مروری بر برنامه‌ریزی بهینه پاسخگویی تقاضای منازل مسکونی از طریق تجمیع‌کننده

محمد حسین عرفانی مجد[۱]، غلامرضا کامیاب[۲*] و سعید بلوچیان[۳]

چکیده

در این مقاله به مرور جامع راهکارهای بهینه‌سازی پاسخگویی بار در منازل مسکونی از طریق تجمیع‌کننده‌ها پرداخته شده است. با افزایش فزاینده فشار بر شبکه‌های برق به دلیل رشد قابل توجه تقاضا، برنامه‌ریزی و اجرای موثر استراتژی‌های پاسخگویی به تقاضا اهمیت زیادی یافته است. استفاده از روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی و هوشمند، مدل‌سازی اقتصادی، تحلیل‌های آماری و فرآیندهای داده‌کاوی، و همچنین توجه به جنبه‌های محیطی و بهبود بهره‌وری انرژی از مهم‌ترین رویکردهای مورد بحث در منابع مرور شده است. مزایای قابل توجه استفاده از تجمیع‌کننده‌ها شامل کاهش هزینه‌های انرژی، بهبود پایداری شبکه، افزایش انعطاف‌پذیری و کاهش قابل توجه انتشار آلاینده‌ها می‌باشد. با این حال، چالش‌هایی نظیر پیچیدگی‌های فنی، نیاز به هماهنگی موثر بین ذی‌نفعان مختلف، و محدودیت‌های زیرساختی در اجرای این راهکارها وجود دارد. به‌منظور غلبه بر این چالش‌ها، استفاده از روش‌های پیشرفته تحلیل داده، توسعه الگوهای نوین و نوآور تجمیع و به‌کارگیری استراتژی‌های کارآمد مدیریت انرژی توصیه شده است. نتایج مرور نشان می‌دهد که با به‌کارگیری مناسب و مؤثر تجمیع‌کننده‌ها، می‌توان به تحقق اهداف کلیدی بهینه‌سازی پاسخگویی بار در منازل مسکونی دست یافت که این امر نه تنها بهبود کارایی شبکه‌های برق را به‌دنبال دارد، بلکه به کاهش هزینه‌های انرژی مصرف‌کنندگان نیز کمک شایانی می‌کند. با توجه به تنوع و گستردگی روش‌های موجود، تحقیق و توسعه بیشتر در این حوزه به‌ویژه در زمینه‌ی یکپارچه‌سازی فناوری‌های نوین و همچنین افزایش مشارکت فعال مصرف‌کنندگان در برنامه‌های موثر پاسخگویی بار پیشنهاد می‌شود.

کلمات کلیدی: پاسخگویی تقاضا، تجمیع‌کننده، شبکه هوشمند، مدیریت مصرف انرژی

دریافت مقاله: ۲۵/۰۵/۱۴۰۳

پذیرش مقاله: ۱۰/۰۸/۱۴۰۳

۱-مقدمه

با رشد سریع جمعیت و توسعه شهرها، فشار بر روی شبکه‌های برق به طور فزاینده‌ای افزایش یافته است. این رشد تقاضا باعث شده است که شبکه‌های برق با چالش‌های جدیدی مواجه شوند و نیاز به بهینه‌سازی مدیریت مصرف و تقاضا بیش از پیش احساس شود. در این راستا، یکی از راهکارهای مؤثر برای مدیریت تقاضای برق در مقیاس منازل مسکونی، استفاده از تجمیع‌کننده‌ها است. تجمیع‌کننده‌ها به عنوان ابزارهایی کلیدی در بهینه‌سازی مصرف انرژی و پاسخگویی به نیازهای شبکه برق معرفی شده‌اند.

