

Optimizing Peer to Peer Energy Trades in Energy Communities Connected to Active Distribution Network Using Dynamic Operation Envelopes

Mohammad Sedaghat¹, *PhD Student*, Esmaeel Rokrok¹, *Professor*,
Meysam Doostizadeh¹, *Associate Professor*

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran

Abstract:

In recent years, peer to peer energy trading have become an important component of local and decentralized electricity markets. One of the remarkable challenges in implementing these trades between users is keeping the technical constraints of distribution networks within the permitted limits and utilizing the maximum capacity of prosumers during energy transactions. Usually, power demand at points in the grid that do not have generations varies over time, which makes it very difficult for prosumers to determine their operating range. In this paper, a structure based on dynamic operation envelopes is presented to dynamically calculate network constraints, which, in addition to maintaining the technical constraints of the network within the permitted range, allows the maximum use of the capacity of prosumers to participate in the market. The proposed structure is presented for P2P trades of energy communities consisting of solar and wind generation, fixed and flexible loads, and batteries in an active distribution network. Also, in this structure, dynamic operation envelopes are calculated from the agreement between the energy communities and the distribution system operator. The proposed method has been implemented on standard IEEE 33 bus system with the presence of several energy communities. The optimization of the equations is performed using the alternating direction method of multipliers (ADMM) and is completely decentralized. The simulations in this paper are accomplished using GAMS software version 24.8.1., and the obtained results show that the presented method increases the trades of energy communities and maintains the technical constraints of the network within the safe range.

Keywords: Peer to peer energy trading, Dynamic operation envelope, Active distribution network, Local electricity market and Energy community.

Received: 06 January 2025

Revised: 16 March 2025

Accepted: 30 April 2025

Corresponding Author: Dr. Esmaeel Rokrok, Rokrok.e@lu.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.71691/teeges.2026.1195710>





فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

بهینه‌سازی مبادلات همتابه‌همتای انرژی در مجتمع‌های تولید انرژی متصل به شبکه توزیع فعال با استفاده از پوش‌های بهره‌برداری پویا

محمد صداقت^۱، دانشجو دکتری، اسمعیل رک رک^۱، استاد، میثم دوستی زاده^۱، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی، گروه برق قدرت، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

چکیده: در سال‌های اخیر مبادلات همتابه‌همتای انرژی، به عنوان یکی از اجزای مهم بازارهای برق محلی و غیرمتمرکز شناخته می‌شوند. یکی از چالش‌های مهم در پیاده‌سازی این مبادلات میان کاربران، حفظ قیود فنی شبکه‌های توزیع در محدوده مجاز و استفاده از حداکثر ظرفیت مشترکین در جریان مبادلات انرژی است. معمولاً تقاضای توان در نقاطی از شبکه که فاقد تولیدکننده هستند در بازه‌های زمانی مختلف متغیر است که تعیین محدوده عملیاتی برای تولیدکنندگان را بسیار دشوار می‌سازد. در این مقاله ساختاری مبتنی بر پوش‌های بهره‌برداری پویا برای محاسبه محدودیت‌های شبکه به صورت دینامیک ارائه شده است که علاوه بر حفظ قیود فنی شبکه در محدوده مجاز، موجب استفاده از حداکثر ظرفیت تولیدکنندگان برای مشارکت در بازار می‌شود. ساختار پیشنهادی برای مبادلات همتابه‌همتای مجتمع‌های تولید انرژی متشکل از تولیدات خورشیدی و بادی، بارهای ثابت و انعطاف‌پذیر و باتری در یک شبکه توزیع فعال ارائه شده است. همچنین در این ساختار، پوش‌های بهره‌برداری پویا از توافق میان مجتمع‌های انرژی و اپراتور شبکه توزیع محاسبه می‌شوند. روش پیشنهادی بر روی شبکه ۳۳ شینه استاندارد IEEE و با حضور چندین مجتمع تولید انرژی پیاده‌سازی شده است. بهینه‌سازی مبادلات در ساختار پیشنهادی با استفاده از روش جهت متناوب ضرب کننده‌ها (ADMM) و از نوع کاملاً غیرمتمرکز انجام می‌شود. شبیه‌سازی‌های این مقاله با استفاده از نرم افزار GAMS نسخه 24.8.1 انجام می‌شود و نتایج بدست آمده نشان می‌دهد روش ارائه شده موجب افزایش مبادلات مجتمع‌های تولید انرژی شده و قیود فنی شبکه را در محدوده ایمن حفظ می‌کند.

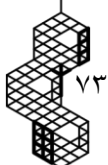
واژه‌های کلیدی: مبادلات همتابه‌همتای انرژی، پوش‌های بهره‌برداری پویا، شبکه توزیع فعال، بازار برق محلی و مجتمع‌های تولید انرژی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۷

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۱۰

نویسنده‌ی مسئول: دکتر اسمعیل رک رک، Rokrok.e@lu.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.71691/teeges.2026.1195710>



۱-۱- ساختار کلی پژوهش

با توجه به رشد روز افزون و نفوذ منابع تولید پراکنده^۱ به خصوص منابع انرژی تجدیدپذیر^۲، مشترکین سنتی با تولید انرژی به مصرف‌کنندگان فعال^۳ انرژی مبدل شده‌اند [۱]. این نوع مشترکین جدید در شبکه‌های توزیع، نه تنها می‌توانند نیاز برق خود را تامین کنند، بلکه می‌توانند انرژی اضافی تولیدی خود را به شبکه بالادست بفروشند. به‌علاوه این اجزای شبکه می‌توانند از طریق باتری‌ها، وسایل نقلیه الکتریکی، بارهای انعطاف‌پذیر و بارهای قطع‌شونده، خدمات انعطاف‌پذیری^۴ را در پاسخ به درخواست‌های شبکه توزیع ارائه دهند. این رفتار منعطف ارائه شده توسط مشترکین، وابستگی شبکه توزیع به شبکه بالادستی را کاهش می‌دهد. یکی از شروط لازم برای بهره‌گیری از این خدمات بر بستر شبکه‌های توزیع، ایجاد بازارهای انرژی محلی^۵ است که یک محیط رقابتی را برای انواع مشترکین مصرف‌کننده و فعال به منظور مبادله خدمات انرژی و انعطاف‌پذیری در شبکه‌های توزیع فراهم می‌کند [۲]. شرط دیگر تحقق بازارهای محلی انرژی، طراحی روش‌هایی برای هماهنگ کردن مبادلات انرژی و انعطاف‌پذیری مشارکت‌کنندگان در بازار است که محدودیت‌های شبکه توزیع و تصمیمات مستقل مشترکین برای مبادلات انرژی را در نظر گیرد [۳]. یکی از جدیدترین روش‌های پیاده‌سازی مبادلات انرژی و خدمات انعطاف‌پذیری با در نظر گرفتن محدودیت‌های شبکه توزیع در بازارهای برق محلی، مبادلات همتابه‌های انرژی^۶ است که در سالیان اخیر توجه زیادی را به خود معطوف نموده‌است.

۱-۲- مبادلات همتا به همتای انرژی

به منظور اینکه تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان بتوانند انرژی را بدون نیاز به واسطه و با بازده مالی سودآور بین خود داد و ستد کنند، مفهوم مبادلات همتابه‌ها (P2P) به عنوان یک ساختار کارآمد در بازارهای برق محلی معرفی شد. با توسعه این ساختار، بازیگران و تولیدکنندگان مقیاس کوچک توانستند مازاد انرژی خود را بدون واسطه با یکدیگر مبادله کنند. به‌علاوه با تشویق به حضور در بازار همتابه‌ها، انعطاف‌پذیری شبکه نیز افزایش یافت که هدفی است که همواره اپراتور شبکه آن را دنبال می‌کند. در حال حاضر، گرایش زیادی به طراحی ساختارهای معاملاتی مختلف مبتنی بر مبادلات همتابه‌ها با هدف حمایت از محیط زیست، استقلال عوامل شبکه، کاهش هزینه قبوض برق، خدمات انعطاف‌پذیری در سمت تقاضا و بهبود کیفیت خدمات وجود دارد [۴].

مبادلات همتابه‌ها به دو شیوه متمرکز^۷ و غیرمتمرکز^۸ تعریف می‌شوند. در رویکرد متمرکز یک نهاد واسطه که معمولاً اپراتور شبکه توزیع^۹ (DSO) است، پلتفرم معاملاتی را مدیریت می‌کند. این رویکرد موجب نگرانی در خصوص حریم خصوصی بازیگران معاملات شده و همه بازیگران مشتاق به شرکت در مبادلات همتا به همتای متمرکز نیستند. از سوی دیگر، رویکرد غیرمتمرکز، مصرف‌کنندگان را قادر می‌سازد تا انرژی مازاد خود را مستقیماً با یکدیگر مبادله کنند، بدون اینکه نیازی به مداخله یک مرجع ثالث باشد. چنین رویکردی به شرکت‌کنندگان انعطاف‌پذیری بیشتری می‌بخشد و حریم خصوصی آنها را حفظ می‌کند [۵].

برای حل مسائل مبتنی بر مبادلات همتابه‌ها با رویکرد غیرمتمرکز روش‌های مختلفی ارائه شده‌اند. این روش‌ها براساس قواعد بازی همکارانه^{۱۰} [۶]، غیر همکارانه^{۱۱} [۷]، مبتنی بر پیشنهاد کردن رفاه اجتماعی [۸] و یا روش جهت متناوب ضرب‌کننده‌ها^{۱۲} (ADMM) [۹] پیاده‌سازی و ارائه شده‌اند. در این مقاله برای پیاده‌سازی مبادلات همتابه‌ها از روش جهت متناوب ضرب‌کننده‌ها استفاده می‌شود. لازم به ذکر است برای حل مسائلی که تعداد متغیرهای بالا و قیود متقابل دلرند روش ADMM بسیار موثر بوده و عموماً شرایط بهینگی را تضمین می‌کند. این روش مسائل در مقیاس بزرگ را با تجزیه مسئله اصلی به مسائل فرعی کوچکتر در زمان مناسب حل می‌کند. روش‌های بهینه‌سازی دیگری همانند اصل مساله کمکی [۱۰] و پیش‌بینی‌کننده، تصحیح‌کننده ضرایب [۱۱] نیز می‌توانند در حل مسائل بهینه‌سازی موثر باشند، اما روش ADMM عموماً با تعداد تکرار کمتر به همگرایی منجر می‌شود. در مجموع روش ADMM به دلیل مزایای فراوانی همانند ساختار ماژولار، همگرایی بالا، پیاده‌سازی آسان و انعطاف‌پذیری بالا، همچنان یکی از محبوب‌ترین ابزارها برای بهینه‌سازی توزیع شده‌است [۱۲] که در بهینه‌سازی روش پیشنهادی در این مقاله نیز مورد استفاده قرار گرفته‌است.



۳-۱- چالش‌های پیاده‌سازی مبادلات همتابه‌همتای انرژی

اگرچه توسعه مبادلات همتابه‌همتا گامی بلند در توسعه بازارهای برق محلی و تشویق مشترکین به شرکت در این بازارها بوده، با این حال اجرای تصمیمات خریداران شرکت‌کننده در بازار همتابه‌همتا و تبادل انرژی آنها با یکدیگر ممکن است از نظر فنی در شبکه فیزیکی قابل پیاده‌سازی نبوده و توسط سیستم توزیع حمایت نشود. یکی از چالش‌های مهم در پیاده‌سازی مدل همتابه‌همتا در تبادل انرژی، در نظر گرفتن قیود فنی شبکه از جمله محدوده مجاز ولتاژ شینه‌ها و حد بارگزاری خطوط است [۱۳].

مراجع [۱۳] با آنالیز حساسیت شبکه و ارائه توافقات دوجانبه مبادلات همتابه‌همتا، اپراتور شبکه توزیع را قادر می‌سازد تا قراردادهایی که ممکن است محدودیت‌های فنی شبکه را به خطر بیندازند، رد کند. اما همانطور که پیشتر ذکر شد، رویکرد متمرکز و وجود یک نهاد واسطه موجب بروز نگرانی درخصوص امنیت اطلاعات خصوصی کاربران می‌گردد و موجب کاهش حضور ایشان در بازارهای برق محلی و مبادلات همتابه‌همتا می‌شود.

نویسندگان [۱۴، ۱۵] مکانیسم مبادلات همتابه‌همتا و غیرمتمرکز را ارائه می‌کنند که در آن با تخصیص شاخص‌هایی مبتنی بر هزینه استفاده از شبکه، فاصله الکتریکی تولیدکننده‌ها و نیز تلفات تبادل توان، مشترکین همتهای خود برای تبادل انرژی را انتخاب می‌کنند. با این حال، این رویکردها برای مدیریت مستقیم معاملات همتابه‌همتا به اپراتور شبکه توزیع متکی هستند و علی‌رغم در نظر گرفتن قیود فنی و غیرمتمرکز بودن، با حفظ حریم خصوصی اطلاعات تجارت در تضاد است.

یکی از راهکارهای اعمال قیود فنی در مبادلات همتابه‌همتا مشارکت بهره‌بردار در مبادلات به صورت همکارانه است. مسئله مشارکت همکارانه در مراجع [۱۶، ۱۷] با استفاده از روش بهینه‌سازی ADMM حل شده است. لازم به ذکر است روش ADMM برای استفاده در رویکردهای غیرمتمرکز تجارت همتابه‌همتا اعمال می‌شود. با این حال، یکی از مسائلی که در این مقالات مورد توجه است، خطی‌سازی پخش بار در توصیف شبکه توزیع است. این امر گاهی موجب می‌شود، افزایش تلفات توان ناشی از معاملات غیرمنتظره همتابه‌همتا در نظر گرفته نشود.

به منظور بالا بردن دقت در حل مسائل همتابه‌همتا مراجع [۱۸، ۱۹] یک تحلیل حساسیت برای ارزیابی تغییر ولتاژ شینه‌ها و تلفات توان شبکه ناشی از معاملات همتابه‌همتا به کار برده‌اند. در این پژوهش، مشترکین با دانستن قیود شبکه، آن را در طول مبادلات در نظر می‌گیرند. اشکال این روش این است که خریداران تمایلی به در نظر گرفتن محدودیت‌های شبکه در طول مبادلات ندارند، که این عدم تمایل ربطی به مازاد انرژی آنها ندارد. به علاوه، امکان اشتراک‌گذاری پارامترهای شبکه با خریداران نیز برای اپراتور شبکه توزیع غیرعملی است.

در دسته ای دیگر از پژوهش‌ها، برای هدایت درست و تخصیص بهینه مبادلات، هزینه استفاده از شبکه وضع شده که مبنای محاسبه آن برای مشترکین بازار، قیمت حاشیه‌ای محلی توزیع شده^۳ می‌باشد [۲۰-۲۲]. اشکالی که به این گروه از مطالعات وارد است، اختصاص قیمت حاشیه‌ای به همه مشترکین در هر مرحله از مذاکرات همتابه‌همتا است که شرط استقلال مشارکت‌کنندگان را به چالش می‌کشد. به علاوه تغییرات قیمت حاشیه‌ای به صورت همزمان در مبادلات همتابه‌همتا را نمی‌توان در این نوع قیمت‌گذاری اعمال نمود.

در حالی که روش‌های همتابه‌همتای ذکر شده به طور موثر محدودیت‌های شبکه را مدل می‌کنند، معمولاً برای یک نقطه بهره‌برداری در بین شرکت‌کنندگان بهینه می‌شوند تا از محدودیت‌های فنی شبکه و رعایت قیود فنی اطمینان حاصل کنند. به عبارت دیگر، مبادلات همتابه‌همتا با در نظر گرفتن هزینه‌های استفاده از شبکه، در حداکثر محدودیت‌های خرید و فروش توان از پیش تعریف شده بهینه‌سازی می‌شوند تا از عملکرد ایمن شبکه اطمینان حاصل شود. به عنوان مثال، در سطح شبکه توزیع برق فشار ضعیف، حداکثر نقطه تنظیم برای صادرات برق در نقاط مختلف جهان ۵ کیلووات است [۲۳].

