انرژی تراکنشی: راهکاری نوین و موثر برای مدیریت سمت تقاضای مصرف برق

فرگل نعمت‌خواه[1] **فرخ امینی‌فر[2]**

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران - تهران- ایران
fargol.nematkhah@ut.ac.ir
۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران
faminifar@ut.ac.ir

چکیده: در سال‌های اخیر تقاضا برای انرژی الکتریکی به شدت افزایش یافته‌است. در مقابل، توسعه سیستم‌های قدرت علاوه بر نیاز به سرمایه‌گذاری‌های کلان، فرآیندی زمان‌بَر است و اغلب با مخالفت دوستداران محیط زیست مواجه می‌شود. از این رو متولیان صنعت برق احداث واحدهای تولید و خطوط انتقال جدید را راه حل مناسبی برای تأمین تقاضای رو به رشد مصرف‌کنندگان نمی‌بینند و به گزینه‌های دیگری مانند مدیریت سمت تقاضا روی آورده‌اند تا با اعمال سیاست‌های مدیریتی به مصرف‌کنندگان، تقاضا را با محدودیت‌های تولید برق همسو سازند. نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر به سیستم‌های توزیع و استفاده فراگیر از تجهیزات هوشمند، فضای سیستم‌های قدرت را دگرگون ساخته‌است. بدیهی است سیاست‌های مدیریت تقاضا نیز باید برای حفظ کارایی در شرایط جدید دستخوش تغییراتی شوند. انرژی تراکنشی یکی از حوزه‌های نوپدید مدیریت سمت تقاضا می‌باشد که به منظور حفظ تعادل توان در فضای کنونی شبکه برق هوشمند به کار گرفته می‌شود. این مقاله نخست به بررسی ضرورت مدیریت سمت تقاضا می‌پردازد و در ادامه با تشریح مفهوم پاسخگویی تقاضا و ارزیابی انواع برنامه‌های آن، چالش‌های موجود را واکاوی می‌کند. در انتها انرژی تراکنشی به عنوان شکل جامع‌تری از پاسخگویی تقاضا معرفی می‌گردد و اهداف، چالش‌های پیاده‌سازی و نیز برخی مطالعات انجام شده در خصوص چارچوب‌های انرژی تراکنشی بررسی می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: انرژی تراکنشی، پاسخگویی تقاضا، مدیریت سمت تقاضا، شبکه هوشمند

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.1.259

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۱۳
تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۱۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۲۴
نام نویسنده‌ی مسئول: فرخ امینی‌فر
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – تهران –خیابان کارگر شمالی – پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران – دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، وابستگی رو به رشد مصرف‌کنندگان به انرژی الکتریکی منجر به افزایش تقاضا برای این نوع از انرژی شده‌است. برای برآورده کردن تقاضای مصرف‌کنندگان با حفظ سطح قابلیت اطمینان مورد انتظار، شبکه‌های قدرت با هدف تأمین اوج تقاضا توسعه می‌یابند. احداث نیروگاه‌ها و خطوط انتقال جدید فرآیندی زمان‌بر و نیازمند سرمایه‌گذاری‌های کلان می‌باشد. از آنجایی‌که این امکانات برای پاسخ‌گویی به اوج تقاضا و نه میانگین آن طراحی و اجرا می‌شوند، علی‌رغم صرف هزینه و زمان بسیار، در اکثر اوقات بلااستفاده هستند [۱]. علاوه بر آنچه عنوان شد، تولید برق از طریق فناوری‌های گوناگون اثرات مستقیم و غیرمستقیم زیست محیطی متعددی مانند انتشار گازهای گل‌خانه‌ای در هوا، ورود فلزات سنگین و ترکیبات شیمیایی سمی به آب و همین‌طور تغییر در الگوهای جمعیتی یک منطقه را به همراه دارد. احداث جاده‌های دسترسی و گسترش سیستم انتقال نیز موجب تخریب موضعی زیست‌گاه‌های طبیعی می‌گردد. لذا روش‌های بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت باید به نحوی اصلاح گردند که منابع انرژی موجود به شکل بهینه به کار گرفته شوند. از سوی دیگر، پیدایش انواع جدیدی از مصرف‌کنندگان مانند خودروهای برقی، پروفایل بار را به نحو قابل توجهی تغییر داده‌است [۲].

با در نظر گرفتن روند افزایش تقاضا و محدود بودن منابع انرژی، روشن است که افزایش ظرفیت تولید نمی‌تواند تقاضای در حال رشد مصرف‌کنندگان را دنبال کند. لذا راه‌کارهای دیگری برای تأمین تقاضا مطرح شده‌است که مشکلات ذکر شده را ایجاد نمی‌کند. یکی از این راهکارها، مدیریت مصرف در سطوح مختلف است تا تقاضای انرژی الکتریکی در حد امکان، با شرایط تولید سیستم قدرت همسو گردد. سیاست‌های مدیریت مصرف انرژیِ مصرف‌کنندگان که با نام مدیریت سمت تقاضا[۱] شناخته می‌شود، می‌تواند مقدار اوج بار را کاهش دهد و در نتیجه بهره‌برداری قابل اطمینان و اقتصادی از شبکه قدرت را به ارمغان بیاورد. یکی از انواع برنامه‌های مورد توجه مدیریت سمت تقاضا، پاسخگویی تقاضا[۲] می‌باشد که با پیشنهاد مشوق‌های مالی به مصرف‌کنندگان یا ارائه قیمت‌گذاری‌های متغیر با زمان برای برق، آنها را ترغیب می‌کند تا مصرف خود را مطابق با شرایط سیستم قدرت تغییر دهند [۳].

بهره‌گیری از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند سیستم‌های فوتوولتائیک[۳] و توربین‌های بادی یکی دیگر از راه‌کارهای تأمین تقاضای رو به رشد مصرف‌کنندگان می‌باشد که در سال‌های اخیر به صورت نصب واحدهای تولید کوچک در نزدیکی مراکز مصرف، پیاده‌سازی شده‌است تا از هزینه‌های گزاف احداث خطوط انتقال، تلفات توان و نیز مسائلی که تراکم این خطوط برای بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت ایجاد می‌کند جلوگیری نماید. بهره‌گیری از منابع انرژی تجدیدپذیر مزایای زیست محیطی فراوانی را به همراه دارد؛ اما طبیعت تغییرپذیر و تصادفی این منابع و غیر قابل برنامه‌ریزی بودن تولید آنها بر عدم قطعیت‌های موجود در بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت افزوده‌است به طوریکه وجود تعداد زیاد منابع انرژی تجدیدپذیر در یک شبکه توزیع می‌تواند منجر به بروز مشکلاتی از قبیل افزایش ولتاژ، شارش وارونه توان از سوی این منابع به پست‌ها و موارد مشابه گردد. بنابراین بکارگیری گسترده منابع انرژی تجدیدپذیر در سیستم‌های قدرت، علی‌رغم مزایایی که به همراه دارد، بهره‌برداری از این سیستم‌ها را دشوار و حفظ تعادل میان تولید و تقاضا را به امری چالش برانگیز تبدیل می‌کند [۲].

یکی دیگر از تحولات اخیر سیستم‌های قدرت که درکنار نفوذ گسترده منابع انرژی تجدیدپذیر به سیستم‌های توزیع در حال وقوع است، استفاده فراگیر مصرف‌کنندگان از تجهیزات هوشمند نظیر ترموستات‌های هوشمند می‌باشد. قابل تصور است که شبکه‌هایی از این تجهیزات هوشمند می‌توانند پیچیدگی‌های کنترل بارها را به حدی برسانند که کنترل مرکزی بار دیگر معنایی نداشته باشد.

تحولات عنوان شده، فضای شبکه‌های قدرت را دگرگون ساخته و منجر به پیدایش اشکال جدیدی از پاسخگویی تقاضا با قابلیت‌هایی فراتر از کاهش اوج بار شده‌است تا بتواند نیازهای نوپیدا و متعدد شبکه قدرت امروزی را برآورده سازند. انرژی تراکنشی[۴] مفهومی سازگار با شرایط کنونی سیستم‌های قدرت می‌باشد که به تازگی مطرح شده‌است و به عنوان شکل جامع‌تری از پاسخ‌گویی تقاضا، علاوه بر پایش و کنترل زمان-واقعی[۵] منابع مصرف انرژی الکتریکی می‌تواند منابع تولید را هم در جهت منافع سیستم قدرت، کنترل و بهره‌برداری کند [۳]. مفهوم انرژی تراکنشی با تصمیم‌گیری زمان-واقعی، خودمختار و غیرمرکزی منابع انرژی اعم از تولید و مصرف گره خورده‌است و قادر است بر پایه ساختار مبتنی بر بازار خود، زمینه را برای مبادله انرژی میان تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی در سطوح مختلف فراهم آورد و منجر به بهبود بازدهی سیستم قدرت گردد.

این مقاله به مرور مفاهیم مدیریت سمت تقاضا، پاسخگویی تقاضا و ارزیابی انواع برنامه‌های آن می‌پردازد و در نهایت انرژی تراکنشی را به عنوان شکل جامع‌تری از پاسخگویی تقاضا که متناسب با تحولات سیستم‌های قدرت امروزی می‌باشد معرفی کرده و به بررسی برخی طرح‌ها، مشخصات، مطالعات صورت گرفته و سایر جوانب آن می‌پردازد.

۲- مدیریت سمت تقاضا

از بدو ایجاد سیستم‌های قدرت، هم‌تراز کردن سطح بار[۶] برای بهره‌برداران این سیستم‌ها یک چالش به شمار می‌آمده‌است و در گذر زمان، تدابیر مختلفی برای تشویق سمت تقاضا به موکول کردن

مصرف به زمان‌های غیرپیک اتخاذ شده‌است. در اواخر دهه هفتاد میلادی، منتقدانِ برنامه‌ریزی سنتی سیستم‌های قدرت پس از مباحثات بسیار به این نتیجه رسیدند که کاهش تقاضای انرژی الکتریکی، اقتصادی‌تر از افزایش عرضه آن از طریق توسعه ظرفیت‌های تولید می‌باشد. اینگونه بود که مفهوم مدیریت سمت تقاضا پدید آمد [۱]. این مفهوم، مجموعه‌ای از تدابیر و سیاست‌ها می‌باشد که برنامه‌های بازدهی انرژیِ بلندمدّت تا کنترل زمان-واقعی منابع انرژی توزیع‌شده را پوشش می‌دهد. بر اساس [۴]، مدیریت سمت تقاضا تمامی روش‌های مدیریتی جهت نظارت بر فعالیت‌های سمت تقاضا، شامل طرح‌ریزی برنامه‌های مدیریتی، ارزیابی، پیاده‌سازی و همین‌طور پایش این برنامه‌ها را شامل می‌شود.

