطی را تبدیل به یک مسئله تک‌سطحی خطی کرد که در این حالت چون مسئله به دست آمده یک مسئله بهینه‌سازی خطی آمیخته عدد صحیح است بنابراین فقط دارای یک جواب بهینه است که در واقع همان جواب نش است.

(۲) استفاده از الگوریتم‌های تکراری: در این روش‌ها نقطه شروعی برای حل مسئله در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از آن جواب بهینه به دست می‌آید. از آنجاییکه جواب به دست آمده به نقطه شروع مسئله بستگی دارد بنابراین ممکن است جواب به دست آمده یک نقطه بهینه محلی باشد.

تنها محدودیت استفاده از روش کروش - کان - تاکر این است که مسئله سطح پایین باید کانوکس باشد که مسئله سطح پایین ارائه شده در این مقاله این ویژگی را دارد. بنابراین در این مقاله مدل دو سطحی پیشنهادی با استفاده از شرایط کروش - کان - تاکر به یک مدل تک سطحی تبدیل می‌شود. از آنجایی که قیمت پیشنهادی خرده‌فروش به ریزشک‌ها به منظور تبادل انرژی و رزرو به عنوان پارامتر در مسئله ریزشک‌ها در نظر گرفته می‌شوند، بنابراین مسائل ریزشک‌ها توابع خطی و پیوسته و در نهایت کانوکس هستند و می‌توان آنها را با شرایط کروش - کان - تاکر جایگزین کرد (پیوست ۱).

بخش غیرخطی معادله (۱) را می‌توان با استفاده از تئوری دوگان به معادله خطی تبدیل کرد (پیوست ۲). بنابراین معادله (۱) به صورت معادله (۲۲) بازنویسی می‌شود.

$$PF^{Ret.} = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \left[\begin{aligned} & -\rho_i^G p_{i,t}^G - \rho_{i,t}^{CL} p_{i,t}^{CL} - \rho_i^G p_{i,t}^{G,R} \kappa_t^{Res.} - \rho_{i,t}^{CL} p_{i,t}^{CL,R} \kappa_t^{Res.} \\ & - \bar{P}_i (\sigma_{i,t}^1 + \sigma_{i,t}^2 + \sigma_{i,t}^3) + \underline{p}_i^G \sigma_{i,t}^7 - \bar{p}_i^G \sigma_{i,t}^8 \\ & - (RU_i^G) \sigma_{i,t}^9 - (RU_i^G + P_i^{G,ini}) \sigma_{i,t}^{10} - (RD_i^G) \sigma_{i,t}^{11} \\ & - (RD_i^G - P_i^{G,ini}) \sigma_{i,t}^{12} - \bar{p}_i^{CL} \sigma_{i,t}^{15} - \bar{P}_i^{batt} (\sigma_{i,t}^{17} + \sigma_{i,t}^{19}) + \underline{SOC}_i \sigma_{i,t}^{20} - \bar{SOC}_i \sigma_{i,t}^{21} \\ & + Soc_i^{ini} \delta_{i,t}^2 - \beta P_i^L (\sigma_{i,t}^{23} + \sigma_{i,t}^{25}) + (P_i^L) \delta_{i,t}^4 \end{aligned} \right] \\ + \left[-\rho_t^M p_t^{PM} + \lambda_t^{Res} p_t^{Res} + \rho_t^{RT} p_t^{Res.} K_t^{Res} \right] \quad (22)$$

۴- مطالعات عددی

در این بخش رفتار خرده‌فروش و ریزشک‌ها در بازارهای انرژی و رزرو محلی به طور همزمان و در یک دوره زمانی مورد بررسی قرار می‌گیرد. اطلاعات ورودی مربوط به منابع ریزشک‌ها در جدول (۳) ذکر شده است [۳۱]. همانطور که در جدول (۳) نشان داده شده است، ریز شبکه ۱ دارای منبع تولید پراکنده و باتری می‌باشد در حالی که ریزشک‌های ۲ و ۳ فقط دارای منبع تولید پراکنده هستند. مشخصات قیمت بازار حوضچه و رزرو عمده‌فروشی در جدول (۴) آورده شده است. بار مصرفی ریز شبکه‌ها و هزینه بارهای قابل قطع مطابق [۳۱] می‌باشد. علاوه بر این بیشترین مقدار توان قابل خریداری از بازار عمده‌فروشی توسط خرده‌فروش و بیشترین مقدار توان قابل تبادل بین خرده‌فروش و ریزشک‌ها به ترتیب ۴۰ و ۱۰ مگاوات است. بیشترین درصد قطع بار و همچنین احتمال فراخوانی رزرو



در تمامی ساعت‌ها ثابت و برابر ۱۰ درصد در نظر گرفته شده‌اند. بیشترین مقدار قیمت تبادل انرژی و رزرو در بازارهای محلی بین خردهفروش و ریزشبکه‌ها به ترتیب ۶۰ و ۳۰ دلار بر مگاوات ساعت است. نتایج در دو قسمت ارائه شده است. ابتدا نتایج حاصل از بهره‌برداری خردهفروش و ریزشبکه‌ها در بازارهای محلی انرژی و رزرو به طور همزمان ارائه شده است و سپس نتایج حاصل با حالتی که فقط بازار محلی انرژی وجود داشته باشد مقایسه شده است.

جدول (۳): اطلاعات ورودی مربوط به منابع ریزشبکه‌ها

منابع	ریزشبکه اول	ریزشبکه دوم	ریزشبکه سوم
هزینه توان تولیدی تولید پراکنده	۳۷	۴۰	۳۵
حداکثر توان تولیدی تولید پراکنده	۴	۵	۵/۵
شیب تولید کاهشی تولید پراکنده	۱	۱/۲۵	۱/۳۷۵
شیب تولید افزایشی تولید پراکنده	۱	۱/۲۵	۱/۳۷۵
انرژی اولیه ذخیره شده در باتری	۱	۰	۰
حداقل انرژی ذخیره شده در باتری	۱	۰	۰
حداکثر انرژی ذخیره شده در باتری	۲/۵	۰	۰
حداکثر توان باطری	۰/۵	۰	۰
بازدهی شارژ/دشارژ باطری	۰/۹۵	۰	۰

جدول (۴): قیمت بازار حوضچه و رزرو عمده فروشی

قیمت رزرو عمده فروشی	قیمت بازار حوضچه	زمان
۰/۲۵	۲۹/۴۹	۱
۱	۱۵/۷۱	۲
۱	۱۵/۳۶	۳
۱	۱۴/۴۴	۴
۱/۲۵	۱۴/۰۹	۵
۱/۲۵	۱۴/۷۴	۶
۲/۵	۱۵/۹۴	۷
۲/۵	۱۷/۲۳	۸
۰/۱۵	۱۷/۸۳	۹
۰/۱۵	۲۰/۹۳	۱۰
۰/۱۵	۲۲/۱۵	۱۱
۰/۲۵	۲۴/۱۳	۱۲
۰/۲۵	۲۴/۹۴	۱۳
۰/۲۵	۳۰/۳۱	۱۴
۰/۲۵	۲۷/۷۸	۱۵
۰/۲۵	۳۰/۰۳	۱۶
۸	۳۵/۰۵	۱۷
۱۵/۵	۳۹/۳۸	۱۸
۹/۳۶	۳۲/۹۲	۱۹
۶/۲۳	۲۴/۶۲	۲۰
۴/۹۴	۲۲/۰۸	۲۱
۱/۲۵	۲۰/۸۱	۲۲
۱/۹۷	۲۲/۲۳	۲۳
۱/۲۵	۱۷/۹۶	۲۴