یکی از جدیدترین روش‌های مدل‌سازی قیود فنی استفاده از راهکار پوش‌های بهره‌برداری پویا^۴ (DOE) می‌باشد. مزیت این روش این است که می‌تواند محدودیت‌های تبادل انرژی را در طول زمان و مکان بر اساس ظرفیت موجود شبکه محلی یا سیستم قدرت تغییر دهد. پس از محاسبه پوش‌های عملیاتی پویا توسط اپراتور شبکه توزیع و تخصیص به مشترکین مختلف، چنانچه تزریق انرژی به شبکه توسط مشترکین براساس پوش‌های عملیاتی پویا باشد، ولتاژها از حد مجاز تجاوز نمی‌کنند [۲۴، ۲۵].

در ابتدا روش پوش‌های عملیاتی پویا تنها با در نظر گرفتن تبادل مشترکین با شبکه و تزریق انرژی به شبکه بالادست معرفی شد. اما با توسعه مبادلات همتابه‌همتا، این روش در پژوهش‌های اخیر در مدل‌سازی‌های مبتنی بر مبادلات همتابه‌همتا نیز به کار گرفته شده است.



مبادلات انرژی همتابه‌همتا با قابلیت پوش‌های عملیاتی پویا که توسط اپراتور شبکه توزیع محاسبه و به مشترکین ابلاغ می‌شود، موجب افزایش قابلیت صادرات انرژی تولیدکنندگان در بازار برق محلی در مقایسه با رویکردهای همتابه‌همتا موجود می‌گردد و آنها را قادر می‌سازد تا به بازده مالی بهتری بدون نقض محدودیت‌های شبکه دست یابند [۲۶-۲۸].

با مطالعه مراجع بالا که مربوط به محدودیت‌های فنی شبکه فیزیکی و مبتنی بر محاسبه و تخصیص پوش‌های عملیاتی پویا هستند، مشخص می‌شود که در مبادلات همتابه‌همتا انرژی مقدار پوش‌های عملیاتی پویا توسط اپراتور شبکه توزیع محاسبه و ابلاغ می‌شود و تولیدکننده‌ها با پذیرش این مقادیر ابلاغی، قیود شبکه را در طول مبادلات خود حفظ می‌کنند. در این حالت احتمال بروز دو مشکل وجود دارد:

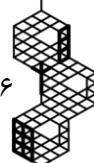
- پوش‌های عملیاتی پویا می‌بایست از توافق میان اپراتور شبکه توزیع و تولیدکننده‌ها محاسبه گردد، چراکه ممکن است پوش‌های عملیاتی پویای ابلاغی با انعطاف‌پذیری خریداری شده از سوی تولیدکننده‌ها دچار تداخل گردد و تولیدکننده‌ها نتوانند تمام انعطاف‌پذیری خریداری شده خود را با توجه محدودیت مقدار پوش‌های عملیاتی پویا تبدیل به انرژی کنند و متحمل جریمه شوند.
 - در حالت پیش‌برنامه‌ریزی ممکن است تولیدکننده‌ها ظرفیت مبادله انرژی خود را تا آستانه پوش‌های عملیاتی پویای ابلاغی از سوی اپراتور شبکه در نظر بگیرند. اما در حالت به هنگام و شرایط واقعی، دچار کمبود و یا بیش‌بود انرژی شده و نیازمند انعطاف‌پذیری شوند و به منظور تحقق مبادلات خود متحمل جریمه (خرید انعطاف‌پذیری و یا کاهش تولید انرژی) گردند.
- از این رو یک چارچوب مبتنی بر محاسبه پوش‌های عملیاتی پویا حاصل از توافق میان اپراتور شبکه توزیع و تولیدکننده‌ها، ضروری می‌باشد. لذا در این مقاله یک چارچوب محاسبه پوش‌های عملیاتی پویا حاصل از توافق میان اپراتور شبکه توزیع و تولیدکننده‌ها ارائه شده است تا تولیدکننده‌ها بتوانند مبادلات همتابه‌همتا انرژی خود را با بیشترین بازده و حفظ قیود فنی شبکه انجام دهند.
- به این ترتیب و با توجه به توضیحات فوق، در جدول (۱)، روش پیشنهادی این مقاله که مدلسازی مبادلات همتابه‌همتا انرژی با در نظر گرفتن پوش‌های عملیاتی پویای حاصل از توافق میان اپراتور شبکه توزیع و تولیدکننده‌ها است، با سایر راهکارهای مدلسازی قیود شبکه در جریان مبادلات همتابه‌همتا انرژی مقایسه شده است.

جدول (۱): مقایسه روش پیشنهادی با سایر روش‌های مبادلات همتابه‌همتا انرژی

مرجع	مدلسازی قیود شبکه	بازار همتابه‌همتا	نحوه اجرای پوش‌های بهره- بردار پویا	
			محاسبه پوش‌های بهره‌برداری پویا	بهره‌برداری پویا
[۱۳]	متمرکز	✓	-	-
[۱۴، ۱۵]	غیرمتمرکز	✓	-	-
[۱۶، ۱۷]	هزینه استفاده از شبکه	✓	-	-
[۲۲، ۲۳]	اعمال محدودیت ثابت	✓	متمرکز	ابلاغ توسط اپراتور شبکه توزیع
[۲۴-۲۶]	پوش‌های بهره‌برداری پویا	✓	متمرکز	ابلاغ توسط اپراتور شبکه توزیع
[۲۷]	پوش‌های بهره‌برداری پویا	✓	متمرکز	ابلاغ توسط اپراتور شبکه توزیع
[۲۸]	پوش‌های بهره‌برداری پویا	✓	غیرمتمرکز	ابلاغ توسط اپراتور شبکه توزیع
روش پیشنهادی	پوش‌های بهره‌برداری پویا	✓	غیرمتمرکز	توافقی میان مجتمع‌های تولید انرژی و اپراتور شبکه توزیع

۴-۱- نوآوری‌های روش پیشنهادی

- در این پژوهش یک چارچوب غیرمتمرکز از مبادلات همتابه‌همتا مربوط به مجتمع‌های تولید انرژی^{۱۵} متشکل از تولیدات خورشیدی و بادی، بارهای ثابت و انعطاف‌پذیر و باتری در شبکه توزیع فعال با در نظر گرفتن قیود فنی و محدودیت‌های شبکه ارائه شده است.
- در این مطالعه برای حفظ محدودیت‌های شبکه توزیع از روش پوش‌های عملیاتی پویا استفاده می‌شود که موجب می‌گردد قیود شبکه در هر پنجره زمانی به روزرسانی شده و از ظرفیت منابع تولیدی بیشترین استفاده انجام بگیرد. در حالت معمول، مدلسازی محدودیت‌های شبکه در مبادلات همتابه‌همتا یا با دخالت یک نهاد سوم مثلاً اپراتور شبکه و یا با اعمال محدودیت‌های ثابت صورت می‌گیرد. اما با محاسبه پوش‌های بهره‌برداری پویا می‌توان به صورت دینامیک محدودیت‌های شبکه مثل آستانه ولتاژ و توان خط را



برای مبادلات همتابه‌همتا وضع نمود که علاوه بر حفظ قیود فنی شبکه در محدوده مجاز، امنیت خصوصی مشارکت‌کنندگان در مبادلات نیز موردتوجه قرار گیرد و همچنین از حداکثر ظرفیت آنها برای مشارکت در بازار نیز استفاده می‌شود.

در پژوهش‌های اخیر که قیود عملیاتی شبکه را با محاسبه پوش‌های بهره‌برداری پویا مدل نموده‌اند، این پوش‌ها به صورت یکطرفه و توسط اپراتور شبکه توزیع محاسبه شده و به مجتمع‌های تولید انرژی ابلاغ می‌شوند. این محدوده‌های بهره‌برداری در برخی موارد منطبق بر شرایط و ترجیحات مجتمع‌های تولید انرژی نیست و موجب می‌شود که در بعضی از پنجره‌های زمانی با توجه به نامعینی ذاتی در تولید و یا مصرف انرژی با مشکل کمبود و یا بیشبود انرژی نسبت به حالت پیش‌برنامه‌ریزی شده مواجه شوند و در نتیجه مشمول دریافت جریمه گردند. اما در روش پیشنهادی، پوش‌های عملیاتی پویا از مذاکره میان اپراتور شبکه توزیع و مجتمع‌های تولید انرژی محاسبه می‌شوند. به این ترتیب برخلاف مطالعات گذشته نقش اپراتور شبکه توزیع در این پژوهش تغییر یافته و به جای ابلاغ محدودیت‌ها به مشترکین به عنوان یک واحد قیمت‌گذار، از طریق مذاکره با ایشان محدودیت‌های فنی شبکه را تعیین می‌کند که در واقع به عنوان یک تنظیم‌گر به ایفای نقش می‌پردازد.

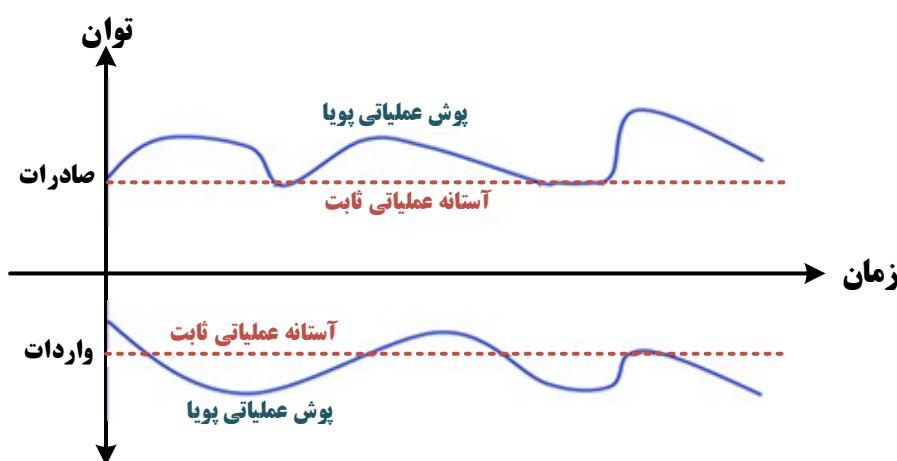
در ادامه نگارش مقاله حاضر، در بخش دوم چارچوب مسئله بهینه‌سازی موردنظر برای افزایش منافع مشارکت‌کنندگان در بازار برق محلی، مبادلات همتابه‌همتا و نیز روش محاسبه پوش‌های عملیاتی پویا توصیف می‌شود. در بخش سوم فرمول‌بندی مسئله برای مشارکت‌کنندگان، اپراتور شبکه توزیع و نیز مدل‌سازی پوش‌های عملیاتی پویا ارائه می‌شود. در بخش چهارم شبیه‌سازی مسئله بر روی یک سیستم آزمایشی پیاده‌سازی شده و نتایج ارائه می‌شوند و در نهایت در بخش پنجم به بیان نتیجه‌گیری پرداخته می‌شود.

۲- چارچوب مسئله

در این بخش ابتدا یک نمای کلی از مفهوم پوش‌های بهره‌برداری پویا ارائه می‌شود. سپس نقش تولیدکنندگان فعال بازار، ریزشک‌ها و اپراتور شبکه توزیع در روش پیشنهادی معرفی شده و چارچوب کلی شرح داده می‌شود.

۲-۱- پوش‌های بهره‌برداری پویا

همانطور که پیشتر گفته شد حد مجاز تزریق توان معمولاً بر مبنای یک آستانه مشخص تعیین می‌شود. اما پوش‌های عملیاتی پویا یک محدوده بهره‌برداری خاص را برای تزریق توان هر یک از تولیدکنندگان در هر بازه زمانی ارائه می‌دهند، بطوریکه که هدف اپراتور شبکه توزیع برای حفظ محدودیت‌های فنی شبکه با اطمینان از اینکه ولتاژها و توان خط در محدوده مجاز هستند را در نظر می‌گیرد.



شکل (۱): پوش‌های عملیاتی پویا (DOE) در مقایسه با آستانه عملیاتی ثابت



معمولا تقاضای توان در نقاطی از شبکه که فاقد تولیدکننده هستند در بازه‌های زمانی مختلف تغییر می‌کند که این امر مشخص کردن دقیق محدوده عملیاتی برای تولیدکنندگان را بسیار دشوار می‌سازد. لذا معمولا یک مقدار آستانه ثابت به عنوان حد مجاز بهره‌برداری برای تولیدکنندگان در نظر گرفته می‌شود [۲۳]. اشکال این طرح این است که تولید کنندگان قادر نخواهند بود از تمام ظرفیت خود در بازار بهره ببرند. همچنین اپراتور شبکه توزیع نیز در بهره‌برداری و مدیریت انرژی و انعطاف‌پذیری شبکه محدود می‌گردد. اما با محاسبه پوش‌های بهره‌برداری پویا، اپراتور شبکه توزیع می‌تواند محدودیت‌های بهره‌برداری مجاز را در هر پنجره زمانی به مجتمع‌های تولید انرژی اختصاص دهد.

در شکل (۱) آستانه بهره‌برداری با استفاده از پوش‌های عملیاتی پویا در مقایسه با محدودسازی با یک آستانه بهره‌برداری ثابت برای یک تولیدکننده محلی نشان داده شده‌است. همانطور که مشخص است یک آستانه بالا و یک آستانه پایین در نظر گرفته شده و با استفاده از پوش‌های بهره‌برداری پویا، ظرفیت خرید و فروش انرژی نسبت به اعمال یک آستانه عملیاتی ثابت افزایش می‌یابد. در این مقاله که بر مبنای بازار روز آینده طرح‌ریزی شده، فرض بر نرمال بودن شرایط بهره‌برداری در پیش‌بینی روز بعد می‌باشد. همچنین پوش‌های بهره‌برداری با توجه به اینکه برای بازار روز بعد محاسبه شده‌اند در بازار بلادرنگ^{۱۶} مجددا به‌روزرسانی نمی‌شوند. اما روش پیشنهادی به ترتیب زیر در برابر بروز شرایط اضطراری در شبکه عمل می‌کند که از دو جنبه قابل بررسی است:

- (۱) چنانچه خطای احتمالی در بهره‌برداری بلادرنگ شبکه ناشی از خطای مجتمع‌های انرژی ناشی از وجود نامعینی باشد، با توجه به اینکه یکی از نوآوری‌های این مقاله، محاسبه پوش‌های بهره‌برداری پویا با در نظر گرفتن نامعینی مجتمع‌های انرژی است، آستانه مجاز بهره‌برداری مجتمع‌ها با توجه به آستانه بهره‌برداری اپراتور شبکه توزیع و با توجه به قیود فنی شبکه محاسبه شده‌است، لذا با توجه به اینکه نامعینی منابع در محاسبه پوش‌های عملیاتی در نظر گرفته شده، خطری متوجه شبکه نمی‌شود.
- (۲) چنانچه خطای احتمالی در بهره‌برداری بلادرنگ شبکه در اثر قطع خطوط، تغییر بار ژنراتورها و ... که ناشی از تغییر در توپولوژی شبکه است، رخ دهد، مسئولیت رفع آن بر عهده اپراتور شبکه توزیع می‌باشد. لازم به ذکر است در این شرایط اپراتور شبکه توزیع به منظور جلوگیری از برهم خوردن برنامه‌ریزی مجتمع‌های انرژی و تحقق مبادلات آنها، بازار دیگری موسوم به انعطاف-پذیری که خاص شرایط بهره‌برداری بلادرنگ است را اجرا می‌کند و از آن طریق کمبودها و بیشبودهای احتمالی را جبران می‌نماید [۲۹].