مدیریت سمت تقاضا، نیازمند فراهم بودن زیرساخت‌های مورد نیاز و همین‌طور ساختار مناسب جهت انگیزش مصرف‌کنندگان می‌باشد. به طور کلی، طراحی و اداره بازارهای برق به علت انفصال بخش اصلی سمت تقاضا از این بازارها، با معیارهای استاندارد عنوان شده در نظریه‌های علم اقتصاد متفاوت است. اما با تعیین مکانیزم‌های کارآمد مبتنی بر بازار و دستورالعمل‌های مورد نیاز، می‌توان از پتانسیل‌های سمت تقاضا برای عملکرد اقتصادی و قابل اطمینان شبکه بهره‌برداری نمود. بکارگیری روش‌های مدیریت سمت تقاضا می‌تواند نتایجی از قبیل بهینه‌سازی الگوی مصرف انرژی، پاسخگویی به تقاضای انرژی به ویژه در زمان اوج بار، کاهش نیاز به سرمایه جهت ایجاد تأسیسات و شبکه‌های تولید، انتقال و توزیع، کاهش آلودگی‌های زیست محیطی و نیز کاهش قیمت برق را به ارمغان آورد.

فرصت‌های مدیریت سمت تقاضا، برای تمامی بخش‌های مصرف‌کننده شامل بخش‌های خانگی، صنعتی و تجاری وجود دارد. توسعه نخستین برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا با تمرکز بر مصرف‌کنندگان خانگی صورت گرفت که به علت ظرفیت‌های کوچکِ بارهای خانگی، طبیعت توزیع‌شده و غیرمتمرکز آنها و نیز فراهم نبودن زیرساخت‌های مخابراتی لازم، بهره‌وری اقتصادی مورد انتظار را به همراه نداشت. اگرچه بهره‌برداران هیچگاه پیاده‌سازی برنامه‌های مدیریت بار خانگی را کنار نگذاشتند، اما از دهه هشتاد میلادی به بعد توجه‌ها به سوی مصرف‌کنندگان بزرگ صنعتی و تجاری جلب شد. این مصرف‌کنندگان با بارهای بزرگ و متمرکزشان شناخته می‌شوند؛ متمرکز بودن بار این مصرف‌کنندگان منجر به کاهش هزینه‌ی ایجاد زیرساخت‌های کنترلی و مخابراتی لازم برای مدیریت تقاضای آنها می‌شود. پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی‌های مخابراتی و کنترلی، فرصت دوباره‌ای را برای مدیریت تقاضای تعداد بسیار زیاد مصرف‌کنندگان خانگی و در نتیجه تطبیق زمان-واقعی تقاضای برق با شرایط شبکه فراهم آورده‌است [۱]. برنامه‌های مدیریت سمت بار را در دو گروه کلی می‌توان مطالعه کرد: برنامه‌های بازدهی انرژی و پاسخگویی تقاضا.

بنا به تعریف ارائه شده از سوی دپارتمان انرژی ایالات متحده، افزایش بازدهی انرژی به معنی استفاده از انرژی کم‌تر برای تأمین سطح یکسان یا بهبود یافته‌ای از خدمات برای مصرف‌کننده از طریق سازوکارهای مناسب اقتصادی است [۱]. به عبارتی افزایش بازدهی انرژی به معنای کاهش مصرف انرژی در تمامی بازه‌های زمانی و نه تنها در ساعات اوج بار می‌باشد. این کاهش مصرف، از طریق ایجاد تغییرات فنی و بهره‌برداری مانند استفاده از لامپ‌ها و تجهیزات کم‌مصرف، مدیریت مصرف برق سیستم‌های تهویه مطبوع و مواردی از این دست، قابل انجام می‌باشد. از آنجاییکه پاسخگویی تقاضا مدخل مناسبی برای ورود به بحث انرژی تراکنشی می‌باشد، در بخش بعد به معرفی مفهوم پاسخگویی تقاضا و مرور نتایج حاصل از پیاده‌سازی انواع برنامه‌های آن می‌پردازیم.

۳- پاسخگویی تقاضا

پاسخگویی تقاضا به معنای مشارکت مصرف‌کنندگان در بهبود الگوی مصرف انرژی، یکی از حوزه‌های مدیریت سمت تقاضا به شمار می‌آید. تعریف ارائه شده توسط وزارت انرژی ایالات متحده، پاسخگویی تقاضا را این‌گونه توصیف می‌کند [۳]: "تغییر مصرف انرژی الکتریکی مصرف‌کنندگان از الگوی معمول مصرفشان، در پاسخ به تغییر قیمت و یا مشوق‌های مالی تعیین‌شده برای کاهش مصرف برق در ساعاتی که قیمت برق در بازار بالا است و یا قابلیت اطمینان سیستم درخطر می‌باشد."

پاسخگویی تقاضا، در آغاز با هدف افزایش انعطاف‌پذیری سمت تقاضا، از طریق جابجایی موقت یا کاهش اوج تقاضای انرژی الکتریکی در شبکه‌های برق سراسر دنیا گسترش یافت تا حفظ پایداری شبکه برای تعداد ساعات کمی از روز، نیازمند سرمایه‌گذاری‌های کلان برای نصب واحدهای تولید و خطوط انتقال جدید نباشد. با حرکت به سمت بازارهای رقابتی برق، پاسخگویی تقاضا به ابزار مهمی تبدیل شده‌است که توسط بسیاری از واحدها و بهره‌برداران سیستم، جهت افزایش درآمد در کنار حفظ قابلیت اطمینان شبکه به کار گرفته می‌شود [۵].

به طور کلی برنامه‌های پاسخ‌گویی تقاضا را می‌توان به دو گروه برنامه‌های مبتنی بر مشوق[۷] و برنامه‌های مبتنی بر قیمت[۸] تقسیم‌بندی کرد. دسته اول در سال ۱۹۶۸، زمانی که شرکت برق دترویت ادیسون یک برنامه کنترل مستقیم بار را اجرا کرد، به مرحله پیاده‌سازی رسید. با ظهور سیستم‌های اندازه‌گیری هوشمند، برنامه‌های مبتنی بر قیمت مورد توجه قرار گرفتند. چراکه سیستم‌های اندازه‌گیری سنتی، مصرف انرژی را در طول بازه‌های زمانی طولانی گردآوری و گزارش می‌کردند و بر اساس این گزارش‌ها، صورت حساب‌ها، برای مثال یک ماهه، برای مصرف‌کنندگان صادر می‌شد. در حالیکه سیستم‌های اندازه‌گیری هوشمند قادر هستند

مصرف انرژی را در بازه‌های زمانی بسیار کوتاه‌تری، مانند ۱۰ دقیقه، گزارش کنند و لذا پیاده‌سازی طرح‌های مبتنی بر قیمت را امکان‌پذیر سازند [۶]. در ادامه به مطالعه انواع برنامه‌های پاسخگویی تقاضا، مطابق دسته‌بندی گفته‌شده می‌پردازیم و مزایا و معایب آنها را بر اساس نتایج حاصل از پروژه‌های آزمایشیِ پیاده‌سازی شده، بررسی می‌کنیم.

۳-۱- برنامه‌های مبتنی بر مشوق

دراین نوع از برنامه‌ها، مشوق‌های مالی به مصرف‌کنندگان پیشنهاد می‌شود تا با کاهش بار خود به حفظ قابلیت اطمینان شبکه کمک کنند یا مانع از تولید برق با هزینه‌های گزاف شوند. برنامه‌های مبتنی بر مشوق خود در دو گروه برنامه‌های کلاسیک شامل کنترل مستقیم بار[۹] و بارهای قابل قطع[۱۰] و برنامه‌های مبتنی بر بازار شامل ارائه خدمات جانبی[۱۱]، پاسخگویی تقاضای اضطراری[۱۲]، بازفروش مقدار تقاضا[۱۳] و بازار ظرفیت[۱۴] مطالعه می‌گردند [۵]. در ذیل به انواع رایج‌تر رایج‌تر برنامه‌های پاسخ‌گویی تقاضا پرداخته شده‌است.

- **کنترل مستقیم:** در این نوع، شرکت برق یا بهره‌بردار سیستم، از راه دور عملکرد بخشی از تجهیزات الکتریکی مصرف‌کننده را متوقف می‌کند.
- **بارهای قابل قطع:** مشترکین در ازای کاهش برق در زمان‌های ضروری، پاداش دریافت می‌کنند؛ متعاقباً عدم پاسخ‌گویی با جریمه همراه است.
- **بازار ظرفیت:** مشترکین با حادث شدن شرایط بحرانی در شبکه، بار خود را به مقدارِ از پیش تعیین شده‌ای کاهش می‌دهند.
- **ارائه خدمات جانبی:** این نوع برنامه‌ها به مصرف‌کنندگان این امکان را می‌دهند تا در بازار خدمات جانبی شرکت کرده و پیشنهاد کاهش بار خود را ارائه دهند.

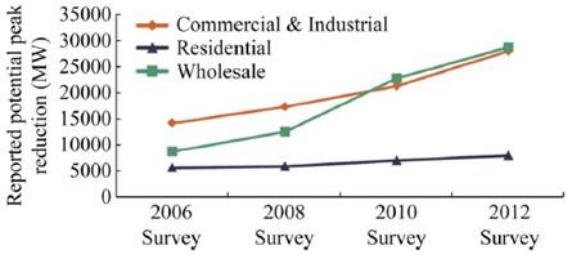
۳-۲- برنامه‌های مبتنی بر قیمت

در این دسته از برنامه‌ها، سیگنال‌های قیمتِ متغیر با زمان به مصرف‌کنندگان عرضه می‌گردد تا آنها به کاهش مصرف در زمان‌هایی که قیمت برق بالاست، ترغیب شوند. انواع این دسته از برنامه‌ها به شرح ذیل می‌باشند.

- **قیمت‌گذاری زمان استفاده**[۱۵]: در این نوع، ساعات روز به چند بازه زمانی ثابت و با قیمت انرژی متفاوت تقسیم می‌شوند.
- **قیمت‌گذاری پیک بحرانی**[۱۶]: در برخی از ساعات در طول سال که مصرف برق زیاد است، قیمتی بسیار بالا برای برق در نظر گرفته می‌شود.
- **قیمت‌گذاری لحظه‌ای**[۱۷]: انرژی مصرفی توسط مصرف‌کنندگان به صورت ساعتی به وسیله کنتورها ثبت می‌شود و صورت‌حساب آنها بر اساس قیمت لحظه‌ای انرژی محاسبه می‌گردد.

۳-۳- ارزیابی انواع برنامه‌های پاسخگویی تقاضا

از سال ۲۰۰۶، وزارت انرژی ایالات متحده سالانه یک گزارش از ارزیابی عملکرد پروژه‌های پاسخ‌گویی تقاضا و سیستم‌های اندازه‌گیری منتشر می‌کند [۷-۱۰]. شکل (۱) خلاصه‌ای از این گزارش‌ها را در خصوص کاهش اوج بار توسط بخش‌های مختلف مصرف‌کننده نشان می‌دهد.