تجمیع‌کننده‌ها می‌توانند به انواع مختلفی از جمله تجمیع‌کننده‌های توان، تجمیع‌کننده‌های بار و تجمیع‌کننده‌های پاسخگویی تقاضا تقسیم شوند. هر یک از این تجمیع‌کننده‌ها با اهداف و عملکردهای خاص خود به بهبود بهره‌وری و پایداری شبکه‌های برق کمک می‌کنند. تجمیع‌کننده‌های توان عمدتاً به کاهش بار اوج مصرف و بهبود کیفیت توان شبکه می‌پردازند، در حالی که تجمیع‌کننده‌های بار بر روی کاهش و مدیریت بار در زمان‌های پیک تمرکز دارند. تجمیع‌کننده‌های پاسخگویی

[۲*] پست الکترونیک نویسنده مسئول: kamyabgolamreza@yahoo.com

۱. دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد

۲. استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد

۳. دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

تقاضا نیز با هدف تغییر الگوی مصرف و تطبیق آن با نیازهای شبکه فعالیت می‌کنند.

در این مقاله، به بررسی جامع و دقیق راهکارهای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی پاسخگویی تقاضا در منازل مسکونی از طریق تجمیع‌کننده‌ها پرداخته خواهد شد. مزایای استفاده از تجمیع‌کننده‌ها شامل کاهش هزینه‌های انرژی، افزایش پایداری شبکه، بهبود کیفیت توان و کاهش انتشار آلاینده‌ها است. به‌طور خاص، تجمیع‌کننده‌ها قادرند به کاهش نیاز به تولید انرژی در ساعات اوج مصرف کمک کنند و با کاهش بار شبکه، باعث بهبود کارایی و کاهش هزینه‌های مرتبط با تولید و توزیع برق شوند. با این حال، چالش‌هایی نیز نظیر پیچیدگی‌های فنی، نیاز به هماهنگی میان ذی‌نفعان مختلف و محدودیت‌های زیرساختی در اجرای این راهکارها وجود دارد.

تحقیقات و مطالعات متعددی در زمینه برنامه‌ریزی بهینه پاسخگویی تقاضا به شواهدی از تأثیرات مثبت و منفی این تجمیع‌کننده‌ها اشاره کرده‌اند. این مقاله به بررسی تجارب مختلف، تحلیل نتایج تحقیقات گذشته و ارائه راهکارهای نوین برای بهبود بهره‌وری تجمیع‌کننده‌ها می‌پردازد. نتایج این مطالعه می‌تواند به سیاست‌گذاران، مدیران انرژی و محققان کمک کند تا راهکارهای مؤثرتری را برای بهینه‌سازی پاسخگویی تقاضا در منازل مسکونی توسعه دهند و به بهبود کارایی شبکه‌های برق و کاهش هزینه‌های انرژی مصرف‌کنندگان کمک کنند.

با توجه به اهمیت روزافزون این موضوع و پیچیدگی‌های آن، نیاز به تحقیقات بیشتر و توسعه فناوری‌های نوین به‌ویژه در زمینه تجمیع‌کننده‌ها احساس می‌شود. این مقاله با هدف ارائه یک مرور جامع و تحلیلی بر روی راهکارهای بهینه‌سازی پاسخگویی تقاضا از طریق تجمیع‌کننده‌ها نوشته شده و امیدوار است که به بهبود درک و اجرای استراتژی‌های مؤثر در این حوزه کمک کند.

در این ادامه این مقاله، ابتدا در بخش دوم به معرفی مفاهیم مرتبط با موضوع پرداخته می‌شود. سپس در بخش سوم، مقالات مرتبط با این موضوع مرور می‌شوند. در بخش چهارم، مزایا رویکرد پاسخگویی تقاضای منازل مسکونی از طریق تجمیع‌کننده‌های بار بیان می شوند. چالش‌ها و راهکارها در بخش پنجم بیان می گردند. در نهایت، در بخش آخر نتایج کلی مقاله مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