۲-۲- مبادلات همتابه‌همتای انرژی در روش پیشنهادی

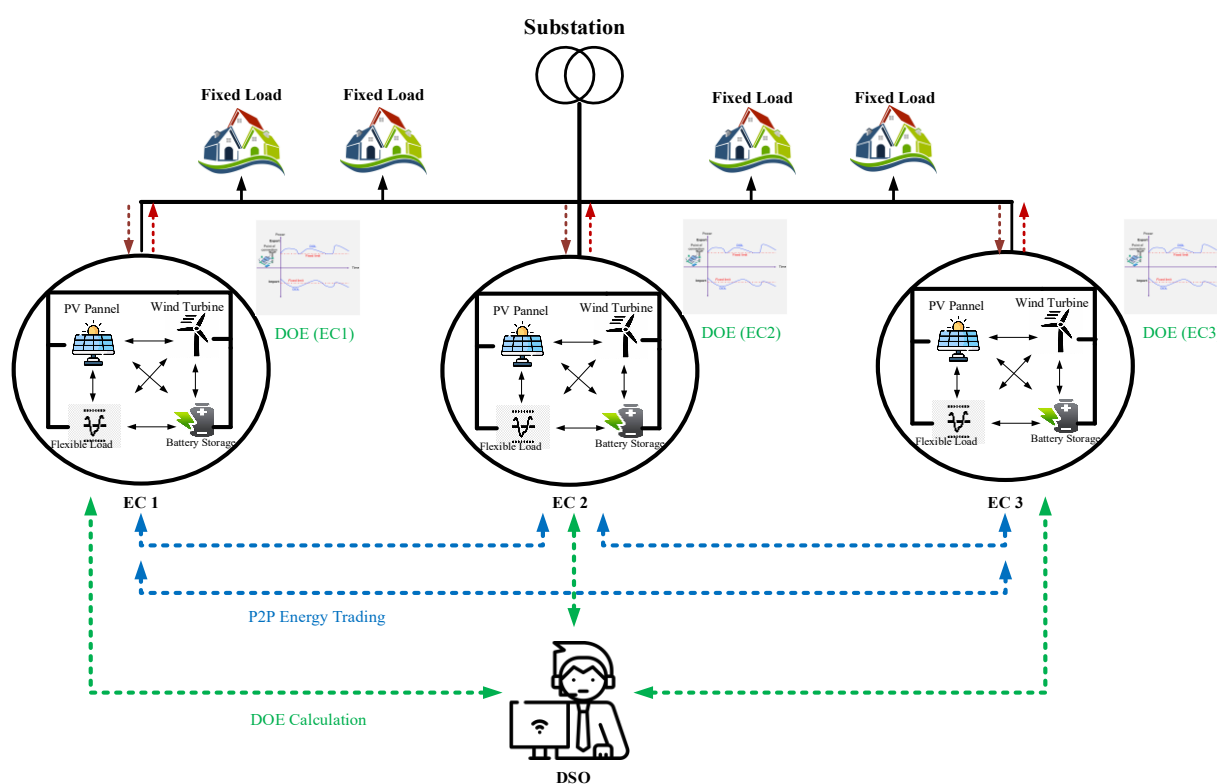
مسئله مبادله همتابه‌همتا در این مقاله شامل مجتمع‌های تولید انرژی و اپراتور شبکه توزیع می‌باشد. مجتمع‌های مستقر در شبکه‌های توزیع شامل سیستم‌های فوتوولتائیک، توربین‌های بادی، سیستم‌های ذخیره انرژی و بارهای ثابت و انعطاف‌پذیر هستند. اهداف آنها به حداکثر رساندن منافع فردی، تحت محدودیت‌های بهره‌برداری است. نقش مهم دیگر در مبادلات همتابه‌همتا را اپراتور شبکه توزیع به عهده دارد که موظف است پوش‌های بهره‌برداری پویا را با توافق تولیدکننده‌ها محاسبه کند که هدف آن کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری شبکه توزیع مطابق الگوی تزریق توان مرتبط با تخصیص پوش‌های بهره‌برداری پویا و نیز حفظ محدودیت‌های فنی شبکه است. در این مقاله فرض می‌شود که اپراتور شبکه توزیع از مقدار معاملات همتابه‌همتا و قیمت آن اطلاعی ندارد.

برای نمونه تبادل انرژی همتابه‌همتای ۳ مجتمع تولید انرژی در شبکه توزیع با در نظر گرفتن محاسبه پوش‌های بهره‌برداری پویا در شکل (۲) نمایش داده شده‌است. همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، مجتمع‌های انرژی با یکدیگر و با شبکه بالادست مبادله همتابه‌همتای انرژی انجام می‌دهند. برای تعیین پوش‌های بهره‌برداری پویا، ابتدا مجتمع‌های تولید انرژی براساس مقدار نامعینی محاسبه شده خود، پوش‌های بهره‌برداری پویای پیشنهادی خود را در هر بازه زمانی محاسبه می‌کنند. اپراتور شبکه توزیع نیز براساس حدود مجاز شبکه و حداکثرسازی ناحیه بهره‌برداری از شبکه، پوش‌های بهره‌برداری پویای موردنظر را در هر بازه زمانی محاسبه می‌کند. سپس پوش‌های بهره‌برداری پویای نهایی از توافق میان اپراتور شبکه توزیع و مجتمع‌های تولید انرژی برای هر بازه زمانی محاسبه می‌شوند. به منظور تشریح چارچوب پیشنهادی و توصیف گام به گام طرح پیشنهادی ذکر نکات زیر لازم است:

- در این مقاله مبادلات همتابه‌همتای انرژی میان مجموعه‌های تولید انرژی در شبکه توزیع فعال انجام می‌گیرد. یک مجتمع انرژی (EC) شامل توربین بادی، سلول خورشیدی، بارهای ثابت و انعطاف‌پذیر و باتری می‌باشد.



- مجتمع‌های انرژی، مبادلات همتابه‌متای انرژی را با هدف کمینه کردن هزینه‌ها و دستیابی به اقتصادی‌ترین پوش‌های بهره‌برداری پویا با در نظر گرفتن نامعینی ذاتی خود برقرار می‌کنند.
- اپراتور شبکه توزیع با هدف حفظ محدودیت‌های فنی شبکه توزیع و بیشینه کردن ناحیه مجاز تزریق توان توسط مجتمع‌های تولید انرژی به منظور افزایش انعطاف‌پذیری خود در بهره‌برداری از شبکه عمل می‌کند.
- مطابق چارچوب پیشنهادی، هر مجتمع انرژی با بررسی داده‌های مربوط به الگوی تولید انرژی تخمینی خود، بهترین تصمیم را در مورد حد بالا و پایین پوش بهره‌برداری مورد نیاز خود می‌گیرد. اپراتور شبکه توزیع نیز حدود مجاز بالا و پایین بهره‌برداری را مشخص می‌کند. سپس مقادیر پوش‌های بهره‌برداری پویا از توافق میان تولیدکنندگان و اپراتور شبکه توزیع محاسبه می‌شود.
- بازار موردنظر از نوع روز بعد فرض می‌شود و بازیگران (اپراتور شبکه توزیع و مجتمع‌های انرژی) از طریق یک بازی همکارانه برای محاسبه پوش‌های بهره‌برداری پویا به توافق می‌رسند.
- قیود معادلات با استفاده از الگوریتم ADMM آزادسازی شده و در توابع هدف جایگذاری می‌شوند و با استفاده از تئوری تعادل نش متغیرهای بازار محاسبه می‌شوند.



شکل (۲): مبادلات همتابه‌متای انرژی میان ۳ مجتمع تولید انرژی با محاسبه پوش‌های بهره‌برداری پویا توافقی با اپراتور شبکه توزیع

۳- فرمول‌بندی مسئله

در این بخش مدل ریاضی مساله بهینه‌سازی فرمول‌بندی می‌شود. ابتدا تابع هدف جهت کمینه‌سازی هزینه‌های تولید مجتمع‌های تولید انرژی تشریح می‌گردد. سپس نحوه پیاده‌سازی مبادلات همتابه‌متا میان مجتمع‌ها ارائه می‌گردد. در ادامه معادلات مربوط به اپراتور شبکه توزیع ارائه می‌گردد. سپس نحوه محاسبه پوش‌های بهره‌برداری پویا حاصل از توافق میان اپراتور شبکه توزیع و مجتمع‌های انرژی، ارائه می‌شود. در نهایت نحوه حل مساله بهینه‌سازی با الگوریتم ADMM توصیف می‌گردد. شایان ذکر است توصیف پارامترها، شاخص‌ها و متغیرهای استفاده شده در فرمول‌بندی مسئله، در جدول (۲) ارائه شده‌است.



۳-۱- مدل‌سازی ریاضی مجتمع‌های تولید انرژی

در رابطه (۱)، تابع هدف مجتمع‌های تولید انرژی جهت کمینه‌سازی هزینه‌های تولید ارائه شده‌است که از پنج جمله تشکیل می‌شود. در این رابطه $t \in T$ بیانگر هر بازه زمانی یک ساعته و $d \in D$ نشان دهنده بارهای توزیع‌پذیر می‌باشد [۳۰].

$$\min J_c = \underbrace{\sum_{d,t} \gamma_{d,t}^D \cdot P_{d,t}^{D,EC}}_{\text{Term 1}} + \underbrace{\sum_{nd,t} \gamma_{nd,t}^{ND} \cdot (P_{nd,t}^{ND,EC} - \tilde{P}_{nd,t}^{ND,EC})^2}_{\text{Term 2}} + \underbrace{\sum_{fl,t} \gamma_{fl,t}^{FL} \cdot (P_{fl,t}^{FL,EC} - \tilde{P}_{fl,t}^{FL,EC})^2}_{\text{Term 3}} + \underbrace{\sum_{s,t} \gamma_{s,t}^{Deg} \cdot P_{s,t}^{Bat,EC}}_{\text{Term 4}} + \underbrace{\sum_t \gamma_t^{ex} \cdot P_t^{EC,ex}}_{\text{Term 5}} \quad (1)$$

جدول (۲): واژه‌نامه

شاخص‌ها			
i, j	شاخص شینه‌های شبکه توزیع	FL	شاخص بارهای انعطاف‌پذیر
C, C'	شاخص کلی مجتمع‌ها	D	شاخص بارهای توزیع‌پذیر
EC, EC'	شاخص مجتمع‌های انرژی	ND	شاخص بارهای آرایش‌ناپذیر
T	شاخص زمان	S	شاخص سیستم‌های ذخیره انرژی
پارامترها			
$\gamma_{d,t}^D$	هزینه حاشیه‌ای بار آرایش‌پذیر	$P_{d,t}^{D,EC}$	توان بار حقیقی واحد آرایش‌پذیر
$\gamma_{nd,t}^{ND}$	هزینه انحراف از پیش‌بینی بار آرایش‌ناپذیر	$P_{nd,t}^{ND,EC}$	توان بار حقیقی واحد آرایش‌ناپذیر
$\gamma_{fl,t}^{FL}$	هزینه ناراحتی انعطاف‌پذیر	$P_{fl,t}^{FL,EC}$	توان حقیقی بار انعطاف‌پذیر
$\gamma_{s,t}^{Deg}$	هزینه استهلاک باتری	$P_{s,t}^{Bat,EC}$	توان خروجی باتری
γ_t^{ex}	قیمت خرید توان از شبکه بالادست	$P_t^{EC,ex}$	توان حقیقی مبادله شده با شبکه بالادست
$\eta_{s,t}^{dch}$	ضریب بهره‌وری شارژ باتری	$E_{s,t}$	انرژی باتری
$\eta_{s,t}^{ch}$	ضریب بهره‌وری دشارژ باتری	$P_{s,t}^{ch}$	توان شارژ باتری
$P_{c,t}^{inj}$	توان حقیقی تزریقی کل	$P_{s,t}^{dch}$	توان دشارژ باتری
$Q_{c,t}^{inj}$	توان راکتیو تزریقی کل	pf_{fl}	ضریب توان بار انعطاف‌پذیر
$\tilde{\pi}_{c,t}^P, \pi_{c,t}^P, \tilde{\pi}_{c,t}^Q, \pi_{c,t}^Q$	ضرایب لاگرانژ	ε	شرط خاتمه
$\tilde{\alpha}_{i,t}, \alpha_{i,t}, \tilde{\beta}_{i,t}, \beta_{i,t}$		Θ^P, Δ, Φ Ψ^q, Θ^q, Ψ^p	ضرایب جریمه
δ	سطح اطمینان مجتمع‌های انرژی	$r_{i,j}, x_{i,j}$	مقاومت و راکتانس بین دو شینه i و j
متغیرها			
$\tilde{P}_{nd,t}^{ND,EC}$	توان خروجی پیش‌بینی شده واحد آرایش‌ناپذیر	$\tilde{P}_{i,t}^{DSO}, P_{c,t}^{DSO}$	حد بالا و پایین توان حقیقی DSO
$P_{c,c',t}^{tr}, P_{c',c,t}^{tr}$	توان‌های حقیقی توافقی در مبادلات هم‌تابه‌همتا	$\tilde{Q}_{i,t}^{DSO}, Q_{i,t}^{DSO}$	حد بالا و پایین توان راکتیو DSO
$Q_{c,c',t}^{tr}, Q_{c',c,t}^{tr}$	توان‌های راکتیو توافقی در مبادلات هم‌تابه‌همتا	$\underline{U}_i, \bar{U}_i$	حد پایین و بالای ولتاژ شینه‌ها
$P_{c,t}^{ec}$ و $\tilde{P}_{c,t}^{ec}$	حد بالا و پایین توان حقیقی مجتمع انرژی	$\bar{P}_{nd}^{ND}, P_{nd}^{ND}$	حداقل و حداکثر توان واحد آرایش‌ناپذیر
$\underline{Q}_{c,t}$ و $\bar{Q}_{c,t}$	حد بالا و پایین توان راکتیو مجتمع انرژی	$\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{x}$	حد بالا و پایین بردارهای متغیر متناظر با توان

در رابطه (۱)، $\gamma_{d,t}^D$ هزینه حاشیه‌ای واحد آرایش‌پذیر d در ساعت t را برای مجتمع انرژی EC نشان می‌دهد و $P_{d,t}^{D,EC}$ نشانگر مقدار توان حقیقی تولیدی واحد آرایش‌پذیر d در ساعت t است. $\gamma_{nd,t}^{ND}$ ضریب هزینه انحراف از مقدار خروجی پیش‌بینی شده واحد





آرایش ناپذیر nd است و $P_{nd,t}^{ND,EC}$ نشانگر مقدار توان حقیقی خروجی واحد آرایش ناپذیر nd در ساعت t است. $\tilde{P}_{nd,t}^{ND,EC}$ نیز مقدار توان خروجی پیش‌بینی شده توسط واحدهای آرایش ناپذیر در زمان t است. $\gamma_{l,t}^{FL}$ هزینه ناراحتی^{۱۷} بار انعطاف پذیر fl در ساعت t است. $P_{fl,t}^{FL,EC}$ توان حقیقی مصرفی بار انعطاف‌پذیر fl در ساعت t است. $\tilde{P}_{fl,t}^{FL,EC}$ نیز مقدار توان مصرفی برنامه‌ریزی‌شده بار انعطاف‌پذیر fl در زمان t است. $\gamma_{s,t}^{Deg}$ هزینه استهلاک باتری در ساعت t است و $P_{s,t}^{Bat,EC}$ توان خروجی باتری مجتمع انرژی EC در ساعت t است. جمله پنجم تابع هدف بیانگر هزینه مبادله انرژی توسط مجتمع انرژی با شبکه توزیع است. در این جمله γ_t^{ex} قیمت انرژی شبکه بالادست (زمان استفاده) و $P_t^{EC,ex}$ توان حقیقی مبادله شده مجتمع‌های انرژی با شبکه است. روابط (۲) تا (۱۵) محدودیت‌های مسئله بهینه‌سازی مجتمع‌های انرژی را بیان می‌کنند.