شکل (۱) : کاهش اوج بار بخش‌های مصرف‌کننده [۹]

بنابراین شکل مصرف‌کنندگانِ بخش‌های صنعتی، تجاری و نیز شرکت‌کنندگانِ بازار عمده‌فروشی برق، بیشترین سهم را در کاهش اوج بار داشته‌اند و رشد کاهش اوج بار در طول سال‌های مورد مطالعه نیز تنها به علت پاسخ‌گویی مناسب این گروه از مصرف‌کنندگان بوده‌است؛ در حالیکه مصرف‌کنندگان خانگی تمایل چندانی برای مشارکت در این حوزه نشان نداده‌اند. یافته‌های کلی پروژه‌های آزمایشی، برخی از مواردی که مانع از نتیجه‌بخشی برنامه‌های پاسخ‌گویی تقاضا می‌گردند را به شرح زیر عنوان کرده‌اند [۸]:

- تمامی مصرف‌کنندگان مایل به مشارکت در این برنامه‌ها نمی‌باشند. اینکه مصرف‌کنندگان در ازای دریافت مشوق‌های مالی به صورت فعالانه در این برنامه‌ها نقش داشته باشند، مستلزم آگاهی آنها از اهمیت اجرای این برنامه‌ها و نیز فرصت‌هایی است که پیاده‌سازی آنها در اختیار مصرف‌کننده قرار می‌دهد،
- استاندارد متحدالشکلی برای قیمت‌گذاری و مشوق‌های مالی تعیین نشده‌است. قیمت‌ها، مشوق‌ها و نیز پروتکل‌های تبادل داده عموماً وابسته به نهادها و شرکت‌های برق می‌باشند و در نتیجه از شرکتی به شرکت دیگر متفاوتند،
- اندازه‌گیری کاهش بار و هزینه‌های مربوط به آن هم‌چنان یک چالش برای انجام این برنامه‌ها می‌باشد. برای مثال نحوه بازیابی هزینه‌های مرتبط با بکارگیری تکنولوژی‌های زیرساختی لازم و نیز پیاده‌سازی پروژه‌ها کاملاً روشن نیست.

مرجع [۱۱] با بررسی ۱۵ برنامه آزمایشی پاسخ‌گویی تقاضای مبتنی بر قیمت که در ایالات متحده و برای مصرف‌کنندگان خانگی طراحی و پیاده‌سازی شده، به این نتیجه رسیده‌است که کاهش اوج بار برای این بخش مصرف‌کننده، به عوامل متعددی مانند وجود سیستم‌های تهویه مطبوع مرکزی، میزان تغییرات قیمت انرژی الکتریکی و نیز فراهم بودن تکنولوژی‌هایی که به صورت خودکار عمل می‌کنند، مانند ترموستات‌های هوشمند که قابلیت مخابره و برنامه‌ریزی شدن را دارند، وابسته است. در میان عوامل یاد شده، تأثیر وجود تکنولوژی‌های زیرساختی در کاهش اوج بار از سایر موارد بیشتر ارزیابی شده‌است؛ به طوریکه مطالعه صورت گرفته بر روی پروژه‌های آزمایشی متعدد مبتنی بر قیمت، نشان می‌دهد که قیمت‌گذاری پیک بحرانی، قادر به کاهش اوج بار برابر با ۱۳ الی ۲۰ درصد بوده‌است. این در حالی است که همین نوع از قیمت‌گذاری در برنامه پاسخ‌گویی تقاضای پیشرفته کالیفرنیا[18] که در آن از تکنولوژی‌های زیرساختی به طور گسترده استفاده شده‌است، توانسته اوج بار را به میزان ۵۱ درصد بکاهد.

بررسی‌های [۱۱] نشان می‌دهد که قیمت‌گذاریِ زمان استفاده در برنامه‌های انجام شده، اوج بار را در حدود ۳ الی ۶ درصد کاسته‌است. اما بزرگ‌ترین پروژه آزمایشی قیمت‌گذاری زمان استفاده که در ایالات متحده و توسط شرکت Puget Sound Energy پیاده‌سازی شده بود با شکست مواجه شد، چراکه مصرف‌کنندگان به تکنولوژی‌های لازم مجهز نبوده و در نتیجه مجبور به پرداخت مبالغ بیشتری در مقایسه با تعرفه ثابت برق شده بودند.

برخلاف برنامه‌های مبتنی بر قیمت، در کنترل مستقیم بار که پروژه‌های آزمایشی بسیاری برای آن تعریف و پیاده‌سازی شده‌است، نیازی به پاسخ‌گویی مصرف‌کننده نیست و هر مصرف‌کننده تنها با اعلام آمادگی برای مشارکت در این نوع از برنامه‌ها، می‌تواند از مشوق‌های در نظر گرفته شده بهره‌مند گردد. بنابراین، کاهش اوج بار از طریق برنامه‌های کنترل مستقیم بار چشم‌گیرتر بوده و می‌تواند تحت کنترل بهره‌بردار شبکه یا شرکت برق باشد. در یکی از برآوردهای وزارت انرژی ایالات متحده، کنترل مستقیم بار، رتبه اول پتانسیل کاهش اوج بار کل را به خود اختصاص داده‌است [۸]. اگرچه این برنامه‌ها در صورت پیاده‌سازی، پتانسیل بالایی برای بهبود شرایط شبکه دارند، اما ترغیب مصرف‌کنندگان به مشارکت در این برنامه‌ها و لذا نتیجه‌بخش بودن آنها بدون چالش نیست.

پروژه‌های آزمایشی اخیر نشان می‌دهند که متوقف کردن اجباری برخی از تجهیزاتِ مورد استفاده مصرف‌کنندگان در برنامه‌های کنترل مستقیم بار که آسایش آنها را بر هم می‌زند، باعث شده‌است تا این دسته از برنامه‌ها محبوبیت خود را در میان مصرف‌کنندگان از دست بدهند. از سوی دیگر، پیاده‌سازی چنین برنامه‌هایی ممکن است حریم خصوصی مصرف‌کنندگان را به خطر بیندازد و زمینه سوء استفاده را برای شرکت‌های برق فراهم کند.

رعایت برابری در قطع بار مصرف‌کنندگان می‌تواند در ایجاد محبوبیت برای مشارکت در کنترل مستقیم بار و یا کنار گذاشته شدن این نوع از برنامه‌ها به علت عدم رضایت مصرف‌کنندگان نقش مؤثری داشته باشد [۳].

بهره‌گیری از برنامه‌های پاسخگویی تقاضا، فارغ از نوع برنامه، به صورت یک گزینه جهت تأمین توان مورد نیاز بارها برای بهره‌برداران سیستم‌های توزیع هوشمند درآمده‌است که می‌تواند با تلفات و نیز هزینه کمتر، بهره‌برداری از سیستم توزیع را امکان‌پذیر سازد. لیکن، در نظر گرفتن این برنامه‌ها منجر به افزایش حجم محاسبات به ویژه افزایش تعداد متغیرها در حل مسائل بهینه‌سازی می‌گردد. برای مثال حضور منابع ذخیره‌ساز انرژی نظیر باتری‌ها در شبکه‌های توزیع که در برنامه‌های پاسخگویی تقاضا هم در نظر گرفته می‌شوند به افزایش حجم بار محاسباتی دامن می‌زند به طوریکه ملاحظاتی مانند تعداد دفعات تغییر حالت از شارژ به دشارژ، چرخه عمر مفید باتری و حد پایین انرژی باقی مانده در باتری باید در تابع هزینه آنها در نظر گرفته شود [۱۲]. علاوه بر این برنامه‌های پاسخگویی تقاضا بازیگران جدیدی نظیر خریداران، فروشندگان و اپراتورهای مبادله‌کننده پاسخگویی تقاضا[19] را به فضای سیستم‌های قدرت به ویژه سیستم‌های توزیع وارد کرده‌اند که هرکدام بنا به نقش خود در این فضای جدید با مسائل و چالش‌هایی مواجه هستند [۱۳]. مطالعات صورت گرفته در رابطه با مسائل پاسخگویی تقاضا را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم‌بندی کرد. در دسته اول، رفتار مصرف‌کنندگان در حضور سیگنال‌های پاسخگویی تقاضا، شامل قیمت متغیر با زمان یا مشوق مالی، مدل‌سازی می‌شود. این مطالعات از روش‌های گوناگون به شبیه‌سازی و بررسی سناریوهای متفاوتی از بازخورد مصرف‌کنندگان که امکان‌پذیر است می‌پردازند. دسته دوم سیگنال‌های پاسخگویی تقاضا را به نحوی که پتانسیل‌های سمت تقاضا به بهینه‌ترین شکل مورد بهره‌برداری قرار گیرد طراحی می‌کند. در این مطالعات سیگنال پاسخ‌گویی تقاضا عموماً از حل یک مسأله بهینه‌سازی با تابع هدفی به دست می‌آید که از عملکرد بازار یا هزینه‌های بهره‌برداری شبکه توزیع استخراج شده است [۱۴].

۴- انرژی تراکنشی

۴-۱- مفهوم و مشخصات انرژی تراکنشی

در فضای دگرگون شده سیستم‌های قدرت امروزی، پایش و کنترل زمان-واقعیِ منابع تولید و مصرف امری غیرممکن به نظر می‌رسد؛ بنابراین برنامه‌های پاسخ‌گویی تقاضا حتی برنامه‌های به‌روزتر آن، باید با تحولات سیستم‌های قدرت سازگار شوند. انرژی تراکنشی شکل کلی‌تری از پاسخ‌گویی تقاضا می‌باشد که علاوه بر منابع مصرف، می‌تواند منابع تولید را هم مدیریت کند. مشابه برنامه‌های پاسخ‌گویی تقاضا، انرژی تراکنشی نیز به نوعی مصرف‌کنندگان را تشویق می‌کنند تا منابع خود را با توجه به نیازهای سیستم بهره‌برداری

کنند؛ با این تفاوت که انرژی تراکنشی می‌تواند مفهوم پاسخ‌گویی تقاضا را به منابع تولید نیز تعمیم دهد و تعادل میان تولید و مصرف را به صورت مستقل، غیرمتمرکز و زمان-واقعی برقرار سازد. به زبان دیگر، انرژی تراکنشی شبکه‌ای از منابع انرژی را ایجاد می‌کند که در آن تمامی سطوح تولید و مصرف می‌توانند با یکدیگر ارتباط برقرار کنند و به مبادله انرژی بپردازند. انرژی تراکنشی، برای منابع تولید و مصرفی که توانایی یا تمایل به شرکت در بازار عمده فروشی برق را ندارند، فرصت مشارکت در فضای مشابهی، به نام بازار انرژی تراکنشی را فراهم می‌آورد. به عنوان مثال، مشابه آنکه یک نیروگاه پس از قبول مقررات، می‌تواند به مشارکت در بازار عمده‌فروشی روز بعد[۲۰] یا زمان-واقعی انرژی بپردازد، بازار انرژی تراکنشی نیز امکان دادوستد انرژی را برای یک خودروی برقی یا سیستم ذخیره‌ی انرژی یک واحد مسکونی ایجاد می‌کند [۱۵]. GWAC[۲۱] انرژی تراکنشی را اینگونه تعریف می‌کند: "مجموعه‌ای از سازوکارهای کنترلی و اقتصادی که تعادل پویای تولید و مصرف را برقرار می‌سازد و از ارزش به عنوان پارامتر کلیدی در این سازوکارها استفاده می‌کند." [۱۶]. از آنجاییکه شرکت‌کنندگان در چارچوب‌های انرژی تراکنشی به صورت مستقل به پیشنهاددهی در این چارچوب‌ها می‌پردازند، قیمت پیشنهادی آنها بر اساس ارزشی است که برای تولید یا مصرف انرژی الکتریکی قائل می‌شوند. بدیهی است که مقدار ارزش بنا بر خصوصیات هر شرکت‌کننده همانند تابع هزینه، عدم آسایش و موارد دیگر مقدار متفاوتی دارد.