۲- تعریف مفاهیم مرتبط با موضوع مقاله

۲-۱- مفهوم پاسخگویی تقاضا

پاسخگویی تقاضا[1] یک روش مهم در مدیریت مصرف انرژی است که با تغییر الگوی مصرف انرژی توسط مصرف‌کنندگان، تعادل بین تولید و مصرف برق را حفظ می‌کند. این مفهوم شامل کاهش مصرف در ساعات اوج و انتقال مصرف به ساعات کم‌باری است. پاسخگویی تقاضا با استفاده از تجهیزات هوشمند، مصرف‌کنندگان را تشویق به کاهش مصرف در ساعات پرباری و ادامه مصرف در ساعات کم‌باری می‌کند. این رویکردها به عملکرد بهتر شبکه برق کمک کرده و هزینه‌های مرتبط با توزیع برق را کاهش می‌دهند. منابع انرژی یکپارچه نیز از پاسخگویی تقاضا برای کاهش فشار تامین برق و افزایش مزایای هم‌افزایی انرژی استفاده می‌کنند.

پاسخگویی تقاضا یک ابزار اساسی در بهره‌وری انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز می‌باشد. با اعمال رویکردهای پاسخگوئی تقاضا، امکان انطباق بهتر با تغییرات ناگهانی در تقاضا و تامین برق بهبود می‌یابد و ارتقای کیفیت خدمات برق برای مصرف‌کنندگان فراهم می‌شود. از طرف دیگر، با توسعه فناوری‌های هوشمند و اینترنت اشیاء، پتانسیل استفاده از پاسخگویی تقاضا بیشتر افزایش می‌یابد و می‌تواند به بهبود عملکرد و بهره‌وری شبکه برق در طولانی‌مدت کمک کند.

۲-۲- نقش تجمیع‌کننده‌ها

تجمیع‌کننده‌ها در سیستم‌های پاسخگویی تقاضا نقش بسیار مهمی ایفا می‌کنند و به بهبود عملکرد شبکه برق کمک می‌کنند. این ابزارها با تجمیع و مدیریت منابع مختلف انرژی و بارهای مصرفی در منازل مسکونی، به بهینه‌سازی مصرف و کاهش هزینه‌ها کمک می‌کنند. نقش اصلی تجمیع‌کننده‌ها عبارتند است از:

الف) مدیریت بار: تجمیع‌کننده‌ها به توزیع بار مصرفی در زمان‌های مختلف کمک می‌کنند تا از بار اضافی در زمان‌های اوج مصرف جلوگیری شود و تعادل بار در شبکه برق حفظ گردد.

---

[1] Demand Response

ب) پاسخ به تغییرات تقاضا: آنها به شبکه برق این امکان را می‌دهند که به تغییرات در تقاضای مصرف انرژی پاسخ دهند و از طریق تکنیک‌های مختلف، مانند تغییر در الگوی مصرف و کاهش مصرف در زمان‌های پیک، به تعادل شبکه کمک کنند.

ج) ادغام منابع انرژی: تجمیع‌کننده‌ها می‌توانند منابع انرژی مختلف، از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر و ذخیره‌سازی انرژی، را به‌طور مؤثر مدیریت و ادغام کنند، که این امر به افزایش پایداری و کاهش وابستگی به منابع انرژی غیرتجدیدپذیر منجر می‌شود.

د) بهینه‌سازی مصرف انرژی: آنها به کمک الگوریتم‌ها و فناوری‌های هوشمند، بهینه‌سازی مصرف انرژی را انجام می‌دهند، که به کاهش هزینه‌های انرژی و افزایش کارایی سیستم برق کمک می‌کند.

در مجموع، تجمیع‌کننده‌ها با ارائه یک راهکار جامع برای مدیریت و بهینه‌سازی مصرف انرژی، به ارتقاء پایداری و کارایی شبکه برق و کاهش هزینه‌های مرتبط با مصرف انرژی کمک می‌کنند.