$$\underline{P}_d^{D,EC} \leq P_{d,t}^{D,EC} \leq \bar{P}_d^{D,EC} \quad (2)$$

$$\underline{Q}_d^{EC} \leq Q_{d,t}^{D,EC} \leq \bar{Q}_d^{EC} \quad (3)$$

$$-P_d^R \leq P_{d,t}^{D,EC} - P_{d,t-1}^{D,EC} \leq P_d^R \quad \forall d, t > 1 \quad (4)$$

$$0 \leq P_{nd,t}^{ND,EC} \leq \bar{P}_{nd,t}^{ND,EC} \quad (5)$$

$$\underline{P}_{fl}^{FL} \leq P_{fl,t}^{FL,EC} \leq \bar{P}_{fl}^{FL} \quad (6)$$

$$Q_{fl,t}^{FL,C} = P_{fl,t}^{FL,C} \sqrt{1 - pf_{fl}^2} / pf_{fl} \quad (7)$$

$$\sum_t P_{fl,t}^{FL,EC} \geq E_l^{min} \quad \forall fl \quad (8)$$

$$-P_{fl}^R \leq P_{fl,t}^{FL,EC} - P_{fl,t-1}^{FL,EC} \leq P_{fl}^R \quad (9)$$

$$P_{s,t}^{Bat,EC} = P_{s,t}^{dch} - P_{s,t}^{ch} \quad \forall s \in S \quad (10)$$

$$\underline{P}_s^{ch} \leq P_{s,t}^{ch} \leq \bar{P}_s^{ch} \quad (11)$$

$$\underline{P}_s^{dch} \leq P_{s,t}^{dch} \leq \bar{P}_s^{dch} \quad (12)$$

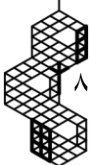
$$E_{s,t} = E_{s,t-1} + \eta_s^{ch} \cdot P_{s,t}^{ch} - \frac{P_{s,t}^{dch}}{\eta_s^{dch}} \quad (13)$$

$$\underline{E}_s \leq E_{s,t} \leq \bar{E}_s \quad (14)$$

$$0 \leq P_t^{EC,ex} \leq \bar{P}^{EC,ex} \quad (15)$$

روابط (۲) و (۳)، به ترتیب حدود پایین و بالای توان حقیقی و راکتیو واحد آرایش‌پذیر d را نمایش می‌دهند. شیب پایین و بالای توان حقیقی واحد آرایش‌پذیر d به وسیله قید رابطه (۴) مشخص می‌گردد. محدودیت‌های توان برنامه‌ریزی شده واحد آرایش‌ناپذیر nd نیز توسط رابطه (۵) مشخص می‌شود. رابطه (۶)، حد پایین و بالای توان حقیقی و قید (۷) رابطه بین توان‌های اکتیو و راکتیو بار انعطاف‌پذیر fl که در این مطالعه از دسته ضریب توان ثابت فرض می‌شوند را برای هر مجتمع انرژی مشخص می‌کند. رابطه (۸) حداقل انرژی مصرفی بارهای انعطاف‌پذیر را نشان می‌دهد. رابطه (۹) شیب پایین و بالای تغییرات توان حقیقی بارهای انعطاف‌پذیر را مشخص می‌کند. در رابطه (۱۰) توان باتری هر مجتمع انرژی در زمان t مدل شده است. روابط (۱۱) و (۱۲) محدوده شارژ و دشارژ باتری‌ها را بیان می‌کنند. در رابطه (۱۳) نحوه محاسبه انرژی در هر زمان t به نمایش در آمده است.

در این رابطه η_s^{ch} و η_s^{dch} به ترتیب ضریب بهره‌وری شارژ و دشارژ باتری‌ها هستند. رابطه (۱۴) نیز محدوده مجاز انرژی ذخیره شده در باتری‌ها را مشخص می‌کند. محدودیت توان حقیقی خریداری شده توسط مجتمع‌های انرژی از شبکه بالادست نیز در رابطه (۱۵) ارائه شده است.





بعد از فرمول‌بندی اجزای هر مجتمع انرژی و مشخص کردن محدوده‌های مجاز بهره‌برداری آنها، فرمول‌بندی تبادل توان مجتمع‌ها و محدودیت‌های مرتبط با آنها در ادامه ارائه می‌شود.

۳-۲- مدل‌سازی مبادلات همتابه‌های مجتمع‌های تولید انرژی

پس از مدل‌سازی ریاضی هر مجتمع تولید انرژی، در این بخش به مدل‌سازی مبادلات همتابه‌ها و توافق هر مجتمع انرژی EC با اپراتور شبکه توزیع DSO می‌پردازیم. در رابطه (۱۶)، $P_{c,t}^{inj}$ توان حقیقی تزریقی کل مجتمع‌های انرژی را در زمان t نمایش می‌دهد که از مجموع توان حقیقی بارهای توزیع‌پذیر، توزیع‌ناپذیر و باتری‌ها با کسر توان حقیقی انعطاف‌پذیر همه EC ها محاسبه می‌شود. در رابطه (۱۷) نیز $Q_{c,t}^{inj}$ توان راکتیو تزریقی کل مجتمع‌های انرژی در زمان t را نمایش می‌دهد [۱۵].

$$\sum_{\substack{d \in D \\ t \in T}} P_{d,t}^{D,EC} + \sum_{\substack{nd \in ND \\ t \in T}} P_{nd,t}^{ND,EC} + \sum_{s \in S} P_{s,t}^{Bat,EC} - \sum_{\substack{fl \in FL \\ t \in T}} P_{fl,t}^{FL,C} = P_{c,t}^{inj} \quad (16)$$

$$\sum_d Q_{d,t}^{D,EC} - \sum_{fl} Q_{fl,t}^{FL,EC} = Q_{c,t}^{inj} \quad (17)$$

$$P_{EC,t}^{inj} = \sum_{EC' \in v} P_{EC,EC',t}^{tr} \quad (18)$$

$$P_{c,c',t}^{tr} + P_{c',c,t}^{tr} = 0 : (\lambda_{c,c',t}) \quad (19)$$

$$Q_{c,c',t}^{tr} + Q_{c',c,t}^{tr} = 0 : (\mu_{c,c',t}) \quad (20)$$

در رابطه (۱۸)، EC' نشانگر مجتمع تولید انرژی در همسایگی مجتمع انرژی EC می‌باشد که با آن به تبادل انرژی با نماد اختصاری tr می‌پردازد و W نشانگر تمامی مجموعه‌های تولید انرژی است. توان تزریقی مبادله شده از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود. مطابق روابط (۱۹) و (۲۰)، توان حقیقی و راکتیو مبادله شده میان هر EC و EC' در زمان t و قیمت توافقی به ترتیب $\lambda_{c,c',t}$ و $\mu_{c,c',t}$ می‌بایست برابر باشد. در رابطه (۱۹)، $P_{c,c',t}^{tr}$ و $P_{c',c,t}^{tr}$ به ترتیب توان‌های حقیقی توافقی در مبادلات همتابه‌ها میان مجتمع‌های انرژی EC و EC' در زمان t می‌باشند و در رابطه (۲۰) نیز $Q_{c,c',t}^{tr}$ و $Q_{c',c,t}^{tr}$ به ترتیب توان‌های راکتیو توافقی در مبادلات همتابه‌ها میان مجتمع‌های انرژی EC و EC' در زمان t هستند. در این روابط $c \in EC$ و $c' \in EC'$ می‌باشند.

$$P_{c,t} \leq P_{c,t}^{inj} \leq \tilde{P}_{c,t} \quad (21)$$

$$Q_{c,t} \leq Q_{c,t}^{inj} \leq \tilde{Q}_{c,t} \quad (22)$$

$$\tilde{P}_{c,t} = \tilde{P}_{i,t}^{DSO} \cdot IN_c^i : (\tilde{\pi}_{c,t}^p) \quad (23)$$

$$P_{c,t} = P_{c,t}^{DSO} \cdot IN_c^i : (\pi_{c,t}^p) \quad (24)$$

$$\tilde{Q}_{c,t} = \tilde{Q}_{i,t}^{DSO} \cdot IN_c^i : (\tilde{\pi}_{c,t}^Q) \quad (25)$$

$$Q_{c,t} = Q_{i,t}^{DSO} \cdot IN_c^i : (\pi_{c,t}^Q) \quad (26)$$

روابط (۲۱) و (۲۲)، محدوده مجاز توان‌های حقیقی و راکتیو تزریق شده هر EC را در زمان t نشان می‌دهند. این محدوده‌ها همان پوش‌های بهره‌برداری پویا می‌باشند که می‌بایست از توافق با اپراتور شبکه توزیع حاصل شوند. روابط (۲۳) تا (۲۶)، نحوه محاسبه پوش‌های بهره‌برداری پویای موردنظر مجتمع‌های انرژی که مورد توافق اپراتور شبکه توزیع نیز می‌باشند را نشان می‌دهند. با توجه به اینکه حل مسائل و بهینه‌سازی با الگوریتم ADMM انجام می‌شود که توضیح کامل آن در بخش ۳-۵ ارائه شده و این الگوریتم دارای ضرایب لاگرانژ برای بهینه‌سازی است، در محاسبه پوش‌های بهره‌برداری پویا با ضرایب لاگرانژ متناظر الگوریتم ADMM، $\tilde{\pi}_{c,t}^p$ و $\tilde{\pi}_{c,t}^Q$ به ترتیب ضرایب لاگرانژ متناظر با توافق مجتمع‌های انرژی و اپراتور شبکه توزیع بر سر حد بالا و پایین توان حقیقی و $\pi_{c,t}^p$ و $\pi_{c,t}^Q$ به ترتیب ضرایب لاگرانژ متناظر برای حدود بالا و پایین توان راکتیو می‌باشند. $\tilde{P}_{i,t}^{DSO}$ و $P_{i,t}^{DSO}$ به ترتیب حد بالا و پایین توان حقیقی و





$\tilde{Q}_{i,t}^{DSO}$ و $Q_{i,t}^{DSO}$ به ترتیب حد بالا و پایین توان راکتیو موردنظر اپراتور شبکه توزیع، به منظور حفظ محدودیت های فنی شبکه می باشد. IN_c^i نیز ماتریس داخلی است که اتصال مجتمع های انرژی به گره های شبکه را مشخص می کند.

۳-۳- مدلسازی معادلات اپراتور شبکه توزیع

در این بخش روابط مربوط به محاسبه تابع هدف اپراتور شبکه توزیع ارائه می شود. همچنین مقدار پوش های بهره برداری پویای موردنظر اپراتور شبکه که از توافق با مجتمع های انرژی محاسبه می شوند برای تنظیم محدوده مجاز بهره برداری شبکه و تحقق قیود فنی محاسبه می شوند. در رابطه (۲۷)، نقش شینه شبکه و Ω سناریو را نشان می دهد. رابطه (۲۷)، تابع هدف اپراتور شبکه توزیع با هدف بیشینه کردن محدوده توان های حقیقی و راکتیو شبکه به منظور بهره برداری منعطف تر با حفظ پایداری شبکه را نشان می دهد.

$$\text{Max} \sum_{i \in \Omega_r} \left[(\tilde{P}_{i,t}^{DSO} - P_{i,t}^{DSO}) + (\tilde{Q}_{i,t}^{DSO} - Q_{i,t}^{DSO}) \right] \quad (27)$$

در رابطه (۲۷)، $\tilde{P}_{i,t}^{DSO}$ و $P_{i,t}^{DSO}$ به ترتیب حد بالا و پایین توان حقیقی اپراتور شبکه توزیع در زمان t در شینه i را نشان می دهند، $\tilde{Q}_{i,t}^{DSO}$ و $Q_{i,t}^{DSO}$ نیز به ترتیب حد بالا و پایین توان راکتیو اپراتور شبکه توزیع در زمان t در شینه i را نمایش می دهند. در ادامه روابط (۲۸) تا (۳۴)، قیود معادلات اپراتور شبکه توزیع را نمایش می دهند [۱۵].

$$U_{k,i,t} - U_{k,j,t} = 2(P_{k,i,j,t} \cdot r_{i,j} + Q_{k,i,j,t} \cdot x_{i,j}) - J_{k,i,j,t} Z_{i,j}^2 \quad (28)$$

$$J_{k,i,j,t} U_{k,i,t} \geq P_{k,i,j,t}^2 + Q_{k,i,j,t}^2 \quad (29)$$

$$U_i \leq U_{k,i,t} \leq \bar{U}_i \quad (30)$$

$$P_{k,i,j,t}^2 + Q_{k,i,j,t}^2 \leq \bar{S}_{i,j,t} \quad (31)$$

$$U_{k,i=1,t} = V_{ref}^2 \quad (32)$$

$$P_{k,i,t}^{DSO} + P_{k,i=1,t}^{ref} + P_{k,j,i,t} - r_{j,i} J_{k,j,i,t} - P_{k,i,j,t} = 0 \quad (33)$$

$$Q_{k,i,t}^{DSO} + Q_{k,i=1,t}^{ref} + Q_{k,j,i,t} - x_{j,i} J_{k,j,i,t} - Q_{k,i,j,t} = 0 \quad (34)$$

روابط (۲۸) و (۲۹)، تعادل ولتاژ را نمایش می دهند، k شمارنده حالت بهره برداری (پوش بالا و یا پوش پایین) و $U_{k,i,t}$ ولتاژ شینه i در زمان t است. $U_{k,j,t}$ نیز ولتاژ شینه j در زمان t است. $P_{k,i,j,t}$ توان حقیقی جاری بین دو شینه i و j در زمان t و $Q_{k,i,j,t}$ نیز توان راکتیو جاری بین دو شینه i و j در زمان t می باشد. $r_{i,j}$ و $x_{i,j}$ نیز به ترتیب مقاومت و راکتانس بین دو شینه i و j می باشند. Z نیز امپدانس شاخه بین دو شینه i و j است. در رابطه (۳۰) نیز U_i و $\bar{U}_i$ به ترتیب حد پایین و بالای ولتاژ در هر شینه i را نمایش می دهند.

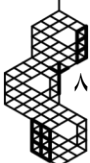
در رابطه (۳۱)، $P_{k,i,j,t}^2$ ، $Q_{k,i,j,t}^2$ و $\bar{S}_{i,j,t}$ به ترتیب مجذور توان حقیقی، مجذور توان راکتیو و حد بالای قدرت بین شینه های i و j در هر دور مذاکره در زمان t را نمایش می دهند. در رابطه (۳۲)، $U_{k,i=1,t}$ ولتاژ مرجع در شینه اول و در زمان t را نشان می دهد. در روابط (۳۳) و (۳۴)، تعادل توان های حقیقی و راکتیو اپراتور شبکه توزیع بین شینه های i و j در هر دور مذاکره در زمان t را نسبت به مقادیر مرجع مربوطه نمایش می دهند.

$$\tilde{P}_{i,t}^{DSO} = \tilde{P}_{c,t} \cdot IN_c^i \quad (\tilde{\alpha}_{i,t}) \quad (35)$$

$$P_{i,t}^{DSO} = P_{c,t} \cdot IN_c^i \quad (\alpha_{i,t}) \quad (36)$$

$$\tilde{Q}_{i,t}^{DSO} = \tilde{Q}_{c,t} \cdot IN_c^i \quad (\tilde{\beta}_{i,t}) \quad (37)$$

$$Q_{i,t}^{DSO} = Q_{c,t} \cdot IN_c^i \quad (\beta_{i,t}) \quad (38)$$





همچون روابط (۲۳) تا (۲۶) در بخش مدلسازی روابط مجتمع‌های انرژی در مبادلات همتابه‌های که به منظور محاسبه پوش‌های بهره‌برداری پویا با توافق اپراتور شبکه توزیع ارائه شده‌اند، مطابق روابط (۳۵) تا (۳۸)، محدوده‌های حداقل و حداکثر توان‌های حقیقی و راکتیو اپراتور شبکه توزیع می‌بایست با توافق مجتمع‌های انرژی محاسبه شود. در این حالت ضرایب لاگرانژ الگوریتم ADMM، $\tilde{\alpha}_{i,t}$ و $\tilde{\alpha}_{c,t}$ به ترتیب برای حد بالا و پایین توان حقیقی و همچنین $\tilde{\beta}_{i,t}$ و $\tilde{\beta}_{c,t}$ برای حدود بالا و پایین توان راکتیو می‌باشند. $\tilde{P}_{c,t}$ و $\tilde{P}_{i,t}$ به ترتیب حد بالا و پایین توان حقیقی و $\tilde{Q}_{c,t}$ و $\tilde{Q}_{i,t}$ نیز به ترتیب حد بالا و پایین توان راکتیو توان هر مجتمع انرژی می‌باشند که برای توافق با اپراتور شبکه توزیع ارائه می‌شوند.