برای تبیین دو مفهوم پاسخگویی تقاضا و انرژی تراکنشی، از یک مثال کمک می‌گیریم. یک پنل فوتوولتائیک و تعدادی بار انعطاف‌پذیر را در نظر بگیرید. به علت خطای پیش‌بینی، پنل فوتوولتائیک توان کمتری را نسبت به مقدار پیش‌بینی شده تولید کرده‌است. برای برقراری تعادل میان تولید و مصرف تحت برنامه‌های پاسخگویی تقاضای رایج و چارچوب انرژی تراکنشی، رویه‌های مختلفی به کار گرفته می‌شود. در یک برنامه پاسخگویی تقاضای مبتنی بر قیمت، بازار برق قیمت را به صورت موقت بالا می‌برد با این امید که مصرف‌کنندگان تقاضای خود را کاهش دهند. در یک برنامه پاسخگویی تقاضا از نوع کنترل مستقیم بار، مرکز کنترلی که مدیریت آن ناحیه را بر عهده دارد برخی از بارها را از راه دور قطع می‌کند. در یک چارچوب انرژی تراکنشی مشابه پروژه Pacific Northwest آمریکا که هر بار انعطاف‌پذیر با یک عامل[۲۲] شناخته می‌شود و عامل دیگری به عنوان برقرارکننده تعادل توان در نظر گرفته می‌شود، عامل برقرارکننده تعادل توان با عوامل بار مذاکره می‌کند تا مصرف خود را کاهش دهند. در چارچوب پیشرفته‌تری از انرژی تراکنشی که سطح بالایی از اتوماسیون برای آن در نظر گرفته می‌شود، پنل فوتوولتائیک، خود با بارهای انعطاف‌پذیر مذاکره می‌کند و با پیشنهاد کاهش مصرف در ازای دریافت مبالغی به بارها، در واقع تفاوت توان تولیدی و پیش‌بینی شده خود را از آنها خریداری می‌کند.

ویژگی‌های برجسته انرژی تراکنشی را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- تراکنش انرژی می‌تواند در ابعاد زمانیِ متفاوت، از کسری از ثانیه تا چند ساعت رخ دهد؛ درحالیکه برنامه‌های پاسخگویی تقاضای سنتی در بازه‌های زمانی طولانی‌تری اتفاق می‌افتند،
- مشارکت منابع در بازارهای انرژی تراکنشی برای برقراری تعادل توان، کاملاً داوطلبانه می‌باشد و در این چارچوب هیچ نهاد مرکزی در نظر گرفته نمی‌شود که برای بهره‌برداری از منابع فرمان صادر کند،
- در چارچوب انرژی تراکنشی، منابع مصرف و تولید توسط یک عامل یا گِره[۲۳] شناخته می‌شوند که قادر به ایجاد ارتباط با یکدیگر هستند و می‌توانند به صورت خودکار و مستقل، از جانب مالکان خود تصمیم‌گیری کنند. به این ویژگی انرژی تراکنشی، قابلیت همکاری[۲۴] می‌گویند،
- منابع هوشمند به صورت غیرمتمرکز با یکدیگر به تبادل داده و خرید و فروش می‌پردازند تا مقیاس‌پذیری[۲۵] این چارچوب‌ها حفظ شود،
- برای حفظ حریم خصوصی در چاچوب‌های انرژی تراکنشی، منابع تنها توسط مالکان خود کنترل می‌شوند و نه شرکت‌های برق،
- در چارچوب‌های انرژی تراکنشی فرض می‌شود که مصرف‌کنندگان به سیستم مدیریت انرژی مجهز می‌باشند،
- در انرژی تراکنشی معاملات انرژی در سطح خرده‌فروشی می‌باشد،
- در چارچوب‌های انرژی تراکنشی شارش توان به صورت دو سویه در نظر گرفته می‌شود.

در بخش بعد به مرور برخی چارچوب‌های انرژی تراکنشی می‌پردازیم.

۴-۲- نمونه‌هایی از چارچوب‌های انرژی تراکنشی

پروژه Pacific Northwest یک طرح آزمایشی در خصوص انرژی تراکنشی به ارزش ۱۷۹ میلیون دلار می‌باشد که در سال ۲۰۱۰ میلادی آغاز به کار کرد [۱۸,۱۷]. در این چارچوب، شبکه قدرت Pacific Northwest به ۲۷ زیرشبکه[۲۶] تقسیم می‌شود که می‌توانند با یکدیگر به مبادله داده بپردازند. هر زیرشبکه یک عامل متعادل‌سازی محلی دارد که عهده‌دار برقراری تعادل توان زیرشبکه است. هرکدام از این عوامل تخمینی از هزینه انتقال برق را به زیرشبکه‌های همسایه اعلام می‌کنند که این هزینه وابسته به مقدار توان انتقالی می‌باشد. عوامل زیرشبکه‌های همسایه در پاسخ به این سیگنال، مقدار توانی که مایل به دریافت آن هستند را اعلام می‌کنند.

در صورتیکه مقدار توان مورد نیاز زیرشبکه خریدار با توان پیشنهادی زیرشبکه فروشنده یکسان یا نزدیک به هم باشد، نیازی به مبادله بیشتر داده نیست اما اگر عدم توافقی میان این دو وجود داشته باشد، برای مثال زیرشبکه خریدار مایل به خرید توان بیشتری از آنچه تخمین زده بود باشد، تبادل داده به این شکل ادامه پیدا می‌کند که زیرشبکه فروشنده قیمت را بالا می‌برد و زیرشبکه خریدار در پاسخ، مقدار توان مورد نیاز خود را کاهش می‌دهد و این تبادل داده تا زمانیکه زیرشبکه‌ها در خصوص قیمت و مقدار توان مورد مبادله به توافق برسند ادامه پیدا می‌کند.

در چارچوب انرژی تراکنشی دیگری که توسط PNNL[۲۷] ارائه شده‌است، هر بار توانایی صحبت با سایر بارها را دارد و با همسایگانش داده رد و بدل می‌کند و برنامه مصرف انرژی الکتریکی خود را به نحوی مشخص می‌کند که مشخصه بار کل هرچه بیشتر یکنواخت گردد [۱۹]. مرجع [۲۰] یک چارچوب انرژی تراکنشی برای مصرف‌کنندگان خانگی در نظر می‌گیرد که در آن برای هر فیدر سیستم توزیع هر ۵ دقیقه یکبار یک بازار خرده فروشی انرژی برگزار می‌شود. هر ساختمان یک پیشنهاد تقاضا به مرکز بهره‌برداری واقع در پست مربوطه می‌فرستد. مرکز بهره‌برداری پس از دریافت تمام پیشنهادها از ساختمان‌هایی که توسط یک فیدر تغذیه می‌شوند، یک مشخصه برای تقاضای کل آن فیدر ایجاد می‌کند. با این فرض که مشخصه تغذیه برای هر فیدر مشخص است، قیمت تسویه بازار از محل برخورد این دو مشخصه حاصل می‌شود. پس از مشخص شدن قیمت تسویه بازار، این قیمت به تمام تجهیزات هوشمند ارسال می‌گردد تا هر ساختمان برنامه مصرف انرژی خود را بر این اساس تعیین کند. تمامی طرح‌های عنوان شده عوامل را به تصمیم‌گیری غیرمتمرکز و خودکار وا می‌دارند.

در چارچوب‌های پیشرفته‌تری که برای انرژی تراکنشی در نظر گرفته می‌شود، هر گره تراکنشی در شبکه قدرت یک برنامه مصرف یا تولید انرژی الکتریکی را به صورت روز بعد یا زمان-واقعی تهیه و آن را دنبال می‌کند. گره‌های تراکنشی مجهز به عواملی می‌باشند که توانایی صحبت کردن با گره‌های دیگر و نیز اخذ تصمیم‌های مستقل را دارند. در صورتیکه یک گره به صورت زمان-واقعی قادر به دنبال کردن برنامه تولید یا مصرفی که اعلام کرده‌است نباشد، جریمه می‌شود. برای اجتناب از اعمال جریمه، این گره تراکنشی که از این پس آن را گره خاطی می‌نامیم، نخست مقدار کمبود یا مازاد توانش را به گره‌هایی که برای مبادله توان واجد شرایط می‌دانند اعلام می‌کند. گره‌های واجد شرایط، باید از نظر فیزیکی نزدیک به گره خاطی باشند تا تبادل توان میان آنها منجر به تغییرات نامطلوب در شارش جریان خطوط نگردد. گره‌های واجد شرایط در پاسخ به درخواست گره خاطی، مقدار توانی که قادر به تولید یا مصرف آن هستند و نیز قیمت متناظر با انجام این کار را اعلام می‌کنند. گره خاطی پس از ارزیابی پیشنهادها، تصمیم‌گیری می‌کند. در صورت پذیرفته شدن پیشنهاد هر گره واجد شرایط، آن گره متعاقباً توان پیشنهادی را تولید یا مصرف می‌کند و لذا از جریمه شدن گره خاطی اجتناب می‌شود. با اعمال چنین چارچوبی، تا زمانیکه هر گره برنامه تولید یا مصرف خود را دنبال کند تعادل توان برقرار است و در صورتیکه گره‌ای قادر به انجام این کار نباشد، تعادل توان از طریق تراکنش‌های محلی برقرار می‌گردد و تنها تعدادی از گره‌ها برنامه خود را تغییر داده و سایر گره‌ها از این تغییرات مصون می‌مانند.