۲-۳- نقش تجمیع‌کننده‌های بار

تجمیع‌کننده بار واسطه‌ای بین مصرف‌کنندگان و اپراتور شبکه برق است که با ادغام منابع پاسخگویی تقاضای کاربران، به ویژه در بخش مسکونی، به بهینه‌سازی مصرف انرژی کمک می‌کند. تجمیع‌کننده‌ها با داشتن فناوری و دانش لازم برای اجرای برنامه‌های پاسخگویی تقاضا، مسئول نصب دستگاه‌های ارتباطی و کنترلی مانند کنتورهای هوشمند در محل کاربران هستند. از آنجایی که هر تجمیع‌کننده نماینده‌ی بخش قابل‌توجهی از تقاضای کل در بازار پاسخگوئی تقاضا است، می‌تواند به‌طور مؤثرتری از طرف کاربران خانگی با اپراتور شبکه مذاکره کند. این واسطه‌ها با تجمیع منابع انعطاف‌پذیر مصرف‌کنندگان و فروش آنها به شرکت‌های برق، امکان مشارکت کاربران خانگی در پروژه‌های پاسخگوئی بار و کسب سود بیشتر را فراهم می‌کنند. همچنین، تجمیع‌کننده‌ها در مواقع اوج تقاضا می‌توانند با کنترل مستقیم برخی از وسایل برقی کاربران مانند دستگاه‌های تهویه مطبوع، به کاهش تقاضا و تضمین پایداری و امنیت شبکه برق کمک کنند. تجمیع‌کننده‌ها با استفاده از فناوری‌های پیشرفته به مدیریت مصرف انرژی گروهی از مصرف‌کنندگان می‌پردازند و اهدافی مانند کاهش هزینه‌های مصرف انرژی و بهبود کیفیت خدمات انرژی را دنبال می‌کنند.

۲-۴- روشهای تجمیع بار

برخی از روش‌های تجمیع بار عبارتند از :

الف) تجمیع فیزیکی[1]: تجمیع فیزیکی یک روش ادغام مستقیم بارهای متعدد به یک نقطه و مدیریت آن‌ها به عنوان یک واحد متمرکز است. در این روش، بارهای مختلف از نقاط مختلف یک منطقه یا سازمان به یک نقطه مشترک یا تجمیع‌کننده پیشرفته وصل می‌شوند. این تجمیع بار فیزیکی می‌تواند از طریق سیستم‌های انتقال انرژی متصل به یک نقطه مشترک صورت گیرد، مانند استفاده از تجهیزات توزیع برق یا سیستم‌های کنترل و مانیتورینگ مرکزی. از طریق تجمیع فیزیکی، مدیران به راحتی می‌توانند مصرف انرژی گروهی از مصرف‌کنندگان را تحلیل و مدیریت کرده و بهینه‌سازی در مصرف انرژی را انجام دهند. این روش می‌تواند به بهبود کارایی و بهره وری انرژی در مقیاس گسترده کمک کند و بتواند هزینه‌ها را کاهش داده و محیط زیست را حفظ کند.

ب) تجمیع مجازی[2] : تجمیع مجازی یک روش مدرن برای جمع‌آوری و مدیریت اطلاعات مصرف انرژی است. در این روش، سیستم‌های مدیریت انرژی از منابع مختلف مانند سنسورها، محیط‌های اتوماسیون ساختمانی، سیستم‌های حفاظتی و کنترلی و حتی دیتا سنترها اطلاعات مصرف انرژی را جمع‌آوری می‌کنند. این اطلاعات سپس تحلیل و پردازش شده و به روش‌های هوشمندی نظیر پیش‌بینی مصرف، بهینه‌سازی بر اساس الگوهای مصرف و انطباق با الزامات محیط زیستی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تجمیع مجازی به کاربران امکان می‌دهد تا اطلاعات دقیق و هوشمندانه در مورد مصرف انرژی خود را مشاهده و مدیریت کنند. این روش علاوه بر بهبود کارایی و کاربردی بودن، می‌تواند کمک به کاهش هزینه‌های انرژی و کاهش اثرات منفی محیط زیستی کند.