۳-۴- محاسبه پوش‌های بهره‌برداری پویا

در این مقاله به منظور محاسبه پوش‌های بهره‌برداری پویا، از روش شانس محدود استفاده می‌شود. در این روش، تولید توان توسط واحدهای توزیع ناپذیر (خورشیدی و بادی) حول مقادیر پیش‌بینی شده متغیر است. اما می‌توان بازه آن را به صورت روابط (۳۹) و (۴۰) مدلسازی نمود:

$$P_r \{P_{nd,t}^{ND} \leq \bar{P}_{nd,t}^{ND}\} \geq \delta \quad (39)$$

$$P_r \{P_{nd,t}^{ND} \geq \underline{P}_{nd,t}^{ND}\} \geq \delta \quad (40)$$

در روابط بالا، δ سطح اطمینان موردنظر مجتمع‌های انرژی را نشان می‌دهد. به منظور تبدیل قیود شانس فوق به قیود معین طبق مرجع [۳۱] عمل می‌شود. مطابق این مرجع، $\bar{P}_{nd,t}^{ND}$ و $\underline{P}_{nd,t}^{ND}$ با استفاده از معکوس تابع تجمعی و با استفاده از روابط (۴۱) و (۴۲) محاسبه می‌شوند.

$$\bar{P}_{nd,t}^{ND} = (\psi^{ND})^{-1}(\delta) \quad (41)$$

$$\underline{P}_{nd,t}^{ND} = (\psi^{ND})^{-1}(1-\delta) \quad (42)$$

با توجه به اینکه در این مطالعه از تابع توزیع نرمال برای مدلسازی عدم قطعیت واحدهای آرایش‌ناپذیر استفاده می‌شود، تابع معکوس تجمعی در توزیع نرمال به منظور تعیین مقادیر حداقل و حداکثر $P_{nd,t}^{ND}$ با استفاده از رابطه (۴۳) محاسبه می‌شود.

$$(\psi^{ND})^{-1}(\delta) = e + \frac{\delta\sqrt{3}}{\pi} \ln \frac{\delta}{1-\delta} \quad (43)$$

به این ترتیب ناحیه پیش‌بینی شده توان خروجی از واحدهای تجدیدناپذیر $(P_{nd,t}^{ND})$ از رابطه (۴۴) محاسبه می‌شود:

$$P_{nd,t}^{ND} = P_{nd,t}^{avg} - \frac{\delta_{nd,t}^{ND}\sqrt{3}}{\pi} \ln \left(\frac{\delta}{1-\delta} \right) \leq P_{nd,t}^{ND} \leq P_{nd,t}^{avg} + \frac{\delta_{nd,t}^{ND}\sqrt{3}}{\pi} \ln \left(\frac{\delta}{1-\delta} \right) = \bar{P}_{nd,t}^{ND} \quad (44)$$

با توجه به حضور منابع مختلف در مجتمع‌های انرژی، سازوکاری باید در نظر گرفته شود که پوش‌های بهره‌برداری که برابند محدوده‌های بالا و پایین منابع موجود در مجتمع‌های انرژی هستند، محاسبه شوند. برای این منظور دو دسته متغیر متناظر با توان هر کدام از منابع موجود در مجتمع‌های انرژی در نظر گرفته می‌شوند که بیانگر حدود بالا و پایین توان منابع موجود در مجتمع‌های انرژی هستند. این متغیرها به صورت $\mathbf{x}$ و $\mathbf{x}$ نشان داده می‌شوند و به ترتیب بیانگر حدود بالا و پایین بردار $\mathbf{x}$ در رابطه (۴۵) هستند که نشانگر متغیرهای تصمیم‌گیری مجتمع‌های انرژی است. با این وصف، پوش‌های بهره‌برداری از رابطه (۴۶) محاسبه می‌شود:

$$\mathbf{x} = [P_{d,t}^{D,EC}, Q_{d,t}^{D,EC}, P_{nd,t}^{ND}, P_{fl,t}^{FL,C}, Q_{fl,t}^{FL,C}, P_{s,t}^{ch}, P_{s,t}^{dch}, P_{s,t}^{Bat,EC}, E_{s,t}, P_t^{EC,ex}, Q_t^{EC,ex}] \quad (45)$$

$$\mathbb{I} = [P_{d,t}^{D,EC}, \tilde{P}_{d,t}^{D,EC}] \times [Q_{d,t}^{D,EC}, \tilde{Q}_{d,t}^{D,EC}] \times \dots \times [Q_t^{EC,ex}, \tilde{Q}_t^{EC,ex}] \quad (46)$$

در رابطه (۴۶)، $\mathbb{I}$ پوش بهره‌برداری پویا است و از حاصلضرب حد بالا و پایین متغیرهای تصمیم‌گیری مجتمع‌های انرژی محاسبه می‌شود. مجتمع‌های انرژی باید فضای $\mathbb{I}$ را تا حد امکان بسط دهند. برای این منظور، بردار متغیرهای $\mathbf{x}$ و $\mathbf{x}$ باید در روابط (۲) الی (۱۵) صدق کنند.





۳-۵- روش و الگوریتم حل مسئله بهینه سازی

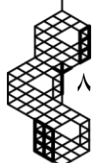
با توجه به استقلال مجتمع‌های انرژی نسبت به یکدیگر و اپراتور شبکه توزیع، مسئله بهینه‌سازی شرکت‌کنندگان بازار باید به صورت مستقل و توزیع شده حل شود. اما قیود متقابل بین آن‌ها امکان حل مستقل مسائل بهینه‌سازی را به مجتمع‌های انرژی و بهره‌بردار نمی‌دهد. لذا با استفاده از روش ADMM و با توجه به مراجع [۳۲، ۳۳] مسئله در قالب روابط زیر تجزیه می‌شود. در این تکنیک تمام قیود متقابل با ضرایب دوگان متناظرشان آزادسازی می‌شوند. در این صورت، تابع هدف مجتمع‌های انرژی به صورت رابطه (۴۷) بازنویسی می‌شود:

$$\begin{aligned}
 \min J_c = & \underbrace{\sum_{d,t} \gamma_{d,t}^{EC} \cdot P_{d,t}^{D,EC}}_{\text{first term}} + \underbrace{\sum_{nd,t} \gamma_{nd,t}^{EC} \cdot (P_{nd,t}^{ND,EC} - \tilde{P}_{nd,t}^{ND,EC})^2}_{\text{second term}} + \underbrace{\sum_{l,t} \gamma_{l,t}^{EC} \cdot (P_{l,t}^{FL,EC} - \tilde{P}_{l,t}^{FL,EC})^2}_{\text{third term}} \\
 & + \underbrace{\sum_{s,t} \gamma_{Deg,t} \cdot P_{s,t}^{Bat,EC}}_{\text{fourth term}} + \underbrace{\sum_t \gamma_t^{ex} \cdot P_t^{EC,ex}}_{\text{Term 5}} \\
 & + \sum_{c',t} (P_{c',t}^{tr} + P_{c',t}^{tr*}) \lambda_{c',t} + \frac{\Phi}{2} (P_{c',t}^{tr} + P_{c',t}^{tr*})^2 \\
 & + \sum_{c',t} (Q_{c',t}^{tr} + Q_{c',t}^{tr*}) \mu_{c',t} + \frac{\Delta}{2} (Q_{c',t}^{tr} + Q_{c',t}^{tr*})^2 \\
 & + \sum_{i,t} IN_c^i \left[(\tilde{P}_{c,t} - \tilde{P}_{i,t}^{DSO*}) \tilde{\pi}_{i,t}^p + \frac{\Theta^p}{2} (\tilde{P}_{c,t} - \tilde{P}_{i,t}^{DSO*})^2 \right] \\
 & + \sum_{i,t} IN_c^i \left[(P_{c,t} - P_{i,t}^{DSO*}) \pi_{i,t}^p + \frac{\Psi^p}{2} (P_{c,t} - P_{i,t}^{DSO*})^2 \right] \\
 & + \sum_{i,t} IN_c^i \left[(\tilde{Q}_{c,t} - \tilde{Q}_{i,t}^{DSO*}) \tilde{\pi}_{i,t}^q + \frac{\Theta^q}{2} (\tilde{Q}_{c,t} - \tilde{Q}_{i,t}^{DSO*})^2 \right] \\
 & + \sum_{i,t} IN_c^i \left[(Q_{c,t} - Q_{i,t}^{DSO*}) \pi_{i,t}^q + \frac{\Psi^q}{2} (Q_{c,t} - Q_{i,t}^{DSO*})^2 \right]
 \end{aligned} \quad (47)$$

در رابطه (۴۷)، پس از هر مرحله بهینه‌سازی، مقدار محاسبه شده جدید برای هر متغیر با اندیس * مشخص می‌شود مادامی که شرط خاتمه الگوریتم بهینه‌سازی حاصل شود. Φ ، Δ ، Θ^p ، Ψ^p ، Θ^q و Ψ^q ضرایب جریمه الگوریتم ADMM می‌باشند. به طور مشابه، شکل آزادسازی شده مسئله اپراتور شبکه توزیع نیز در قالب رابطه (۴۸) نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned}
 \min \sum_{i \in \Omega_p} & \left[-(\tilde{P}_{i,t}^{DSO} - P_{i,t}^{DSO}) - (\tilde{Q}_{i,t}^{DSO} - Q_{i,t}^{DSO}) \right] \\
 & + \sum_{c,t} IN_c^i \left[(\tilde{P}_{i,t}^{DSO} - \tilde{P}_{c,t}^*) \tilde{\alpha}_{i,t}^p + \frac{\Theta^p}{2} (\tilde{P}_{i,t}^{DSO} - \tilde{P}_{c,t}^*)^2 \right] \\
 & + \sum_{c,t} IN_c^i \left[(P_{i,t}^{DSO} - P_{c,t}^*) \alpha_{i,t}^p + \frac{\Psi^p}{2} (P_{i,t}^{DSO} - P_{c,t}^*)^2 \right] \\
 & + \sum_{c,t} IN_c^i \left[(\tilde{Q}_{i,t}^{DSO} - \tilde{Q}_{c,t}^*) \tilde{\beta}_{i,t}^q + \frac{\Theta^q}{2} (\tilde{Q}_{i,t}^{DSO} - \tilde{Q}_{c,t}^*)^2 \right] \\
 & + \sum_{c,t} IN_c^i \left[(Q_{i,t}^{DSO} - Q_{c,t}^*) \beta_{i,t}^q + \frac{\Psi^q}{2} (Q_{i,t}^{DSO} - Q_{c,t}^*)^2 \right]
 \end{aligned} \quad (48)$$

به روزرسانی ضرایب دوگان مسئله بهینه‌سازی مجتمع‌های انرژی در جهت کاهش گرادیان تابع هدف نسبت به متغیرها صورت می‌گیرد که در روابط (۴۹) تا (۵۴) ارائه شده است.





$$\lambda_{c,c',t}^{new} = \lambda_{c,c',t}^{old} + \Phi \left(P_{c,c',t}^{tr*} + \tilde{P}_{c',c,t}^{tr*} \right) \quad (49)$$

$$\mu_{c,c',t}^{new} = \mu_{c,c',t}^{old} + \Delta \left(Q_{c,c',t}^{tr*} + Q_{c',c,t}^{tr*} \right) \quad (50)$$

$$\tilde{\pi}_{i,t}^{p,new} = \tilde{\pi}_{i,t}^{p,old} + \Theta^p \left(\tilde{P}_{c,t}^* IN_c^i - \tilde{P}_{i,t}^{DSO*} \right) \quad (51)$$

$$\pi_{i,t}^{p,new} = \pi_{i,t}^{p,old} + \Psi^p \left(P_{c,t}^* IN_c^i - P_{i,t}^{DSO*} \right) \quad (52)$$

$$\tilde{\pi}_{i,t}^{q,new} = \tilde{\pi}_{i,t}^{q,old} + \Theta^q \left(\tilde{Q}_{c,t}^* IN_c^i - \tilde{Q}_{i,t}^{DSO*} \right) \quad (53)$$

$$\pi_{i,t}^{q,new} = \pi_{i,t}^{q,old} + \Psi^q \left(Q_{c,t}^* IN_c^i - Q_{i,t}^{DSO*} \right) \quad (54)$$

شرایط توقف الگوریتم ADMM به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که بهینگی سراسری مسائل بهینه‌سازی را تضمین کند. این شروط به دو بخش تقسیم می‌شوند که باید به صورت همزمان برقرار شوند. دسته اول، عبارتند از کوچکتر بودن مانده اولیه از یک مقدار کوچک از پیش تعیین شده که معیار توقف نامیده می‌شود و با ε نشان داده می‌شود. این دسته شروط در قالب روابط (۵۵) تا (۶۰) بیان می‌شوند:

$$\left| P_{c,c',t}^{tr*} + \tilde{P}_{c',c,t}^{tr*} \right| \leq \varepsilon \quad (55)$$

$$\left| Q_{c,c',t}^{tr*} + Q_{c',c,t}^{tr*} \right| \leq \varepsilon \quad (56)$$

$$\left| \tilde{P}_{c,t}^* IN_c^i - \tilde{P}_{i,t}^{DSO*} \right| \leq \varepsilon \quad (57)$$

$$\left| P_{c,t}^* IN_c^i - P_{i,t}^{DSO*} \right| \leq \varepsilon \quad (58)$$

$$\left| \tilde{Q}_{c,t}^* IN_c^i - \tilde{Q}_{i,t}^{DSO*} \right| \leq \varepsilon \quad (59)$$

$$\left| Q_{c,t}^* IN_c^i - Q_{i,t}^{DSO*} \right| \leq \varepsilon \quad (60)$$

همچنین دسته شروط دوم بیانگر کوچک بودن تغییرات ضرایب دوگان در تکرارهای متوالی است. این دسته شروط نیز مطابق روابط (۶۱) تا (۶۶) به صورت زیر محاسبه می‌گردند:

$$\left| \lambda_{c,c',t}^{new} - \lambda_{c,c',t}^{old} \right| \leq \varepsilon \quad (61)$$

$$\left| \mu_{c,c',t}^{new} - \mu_{c,c',t}^{old} \right| \leq \varepsilon \quad (62)$$

$$\left| \tilde{\pi}_{i,t}^{p,new} - \tilde{\pi}_{i,t}^{p,old} \right| \leq \varepsilon \quad (63)$$

$$\left| \pi_{i,t}^{p,new} - \pi_{i,t}^{p,old} \right| \leq \varepsilon \quad (64)$$