ریزشبکه[۲۸] مجموعه‌ای از منابع تولید انرژی تجدیدپذیر، سیستم‌های ذخیره انرژی و بارهای کنترل‌شونده است که به یک فیدر فشار ضعیف متصل می‌شوند و می‌توانند به صورت متصل به شبکه یا جزیره‌ای کارکنند. از آنجایی‌که ریزشبکه‌ها عموماً مجهز به زیرساخت‌های کنترلی و مخابراتی مناسب می‌باشند، مبادله توان در بازارهای بین ریزشبکه‌ای به یکی از موضوعات مورد توجه در زمینه انرژی تراکنشی تبدیل شده‌است. مرجع [۲۱] در یک چارچوب دو سطحیِ مدیریت منابع انرژی توزیع‌شده، به بررسی تبادل انرژی در یک بازار بین ریزشبکه‌ای می‌پردازد. سطح اول یا سطح میدانی[۲۹]، مدیریت هر ریزشبکه را بر عهده دارد و میزان مازاد توان یا کمبود آن را محاسبه می‌کند. سطح بالاتر یا سطح بازار، امکان تبادل انرژی میان ریزشبکه‌ها با هم و نیز ریزشبکه و شبکه اصلی را فراهم می‌آورد.

مرجع [۲۲] یک چارچوب چندعاملی انرژی تراکنشی برای سیستم‌های توزیع با ریزشبکه‌های هوشمند، به منظور برطرف کردن پیچیدگی‌هایی که حضور این ریزشبکه‌ها برای بهره‌برداری از سیستم توزیع ایجاد می‌کنند، ارائه می‌کند. به صوریکه عدم تعادل انرژی در دو فاز مرتفع می‌گردد؛ در فاز اول، یک بازار مناقصه‌ای[۳۰] روز بعد برای هر ریزشبکه با شرکت عوامل تولید و مصرف آن برگزار می‌گردد و پس از تسویه بازار با مکانیزم مزایده دو طرفه، عدم تعادل توان مشخص می‌گردد، بخشی از این عدم تعادل با برنامه‌ریزی منابع شرکت‌کننده در پاسخگویی تقاضا و نیز سیستم‌های توزیع‌شده ذخیره انرژی برطرف می‌گردد و عدم تعادل باقی‌مانده به صورت زمان-واقعی و در بازار انرژی تراکنشی که در آن هر ریزشبکه یک شرکت‌کننده می‌باشد، از طریق مکانیزم مزایده دو طرفه با قیمت اول[۳۱] تسویه می‌شود. عدم تعادل باقی‌مانده بعد از فاز دوم این چارچوب، تنها از طریق برنامه‌ریزی مجدد منابع پاسخگویی تقاضا مرتفع می‌گردد. برای حفظ مقیاس‌پذیری این چارچوب، از برنامه‌ریزی سیستم‌های توزیع‌شده ذخیره انرژی در این مرحله صرف نظر شده‌است. چراکه غیرخطی بودن هزینه مستهلک شدن سیستم‌های ذخیره، زمان محاسبات را بالا می‌برد.

برخی مطالعات به بررسی تراکنش انرژی در سطحی جزئی‌تر و میان اعضای یک ریزشبکه مانند تجهیزات الکتریکی یا خودروهای الکتریکی می‌پردازند. در مرجع [۲۳] مبادله انرژی میان ساختمان‌های یک ریزشبکه که می‌توانند در بازه‌های زمانی مختلف

نقش خریدار یا فروشنده برق را داشته باشند، بررسی شده‌است. در این چارچوب، تجهیزات الکتریکی، پنل فوتوولتائیک و مولد همزمان برق و حرارت[۳۲]، هرکدام به تنهایی پیشنهاد مصرف یا تولید خود، شامل توان و قیمت مورد نظر را به سیستم مدیریت ساختمان اعلام می‌کنند و این سیستم با توجه به استراتژی هر ساختمان که می‌تواند کمینه کردن هزینه، کمینه کردن انتشار دی‌اکسید کربن، بیشینه کردن آسایش یا ترکیبی از تمامی این موارد باشد و با در نظر گرفتن قیمت برق در شبکه، به هماهنگی این تجهیزات و اصلاح پیشنهادهایشان می‌پردازد، از جانب بارها، پیشنهاد صادر می‌کند و سپس این مقادیر را به سیستم مدیریت انرژی محلی ریزشبکه می‌فرستد. این نهاد که عهده‌دار حفظ پایداری ریزشبکه می‌باشد، یک بازار داخل ریزشبکه‌ای برای مبادله توان میان منابع و تجهیزات ساختمان‌های مختلف برگزار می‌کند. این بازار با مکانیزم مزایده دو سویه[۳۳]، تسویه می‌گردد و هر ساختمان با توجه به مجموع مقادیر خرید و فروش خود در بازار، مبلغی را به سیستم مدیریت انرژی محلی پرداخت، یا از آن دریافت می‌کند.

مرجع [۲۴] پارکینگ خودروهای الکتریکی یک ریزشبکه را به صورت محیطی برای تبادل توان در نظر گرفته‌است که در آن خودروهایِ با مازاد توان می‌توانند از طریق تکنولوژی V2V[۳۴] کمبود توان سایر خودروها را جبران کنند. خودروها داوطلبانه به این پارکینگ مراجعه می‌کنند و زمان ورود، خروج و پیشنهادهای خود شامل ارزش و توان مازاد یا مورد نیاز را به کنترل‌کننده مرکزی ریزشبکه ارسال می‌کنند. این نهاد با حل یک مسأله بهینه‌سازی با تابع هدف بیشینه کردن رفاه اجتماعی[۳۵] برای خودروهای برقی موجود در زمان تصمیم‌گیری، بازار را با یک قیمت کلیدی تسویه کرده و برندگان بازار را اعلام می‌کند. در چارچوب پیشنهادی، خودروها انگیزه‌ای برای ارائه پیشنهادهای غیرواقعی ندارند چراکه سود هر خودرو تنها در صورت اعلام پیشنهاد واقعی خود بیشینه می‌گردد. خودروها بر اساس قیمت کلیدی و ارزشی که در نظر داشته‌اند، مبالغی را دریافت یا پرداخت می‌کنند. سپس در مرحله تخصیص انرژی، کنترل‌کننده ریزشبکه SoC[۳۶] و مقدار انرژی خریداری شده هر خریدار را با توجه به اینکه مجموع تقاضا با مجموع عرضه توان در بازار برابر، از آن بزرگتر یا کوچکتر است، تغییر می‌دهد.

۴-۳- فرصت‌ها و چالش‌های انرژی تراکنشی

در صورت مهیا بودن زیرساخت‌های لازم و جذاب بودن محیط بازار انرژی تراکنشی برای مصرف‌کنندگان، پیاده‌سازی چارچوب‌های انرژی تراکنشی می‌تواند مزایایی را برای سیستم‌های قدرت به ارمغان بیاورد:

- منابع انرژی توزیع شده به شکل بهینه بهره‌برداری می‌شوند،
- قابلیت اطمینان و بازدهی سیستم قدرت بهبود می‌یابد،
- نیاز به ظرفیت و رزروهای گردان[۳۷] برای جبران عدم قطعیت منابع تولید و مصرف انرژی کاهش می‌یابد،
- محیطی شفاف و منصفانه برای مبادله انرژی، توسط منابع تولید و مصرف در تمامی سطوح ایجاد می‌گردد.

همان‌طور که از نمونه‌های عنوان شده در بخش ۴-۲- برمی‌آید، چالش‌هایی برای پیاده‌سازی چارچوب‌های انرژی تراکنشی وجود دارد که برای رسیدن به مزایای عنوان شده باید بر آنها فایق آمد [۲۵].

- نخستین و شاید مهم‌ترین چالش برای پیاده‌سازی و بازدهی طرح‌های انرژی تراکنشی فراهم بودن زیرساخت‌های مخابراتی و کنترلی مورد نیاز می‌باشد. به طوریکه بدون وجود سیستم‌های مدیریت انرژی با سطح اتوماسیون بالا، عملی شدن چنین طرح‌هایی غیرممکن است.
- یکی از انگیزه‌های بدوی ایجاد مفهوم انرژی تراکنشی برقراری تعادل توان در فضایی است که تعداد تجهیزات هوشمند در آن رو به افزایش است و امکان مدیریت مرکزی این تجهیزات وجود ندارد. لذا مقیاس‌پذیری طرح‌های انرژی تراکنشی همواره باید مد نظر قرار گیرد و کارکرد این طرح‌ها تحت تأثیر تعداد گره‌ها یا عوامل شرکت کننده قرار نگیرد.
- از آنجاییکه یک واحد مرکزی بر تراکنش‌های صورت گرفته در این چارچوب‌ها نظارت ندارد، مکانیزم‌هایی که برای تراکنش‌ها در نظر گرفته می‌شود باید در برابر فریب و تقلب عوامل شرکت‌کننده در این طرح‌ها مقاوم باشد تا محیط برای انجام مبادلات شفاف باشد.
- از آنجاییکه کارکرد چارچوب‌های انرژی تراکنشی به شدت به رفتار شرکت‌کنندگان در این طرح‌ها وابسته است، در نظر گرفتن رفتار مصرف‌کنندگان در طراحی مکانیزم‌های تراکنشی اهمیت قابل ملاحظه‌ای دارد و باید به نحوی لحاظ شود که مصرف‌کنندگان انگیزه کافی برای مشارکت در این طرح‌ها را داشته باشند.

در بخش بعد به بررسی برخی جنبه‌های تحقیقاتی چارچوب‌های انرژی تراکنشی و پاره‌ای از مطالعات صورت گرفته در این رابطه می‌پردازیم.

۴-۴- زمینه‌های تحقیقاتی انرژی تراکنشی

عموم مطالعات در خصوص چارچوب‌های انرژی تراکنشی سعی در ایجاد بستری دارند که منابع انرژی توزیع‌شده بدون درگیر شدن با

پیچیدگی‌ها و تعهدات موجود در بازارهای عمده‌فروشی، بتوانند به مبادله انرژی بپردازند. این بستر علاوه بر در نظر گرفتن نیازها، محدودیت‌ها و منافع شرکت‌کنندگان بازار، نباید خللی به بهره‌برداری سیستم قدرت وارد کند. از این رو، طراحی مکانیزم‌ها و مدل‌های دادوستد کارآمد از زمان مطرح شدن مفهوم انرژی تراکنشی مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته‌است. از آنجایی‌که انرژی تراکنشی بر این مبنا پایه‌گذاری شده‌است که مصرف‌کننده نیازها و منافع خود را به خوبی می‌شناسد و بر اساس آنها تصمیم‌گیری می‌کند، شناخت دقیق رفتار مصرف‌کنندگان یا به بیان بهتر، شرکت‌کنندگان بازار انرژی تراکنشی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. چراکه همسو کردن منافع مصرف‌کنندگان با سیستم قدرت تنها در گرو آگاهی دقیق از واکنش و نحوه تصمیم‌گیری آنها در شرایط مختلف، میسر می‌باشد. لذا مطالعه رفتار مصرف‌کنندگان در بازارهای انرژی تراکنشی با مکانیزم‌های مشخص، و نیز نحوه پیشنهاددهی آنها برای تأمین منافع خود، شاخه دیگری از تحقیقات مرتبط با انرژی تراکنشی را ایجاد کرده‌است. امنیت لازم برای رد و بدل داده‌ها در چارچوب‌های انرژی تراکنشی نیز اخیراً بسیار مورد توجه محققین حوزه‌های شبکه‌های هوشمند و نیز سایر زمینه‌ها نظیر تراکنشی‌های مالی قرار گرفته‌است و روش‌های متعددی برای تأمین آن ارائه شده‌است. در ادامه گزیده‌ای از مطالعات صورت گرفته را به طور خلاصه مرور می‌کنیم.