۴-۱- نتایج بهره‌برداری خرده‌فروش و ریزشبه‌ها در بازارهای محلی انرژی و رزرو

نتایج قیمت‌های انرژی و رزرو محلی ناشی از تعامل میان خرده‌فروش و ریزشبه‌ها به ترتیب در جدول (۵) نشان داده شده است. در ساعت ۱ قیمت انرژی محلی ثابت و تقریباً برابر هزینه تولید توان تولید پراکنده ریزشبه دوم است. در ساعات ۲ و ۱۱ قیمت برق محلی برابر حداقل مقدار خود می‌باشد. در ساعات ۱۳ الی ۱۷ و ۱۹ الی ۲۰ قیمت‌های انرژی محلی رو به افزایش و بالاتر از هزینه تولید توان تولید پراکنده ریزشبه سوم است. در ساعت ۱۸ قیمت انرژی محلی برابر حداکثر مقدار سقف خود می‌باشد. در دیگر ساعات قیمت انرژی محلی ثابت و برابر هزینه تولید توان تولید پراکنده ریزشبه سوم است. قیمت رزرو محلی نیز در ساعت ۱۴ دارای حداکثر مقدار، در ساعت ۱۵ کمترین مقدار، در ساعت ۱۲ دارای مقدار متوسط رزرو و در دیگر ساعات برابر کمترین میزان خود می‌باشد.

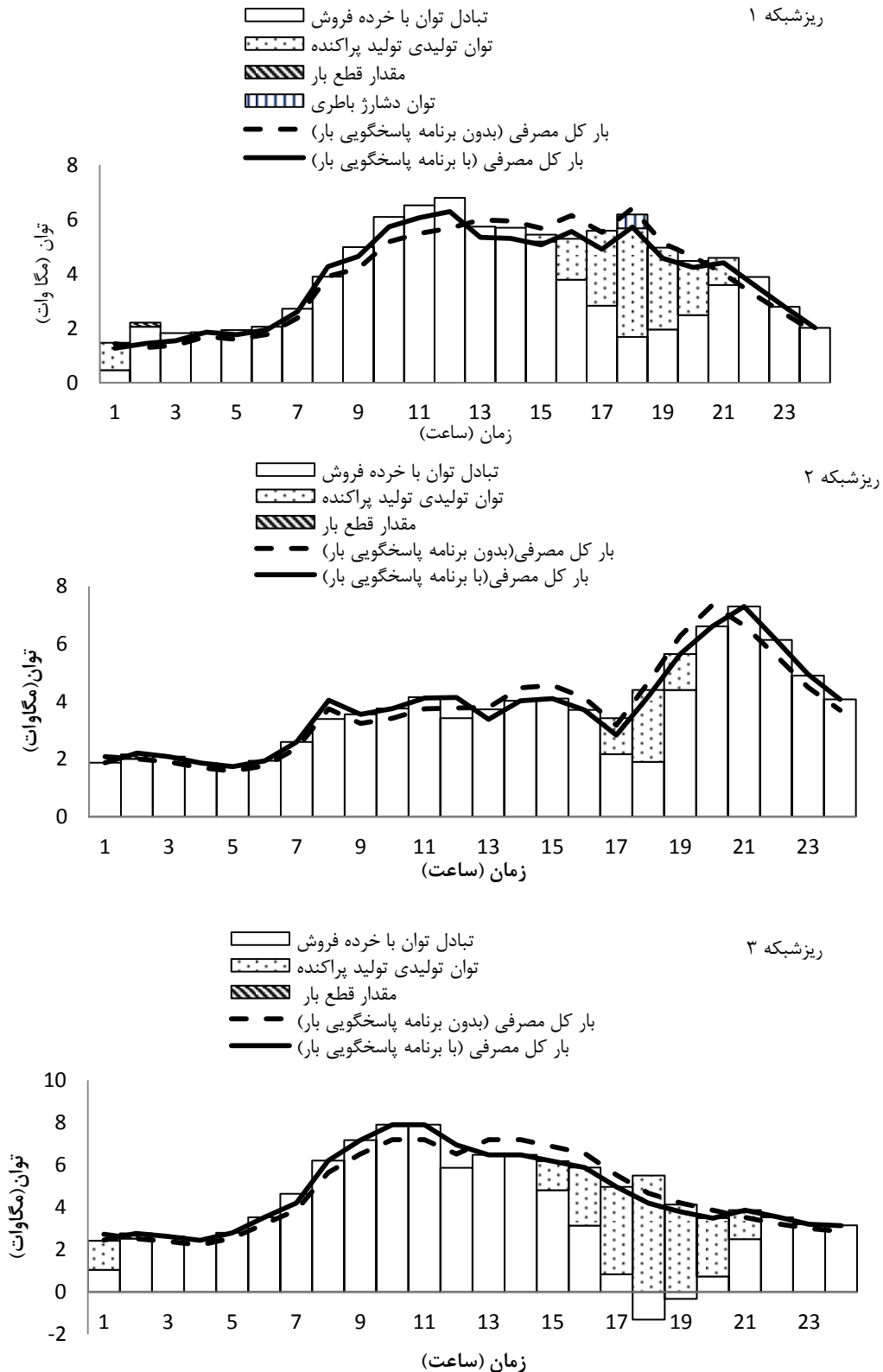
جدول (۵): قیمت انرژی و رزرو محلی

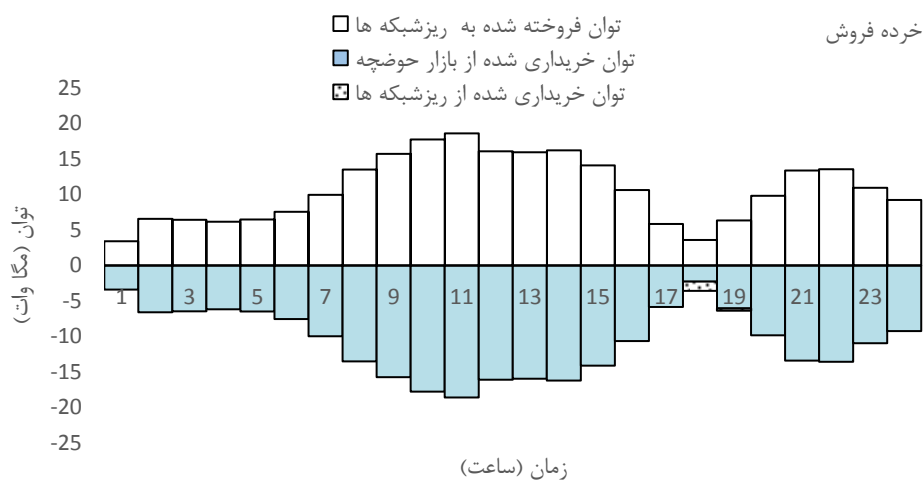
قیمت رزرو	قیمت انرژی	زمان	قیمت رزرو	قیمت انرژی	زمان	قیمت رزرو	قیمت انرژی	زمان	قیمت رزرو	قیمت انرژی	زمان
۰	۳۵/۱	۱۹	۰	۳۵/۲	۱۳	۰	۳۵	۷	۰	۳۹/۵	۱
۰	۳۵/۲	۲۰	۱/۲۵۴	۳۵/۳	۱۴	۰	۳۵	۸	۰	۳۴/۵	۲
۰	۳۵	۲۱	۰/۲۷۵	۳۵/۲	۱۵	۰	۳۵	۹	۰	۳۵	۳
۰	۳۵	۲۲	۰	۳۵/۳	۱۶	۰	۳۵	۱۰	۰	۳۵	۴
۰	۳۵	۲۳	۰	۳۵/۲	۱۷	۰	۳۴/۵	۱۱	۰	۳۵	۵
۰	۳۵	۲۴	۰	۶۰	۱۸	۰/۵۴۹	۳۵	۱۲	۰	۳۵	۶