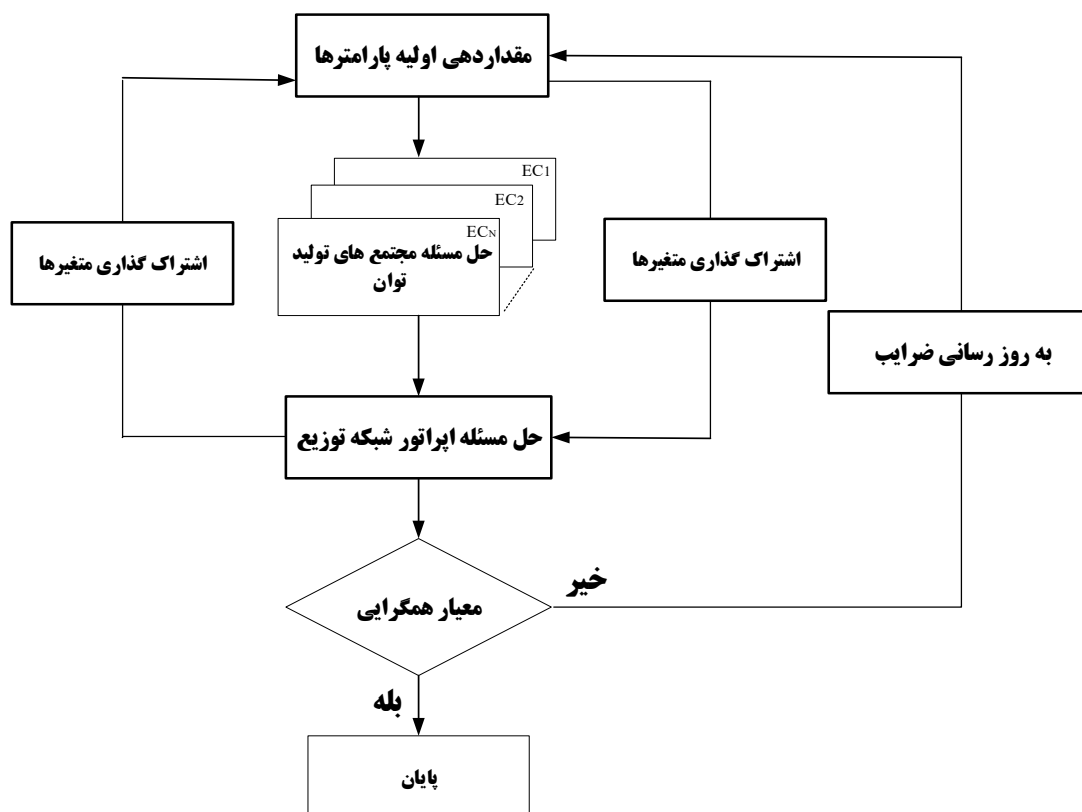
$$\left| \tilde{\pi}_{i,t}^{q,new} - \tilde{\pi}_{i,t}^{q,old} \right| \leq \varepsilon \quad (65)$$

$$\left| \pi_{i,t}^{q,new} - \pi_{i,t}^{q,old} \right| \leq \varepsilon \quad (66)$$

فلوچارت حل مساله محاسبه پوش‌های بهره‌برداری در شکل (۳) نشان داده شده‌است. با توجه به شکل (۳) فرایند حل مساله به این ترتیب انجام می‌شود که ابتدا مقداردهی اولیه انجام می‌گیرد، سپس مساله توافق میان مجتمع‌های انرژی حل می‌شود و خروجی آن برای حل مساله اپراتور شبکه توزیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. چنانچه شرط همگرایی برقرار شود، فرایند حل مساله پایان می‌یابد. در



غیر این صورت ضرایب الگوریتم حل مساله به روزرسانی شده و مجددا فرایند بهینه سازی و حل مساله با ضرایب حل مساله جدید آغاز می گردد تا شرط همگرایی حاصل شود.



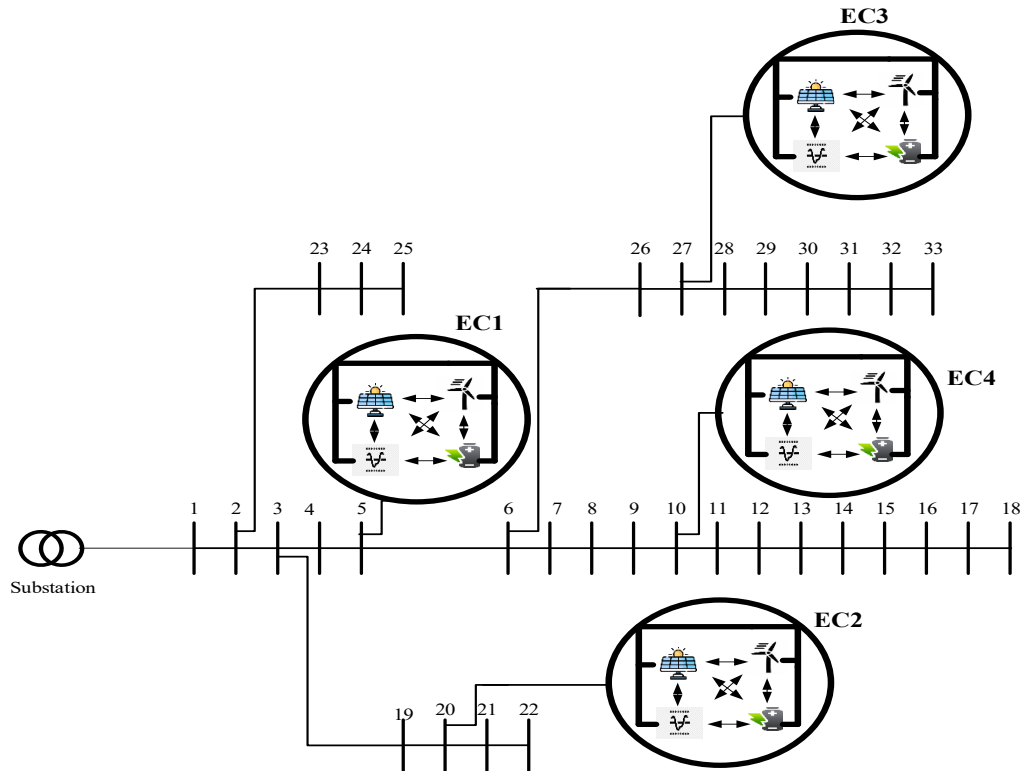
شکل (۳): فلوچارت روش پیشنهادی برای محاسبه پوش های بهره برداری پویا

۴- شبیه سازی و بحث در نتایج

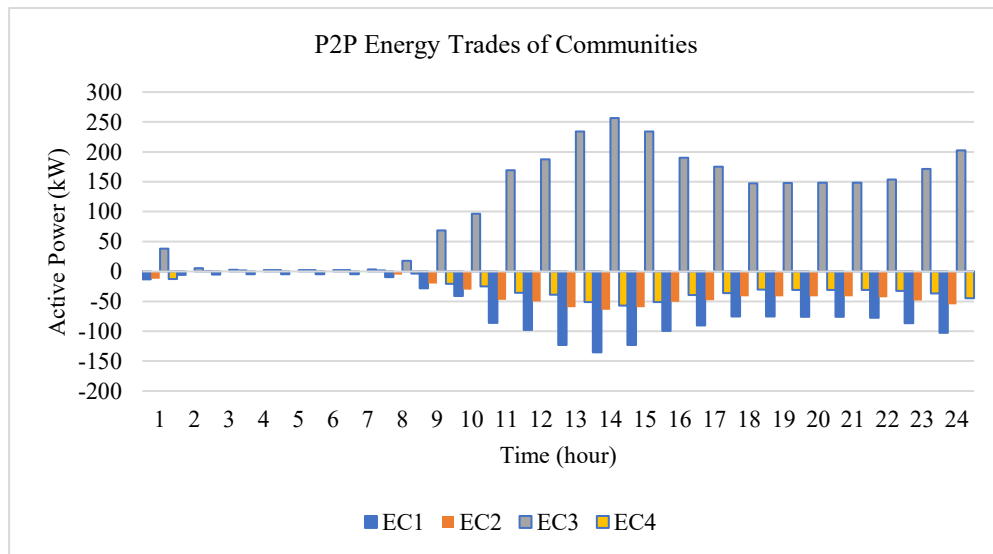
۴-۱- شبیه سازی روش پیشنهادی در شبکه ۳۳ شینه

در این مقاله برای پیاده سازی روش پیشنهادی، یک سیستم ۳۳ شینه IEEE استاندارد [۳۴] مطابق شکل (۴) در نظر گرفته شده است. شبیه سازی ها به کمک محاسبه گر CPLEX در محیط نرم افزار GAMS با استفاده از استفاده از پردازنده Intel(R) Xeon(R) E5-1630 v4@3.70 گیگاهرتز و ۱۶ گیگابایت RAM صورت پذیرفت است. بر روی این شبکه، چهار مجموعه تولید انرژی فرض شده است که به تبادل انرژی با یکدیگر می پردازند. هر مجموعه شامل واحدهای تولید انرژی توزیع پذیر (انواع نیروگاه های قابل کنترل) و توزیع ناپذیر (توربین بادی و خورشیدی)، بارهای قابل تنظیم، بارهای ثابت و سیستم ذخیره انرژی می باشد. افق زمانی شبیه سازی نیز ۲۴ ساعته در نظر گرفته شده است. اطلاعات مربوط به هر مجموعه در قسمت پیوست ذکر شده است و ضرایب لاگرانژ مطابق مرجع [۳۴] به کار گرفته شده است. همچنین اطلاعات مربوط به انرژی خورشیدی و باد و هزینه های شبکه بالادست از مرجع [۳۵] استخراج شده است. مجتمع های انرژی در شینه های ۵، ۱۰، ۲۰ و ۲۷ از شبکه توزیع ۳۳ شینه قرار گرفته اند و به تبادل انرژی با یکدیگر می پردازند.

در این مقاله ۴ مجتمع تولید انرژی به مبادله همتای انرژی با یکدیگر می پردازند. مجموع مبادلات هر مجتمع تولید توان در افق ۲۴ ساعته در شکل (۵) نمایش داده شده است. با توجه به شکل (۵) و ماهیت مجتمع ها مشاهده می شود که مبادلات عموماً به صورت فروش انرژی از مجتمع های ۱، ۲ و ۴ به مجتمع ۳ می باشد و مجتمع ۱ نیز بیشترین سهم را در تامین نیاز مجتمع ۳ دارد.



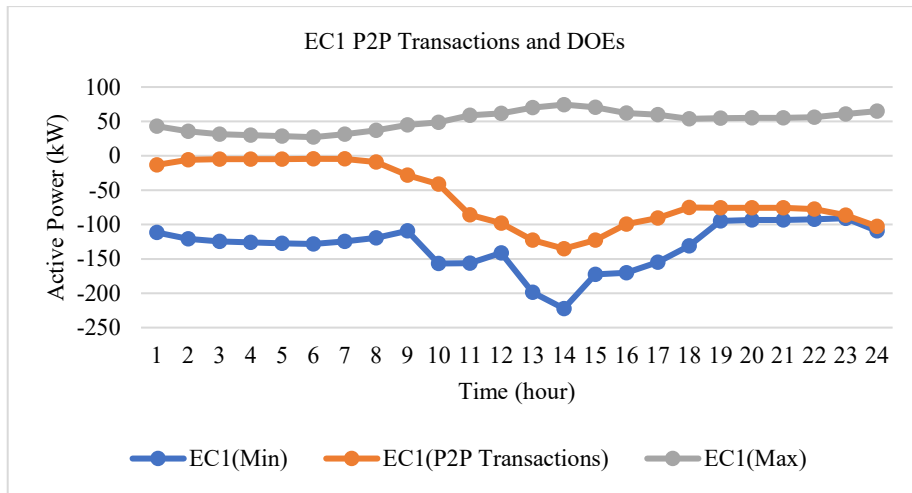
شکل (۴): شبکه ۳۳ شینه استاندارد با حضور مجتمع‌های تولید انرژی



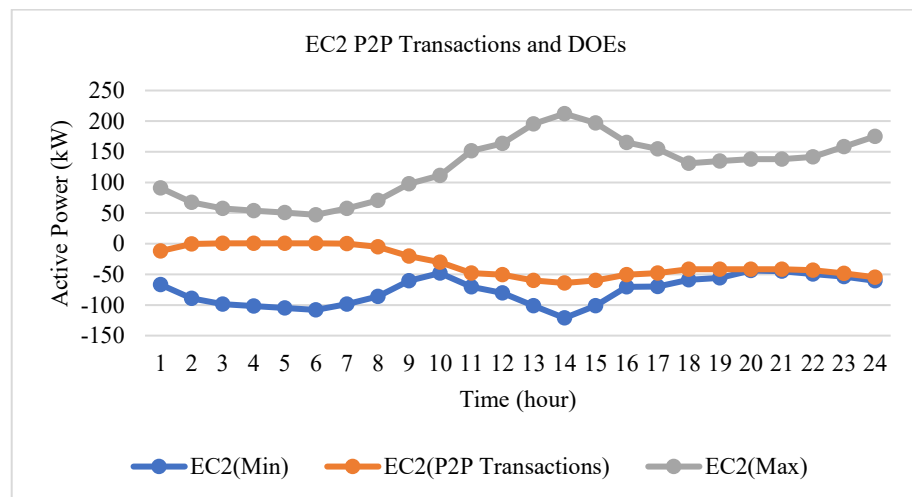
شکل (۵): مجموع مبادلات همتا به همتای مجتمع‌های تولید انرژی در افق ۲۴ ساعته با در نظر گرفتن اثر محاسبه پوش‌های بهره‌برداری پویا

همچنین برای هر مجتمع انرژی، نامعینی در تولید انرژی به صورت پوش‌های عملیاتی پویا در نظر گرفته شده‌است. به این ترتیب آستانه‌های عملیاتی حداقل و حداکثر مبادله انرژی برای هر مجتمع تولید انرژی در هر ساعت محاسبه شده‌است. به ترتیبی که هم محدودیت‌های فنی شبکه حفظ شود و هم امکان حداکثر مبادله انرژی توسط مجتمع‌های انرژی به صورت پویا در افق ۲۴ ساعته فراهم شود. در شکل‌های (۶) تا (۹) برای مجتمع‌های تولید انرژی مقدار پوش‌های عملیاتی حداقل و حداکثر و نیز مقدار تبادل انرژی در افق ۲۴ ساعته نشان داده شده‌است.