نظریه بازی[۳۸] را می‌توان یک روش کارآمد برای توصیف سازوکار بازارهای انرژی تراکنشی و نیز رفتار شرکت‌کنندگان در این بازارها دانست. مراجع [۲۶]-[۲۸] از مفاهیم گوناگون نظریه بازی برای تحلیل چارچوب‌های انرژی تراکنشی استفاده کرده‌اند. مرجع [۲۶] یک روش برای شبیه‌سازی رفتار مصرف‌کنندگان خانگی یک سیستم توزیع در بازار انرژی تراکنشی ارائه می‌کند. در این تحقیق پس از طرح پیشنهاددهی منابع تولید و مصرف انرژی، به صورت یک مسأله بهینه‌سازی با تابع هدف بیشینه کردن سود بازیگر و مقید به قیود پخش بار و تعادل توان، از روش ارزش شیپلی[۳۹] برای تعیین میزان مشارکت هریک از این منابع در ایجاد تلفات سیستم در صورت انتخاب پیشنهاد خود، استفاده شده‌است. برای به دست آوردن نقطه تعادل نش سیستم از تابع Nykaido-Isoda استفاده شده‌است. از این تابع با نام دیگر تابع پتانسیل نیز در مطالعات یاد می‌شود و در واقع تغییرات سود بازیگر را در صورت تغییر استراتژی خود و با فرض ثابت بودن استراتژی رقیبان نشان می‌دهد. تابع پتانسیل، در صورت وجود، به این نحو به تعیین نقطه تعادل یک بازی کمک می‌کند که کمینه کردن این تابع معادل بیشینه کردن سود هر بازیگر خواهد بود؛ چراکه در نقطه تعادل یک بازی، هیچ بازیگری مایل به تغییر استراتژی خود نمی‌باشد. در این چارچوب، در صورتیکه بازیگران به صورت همکارانه و همسو با برنامه‌ریزی واحدهای نیروگاهیِ مقید به امنیتِ[۴۰] شبکه تصمیم‌گیری کنند، سود بیشتری دریافت می‌کنند.

مرجع [۲۷] یک مدل مبتنی بر بازی رهبر و پیرو (بازی استکلبرگ[۴۱]) برای مدیریت تبادل توان در یک ریزشبکه با مصرف‌کنندگان مجهز به پنل‌های فتوولتائیک ارائه می‌کند. در این مدل توابع سود بهره‌بردار ریزشبکه و نیز مصرف‌کنندگان استخراج شده‌است. بهره‌بردار ریزشبکه در نقش رهبر، سعی دارد تا با تعیین یک سیگنال قیمت، مصرف‌کنندگان را به نحوی هماهنگ کند تا کمترین خرید از سیستم توزیع انجام شود؛ در حالیکه مصرف‌کنندگان که پیروان بازی هستند، خودخواهانه در پی بیشینه کردن سود خود در حضور سیگنال‌های قیمت دریافتی از بهره‌بردار ریزشبکه هستند. در این مطالعه برای مدیریت عدم قطعیت تولید تجدیدپذیر و نیز بار، یک مکانیزم صدور صورت‌حساب ابداع شده‌است که با محاسبه تفاوت میان بار خالص واقعی و برنامه‌ریزی‌شده، سود یا زیان مصرف‌کنندگان براساس مشارکت آنها در سود واقعی بهره‌بردار ریزشبکه تنظیم می‌گردد.

در چارچوب انرژی تراکنشی توصیف شده [۲۸] تعارض منافع میان عوامل در بازار انرژی تراکنشی در قالب مسأله چانه‌زنی نش[۴۲] مطالعه شده‌است؛ به این معنی که عوامل به صورت همکارانه برای رسیدن به یک توافق در مورد پیشنهادهای خود، به چانه‌زنی می‌پردازند. برای جلوگیری از بروز مشکلات بهره‌برداری، قیود پخش بار جریان متناوب در مسأله چانه‌زنی در نظر گرفته شده‌اند. برای کاهش حجم محاسبات، این مسأله به دو زیرمسأله[۴۳] شکسته شده‌است که در اولی، یک مسأله پخش بار با در نظر گرفتن تبادل انرژی حل می‌گردد سپس در زیر مسأله چانه‌زنی، پرداخت‌های عوامل با توجه به جواب زیرمسأله اول تعیین می‌شوند. برای حل این مسأله، گونه تغییریافته‌ای از الگوریتم توزیع شده ADMM[۴۴] به‌کار گرفته شده‌است. در الگوریتم استفاده شده، به جای به روزرسانی متغیرها در تکرارهای متوالی، جواب هر زیرمسأله به صورت شکل- بسته[۴۵] توصیف شده‌است. لازم به ذکر است که روش ADMM به کرات و در کنار روش‌های دیگر، برای طراحی الگوریتم‌های توزیع‌شده در خصوص بازارهای انرژی تراکنشی به کار گرفته می‌شود. برای مثال مرجع [۲۹] ابتدا مسأله دادوستد انرژی را به صورت مرکزی و در قالب یک بهینه‌سازی دو سطحی بررسی می‌کند و استراتژی بهینه افراد را در پاسخ به سیگنال‌های قیمت به دست می‌آورد. در سطح بیرونی این چارچوب، مسأله بیشینه کردن رفاه اجتماعی، با در نظر گرفتن قیود مبتنی بر مدل خطی پخش بار جریان متناوب شبکه حل می‌گردد و در سطح داخلی، پاسخ بهینه ژنراتورها و تجمیع‌کنندگان بار[۴۶]، به سیگنال قیمت محاسبه شده در سطح بیرونی به دست می‌آید. برای مدیریت عدم قطعیت بار، از تخمین احتمالاتی آن استفاده شده‌است. عدم قطعیت تولید منابع انرژی تجدیدپذیر نیز با در نظر گرفتن یک مجموعه عدم قطعیت تطبیقی و ریسک رو به پایین[۴۷] که بیشترین هزینه کمبود انرژی را محاسبه می‌کند، مرتفع شده‌است. ریسک ابزار مناسبی برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت در

پارامترهای مختلف نظیر قیمت فراهم می‌آورد و در مطالعات بسیاری در حوزه انرژی مورد توجه قرار گرفته‌است [۳۰]. در ادامه، برای حفظ حریم شخصی مشارکت‌کنندگان بازار، یک روش غیرمتمرکز یا توزیع‌شده برای مسأله مبادله انرژی پیشنهاد شده‌است. برای طراحی الگوریتم این بخش، روش‌های تجزیه دوگان[۴۸] و ADMM به کار گرفته شده‌اند.

مرجع [۳۱] یک چارچوب انرژی تراکنشی چندعاملی برای کنترل عرضه و تقاضای انرژی الکتریکی در یک شبکه با تعداد زیادی منبع انرژی تجدیدپذیر و خودرو برقی ارائه می‌کند. این مطالعه ضمن بیشینه کردن سود شرکت‌کنندگان بازار، قیود مربوط به ولتاژ را برآورده می‌سازد. بدین منظور از قیمت‌گذاری زمان-واقعی براساس مدل رقابتی انحصار چندجانبه کورنات[۴۹] برای سمت تقاضا و اثر معیار شایستگی[۵۰] برای سمت تولید، جهت مهار کردن نوسانات تولید منابع تجدیدپذیر استفاده کرده‌است. در روش فراابتکاری[۵۱] و تکراری[۵۲] پیشنهادی، ابتدا هر عامل تقاضا (مصرف‌کننده)، یک مسأله بهینه‌سازی را بدون در نظر گرفتن قیود شبکه و نیز تأثیر پیشنهاد سایر شرکت‌کنندگان بر قیمت، برای برنامه‌ریزی بار خود حل می‌کند. عامل تولید با جمع‌آوری پیشنهادهای قیمت واحدهای تولید و مرتب کردن آنها به صورت افزایشی، حدود قیمت زمان-واقعی را اعلام می‌کند. عامل شبکه بر اساس تصمیمات تمامی عوامل، تغییرات لازم را به شبکه اعمال می‌کند.

همان‌طور که در بخش ۴-۲- عنوان شد، تغییرات اخیر در شبکه‌های توزیع از منظر تکنولوژی، اقتصادی و اجتماعی باعث شده‌است تا ریزشبکه به عنوان جایگزین مناسبی برای شبکه قدرت سنتی در تحویل توان به مصرف‌کنندگان در نظر گرفته شود. از این رو ریزشبکه‌هایی که از لحاظ جغرافیایی در مجاورت یکدیگر قرار دارند می‌توانند به یکدیگر متصل شوند تا مزایایی که حضور ریزشبکه‌ها به تنهایی می‌تواند به همراه داشته باشد افزایش یابد [۳۲]. از این رو در سال‌های اخیر اتصال ریزشبکه‌ها به یکدیگر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌است. ریزشبکه‌های متصل[۵۳] می‌توانند راه حلی مقیاس‌پذیر و منعطف برای برطرف کردن نگرانی‌های زیست‌محیطی و نیز اهداف بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت مدرن ارائه کنند. برای مثال منابع انرژی توزیع‌شده‌ای که در نقاط مختلف از ریزشبکه‌های جدا از هم پراکنده شده‌اند می‌توانند به صورت یکپارچه مورد بهره‌برداری قرار گیرند. علاوه بر این، از آنجاییکه ریزشبکه‌های متصل می‌توانند با بازدهی بیشتر به شرایط بهره‌برداری پویایی که تغییرپذیری منابع انرژی توزیع شده به شبکه تحمیل می‌کند پاسخ دهند، به بهره‌وری و امنیت شبکه توزیع نیز کمک می‌کنند. ریزشبکه‌های متصل به طور ذاتی قابلیت اطمینان بالاتری دارند. چراکه هر ریزشبکه می‌تواند منابع رزرو خود را برای کاهش احتمال قطعی برق به همتایانش پیشنهاد دهد [۳۳]. در انتها می‌توان افزود که ریزشبکه‌های متصل می‌توانند اخلال در کارکرد شبکه را که می‌تواند به علل گوناگونی مانند بلایای طبیعی، حملات سایبری یا فیزیکی رخ دهد، تاب بیاورند و برای بازیابی شبکه و خدمات آن با یکدیگر مشارکت کنند [۳۴]-[۳۶]. با توجه به گسترش روز افزون ریزشبکه‌ها و به هم پیوستن آنها، شبکه توزیع به سویی پیش می‌رود که می‌توان آن را مجموعه‌ای از ریزشبکه‌های متصل در نظر گرفت[۳۷].