تصمیمات خرده‌فروش و ریزشبه‌ها در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. در ساعت ۱ بدلیل بالا بودن قیمت انرژی محلی که تقریباً برابر هزینه تولید توان تولید پراکنده ریزشبه دوم است، ریزشبه‌ها انرژی کمتری از خرده‌فروش خریداری می‌کنند و بیشتر از ظرفیت منابع خود خصوصاً تولیدات پراکنده استفاده خواهند کرد. در ساعات ۲ و ۱۱ به علت پایین بودن برق محلی (کمترین میزان خود) ریزشبه‌ها تمامی توان مورد نیاز خود را از خرده‌فروش خریداری می‌کنند و از ظرفیت منابع خود کمتر استفاده می‌کنند. ضمناً در این ساعات قیمت رزرو محلی نیز به کمترین مقدار خود می‌رسد و خرده‌فروش در بازار رزرو شرکت نمی‌کند و هیچ مقدار رزروی را فراهم نمی‌کند. در ساعات ۳ الی ۱۰، ۱۲ و ۲۱ الی ۲۴ به علت پایین بودن قیمت برق محلی که برابر هزینه تولید توان ریزشبه ۳ است، ریزشبه‌ها تمامی توان مورد نیاز خود را از خرده‌فروش می‌خرند و از منابع خود استفاده نمی‌کنند. در ساعات ۱۳ الی ۱۷ و ۱۹ الی ۲۰ به علت بالا بودن قیمت برق محلی و تغییرات قیمت رزرو محلی در ساعات ۱۲، ۱۴ و ۱۵، در این ساعات ریزشبه‌ها و خرده‌فروش از ظرفیت منابع خود مخصوصاً تولیدات پراکنده برای فراهم کردن رزرو استفاده می‌کنند. در ساعت ۱۸ خرده‌فروش قیمت انرژی را تا میزان سقف آن افزایش و قیمت رزرو را برابر کمترین میزان خود قرار می‌دهد که با توجه به بالا بودن قیمت انرژی محلی در این ساعت، خرده‌فروش انرژی مورد نیاز ریزشبه‌ها را از بازار عمده فروشی تامین می‌کند و میزان تولید تولیدات پراکنده به ماکزیمم مقدار می‌رسد. در این ساعت خرده‌فروش و ریزشبه‌ها در بازار رزرو شرکت نمی‌کنند و هیچ مقدار رزروی را فراهم نمی‌کنند. ضمناً در این ساعت ریزشبه ۳ به علت بالا بودن قیمت برق محلی و همچنین پایین بودن بار مصرفی آن بخشی از توان اضافی خود را به خرده‌فروش (بقیه ریزشبه‌ها) می‌فروشد. ریزشبه‌ها با توجه به قیمت انرژی محلی جهت کاهش هزینه، مصرف انرژی خود را در

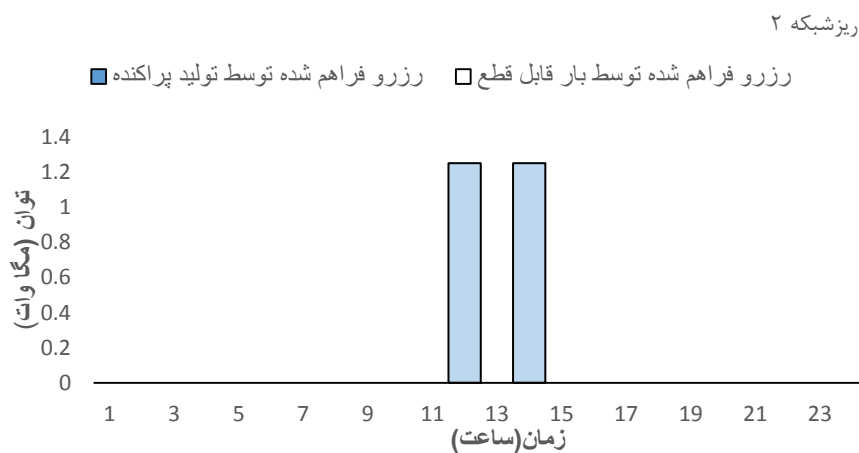
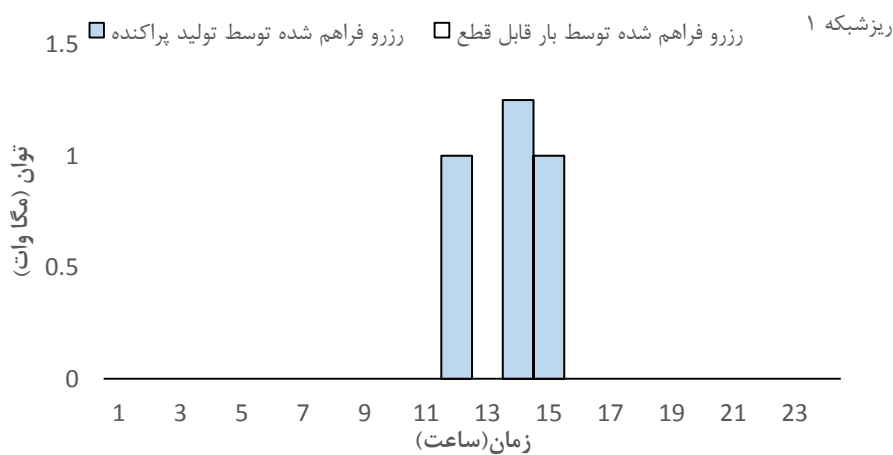


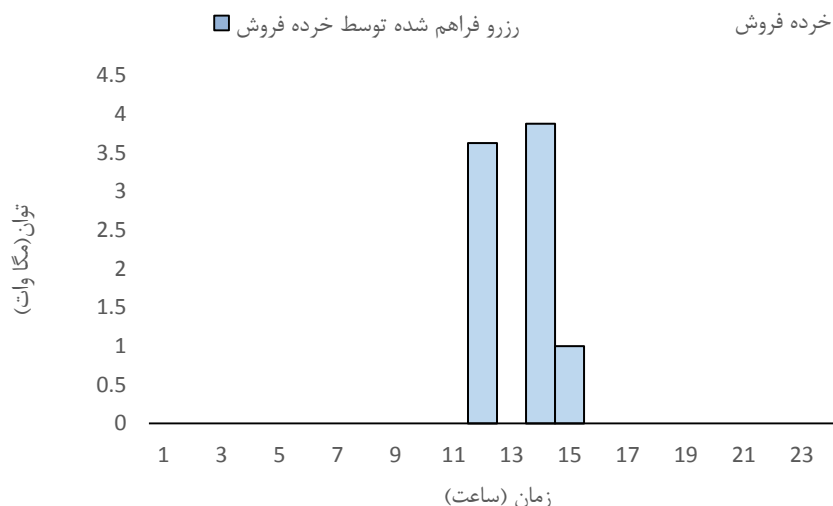
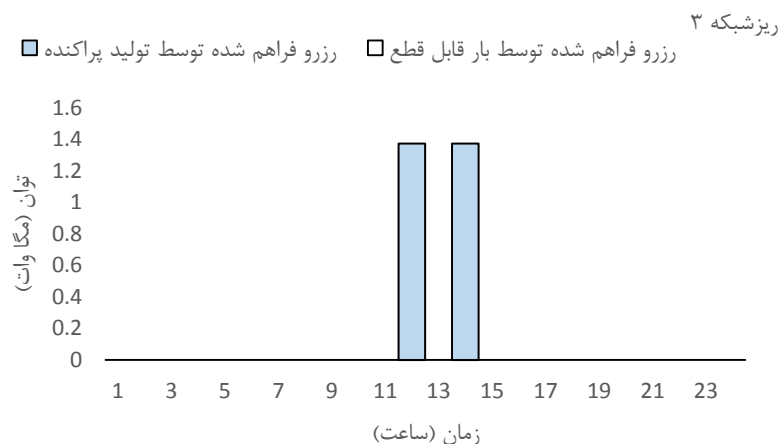
دوره‌های مختلف تغییر یا شیفت می‌دهند. ریز شبکه‌ها در ساعت‌های ۱ و ۱۳ الی ۲۰ که قیمت تبادل توان انرژی بالا است بارهای مصرفی خود را به سمت پایین شیفت می‌دهند. در دیگر ساعات که قیمت تبادل توان انرژی پایین است بارهای مصرفی خود را به سمت بالا شیفت می‌دهند.