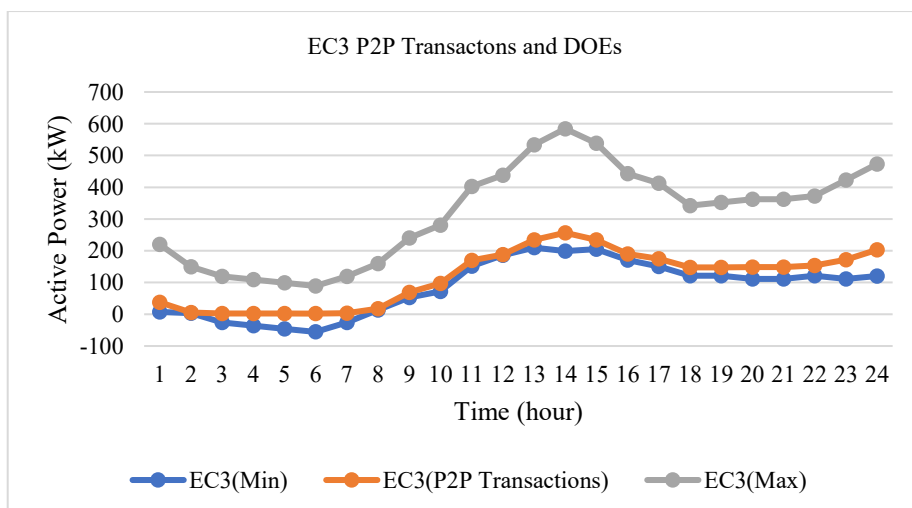




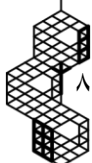
شکل (۶): پوش‌های عملیاتی حداقل و حداکثر و نیز مقدار تبادل هم‌تا به هم‌تای انرژی در افق ۲۴ ساعته مجتمع تولید انرژی ۱

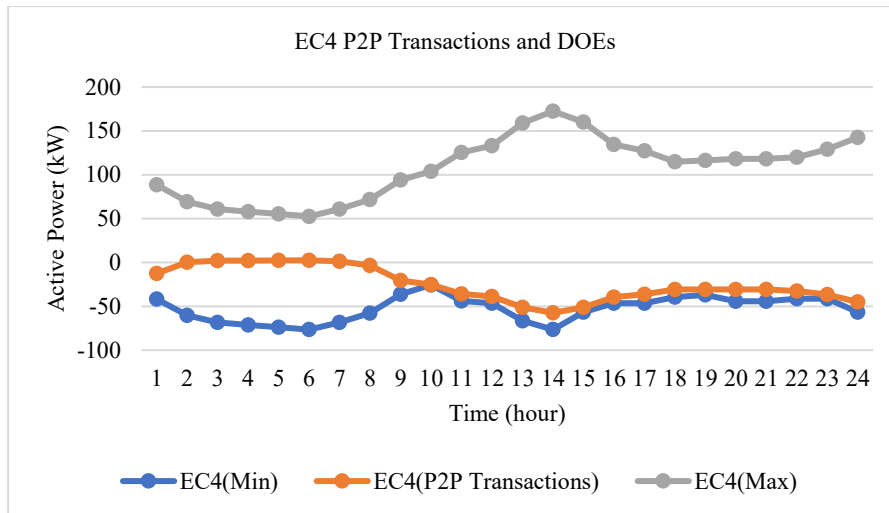


شکل (۷): پوش‌های عملیاتی حداقل و حداکثر و نیز مقدار تبادل هم‌تا به هم‌تای انرژی در افق ۲۴ ساعته مجتمع تولید انرژی ۲



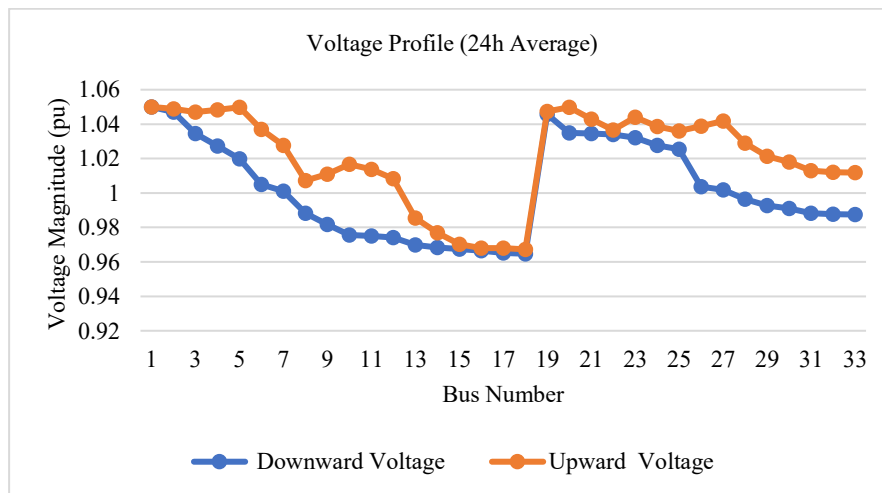
شکل (۸): پوش‌های عملیاتی حداقل و حداکثر و نیز مقدار تبادل هم‌تا به هم‌تای انرژی در افق ۲۴ ساعته مجتمع تولید انرژی ۳





شکل (۹): پوش‌های عملیاتی حداقل و حداکثر و نیز مقدار تبادل همتا به همتای انرژی در افق ۲۴ ساعته مجتمع تولید انرژی ۴

همانگونه که در شکل‌های (۶) تا (۹) مشاهده می‌شود، مبادلات همتابه‌همتای هر مجتمع تولید انرژی در محدوده مجاز شبکه یعنی پوش بالا و پایین بهره‌برداری، انجام شده و در نتیجه مبادلات با رعایت قیود فنی انجام شده‌اند که صحت روش پیشنهادی را به اثبات می‌رساند. چنانچه یک محدوده مجاز ثابت برای مبادلات در نظر گرفته شود، بخشی از تبادل انرژی حذف می‌گردد و در نتیجه اعمال محدوده مجاز تبادل انرژی به صورت دینامیک و با استفاده از پوش‌های بهره‌برداری پویا موجب افزایش تبادل ایمن انرژی می‌گردد.



شکل (۱۰): محدوده پروفیل ولتاژ در طول مبادلات همتا به همتا میان مجتمع‌های انرژی با محاسبه پوش‌های بهره‌برداری پویا در روش پیشنهادی

در شکل (۱۰) پروفیل ولتاژ شبکه در طول مبادلات همتابه‌همتا میان مجتمع‌های تولید انرژی در شبیه‌سازی ارائه شده‌است. مشاهده می‌گردد که محدوده مجاز ولتاژ که حداقل ۰/۹۵ و حداکثر ۱/۰۵ پریونیت می‌باشد [۲۶]، در محاسبه پوش‌های بالا و پایین بهره‌برداری پویا رعایت شده‌است.

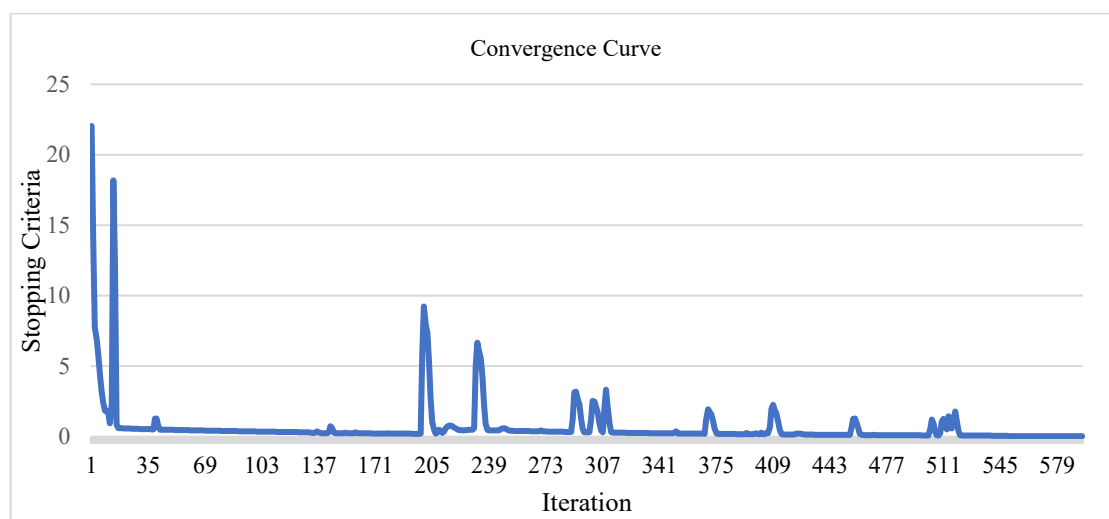
در این مطالعه پوش‌های بهره‌برداری پویا از توافق میان اپراتور شبکه توزیع و مجتمع‌های تولید انرژی محاسبه شده‌اند و مانند پژوهش‌های پیشین به صورت یکطرفه از سوی اپراتور شبکه توزیع ابلاغ نشده‌اند. این نکته موجب می‌شود تا مجتمع‌ها با توجه به نامعینی ذاتی و انعطاف‌پذیری مورد نیاز خود محدوده‌های بهره‌برداری را با اپراتور شبکه توزیع به اشتراک بگذارند و در نتیجه پوش‌های عملیاتی ارائه شده در این مقاله به صورت دوطرفه محاسبه شده و مورد استقبال تولیدکننده‌ها می‌باشد. روش پیشنهادی این مقاله با دو روش مرسوم نیز مقایسه شده‌است. مطابق جدول (۳) روش ارائه شده از نظر حجم مبادلات با روش اعمال محدودیت ثابت در طول مبادلات و همچنین روش محاسبه پوش‌های بهره‌برداری پویا غیرتوافقی با مجتمع‌های تولید انرژی مقایسه شده‌است. لازم به ذکر است

هر سه روش از نظر حفظ محدودیت‌های شبکه موفق هستند اما از نظر حجم مبادلات توان حقیقی، روش پیشنهادی نسبت به روش اعمال محدودیت ثابت ۱۵/۷٪ و نسبت به روش‌های مبتنی بر پوش‌های بهره‌برداری پویای غیرتوافقی اپراتور شبکه و مجتمع‌های تولید انرژی ۸٪ رشد مبادلات دارد.

جدول (۳): مقایسه روش پیشنهادی با دو روش جدید اعمال محدودیت‌های فنی از نظر حجم مبادلات همتا به همتا در بازه زمانی ۲۴ ساعته

حجم مبادلات (Kw)	مدلسازی قیود شبکه	مرجع
۴۱۸۰	اعمال محدودیت ثابت	[۲۳]
۴۴۸۰	پوش‌های بهره‌برداری پویا	[۲۶]
۴۸۴۰	پوش‌های بهره‌برداری پویا	روش پیشنهادی

شکل (۱۱) منحنی همگرایی الگوریتم ADMM در حل مسئله بهینه‌سازی مربوط به محاسبه پوش‌های عملیاتی در مبادلات همتا به همتای انرژی مجتمع‌ها را نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌گردد که بهینه‌سازی به درستی و در تعداد ۵۷۳ تکرار صورت پذیرفته‌است و شرط دستیابی به نقطه بهینه نیز حاصل شده‌است.



شکل (۱۱): منحنی همگرایی الگوریتم ADMM مساله بهینه‌سازی تعیین پوش‌های عملیاتی پویا

الگوریتم ADMM یک روش مقاوم برای حل مسائل بهینه‌سازی با متغیرهای زیاد و درمقیاس‌های بزرگ می‌باشد. در این مقاله تمرکز بر دقت الگوریتم در همگرایی است که خوشبختانه با تعداد تکرار مناسب، بهینگی سراسری حاصل شده‌است و بزرگتر شدن سیستم و افزایش تعداد متغیرها تنها موجب افزایش زمان همگرایی می‌گردد که با توجه به اینکه بازار از نوع روز بعد و پیش برنامه‌ریزی می‌باشد، در حالت بهره‌برداری و بلادرنگ، خللی در کارکرد شبکه ایجاد نمی‌کند. نکته دیگر در اثربخشی الگوریتم ADMM با توجه به [۳۳]، مقاومت این الگوریتم در برابر تاخیر در ارتباطات و خطا در انتقال داده‌هاست. نویسندگان در [۳۳] با حل یک مسئله که با تاخیر و خطا در انتقال داده‌ها مواجه بود، ثابت کرده‌اند که درنهایت الگوریتم ADMM که مبتنی بر آزادسازی ضرایب لاگرانژ است، بهینه‌سازی سراسری و همگرایی را تضمین می‌نماید. لذا با توجه به نکات فوق الگوریتم ADMM در حل روش پیشنهادی، بهینگی سراسری را تضمین می‌نماید.

۲-۴- عملکرد روش پیشنهادی در برابر گزارشات نادرست و تقلب مشترکین

با توجه به اینکه تنها داده‌ای که بین مجتمع‌های انرژی به اشتراک گذاشته می‌شود توان است و قیمت‌ها به اشتراک گذاشته نمی‌شوند، در این روش احتمال تقلب کم است. در روش پیشنهادی که مبتنی بر قیمت حاشیه محلی (LMP) و براساس بازار روز بعد است، امکان دارد مجتمع‌های انرژی در صورت آگاهی از شرایط یکدیگر از این شرایط به نفع خود استفاده کنند که موجب بالا رفتن قیمت می‌شود. در این روش اپراتور شبکه توزیع ناظر غیررقابتی است که با هماهنگی مجتمع‌های انرژی، پوش‌های بهره‌برداری پویا را تعیین



می‌کند و در نتیجه شرایط بهره‌برداری ایمن نقض نمی‌شود. به عنوان مثال، تراکم و پرشدگی خطوط رخ نمی‌دهد که عوامل از آن سوء استفاده کنند و شرایط بهره‌برداری ایمن تضمین شده‌است. لذا شرایط رخداد قدرت بازار ناشی از تراکم وجود ندارد. مگر مجتمع‌های انرژی از پیش‌بینی شرایط یکدیگر سوءاستفاده کنند و خرید یا فروش انرژی انجام ندهند که طبق مکانیسم قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی، قیمت‌ها افزایش می‌یابد. این افزایش قیمت برای واحدهای متخلف شاید در کوتاه مدت سود آور باشد، اما در بلند مدت موجب از دست رفتن فرصت‌های آنها در بازار می‌گردد. چنانچه مجتمع‌های انرژی به تعهدات خود در حالت بلادرنگ عمل نکنند، طبق قواعد بازار، از سوی اپراتور شبکه متحمل جریمه‌های سنگین می‌شوند. برای مثال، اگر عوامل تجدیدپذیر گزارش ذخایر موردنیاز کمتری را در بازار روز بعد برای به دست آوردن سود بیشتر ارائه دهند، این خطر وجود دارد که هزینه بیشتری برای جبران کمبود آن در بازار بلادرنگ پرداخت نمایند، زیرا قیمت‌های بلادرنگ معمولاً بالاتر هستند. علاوه بر این، اپراتور بازار نیز می‌تواند هزینه و جریمه اضافی برای کمبود تولید انرژی تجدیدپذیر از این مشترکین دریافت کند. لذا در این روش با توجه به اینکه بر مبنای بازار روز بعد است چنانچه عوامل رفتار متقلبانه داشته باشند، در بازار بلادرنگ متحمل جریمه می‌گردند [۳۶].