بدیهی است که اتصال ریزشبکه‌ها به یکدیگر بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع را با پیچیدگی‌های بی‌شماری رو به رو می‌سازد. انرژی تراکنشی می‌تواند هر یک از ریزشبکه‌های متصل را به عوامل فعال انرژی تراکنشی تبدیل کند که برای بهبود شرایط شبکه توزیع به صورت هماهنگ فعالیت می‌کنند [۳۸]. انرژی تراکنشی مسئولیت همزمان مدیریت شارش توان و نیز مدیریت بازار را بر عهده دارد، از این رو شارش توان و نیز تراکنشی‌های مالی در سطح شبکه توزیع باید برای تمام مشارکت‌کنندگان در انرژی تراکنشی شفاف و قابل اطمینان باشند. در غیر این صورت رفتار سودجویانه ریزشبکه‌های متصل در بازار می‌تواند منجر به اختلال در عملکرد بازار شود و در صورت پیشروی، برهم خوردن پایداری فیزیکی سیستم قدرت را به بار آورد. نشت اطلاعات حساس عوامل نیز نگرانی دیگری است که در مدیریت انرژی تراکنشی ریزشبکه‌های متصل باید در نظر گرفته شود. عوامل باید تنها اطلاعات غیرحساس خود نظیر ظرفیت تولید موجود و هزینه حاشیه‌ای تولید را به اشتراک بگذارند و از بروز اطلاعاتی مانند ضرایب هزینه تولید منابع محلی خود بپرهیزند.

مرجع [۳۹] برای ایجاد یک بستر مطمئن جهت مدیریت داده‌ها در چارچوب انرژی تراکنشی ریزشبکه‌های متصل، استفاده از تکنولوژی‌های مرتبط با زنجیره بلوکی[۵۴] را پیشنهاد می‌دهد. زنجیره بلوکی که در ابتدا برای ارز رمزنگاری شده[۵۵] بیت کوین[۵۶] به وجود آمد [۴۰]، امروزه به عنوان تکنولوژی پایه در بسیاری سرویس‌های مالی به ویژه تراکنش‌های نظیر به نظیر[۵۷] مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴۱]. زنجیره بلوکی این امکان را فراهم می‌آورد تا وضعیت‌های عملکرد[۵۸] عوامل حتی در یک محیط ناامن به درستی ذخیره شوند و تراکنش انرژی میان عوامل قابل پیگیری باشد. به صورت متداول، هر ریزشبکه یک پایگاه داده[۵۹] محلی دارد که وضعیت‌های عملکرد محلی را ذخیره می‌کند و با بهره‌بردار سیستم توزیع[۶۰]، که در نقش یک واسط مرکزی مورد اعتماد عمل می‌کند، برای تأیید اعتبار این وضعیت‌ها مکالمه می‌کند. این طرح که مبنی بر ذخیره و مدیریت جداگانه اطلاعات می‌باشد، در معرض خطرهایی به ویژه در فرآیند تصدیق[۶۱] اطلاعات و یا حملات سایبری می‌باشد که قادر به برآورده کردن مقیاس‌پذیری و نیز اطمینانی که از یک چارچوب انرژی تراکنشی در این زمینه انتظار می‌رود نیست. زنجیره بلوکی یک پایگاه داده مشترک میان تمامی ریزشبکه‌هاست که داده‌ها را به ترتیب زمانی و به صورت غیرمرکزی ذخیره می‌کند و نیازی به حضور یک واسط مورد اطمینان ندارد؛ از این رو زنجیره بلوکی معایب

چارچوب‌های متداول را ندارد. وضعیت‌های عملکرد جدید توسط یک استخراج‌کننده[۶۲] به صورت بسته‌های داده به انتهای لیست اضافه می‌شوند. زمانیکه یک بسته داده به زنجیره بلوکی افزوده شود، قابل تغییر نخواهد بود چراکه تمامی ریزشبکه ها بر سر آن وضعیت عملکرد توافق دارند. هر ریزشبکه یک نسخه از زنجیره بلوکی را به صورت محلی نگهداری می‌کند تا وضعیت‌های عملکرد محلی را ذخیره و قرائت کند. در واقع هر ریزشبکه پیوسته اعلان‌هایی مربوط به تغییر وضعیت‌ها را دریافت می‌کند، از طریق مکانیزم‌های از پیش تعیین شده‌ای آنها را وارسی[۶۳] می‌کند و در صورت تأیید، این تغییرات را به نسخه خود از زنجیره بلوکی اضافه می‌کند. بر این اساس، هر ریزشبکه یک نسخه به روز رسانی شده از زنجیره بلوکی در دست خواهد داشت. زنجیره بلوکی یک لیست پیش‌رونده از داده‌ها می‌باشد که توسط متدهای رمزنگاری محافظت می‌شود. بسته‌های داده واحدهای اساسی برای ذخیره اطلاعات می‌باشند که به صورت یک درخت مرکب[۶۴] ذخیره و به وسیله تابع Hash (SHA-256) به صورت رشته‌هایی با طول مشخص رمزنگاری می‌شوند که هیچ اثر یا نشانه‌ای در مورد داده اصلی را فاش نمی‌کند [۴۲]. چارچوب‌های انرژی تراکنشی که از زنجیره بلوکی استفاده می‌کنند مزایای منحصر به فردی برای انجام تراکنش‌های انرژی به صورت محلی دارند [۴۳]. اگرچه محدودیت‌های فیزیکی شبکه توزیع، سبب می‌شود تا ملزومات سخت گیرانه‌ای به استفاده از زنجیره بلوکی در مدیریت انرژی تراکنشی تحمیل شود تا مشارکت ریزشبکه‌ها و نیز سایر عوامل مانند بهره‌بردار شبکه توزیع در بازارهای انرژی تراکنشی به صورت خودکار، امن، پربازده و با تاب آوری بالا ثبت گردد. در ادامه به برخی از این ملاحظات و راهکارهای پیشنهادی می‌پردازیم.

ارزهای رمزنگاری شده بیت کوین و اتریوم[۶۵] بدون ارزیابی میزان اعتبار کاربران، به آنها اجازه دسترسی می‌دهند. چنین رویه همگانی‌ای[۶۶] که نیازی به اخذ مجوز ندارد کاربردهای زنجیره بلوکی را به الگوریتم‌های پیچیده توافق[۶۷] مانند الگوریتم proof-of-work گره می‌زند که قادرند حتی برای کاربران ناشناس هم یک محیط امن برای مبادله و تراکنش فراهم آورند [۴۴]. محدودیت‌هایی که در طراحی این الگوریتم‌ها وجود دارد، آنها را پیچیده، زمان‌بر و پرهزینه می‌سازد. بر خلاف زنجیره بلوکی همگانی، زنجیره بلوکی اختصاصی تنها به تعدادی از کاربران وارسی شده اجازه دسترسی می‌دهد و از این رو عمدتاً از الگوریتم‌های ساده‌تر توافق مانند الگوریتم کاربردی Byzantine که حجم محاسباتی کمتری دارند استفاده می‌کند [۴۵]. بنابراین کاربران می‌توانند سریعتر به وارسی و ذخیره اطلاعات بپردازند. به علت ساختار تنظیم شده[۶۸] سیستم قدرت و محدودیت‌های زمانی که برای ذخیره اطلاعات وجود دارد، عموماً از زنجیره‌های بلوکی اختصاصی در چارچوب‌های انرژی تراکنشی استفاده می‌شود.

بازار برق به طور کلی انحصاری‌تر از بازارهای آزاد می‌باشد. به منظور حفظ امنیت بازار، استانداردهای بالایی برای ورود به آن در نظر گرفته می‌شود. بنابراین شرکت‌کنندگان بالقوه در بازارهای انرژی تراکنشی باید پیش از انجام تراکنش، وارسی و سپس از طریق یک نهاد تنظیم‌کننده مانند بهره‌بردار سیستم توزیع، معتبر شناخته شوند. برای جلوگیری از اثرگذاری مالی و فیزیکی که رفتار سودجویانه یا نسنجیده شرکت‌کنندگان بازار می‌تواند بر سیستم قدرت داشته باشد، می‌توان به هر ریزشبکه یک اعتبار[۶۹] نسبت داد که بر اساس تراکنش‌های پیشین آن، میزان اعتبار ریزشبکه را در بازار انرژی تراکنشی مشخص می‌کند. در ابتدای هر بازه زمانی، به تمامی شرکت‌کنندگان بازار یک اعتبار یکسان داده می‌شود . در صورت مشاهده رفتار سودجویانه که می‌تواند به علت حملات سایبری یا تبانی عوامل باشد، ریزشبکه مورد نظر جریمه می‌شود و از اعتبار آن کسر می‌گردد. در صورتیکه اعتبار یک ریزشبکه از یک مقدار آستانه‌ای[۷۰] کمتر باشد، آن ریزشبکه قادر به مشارکت در بازار انرژی تراکنشی نخواهد بود. علاوه بر این، ریزشبکه‌ها می‌توانند در ابتدای بازه‌ای که اعتبارشان امتیازدهی می‌شود، ملزم به پرداخت مقدار قابل توجهی ارز یا ارز رمزنگاری شده به عنوان ودیعه گردند تا نوعی تضمین برای عملکرد آنها باشد. در انتهای هر بازه، ارزهای به ودیعه گذاشته شده مطابق با امتیاز اعتبار آنها به ایشان بازگردانده می‌شود؛ به طوریکه در ازای کاهش اعتبار، مقدار قابل توجهی از ودیعه ریزشبکه کسر می‌گردد و بنابراین با مکانیزم یاد شده احتمال بروز فعالیت‌های سودجویانه در بازار کاهش می‌یابد چراکه ریزشبکه‌ها با چنین فعالیت‌هایی درآمد و اعتبار خود را خواهند کاست [۳۹].

۵- نتیجه‌گیری

وابستگی و نیاز انسان مدرن به انرژی الکتریکی به نحوی افزایش پیدا کرده‌است که بالا بردن ظرفیت واحدهای تولید و توسعه شبکه انتقال قادر به تأمین این نیاز نمی‌باشد. در نتیجه سیاست‌های مدیریت مصرف برای همسو ساختن تقاضا با شرایط تولید انرژی الکتریکی در سراسر دنیا به کار گرفته شده‌اند. همگام با تغییراتی که در فضای سیستم‌های قدرت در حال وقوع است مانند نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر و استفاده گسترده از تجهیزات هوشمند، سیاست‌های مدیریت مصرف نیز در حال گذار از برنامه‌های ساده پاسخ‌گویی تقاضا به سمت برنامه‌های پیشرفته‌تری مانند انرژی تراکنشی هستند که نیازمند مشارکت و تصمیم‌گیری مستقل منابع انرژی می‌باشند تا منابع انرژی موجود با بهره‌وری هرچه بیشتر مورد بهره‌برداری قرار گیرند. این مفهوم نوپدید برای دستیابی به اهداف از پیش‌تعیین شده، نیازمند تحقیقات گسترده در خصوص طراحی و تنظیم مکانیزم‌های بازار انرژی تراکنشی، نحوه انگیزش شرکت‌کنندگان و نیز زیرساخت‌های لازم برای پیاده‌سازی چارچوب‌های آن می‌باشد.