شکل (۱) : تصمیمات بهینه خرده فروش و ریزشبهه ها





شکل (۲): رزرو فراهم شده توسط خرده فروش و ریزشبکه‌ها

۲-۴- مقایسه نتایج بهره‌برداری در بازارهای انرژی و رزرو با بازار فقط انرژی

برای نشان دادن اثر فراهم کردن ظرفیت رزرو توسط خرده‌فروش و ریزشبکه‌ها به ترتیب برای بازار و خرده‌فروش، نتایج مشارکت در هر حالت انرژی و رزرو با حالت فقط انرژی در جدول (۶) مقایسه شده است. همانطور که در جدول (۶) نشان داده شده است، تولید توان تولیدات پراکنده و میزان قطع بار در حالت فقط انرژی بیشتر از حالت همزمان انرژی و رزرو است. این مسئله بخوبی نشان می‌دهد که در حالت انرژی و رزرو ریزشبکه‌ها می‌خواهند از ظرفیت منابع خود مخصوصاً از ظرفیت تولیدات پراکنده خود در رزرو استفاده کنند که مقدار رزرو فراهم شده توسط تولید پراکنده و خرده‌فروش صحت این موضوع را به درستی نشان می‌دهد. بنابراین ریزشبکه‌ها در حالت انرژی و رزرو توان بیشتری از خرده‌فروش می‌خرند و خرده‌فروش مجبور است توان بیشتری را از بازار انرژی خریداری کند. ضمناً سود خرده‌فروش صحت درستی مطالب بالا را تایید می‌کند که در حالت انرژی و رزرو سود خرده‌فروش با مقدار قابل توجه‌ای بیشتر از حالت فقط انرژی است.



جدول (۶) : مقایسه نتایج توان در حالت فقط انرژی با حالت انرژی و رزرو

توان		انرژی و رزرو		انرژی
		خردهفروش	ریزشبکه‌ها	خردهفروش
توان تولیدی تولید پراکنده		۴۳/۸۷۵	-	۵۴/۸۶۴
قطع بار		۰/۶۰۹	-	۰/۸۷۴
مقدار رزرو فراهم شده توسط تولید پراکنده		۸/۵	-	-
مقدار رزرو فراهم شده توسط بارهای قابل قطع		-	-	-
مقدار رزرو فراهم شده توسط خردهفروش		-	۸/۵	-
توان دشارژ باتری		۰/۵	-	۱
توان شارژ باتری		۰/۵۵۴	-	۱/۱۰۸
توان خریداری شده از بازار حوضچه		-	۲۵۶/۴۲	۲۴۵/۴۷۴
توان خریداری شده از ریزشبکه‌ها		-	۱/۶۴۲	۲/۱۷۴
توان فروخته شده به ریزشبکه‌ها		-	۲۵۸/۰۶۲	۲۴۷/۶۴۸
سود خردهفروش		-	۳۳۷۰/۲۸۰	۳۰۳۰/۸۶۹

۵- نتیجه‌گیری

تعامل میان خردهفروش و ریزشبکه‌ها در بازارهای محلی انرژی و رزرو با در نظر گرفتن استراتژی شیفت بار در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است. این محیط تعاملی بصورت یک مسئله بهینه‌سازی دو سطحی مدل‌سازی شده است، به طوری که خردهفروش و ریزشبکه‌ها بترتیب به عنوان رهبر و پیرو در نظر گرفته شده‌اند. بررسی مطالعات اخیر نشان می‌دهد که هیچ کدام از آنها بطور همزمان مدیریت انرژی خردهفروش را در بازارهای همزمان انرژی و رزرو در حضور ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن برنامه‌های پاسخگویی بار بررسی و مورد مطالعه قرار نداده‌اند. از این رو در این مقاله یک مدل جامع برای تصمیم‌گیری خردهفروش ارائه شده است که در آن تاثیر همزمان بازارهای انرژی و رزرو در حضور ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن استراتژی شیفت بار جهت افزایش سود خردهفروش و کاهش هزینه ریزشبکه‌ها به طور دقیق در یک بازار محلی بررسی شده است. نتایج اصلی از این مقاله به شرح زیر است:

- هنگامی که خردهفروش و ریزشبکه‌ها در دو بازار محلی انرژی و رزرو با هم تعامل داشته باشند نسبت به حالتی که فقط در بازار انرژی تعامل دارند دارای رفتارهای بسیار متفاوتی خواهند بود و نوع تصمیم‌های آنها بسیار متفاوت است. این رفتار در نهایت باعث افزایش سود خرده فروش و کاهش هزینه ریزشبکه‌ها خواهد شد.

- در حالت انرژی و رزرو ریزشبکه‌ها از ظرفیت منابع خود بیشتر در رزرو استفاده می‌کنند. بنابراین میزان تبادل انرژی بین خردهفروش و ریزشبکه‌ها در حالت انرژی بیشتر از حالت همزمان انرژی و رزرو می‌باشد.

- میزان استفاده از منابع انرژی گسترده سیستم در حالت انرژی و رزرو بسیار بیشتر از حالت فقط انرژی است.

- استراتژی شیفت بار این توانایی را به ریزشبکه‌ها می‌دهد تا بار مصرفی خود را از ساعات با قیمت بالا به ساعاتی با قیمت پایین تغییر دهند. این رفتار هزینه بهره‌برداری ریزشبکه‌ها را کاهش و همچنین سود خردهفروش را افزایش می‌دهد.

در ادامه پیشنهادات زیر برای ادامه کار ارائه می‌شود:

- با توجه به مدل‌های ارائه شده جهت بهره‌برداری شبکه‌های توزیع فعال، برای ادامه کار در این مقاله می‌توان رفتار خردهفروش را به عنوان یک بازیگر راهبردی در بازارهای برق و رزرو بالادست مدل کرد.





- در سطح شبکه‌های توزیع فعال برای ادامه کار می‌توان رقابت بین شرکت‌توزیع و خردهفروش‌ها را در تعامل با ریزش شبکه‌ها مدل کرد و رقابت را در سطح بازارهای انرژی و رزرو محلی افزایش داد.
- می‌توان از منابع انرژی گسترده دیگر مانند خودروهای برقی در ریزش شبکه به منظور افزایش انعطاف‌پذیری آنها در تعامل با خردهفروش‌ها برای تبادل انرژی و فراهم کردن رزرو استفاده کرد.

پیوست ۱- نحوه تک سطحی مدل دو سطحی غیر خطی (حالت انرژی و رزرو)

پ ۱-۱ - مقدمه

در این پیوست نحوه تک سطحی مدل دوسطحی ارائه شده در مقاله بیان خواهد شد. برای تک سطحی کردن مسئله دوسطحی از شرایط کروش - کان - تاکر استفاده می‌شود که شامل ۴ سری قید است که در ادامه بیان خواهند شد.