۴-۳- سازگاری روش پیشنهادی با استاندارد IEC 61850

پیاده‌سازی نرم‌افزاری ساختار ارتباطی روش پیشنهادی در سیستم توزیع از پروتکل‌های استاندارد IEC 61850 پیروی می‌کند. استاندارد IEC 61850، یک استاندارد بین‌المللی برای ارتباطات در پست‌ها است که یک مدل ارتباط داده مجتمع را برای تسهیل قابلیت همکاری تجهیزات و دستگاه‌های مختلف تعریف می‌کند [۳۷]. در این مقاله، پروتکل ارتباطی بین مجتمع‌های انرژی و اتوماسیون شبکه توزیع مبتنی بر استاندارد IEC 61850-7-420 تعریف شده‌است [۳۸]. در مدل پیشنهادی، معماری شبکه ارتباطی برای مجتمع‌های انرژی بر اساس مفاهیم گره‌های منطقی در استاندارد IEC 61850 ایجاد شده و از چندین گره منطقی تشکیل شده است که هر گره منطقی انواع مختلفی از اطلاعات همانند داده‌های آنالوگ، وضعیت و مکانیسم کنترلی را حمل می‌کنند. در ساختار پیشنهادی، متغیرهای ارتباطی میان مجتمع‌های انرژی، توان حقیقی و راکتیو می‌باشند. همچنین متغیرهای ارتباطی میان اپراتور شبکه توزیع و مجتمع‌های انرژی نیز پوش‌های بالا و پایین بهره‌برداری پویا می‌باشند. با توجه به اینکه مجتمع‌های انرژی در مدل پیشنهادی متشکل از تولیدات خورشیدی و بادی، بارهای ثابت و انعطاف‌پذیر و باتری هستند، هر بخش تولیدی نیازمند دستگاه حسگر مربوطه برای پیروی از استاندارد IEC 61850 است که اطلاعات جزئی‌تر آن در [۳۹] ارائه شده‌است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک چارچوب مبادله همتابه‌ها میان مجتمع‌های تولید انرژی در شبکه توزیع فعال ارائه شده‌است که در آن حدود مجاز بهره‌برداری شبکه از طریق محاسبه و اعمال پوش‌های بهره‌برداری پویا در طول مبادلات حفظ می‌گردد. پوش‌های بهره‌برداری پویا از توافق میان اپراتور شبکه توزیع و مجتمع‌های تولید انرژی محاسبه شده‌اند و مانند پژوهش‌های پیشین به صورت یکطرفه از سوی اپراتور شبکه توزیع ابلاغ نمی‌شوند. این نکته موجب می‌شود تا مجتمع‌ها با توجه به نامعینی ذاتی و انعطاف‌پذیری موردنیاز خود محدوده‌های بهره‌برداری را با اپراتور شبکه توزیع به اشتراک بگذارند و در نتیجه پوش‌های عملیاتی ارائه شده در این مقاله به صورت دوطرفه محاسبه شده و مورد استقبال تولیدکننده‌ها می‌باشد. این روش بر روی دو شبکه استاندارد پیاده‌سازی شده و نتایج حاصل شده نشان می‌دهد، علاوه بر حفظ محدودیت‌های فنی مورد نظر اپراتور شبکه توزیع در طول مبادلات، حجم مبادلات میان تولیدکنندگان محلی که در این مقاله مجتمع‌های تولید انرژی می‌باشند، نسبت به روش‌های پیشین افزایش یافته‌است.



جدول (۴): مشخصات بارهای توزیع پذیر در مجتمع های انرژی

شیب بالارونده (Ramp Up)	شیب پایین رونده (Ramp Down)	حداقل توان حقیقی P_{min} (kW)	حداکثر توان حقیقی P_{max} (kW)	حداقل توان راکتیو Q_{min} (kVar)	حداکثر توان راکتیو Q_{max} (kVar)	مجتمع تولید انرژی
۱۵	-۱۵	۰	۶۰	۰	۶۰	مجتمع انرژی ۱
۱۵	-۱۵	۰	۶۰	۰	۶۰	مجتمع انرژی ۲
۱۵	-۱۵	۰	۶۰	۰	۶۰	مجتمع انرژی ۳
۱۵	-۱۵	۰	۶۰	۰	۶۰	مجتمع انرژی ۴

جدول (۵): مشخصات بارهای انعطاف پذیر

ضریب توان	قیمت حاشیه ای (دلار)	حداقل بار (kW)	حداکثر بار (kW)	حداقل انرژی (kWh)	مجتمع تولید انرژی
۰/۸۵	۰/۱	۵۸/۵	۱۳۵	۱۸۰۰	مجتمع انرژی ۱
۰/۸۵	۰/۳	۵۳/۶۳	۱۲۳/۷۵	۱۲۰۰	مجتمع انرژی ۲
۰/۹	۰/۲	۴۵/۵	۱۰۵	۹۰۰	مجتمع انرژی ۳
۰/۹	۰/۲۵	۳۹	۹۰	۱۳۵۰	مجتمع انرژی ۴

جدول (۶): مشخصات بارهای ثابت

ارزش بار از دست رفته (kW)	بار نامی (kW)	مجتمع تولید انرژی
۰/۴	۱۲۰	مجتمع انرژی ۱
۰/۵	۱۵۰	مجتمع انرژی ۲
۰/۴۵	۱۳۰	مجتمع انرژی ۳
۰/۵	۸۰	مجتمع انرژی ۴

جدول (۷): مشخصات بارهای توزیع ناپذیر

هزینه کاهش بار (دلار)	ظرفیت (kW)	مجتمع تولید انرژی
۰/۴	۷۴/۴	مجتمع انرژی ۱
۰/۴	۱۷۳/۴	مجتمع انرژی ۲
۰/۴	۵۳۰/۴	مجتمع انرژی ۳
۰/۴	۱۴۸/۵	مجتمع انرژی ۴

جدول (۸): مشخصات ذخیره سازهای انرژی

حداکثر انرژی (kWh)	حداقل انرژی (kWh)	انرژی اولیه (kWh)	η_s^{ch}	η_s^{dch}	هزینه استهلاک (دلار)	شارژ و دشارژ (kW)	حداقل توان شارژ و دشارژ (kW)	مجتمع تولید انرژی
۶۰	۳	۵۸/۵	۰/۹	۰/۹۵	۰/۰۲	۲۴	۰	مجتمع انرژی ۱
۶۰	۳	۵/۶۳	۰/۹	۰/۹۵	۰/۰۲	۲۴	۰	مجتمع انرژی ۲
۶۰	۳	۴۵/۵	۰/۹	۰/۹۵	۰/۰۲	۲۴	۰	مجتمع انرژی ۳
۶۰	۳	۳۹	۰/۹	۰/۹۵	۰/۰۲	۲۴	۰	مجتمع انرژی ۴

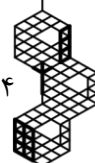




نویسندگان این مقاله از اعضای هیئت تحریریه نشریه فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز کمال سیاسگزاری و قدردانی را دارند.

مراجع

- [1] Y. Liu, L. Wu, and J. Li, "Peer-to-peer (P2P) electricity trading in distribution systems of the future," *The Electricity Journal*, vol. 32, no. 4, pp. 2-6, 2019, doi: 10.1016/j.tej.2019.03.002.
- [2] P. Siano, G. De Marco, A. Rolán, and V. Loia, "A survey and evaluation of the potentials of distributed ledger technology for peer-to-peer transactive energy exchanges in local energy markets," *IEEE Systems Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 3454-3466, 2019, doi: 10.1109/JSYST.2019.2903172.
- [3] J. Zhao, T. Zheng, and E. Litvinov, "A unified framework for defining and measuring flexibility in power system," *IEEE Transactions on power systems*, vol. 31, no. 1, pp. 339-347, 2015, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2390038.
- [4] E. A. Soto, L. B. Bosman, E. Wollega, and W. D. Leon-Salas, "Peer-to-peer energy trading: A review of the literature," *Applied Energy*, vol. 283, p. 116268, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116268.
- [5] M. Elkazaz, M. Sumner, and D. Thomas, "A hierarchical and decentralized energy management system for peer-to-peer energy trading," *Applied Energy*, vol. 291, p. 116766, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116766.
- [6] S. Malik, M. Duffy, S. Thakur, B. Hayes, and J. Breslin, "A priority-based approach for peer-to-peer energy trading using cooperative game theory in local energy community," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 137, p. 107865, 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107865.
- [7] J. Zhao *et al.*, "Peer-to-peer electricity trading of interconnected flexible distribution networks based on non-cooperative games," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 145, p. 108648, 2023, doi: doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108648.
- [8] M. K. AlAshery *et al.*, "A blockchain-enabled multi-settlement quasi-ideal peer-to-peer trading framework," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, no. 1, pp. 885-896, 2020, doi: 10.1109/TSG.2020.3022601.
- [9] B. Han, Y. Zahraoui, M. Mubin, S. Mekhilef, T. Korötko, and O. Alshammari, "Distributed optimal storage strategy in the ADMM-based peer-to-peer energy trading considering degradation cost," *Journal of Energy Storage*, vol. 96, p. 112651, 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.112651.
- [10] J. Brooks, R. D. Trevizan, P. Barooah, and A. S. Bretas, "Analysis and evaluation of a distributed optimal load coordination algorithm for frequency control," *Electric Power Systems Research*, vol. 167, pp. 86-93, 2019, doi: 10.1016/j.epsr.2018.10.021.
- [11] W. Shi, X. Xie, C.-C. Chu, and R. Gadh, "A distributed optimal energy management strategy for microgrids," in *2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, 2014, pp. 200-205: IEEE, doi: 10.1109/SmartGridComm.2014.7007646.
- [12] J. Chen, K. Li, H. Wang, D. Zhao, C. Jiang, and C. Zhang, "Distributed parallel optimal operation for shared energy storage system-multiple park integrated energy system based on ADMM," *Energy*, p. 134677, 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.134677.
- [13] J. Guerrero, A. C. Chapman, and G. Verbič, "Decentralized P2P energy trading under network constraints in a low-voltage network," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 5, pp. 5163-5173, 2018, doi: 10.1109/TSG.2018.2878445.
- [14] A. Zare, M. Mehdinejad, and M. Abedi, "Designing a decentralized peer-to-peer energy market for an active distribution network considering loss and transaction fee allocation, and fairness," *Applied Energy*, vol. 358, p. 122527, 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.122527.
- [15] A. Paudel, L. P. M. I. Sampath, J. Yang, and H. B. Gooi, "Peer-to-peer energy trading in smart grid considering power losses and network fees," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 6, pp. 4727-4737, 2020, doi: 10.1109/TSG.2020.2997956.



- [16] M. H. Ullah and J.-D. Park, "Peer-to-peer energy trading in transactive markets considering physical network constraints," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, no. 4, pp. 3390-3403, 2021, doi: 10.1109/TSG.2021.3063960.
- [17] S. Suthar and N. M. Pindoriya, "Chance-constrained co-optimization of peer-to-peer energy trading and distribution network operations," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 38, p. 101344, 2024, doi: 10.1016/j.segan.2024.101344.
- [18] C. Feng, B. Liang, Z. Li, W. Liu, and F. Wen, "Peer-to-peer energy trading under network constraints based on generalized fast dual ascent," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 14, no. 2, pp. 1441-1453, 2022, doi: 10.1109/TSG.2022.3162876.
- [19] N. Tarashandeh and A. Karimi, "Peer-to-peer energy trading under distribution network constraints with preserving independent nature of agents," *Applied Energy*, vol. 355, p. 122240, 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.122240.
- [20] T. Morstyn, A. Teytelboym, C. Hepburn, and M. D. McCulloch, "Integrating P2P energy trading with probabilistic distribution locational marginal pricing," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 4, pp. 3095-3106, 2019, doi: 10.1109/TSG.2019.2963238.
- [21] Z. Li, C. S. Lai, X. Xu, Z. Zhao, and L. L. Lai, "Electricity trading based on distribution locational marginal price," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 124, p. 106322, 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106322.
- [22] M. Babagheibi, S. Jadid, and A. Kazemi, "Distribution locational marginal pricing for congestion management of an active distribution system with renewable-based microgrids under a privacy-preserving market clearing approach and load models," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 32, p. 100935, 2022, doi: 10.1016/j.segan.2022.100935.
- [23] M. I. Azim, W. Tushar, and T. K. Saha, "Coalition graph game-based P2P energy trading with local voltage management," *IEEE transactions on smart grid*, vol. 12, no. 5, pp. 4389-4402, 2021, doi: 10.1109/TSG.2021.3070160.
- [24] M. Z. Liu, L. F. Ochoa, P. K. Wong, and J. Theunissen, "Using OPF-based operating envelopes to facilitate residential DER services," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 13, no. 6, pp. 4494-4504, 2022, doi: 10.1109/TSG.2022.3188927.
- [25] B. Liu, J. H. Braslavsky, and N. Mahdavi, "Linear OPF-based robust dynamic operating envelopes with uncertainties in unbalanced distribution networks," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 12, no. 4, pp. 1320-1326, 2023, doi: 10.35833/MPCE.2023.000653.
- [26] M. I. Azim *et al.*, "Dynamic operating envelope-enabled P2P trading to maximize financial returns of prosumers," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 15, no. 2, pp. 1978-1990, 2023, doi: 10.1109/TSG.2023.3297366.
- [27] M. M. Hoque, M. Khorasany, M. I. Azim, R. Razzaghi, and M. Jalili, "Dynamic operating envelope-based local energy market for prosumers with electric vehicles," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 15, no. 2, pp. 1712-1724, 2023, doi: 10.1109/TSG.2023.3302270.
- [28] P. Mochi and K. S. Pandya, "Dynamic Operating Envelope for Cost Optimization in Local Peer-to-Peer Energy Market," in *2023 International Conference on Energy, Materials and Communication Engineering (ICEMCE)*, 2023, pp. 1-6: IEEE, doi: 10.1109/ICEMCE57940.2023.10433960.
- [29] M. Khorasany, A. S. Gazafroudi, R. Razzaghi, T. Morstyn, and M. Shafie-khah, "A framework for participation of prosumers in peer-to-peer energy trading and flexibility markets," *Applied energy*, vol. 314, p. 118907, 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.118907.
- [30] M. Z. Golambahri, M. Shakarami, and M. Doostizadeh, "Security-aware joint energy and flexibility trading in electricity-heat networks: A novel clearing and validation analysis," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 157, p. 109901, 2024, doi: 10.1016/j.ijepes.2024.109901.
- [31] S. Feng, W. Wei, and Y. Chen, "Day-ahead scheduling and online dispatch of energy hubs: A flexibility envelope approach," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 15, no. 3, pp. 2723-2737, 2023, doi: 10.1109/TSG.2023.3337629.
- [32] S. P. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex optimization*. Cambridge university press, 2004.
- [33] M. Zhu and E. Frazzoli, "Distributed robust adaptive equilibrium computation for generalized convex games," *Automatica*, vol. 63, pp. 82-91, 2016, doi: 10.1016/j.automatica.2015.10.012.
- [34] C. Huang, M. Zhang, C. Wang, N. Xie, and Z. Yuan, "An interactive two-stage retail electricity market for microgrids with peer-to-peer flexibility trading," *Applied energy*, vol. 320, p. 119085, 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119085.



- [35] M. Babagheibi, S. Jadid, and A. Kazemi, "An Incentive-based robust flexibility market for congestion management of an active distribution system to use the free capacity of Microgrids," *Applied energy*, vol. 336, p. 120832, 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120832.
- [36] Z. Guo, P. Pinson, S. Chen, Q. Yang, and Z. Yang, "Chance-constrained peer-to-peer joint energy and reserve market considering renewable generation uncertainty," *IEEE transactions on smart grid*, vol. 12, no. 1, pp. 798-809, 2020, doi: 10.1109/TSG.2020.3019603.
- [37] J. C. Lozano, K. Koneru, N. Ortiz, and A. A. Cardenas, "Digital substations and iec 61850: A primer," *IEEE Communications Magazine*, vol. 61, no. 6, pp. 28-34, 2023, doi: 10.1109/MCOM.001.2200568.
- [38] P. CODE, "Communication networks and systems for power utility automation-Part 7-420: Basic communication structure-Distributed energy resources logical nodes," *Communication networks and systems for power utility automation-Part*, pp. 7-420, ISBN 978-2-88910-578-6.
- [39] A. M. Eltamaly, M. A. Alotaibi, A. I. Alolah, and M. A. Ahmed, "IoT-based hybrid renewable energy system for smart campus," *Sustainability*, vol. 13, no. 15, p. 8555, 2021, doi: 10.3390/su13158555.

زیر نویس‌ها

-
- ¹ Distributed energy resources
 - ² Renewable energy resources
 - ³ Prosumers
 - ⁴ Flexibility services
 - ⁵ Local energy markets
 - ⁶ Peer to peer energy trading
 - ⁷ Centralized
 - ⁸ Decentralized
 - ⁹ Distribution system operator
 - ¹⁰ Cooperative games
 - ¹¹ Non-cooperative games
 - ¹² Alternating direction method of multipliers
 - ¹³ Distributed local marginal price
 - ¹⁴ Dynamic operational envelope
 - ¹⁵ Energy community
 - ¹⁶ Real-time
 - ¹⁷ Discomfort cost