مراجع

[1] Lampropoulos, I., Kling, W. L., Ribeiro, P. F. and Den Berg, J. Van, "History of demand side management and classification of demand response control schemes," IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet., pp. 31–35, 2013.

[2] Samadi, P., Mohsenian-Rad, H., Schober, R. and Wong, V. W. S., "Advanced demand side management for the future smart grid using mechanism design," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 3, no. 3, pp. 1170–1180, 2012.

[3] Chen, S. and Liu, C. C., "From demand response to transactive energy: state of the art," J. Mod. Power Syst. Clean Energy, vol. 5, no. 1, pp. 10–19, 2017.

[4] Mak, S. and Radford, D., "Communication system requirements for implementation of large scale demand side management and distribution automation," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 11, no. 2, pp. 683–688, 1996.

[5] Albadi, M. H. and El-Saadany, E. F., "A summary of demand response in electricity markets," Electr. Power Syst. Res., vol. 78, no. 11, pp. 1989–1996, Nov. 2008.

[6] "Time based rate programs", SmartGrid Gov, Office of Electricity Delivery & Energy Reliability, US Department of Energy, Washington, DC, USA.

[7] "2006 Assessment of Demand Response and Advanced Metering -- Staff Report," Federal Energy Regulatory Commission, Washington, DC, USA, 2008.

[8] "2010 Assessment of Demand Response and Advanced Metering -- Staff Report," Federal Energy Regulatory Commission, vol. 74, no. 0022–3042 SB–IM, pp. 2–5, 2011.

[9] "Assessment of Demand Response and Advanced Metering -- Staff Report," Federal Energy Regulatory Commission, Washington, DC, USA, 2012.

[10] "Reports on Demand Response & Advanced Metering," Federal Energy Regulatory Commission, Washington, DC, USA, 2015.

[11] Faruqui, A. and Sergici, S., "Household Response To Dynamic Pricing of Electricity—a Survey of the Experimental Evidence," J Regul Econ, no.38, pp.193–225, 2010.

[۱۲] سلمانی سعید، جدید شهرام، "بهره‌برداری بهینه شبکه توزیع هوشمند در حضور منابع انرژی پراکنده"، نشریه انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، شماره۳، ۱۳۹۵.

[13] Arasteh, H. R., Parsa Moghadddam, M., Sheikh-El-Eslami, M.K., Shafie-Khah, M., "Bidding strategy in demand response exchange market," JIAEEE, Vol 2, 1392.

[14] Teymourzadeh Baboli, P., "Designing incentive-based demand response program for minimizing financial risk of retailer during peak period," JIAEEE, Vol 4, 1397.

[15] Rayati, M., Amirzadeh Goghari, S., Nasiri Gheidari, Z. and Ranjbar, A. M., "Robust and dynamic transactive energy system using Tsypkin–Polyak theorem," IET Smart Grid, vol. 1, no. 2, pp. 57–65, 2018.

[16] "GridWise transactive energy framework version 1.0," The Grid-Wise Architecture Council, US Department of Energy, Washington, DC, USA, 2015.

[17] Hammerstrom, DJ., "Pacific Northwest smart grid demonstration, transactive coordination signals". PNWD-4402 Rev X, Battelle—Pacific Northwest Division, Richland, WA, USA, 2013.

[18] Hammerstrom, DJ., Johnson, D., Kirkeby, C., "Pacific Northwest smart grid demonstration project technology performance report," Vol.1, Technology performance. PNWD-4445 Vol.1. Battelle—Pacific Northwest Division, Richland, WA, USA, 2015.

[19] Pacific Northwest National Laboratory VOLTTRON™—"an intelligent agent platform for the smart grid," http://gridoptics. pnnl.gov/VOLTTRON/

[20] Widergren, S. and Fuller, J., "Residential transactive control demonstration," IEEE PES innovative smart grid technologies conference, pp. 1–5, Washington, DC, USA, 2014.

[21] Nunna, K., Doolla, S., "Multi Agent based Distributed Energy Resource Management for Intelligent Microgrids," no. c, 2012.

[22] Nunna, K., Srinivasan, D., "Multiagent-Based Transactive Energy Framework for Distribution Systems with Smart Microgrids," IEEE Trans. Ind. Informatics, vol. 13, no. 5, pp. 2241–2250, 2017

[23] El-Baz, W., Tzscheutschler, P., "Autonomous coordination of smart buildings in microgrids based on a double-sided auction," IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet., vol, pp. 1–5, 2018.

[24] Li, D., Yang, Q., Yu, W., An, D., Yang, X., "Towards double auction for assisting electric vehicles demand response in smart grid," IEEE Int. Conf. Autom. Sci. Eng., vol. 2017–Aug., pp. 1604–1609, 2018.

[25] Atamturk, N., Zafar, M., "Transactive energy: a surreal vision or a necessary and feasible solution to grid problems," California Public Utilities Commission Policy & Planning Division, Los Angeles, 2014.

[26] Zhang, N., Yan, Y., Xu, S., Su, W., "Game-theory-based electricity market clearing mechanisms for an open and transactive distribution grid," IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet., vol. 2015–Sept, 2015.

[27] Liu, Z., Wu, Q., Huang, S., Zhao, H., "Transactive Energy : A Review of State of The Art and Implementation."

[28] Li, J., Zhang, C., Xu, Z., Wang, J., Zhao, J., Zhang, Y. J. A., "Distributed transactive energy trading framework in distribution networks," IEEE Trans. Power Syst., vol. 33, no. 6, pp. 7215–7227, 2018.

[29] Bahrami, S., Hadi Amini, M., Shafie-Khah. M., Catalao, J. P. S., "A Decentralized Renewable Generation Management and Demand Response in Power Distribution Networks," IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 9, no. 4, pp. 1783–1797, 2018.

[۳۰] خجسته میثم، جدید شهرام، "مدل پاسخ بار الکتریکی مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی"، نشریه انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، شماره۱، ۱۳۹۴ .

[31] Divshali, P. H., Choi, B. J., Liang, H.,"Multi-agent transactive energy management system considering high levels of renewable energy source and electric vehicles," IET Gener. Transm. Distrib., vol. 11, no. 15, pp. 3713–3721, 2017.

[32] Che, L., Shahidehpour, M., Alabdulwahab, A., Al-Turki, Yusuf, "Hierarchical coordination of a community microgrid with AC and DC microgrids," IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 6,no. 6, pp. 3042–3051, 2015.

[33] Farzin, H., Fotuhi-Firuzabad, M., Moeini, M., "Enhancing power system resilience through hierarchical outage management in multi-microgrids, " IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 7, no. 6, pp. 2869–2879, 2016.

[34] Ma, S., Chen, B., Wang, Z., "Resilience enhancement strategy for distribution systems under extreme weather events," IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 9, no. 2, pp. 1442–1451, 2018.

[35] Li, Z., Shahidehpour, M., Abdulwhab, A., Abusorrah, A., "Analyzing locally coordinated cyber-physical attacks for

undetectable line outages, " IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 9, no. 1, pp. 35–47, 2018.
[36] Liu, Y., Fan, R., Vladimir, T., "Power system restoration: a literature review from 2006 to 2016," J. Mod. Power Syst. Clean Energy, Vol. 4, no 3, pp. 332–341, 2016.
[37] Li, Z., Shahidehpour, M., Aminifar, F., Alabdulwahab, A., Al-Turki, Y., "Networked microgrids for enhancing the power system resilience," Proc. IEEE, Vol. 105, no. 7, pp. 1289–1310, 2017.
[38] Wang, H., Huang, J., "Incentivizing energy trading for interconnected microgrids, " IEEE Trans. Smart Grid, 3053 (c), pp. 1–11, 2016.
[39] Li, Z., Bahramirad, Sh., Paaso, A., Yan, M., Shahidehpour, M., "Blockchain for Decentralized Transactive Energy Management System in Networked Microgrids," Elsevier, Vol. 32, no. 4, pp. 58–72, 2019.
[40] Nakamoto, S., "Bitcoin: a Peer-to-peer Electronic Cash System, " 2008.
[41] Underwood, S., "Blockchain beyond bitcoin," Commun. ACM, Vol. 59, no. 11, pp. 15–17, 2016.
[42] Gilbert, H., Handschuh, H., "Security analysis of SHA-256 and sisters, " International Workshop on Selected Areas in Cryptography, pp. 175–193, 2003.
[43] Dorri, A., Kanhere, S.S., Jurdak, R., Gauravaram, P., "Blockchain for IoT Security and Privacy: the Case Study of a Smart Home," Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops), pp. 618–623, 2017.
[44] Gervais, A., Karame, G.O., Wüst, K., Glykantzis, V., Ritzdorf, H., Capkun, S., "On the security and performance of proof of work blockchains," Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security, pp. 3–16, 2016.
[45] Androulaki, E., "Hyperledger fabric: a distributed operating system for permissioned blockchains," Proceedings of the Thirteenth EuroSys Conference, pp. 30, 2018.

زیرنویس‌ها

[1] Demand-Side Management (DSM)
[2] Demand Response (DR)
[3] Photovoltaic systems
[4] Transactive Energy (TE)
[5] Real time
[6] Load leveling
[7] Incentive Based Programs (IBP)
[8] Price Based Programs (PBP)
[9] Direct Load Control (DLC)
[10] Interruptible loads
[11] Ancillary services
[12] Emergency demand response
[13] Demand bidding
[14] Capacity market
[15] Time-of-Use (TOU)
[16] Critical Peak Pricing (CPP)
[17] Real Time Pricing (RTP)
[18] California's Advanced Demand Response System program
[19] Demand response exchange operator
[20] Day-ahead
[21] GridWise Architecture Council
[22] Agent
[23] Node
[24] Interoperability
[25] Scalability
[26] Sub-region
[27] Pacific Northwest National Laboratory
[28] Microgrid
[29] Field level
[30] Auction market
[31] First price double auction
[32] Combined Heat and Power (CHP)
[33] Double-sided auction
[34] Vehicle to Vehicle
[35] Social welfare
[36] State of Charge
[37] Spinning reserves
[38] Game theory
[39] Shapley value
[40] Security Constrained Unit Commitment (SCUC)
[41] Stackelberg game
[42] Nash bargaining solution
[43] Subproblem
[44] Alternating Direction Method of Multipliers
[45] Closed-form
[46] Load aggregators
[47] Down-side risk
[48] Dual decomposition
[49] Cournot oligopoly competition model
[50] Merit order effect
[51] Meta heuristic
[52] Iterative
[53] Networked microgrids
[54] Blockchain
[55] Cryptocurrency
[56] Bitcoin
[57] Peer-to-peer
[58] Operating states
[59] Database
[60] Distribution System Operator (DSO)
[61] Validation
[62] Miner
[63] Validate
[64] Merkle tree
[65] Ethereum
[66] Public (permissioned)
[67] Consensus algorithm
[68] Regulated
[69] Reputation score
[70] Threshold value