پ ۱-۲ - مسئله دو سطحی در حالت انرژی و رزرو

برای تبدیل مسئله دو سطحی مقاله به مسئله تک سطحی از شرایط کروش - کان - تاکر استفاده می‌شود. در ابتدا با استفاده از شرایط کروش - کان - تاکر مسئله دوسطحی تبدیل به یک سطح می‌شود. برای این کار ابتدا تمامی قیود نامساوی مسئله ریزش شبکه‌ها بصورت قیود بزرگتر و مساوی صفر نوشته می‌شود.

$$H_{i,t}^1 = p_{i,t}^{MG} + \bar{P}_i \geq 0 : \sigma_{i,t}^1, H_{i,t}^2 = \bar{P}_i - p_{i,t}^{MG} \geq 0 : \sigma_{i,t}^2 \quad (\text{پ ۱-۱})$$

$$H_{i,t}^3 = \bar{P}_i - p_{i,t}^{MG_Res.} + p_{i,t}^{MG} \geq 0 : \sigma_{i,t}^3, H_{i,t}^4 = p_{i,t}^{MG_Res.} \geq 0 : \sigma_{i,t}^4$$

$$H_{i,t}^5 = p_{i,t}^G \geq 0 : \sigma_{i,t}^5, H_{i,t}^6 = P_{i,t}^{G_R} \geq 0 : \sigma_{i,t}^6 \quad (\text{پ ۱-۲})$$

$$H_{i,t}^7 = p_{i,t}^G + P_{i,t}^{G_R} - \underline{p}_{i,t}^G \geq 0 : \sigma_{i,t}^7 \quad (\text{پ ۱-۳})$$

$$H_{i,t}^8 = \bar{p}_{i,t}^G - p_{i,t}^G - P_{i,t}^{G_R} \geq 0 : \sigma_{i,t}^8$$

$$H_{i,t}^9 = RU_i^G - p_{i,t}^G - P_{i,t}^{G_R} + P_{i,t-1}^G \geq 0 : \sigma_{i,t}^9 \quad \forall t > 1 \quad (\text{پ ۱-۴})$$

$$H_{i,t}^{10} = RU_i^G - p_{i,t}^G - P_{i,t}^{G_R} + P_i^{G_ini} \geq 0 : \sigma_{i,t}^{10} \quad \forall t = 1$$

$$H_{i,t}^{11} = RD_i^G - P_{i,t-1}^G - P_{i,t-1}^{G_R} + p_{i,t}^G \geq 0 : \sigma_{i,t}^{11} \quad \forall t > 1 \quad (\text{پ ۱-۵})$$

$$H_{i,t}^{12} = RD_i^G - P_i^{G_ini} - P_{i,t}^{G_R_ini} + p_{i,t}^G \geq 0 : \sigma_{i,t}^{12} \quad \forall t = 1$$

$$H_{i,t}^{13} = p_{i,t}^{CL} \geq 0 : \sigma_{i,t}^{13}, H_{i,t}^{14} = p_{i,t}^{CL_R} \geq 0 : \sigma_{i,t}^{14} \quad (\text{پ ۱-۶})$$

$$H_{i,t}^{15} = \bar{p}_{i,t}^{CL} - p_{i,t}^{CL} - p_{i,t}^{CL_R} \geq 0 : \sigma_{i,t}^{15}$$





$$H_{i,t}^{16} = p_{i,t}^{B_ch} \geq 0 : \sigma_{i,t}^{16}, H_{i,t}^{17} = \bar{p}_i^{batt} - p_{i,t}^{B_ch} \geq 0 : \sigma_{i,t}^{17} \quad (\text{پ ۷-۱})$$

$$H_{i,t}^{18} = p_{i,t}^{B_dch} \geq 0 : \sigma_{i,t}^{18}, H_{i,t}^{19} = \bar{p}_i^{batt} - p_{i,t}^{B_dch} \geq 0 : \sigma_{i,t}^{19}$$

$$H_{i,t}^{20} = soc_{i,t}^B - \underline{SOC}_i \geq 0 : \sigma_{i,t}^{20}, H_{i,t}^{21} = \overline{SOC}_i - soc_{i,t}^B \geq 0 : \sigma_{i,t}^{21} \quad (\text{پ ۸-۱})$$

$$H_{i,t}^{22} = p_{i,t}^{SL_up} \geq 0 : \sigma_{i,t}^{22}, H_{i,t}^{23} = \beta p_{i,t}^L - p_{i,t}^{SL_up} \geq 0 : \sigma_{i,t}^{23} \quad (\text{پ ۹-۱})$$

$$H_{i,t}^{24} = p_{i,t}^{SL_down} \geq 0 : \sigma_{i,t}^{24}, H_{i,t}^{25} = \beta p_{i,t}^L - p_{i,t}^{SL_down} \geq 0 : \sigma_{i,t}^{25}$$

$$N_{i,t}^1 = soc_{i,t}^B - soc_{i,t-1} - (\eta_i^{B_ch} p_{i,t}^{B_ch} - p_{i,t}^{B_dch} / \eta_i^{B_dch}) / Q_i^B = 0 : \delta_{i,t}^1 \quad \forall t > 1$$

$$N_{i,t}^2 = soc_{i,t}^B - Soc_i^{ini} - (\eta_i^{B_ch} p_{i,t}^{B_ch} - p_{i,t}^{B_dch} / \eta_i^{B_dch}) / Q_i^B = 0 : \delta_{i,t}^2 \quad \forall t = 1$$

$$N_{i,t}^3 = \sum_{t=1}^T p_{i,t}^{SL_up} - \sum_{t=1}^T p_{i,t}^{SL_down} = 0 : \delta_i^3 \quad \forall i \quad (\text{پ ۱۱-۱})$$

$$N_{i,t}^4 = p_{i,t}^G + p_{i,t}^{CL} + p_{i,t}^{MG} + p_{i,t}^{B_dch} + p_{i,t}^{SL_down} - p_{i,t}^{SL_up} - p_{i,t}^L - p_{i,t}^{B_ch} = 0 : \delta_{i,t}^4 \quad \forall i, t \quad (\text{پ ۱۲-۱})$$

$$N_{i,t}^5 = p_{i,t}^{MG_Res.} - p_{i,t}^{G-R} - p_{i,t}^{CL-R} = 0 : \delta_{i,t}^5 \quad \forall i, t \quad (\text{پ ۱۳-۱})$$

برای هر مساله سطح پایین تابع لاگرانژ بصورت زیر تشکیل خواهد شد :

$$\mathcal{L}_m = OF^{MG} - HM - NE \quad (\text{پ ۱۴-۱})$$

مشتق تابع لاگرانژ در رابطه با هر متغیر تصمیم‌گیری منجر به بدست آوردن قیود ایستایی به شرح زیر می‌شود :

$$\rho_t^E - \sigma_{i,t}^1 + \sigma_{i,t}^2 - \sigma_{i,t}^3 - \delta_{i,t}^4 = 0 \quad \forall i, t \quad (\text{پ ۱۵-۱})$$

$$\rho_i^G - \sigma_{i,t}^5 - \sigma_{i,t}^7 + \sigma_{i,t}^8 + \sigma_{i,t}^9 - \sigma_{i,t+1}^9 + \sigma_{i,t}^{10} + \sigma_{i,t+1}^{11} - \sigma_{i,t}^{11} - \sigma_{i,t}^{12} - \delta_{i,t}^4 = 0 \quad \forall i, t \quad (\text{پ ۱۶-۱})$$

$$\rho_{i,t}^{CL} - \sigma_{i,t}^{13} + \sigma_{i,t}^{15} - \delta_{i,t}^4 = 0 \quad \forall i, t \quad (\text{پ ۱۷-۱})$$

$$-\rho_t^{MG_Res.} - \rho_t^{RT} K_t^{Res} + \sigma_{i,t}^3 - \sigma_{i,t}^4 - \delta_{i,t}^5 = 0 \quad \forall i, t \quad (\text{پ ۱۸-۱})$$

$$\rho_i^G K_t^{Res.} - \sigma_{i,t}^6 - \sigma_{i,t}^7 + \sigma_{i,t}^8 + \sigma_{i,t}^9 + \sigma_{i,t}^{10} + \sigma_{i,t+1}^{11} + \delta_{i,t}^5 = 0 \quad \forall i, t \quad (\text{پ ۱۹-۱})$$

$$\rho_{i,t}^{CL} K_t^{Res.} - \sigma_{i,t}^{14} + \sigma_{i,t}^{15} + \delta_{i,t}^5 = 0 \quad \forall i, t \quad (\text{پ ۲۰-۱})$$

$$-\sigma_{i,t}^{16} + \sigma_{i,t}^{17} + \left. \frac{\eta_i^{B_ch}}{Q_i^B} \delta_{i,t}^1 \right|_{t>1} + \left. \frac{\eta_i^{B_ch}}{Q_i^B} \delta_{i,t}^2 \right|_{t=1} + \delta_{i,t}^4 = 0 \quad \forall i, t \quad (\text{پ ۲۱-۱})$$

$$-\sigma_{i,t}^{18} + \sigma_{i,t}^{19} - \left. \frac{1}{\eta_i^{B_dch} Q_i^B} \delta_{i,t}^1 \right|_{t>1} - \left. \frac{1}{\eta_i^{B_dch} Q_i^B} \delta_{i,t}^2 \right|_{t=1} - \delta_{i,t}^4 = 0 \quad \forall i, t \quad (\text{پ ۲۲-۱})$$





$$-\sigma_{i,t}^{20} + \sigma_{i,t}^{21} - \delta_{i,t}^1 \Big|_{t \geq 1} + \delta_{i,t+1}^1 - \delta_{i,t}^2 \Big|_{t=1} = 0 \quad \forall i, t \quad (\text{پ} ۱-۲۳)$$

$$\begin{aligned} -\sigma_{i,t}^{22} + \sigma_{i,t}^{23} - \delta_{i,t}^3 + \delta_{i,t}^4 &= 0 & \forall i, t \\ -\sigma_{i,t}^{24} + \sigma_{i,t}^{25} + \delta_{i,t}^3 - \delta_{i,t}^4 &= 0 & \forall i, t \end{aligned} \quad (\text{پ} ۱-۲۴)$$

قیود اولیه، دوگان و مکمل به شرح زیر می‌باشند:

$$\begin{aligned} 0 \leq \sigma_{i,t}^1 \perp H_{i,t}^1 \geq 0, 0 \leq \sigma_{i,t}^2 \perp H_{i,t}^2 \geq 0, 0 \leq \sigma_{i,t}^3 \perp H_{i,t}^3 \geq 0, 0 \leq \sigma_{i,t}^4 \perp H_{i,t}^4 \geq 0 \\ 0 \leq \sigma_{i,t}^5 \perp H_{i,t}^5 \geq 0, 0 \leq \sigma_{i,t}^6 \perp H_{i,t}^6 \geq 0, 0 \leq \sigma_{i,t}^7 \perp H_{i,t}^7 \geq 0, 0 \leq \sigma_{i,t}^8 \perp H_{i,t}^8 \geq 0 \\ 0 \leq \sigma_{i,t}^9 \perp H_{i,t}^9 \geq 0, 0 \leq \sigma_{i,t}^{10} \perp H_{i,t}^{10} \geq 0, 0 \leq \sigma_{i,t}^{11} \perp H_{i,t}^{11} \geq 0, 0 \leq \sigma_{i,t}^{12} \perp H_{i,t}^{12} \geq 0 \\ 0 \leq \sigma_{i,t}^{13} \perp H_{i,t}^{13} \geq 0, 0 \leq \sigma_{i,t}^{14} \perp H_{i,t}^{14} \geq 0, 0 \leq \sigma_{i,t}^{15} \perp H_{i,t}^{15} \geq 0, 0 \leq \sigma_{i,t}^{16} \perp H_{i,t}^{16} \geq 0 \\ 0 \leq \sigma_{i,t}^{17} \perp H_{i,t}^{17} \geq 0, 0 \leq \sigma_{i,t}^{18} \perp H_{i,t}^{18} \geq 0, 0 \leq \sigma_{i,t}^{19} \perp H_{i,t}^{19} \geq 0, 0 \leq \sigma_{i,t}^{20} \perp H_{i,t}^{20} \geq 0 \\ 0 \leq \sigma_{i,t}^{21} \perp H_{i,t}^{21} \geq 0, 0 \leq \sigma_{i,t}^{22} \perp H_{i,t}^{22} \geq 0, 0 \leq \sigma_{i,t}^{23} \perp H_{i,t}^{23} \geq 0, 0 \leq \sigma_{i,t}^{24} \perp H_{i,t}^{24} \geq 0 \\ 0 \leq \sigma_{i,t}^{25} \perp H_{i,t}^{25} \geq 0 \end{aligned} \quad (\text{پ} ۱-۲۵)$$

$$\delta_{i,t}^1, \delta_{i,t}^2, \delta_{i,t}^3, \delta_{i,t}^4, \delta_{i,t}^5 \quad \forall i, t \quad \text{آزاد در علامت} \quad (\text{پ} ۱-۲۶)$$

معادلات توصیف شده در (پ ۱-۲۲) به صورت (پ ۱-۲۴) خطی می‌شوند که در آن M یک پارامتر مثبت نسبتاً بزرگ است.

$$0 \leq a \perp b \geq 0, \quad a \leq M_1 U_{i,t}, \quad b \leq M_2 (1 - U_{i,t}) \quad (\text{پ} ۱-۲۷)$$

پیوست ۲- نحوه خطی کردن مدل تک سطحی غیر خطی (حالت انرژی و رزو)

پ ۱-۲ - مقدمه

در این پیوست نحوه خطی کردن مدل تک سطحی ارائه شده در پیوست ۱ بیان خواهد شد. برای خطی کردن مسئله تک سطحی از تئوری دوگان به شرح زیر استفاده می‌شود.

پ ۲-۲- تبدیل مسئله غیر خطی به خطی (تئوری دوگان)

مدل بدست آمده در بخش قبلی یک مدل تک سطحی غیر خطی است که با استفاده از تئوری دوگان خطی خواهد شد. برای خطی

کردن عبارات غیر خطی $p_{i,t}^{MG_Res}$, ρ_t^{MG} , $p_{i,t}^{MG}$ تئوری دوگان بکار برده می‌شود. برای این منظور تابع هدف دوگان ریزشبکه‌ها بصورت (پ ۲-۲۸) بدست می‌آید.

$$OF^{MG_dual} = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \left[\begin{aligned} & -\bar{P}_i (\sigma_{i,t}^1 + \sigma_{i,t}^2 + \sigma_{i,t}^3) + \underline{p}_i \sigma_{i,t}^7 - \bar{p}_i \sigma_{i,t}^8 \\ & - (RU_i^G) \sigma_{i,t}^9 - (RU_i^G + P_i^{G,ini}) \sigma_{i,t}^{10} - (RD_i^G) \sigma_{i,t}^{11} \\ & - (RD_i^G - P_i^{G,ini}) \sigma_{i,t}^{12} - \bar{p}_i^{CL} \sigma_{i,t}^{15} - \bar{P}_i^{batt} (\sigma_{i,t}^{17} + \sigma_{i,t}^{19}) + \underline{SOC}_i \sigma_{i,t}^{20} - \overline{SOC}_i \sigma_{i,t}^{21} \\ & + \underline{SOC}_i^{ini} \delta_{i,t}^2 - \beta P_{i,t}^L (\sigma_{i,t}^{23} + \sigma_{i,t}^{25}) + (P_{i,t}^L) \delta_{i,t}^4 \end{aligned} \right]$$

(پ ۲-۲۸)





توابع هدف مسئله‌های اولیه و دوگان طبق قضیه قوی دوگان برابر هستند، که در (پ ۲-۲۹) توصیف شده است:

$$\sum_{t=1}^T \left[\begin{aligned} &\rho_t^E p_{i,t}^{MG} + \rho_i^G p_{i,t}^G + \rho_{i,t}^{CL} p_{i,t}^{CL} \\ &+ \rho_i^G p_{i,t}^{G_R} \kappa_t^{Res.} + \rho_{i,t}^{CL} p_{i,t}^{CL_R} \kappa_t^{Res.} \\ &- \rho_t^{MG_Res} p_{i,t}^{MG_Res} - \lambda_t^{RT} p_{i,t}^{MG_Res} \kappa_t^{Res.} \end{aligned} \right]$$

$$= \sum_{t=1}^T \left[\begin{aligned} &-\bar{P}_i (\sigma_{i,t}^1 + \sigma_{i,t}^2 + \sigma_{i,t}^3) + \underline{p}_i \sigma_{i,t}^7 - \bar{p}_i \sigma_{i,t}^8 \\ &-(RU_i^G) \sigma_{i,t}^9 - (RU_i^G + P_i^{G,ini}) \sigma_{i,t}^{10} - (RD_i^G) \sigma_{i,t}^{11} \\ &-(RD_i^G - P_i^{G,ini}) \sigma_{i,t}^{12} - \bar{p}_i \sigma_{i,t}^{15} - \bar{P}_i^{batt} (\sigma_{i,t}^{17} + \sigma_{i,t}^{19}) + \underline{SOC}_i \sigma_{i,t}^{20} - \overline{SOC}_i \sigma_{i,t}^{21} \\ &+ Soc_i^{ini} \delta_{i,t}^2 - \beta P_{i,t}^L (\sigma_{i,t}^{23} + \sigma_{i,t}^{25}) + (P_{i,t}^L) \delta_{i,t}^4 \end{aligned} \right]$$

(پ ۲-۲۹)

$$\sum_{t=1}^T \left[\rho_t^E p_{i,t}^{MG} - \rho_t^{MG_Res} p_{i,t}^{MG_Res} \right]$$

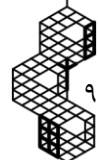
$$= \sum_{t=1}^T \left[\begin{aligned} &-\rho_i^G p_{i,t}^G - \rho_{i,t}^{CL} p_{i,t}^{CL} - \rho_i^G p_{i,t}^{G_R} \kappa_t^{Res.} - \rho_{i,t}^{CL} p_{i,t}^{CL_R} \kappa_t^{Res.} \\ &-\bar{P}_i (\sigma_{i,t}^1 + \sigma_{i,t}^2 + \sigma_{i,t}^3) + \underline{p}_i \sigma_{i,t}^7 - \bar{p}_i \sigma_{i,t}^8 \\ &-(RU_i^G) \sigma_{i,t}^9 - (RU_i^G + P_i^{G,ini}) \sigma_{i,t}^{10} - (RD_i^G) \sigma_{i,t}^{11} \\ &-(RD_i^G - P_i^{G,ini}) \sigma_{i,t}^{12} - \bar{p}_i \sigma_{i,t}^{15} - \bar{P}_i^{batt} (\sigma_{i,t}^{17} + \sigma_{i,t}^{19}) + \underline{SOC}_i \sigma_{i,t}^{20} - \overline{SOC}_i \sigma_{i,t}^{21} \\ &+ Soc_i^{ini} \delta_{i,t}^2 - \beta P_{i,t}^L (\sigma_{i,t}^{23} + \sigma_{i,t}^{25}) + (P_{i,t}^L) \delta_{i,t}^4 \end{aligned} \right]$$

(پ ۲-۳۰)

بنابراین عبارات غیر خطی $\rho_t^E p_{i,t}^{MG}$ ، $\rho_t^{MG_Res} p_{i,t}^{MG_Res}$ معادله (۲۲) با عبارات خطی (پ ۲-۳۰) جایگزین خواهد شد.

مراجع

- [1] S.A. Mansouri, M.S. Javadi, "A robust optimisation framework in composite generation and transmission expansion planning considering inherent uncertainties", *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, vol. 29, no. 4, pp. 717–730, 2017 (doi: 10.1080/0952813X.2016.1259262).
- [2] M. Uddin, M.F. Romlie, M.F. Abdullah, S. Abd Halim, A.H.A. Bakar, T.C. Kwang, "A review on peak load shaving strategies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 3323–3332, Feb, 2018 (doi: 10.1016/j.rser.2017.10.056).
- [3] S. Cai, Y. Xie, Q. Wu, Z. Xiang, "Robust MPC-based microgrid scheduling for resilience enhancement of distribution system", *International Journal Electrical Power and Energy Systems*, vol. 121, Article Number: 106068, Oct, 2020 (doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106068).
- [4] J. Vasiljevskaa, J. A. Peças Lopes, and M. A. Matos, "Evaluating the impacts of the multi-microgrid concept using multicriteria decision aid, " *Electric Power Systems Research*, vol. 91, pp. 44-51, 2012 (doi: 10.1016/j.epsr.2012.04.013).
- [5] M. Falahi, S. Lotfifard, M. Ehsani, and K. Butler-Purpy, "Dynamic Model Predictive-Based Energy Management of DG Integrated Distribution Systems, " *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 28, pp. 2217-2227, 2013(doi:10.1109/TPWRD.2013.2274664).





- [6] Riaz, M., S. Ahmad and M. Naeem . “Joint energy management and trading among renewable integrated microgrids for combined cooling, heating, and power systems”. *Journal of Building Engineering* 75: 106921 , 2023(doi: 10.1016/j.jobe.2023.106921).
- [7] Ahmad, S., M.M. Alhaisoni, M. Naeem, A. Ahmad and M. “Altaf. Joint energy management and energy trading in residential microgrid system”. *IEEE Access* 8: 123334-46, 2020 (doi: 10.1109/ACCESS.2020.3007154).
- [8] Khan, S.S., S. Ahmad and M. Naeem. “ On-grid joint energy management and trading in uncertain environment”. *Applied energy* 330: 120318, 2023 (doi:10.1016/j.apenergy.2022.120318).
- [9] Xia, Y., Q. Xu, Y. Huang, Y. Liu and F. Li. “ Preserving privacy in nested peer-to-peer energy trading in networked microgrids considering incomplete rationality”. *IEEE Transactions on Smart Grid* 14, no 1: 606-22, 2022a(doi: 10.1109/TSG.2022.3189499).
- [10] S. Shi, Q. Zhang, and Q. Xie. “A Distributed Multi-Microgrid Cooperative Energy Sharing Strategy Based on Nash Bargaining”, *Electronics Switzerland* Volume 14, no. 15: pp. 3155, 2025 (<https://doi.org/10.3390/electronics14153155>).
- [11] X. Xiaobin, J. Xia, C. Hong, P. Sun, P. Xi, and J. Li. “Optimization of Cooperative Operation of Multiple Microgrids Considering Green Certificates and Carbon Trading” *Energies* Volume 18, no. 15: pp. 4083. 2025.(<https://doi.org/10.3390/en18154083>).
- [12] S. Bahramara, M. Parsa.-Moghaddam, and M. -R. Haghifam, “A bi-level optimization model for operation of distribution networks with micro-grids. ” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 82, pp. 169-178, 2016 (doi: 10.1016/j.ijepes.2016.03.015).
- [13] T. Lv, Q. Ai, and Y. Zhao, “A bi-level multi-objective optimal operation of grid-connected microgrids, ” *Electric Power Systems Research* , vol. 131, pp. 60-70, 2016 (doi: 10.1016/j.epsr.2015.09.018)
- [14] L. Wang, Y. Zhang, W. Song, Q. Li, “Stochastic cooperative bidding strategy for multiple microgrids with peer-to-peer energy trading”, *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 3, pp. 1447–1457, March 2022 (doi: 10.1109/TII.2021.3094274).
- [15] M. A. El-Meligy, M. Sharaf, and A. T. Soliman, “A coordinated scheme for transmission and distribution expansion planning: A Tri-level approach,” *Electric Power Systems Research*, vol. 196, pp. 107274, Jul 2021,(doi:10.1016/j.epsr.2021.107274).
- [16] Salah Bahramara, Member, IEEE, Maziar Yazdani-Damavandi, Member, IEEE, Javier Contreras, Fellow, IEEE, Miadreza Shafie-khah, Senior Member, IEEE, and Jo~ao P. S. Catal~ao, Senior Member, IEEE , “ Modeling the Strategic Behavior of a Distribution Company in Wholesale Energy and Reserve Markets”, *IEEE Transactions on Smart Grid*. Content may change prior to final publication.2017 Citation information: (doi: 10.1109/TSG.2017.2768486).
- [17] C. Clastres, H. Khalfallah, “ Dynamic pricing efficiency with strategic retailers and consumers: An analytical analysis of short-term market interactions”, *Energy Economics* 98 (2021) 105169,2021 (doi: 10.1016/j.eneco.2021.105169).
- [18] X. Ding, Q. Guo, T. Qiannan, K. Jermsittiparsert, “ Economic and environmental assessment of multi-energy microgrids under a hybrid optimization technique”, *Sustainable Cities and Society* 65 102630, 2021 (doi:10.1016/j.scs.2020.102630).
- [19] S.M. Mousavi, T. Barforoushi, F.H. Moghimi, “ A decision-making model for a retailer considering a new short-term contract and flexible demands”, *Electric Power Systems Research* 192 106960, 2021 (doi: 10.1016/j.epsr.2020.106960).
- [20] T. Jiang, C. Wu, R. Zhang, X. Li, H. Chen, and G. Li, “Flexibility Clearing in Joint Energy and Flexibility Markets Considering TSO-DSO Coordination,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 14, pp. 1376-1387, Mar 2022, (doi: 10.1109/TSG.2022.3153634).
- [21] Zare Oskoue, M., M.A. Mirzaei, B. Mohammadi-Ivatloo, M. Shafiee, M. Marzband and A. Anvari-Moghaddam.. “ A hybrid robust-stochastic approach to evaluate the profit of a multi-energy retailer in tri-layer energy markets”. *Energy* 214: 118948, 2021 (doi: 10.1016/j.energy.2020.118948).





- [22] Clastres, C. and H. Khalfallah.. “ Dynamic pricing efficiency with strategic retailers and consumers: An analytical analysis of short-term market interactions”. *Energy Economics* 98: 105169, 2021 (doi: 10.1016/j.eneco.2021.105169).
- [23] Ding, X., Q. Guo, T. Qiannan and K. Jermisittiparsert. “ Economic and environmental assessment of multi-energy microgrids under a hybrid optimization technique”. *Sustainable Cities and Society* 65: 102630, 2021 (doi: 10.1016/j.scs.2020.102630).
- [24] Hong, Q., F. Meng, J. Liu and R. Bo. “ A bilevel game-theoretic decision-making framework for strategic retailers in both local and wholesale electricity markets”. *Applied energy* 330: 120311, 2023 (doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120311).
- [25] Mousavi, S.M., T. Barforoushi and F.H. Moghimi. “ A decision-making model for a retailer considering a new short-term contract and flexible demands”. *Electric Power Systems Research* 192: 106960, 2021 (doi: 10.1016/j.epsr.2020.106960).
- [26] S.A. Mansouri, A. Ahmarinejad, M.S. Javadi, A.E. Nezhad, M. Shafie-Khah, J.P.S. Catalão, “Chapter 9- Demand response role for enhancing the flexibility of local energy systems”, *Distributed Energy Resource in Local Integrated Energy Systems*, pp. 279–313, 2021 (doi: 10.1016/B978-0-12-823899-8.00011-X).
- [27] H.J. Kim, M.K. Kim, “Risk-based hybrid energy management with developing bidding strategy and advanced demand response of grid-connected microgrid based on stochastic/information gap decision theory”, *International Journal Electrical Power and Energy Systems*, vol. 131, Article Number: 107046, Oct. 2021, (doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107046).
- [28] M. Alizadeh Bidgoli, A. Ahmadian, “Multi-stage optimal scheduling of multi-microgrids using deep-learning artificial neural network and cooperative game approach”, *Energy*, vol. 239, Article Number: 122036, Jan. 2022 (doi: 10.1016/j.energy.2021.122036).
- [29] Sayyad Nojavan, Behnam Mohammadi-Ivatloo, Kazem Zare , “ Optimal bidding strategy of electricity retailers using robust optimisation approach considering time-of-use rate demand response programs under market price uncertainties ” *IET Generation, Transmission & Distribution*, Volume 187, pp. 449-464, 2014. (doi:10.1049/iet-gtd.2014.0548).
- [30] Dehghani, R. and A.A. Foroud. “ Two-stage risk assessment of the electricity retailers in the day-ahead energy and primary-secondary reserve markets with flexible demand responses and parking lots”. *Journal of Energy Storage* 55: 105626, 2022(doi: 10.1016/j.est.2022.105626).
- [31] Ayub Ahmadzadeh Moghaddam, Salah Bahramara, Kazem Zare & Hêmin Golpîra “ Modeling the power trading strategies of a retailer with multi-microgrids: a robust bi-level optimization approach”, *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 19:1, 2288952, 2024 (doi: 10.1080/15567249.2023.2288952)
- [32] Moghimi, F.H., T. Barforoushi and S.M. Mousavi . “ Optimal scheduling of resources for a price-maker distribution company in electricity markets considering network component failures”. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 122: 106200, 2020 (doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106200).
- [33] Feng, X., F. Hu, H. Cao and L. Tang. “ A robust optimization model for multiple electricity retailers based on electricity trading in the presence of demand response program”. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 153: 10936, 2023 (doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109362).
- [34] S. Ghanbari, S. Bahramara, H. Golpîra. “Modeling market trading strategies of the intermediary entity for microgrids: A reinforcement learning-based approach”, *Electric Power Systems Research* Volume 227 109989, 2024.(https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109989).

زیر نویس ها





- ¹ Distribution companies
- ² Distributed Energy Resources
- ³ Distributed Generation
- ⁴ Demand Response Programs
- ⁵ Electrical Energy Storages
- ⁶ Microgrid
- ⁷ Ancillary services
- ⁸ Islanding
- ⁹ Diagonal quadratic approximation
- ¹⁰ Day-ahead
- ¹¹ Real time
- ¹² Karush-Kuhn-Tucker
- ¹³ Up Level
- ¹⁴ Low Level
- ¹⁵ Pool Market
- ¹⁶ Robust optimization approach
- ¹⁷ Robust Mixed-Integer Linear Programming
- ¹⁸ Load shifted