ج) تجمیع توزیعی[3]: تجمیع توزیعی یک روش پیشرفته و کارآمد است که از شبکه‌های توزیع انرژی برق برای

[1] Physical aggregation
[2] Virtual aggregation
[3] Distributed aggregation

جمع‌آوری داده‌های مصرف انرژی از مصرف‌کنندگان استفاده می‌کند. در این روش، شبکه‌های توزیع انرژی برق با استفاده از تکنولوژی‌های ارتباطی پیشرفته از جمله شبکه‌های هوشمند، میترهای هوشمند و سیستم‌های اتوماسیون به منبع انباره‌سازی داده مرکزی ارسال می‌کنند. این داده‌ها سپس تحلیل و پردازش شده و به مدیران انرژی ارائه می‌شود تا بتوانند مصرف انرژی را به صورت بهینه‌تر مدیریت کنند. با استفاده از تجمیع توزیعی، مدیران انرژی می‌توانند الگوهای مصرف انرژی را تحلیل کرده، نقاط قوت و ضعف را شناسایی کرده و اقدامات بهینه‌سازی برای افزایش کارایی و کاهش هزینه‌های مصرف انرژی انجام دهند. این روش از توانایی‌های هوشمندانه و اتوماتیک شبکه برق استفاده می‌کند تا به مدیران انرژی کمک کند به طور موثرتر مصرف انرژی را مدیریت کرده و بهبود مستمر در عملکرد انرژی را ایجاد کند.

د) تجمیع هوشمند[1] : تجمیع هوشمند یک روش پیشرفته است که با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشینی، توانایی بهبود تجمیع بار و مدیریت بهینه مصرف انرژی را داراست. این روش به وسیله تجزیه و تحلیل الگوریتمی، اطلاعات مصرف انرژی و الگوهای رفتاری مصرف‌کنندگان را مورد بررسی قرار می‌دهد تا بتواند با دقت بالاتری مصرف انرژی را بهبود بخشد. با استفاده از تجمیع هوشمند، می‌توان الگوهای پیش‌بینی مصرف انرژی را توسعه داد و از اطلاعات دقیق و هوشمندانه در مدیریت مصرف بهره برد. این روش با توجه به رفتارهای مصرف‌کنندگان و شرایط محیطی مختلف، قادر است بهینه‌سازی مصرف انرژی را انجام دهد و بهبود کارایی و کاربردی بودن سیستم‌های انرژی را فراهم کند. از این راه، تجمیع هوشمند می‌تواند به کاهش هزینه‌های انرژی، بهره‌وری بالا و کاهش اثرات منفی بر محیط زیست کمک کند..

۳- مرور منابع مرتبط با موضوع مقاله

در این بخش به مرور مطالعات مختلف در زمینه برنامه‌ریزی بهینه پاسخگویی تقاضا منازل مسکونی از طریق تجمیع‌کننده‌ها پرداخته شده است. این مرور به‌طور خاص به تحلیل مدل‌ها، الگوریتم‌ها و استراتژی‌های مختلف پرداخته و تلاش کرده است تا نقاط قوت و ضعف هر یک را در زمینه بهینه‌سازی پاسخگویی تقاضا بررسی کند. مراجع مرور شده در این تحقیق از نظر ارتباط با موضوع "برنامه‌ریزی بهینه پاسخگویی تقاضا منازل مسکونی از طریق تجمیع‌کننده"، در ۱۰ دسته کلی تقسیم شده اند. در ادامه مراجع مربوط به هر دسته بطور جداگانه مرور می شوند:

۳-۱- دسته ۱: مدل‌های ریاضی برای برنامه‌ریزی بهینه پاسخگویی تقاضا

در مرجع [۱]، یک مدل پیش‌بینی برای برآورد ظرفیت پاسخگویی تقاضا تجمیع‌شده از دیدگاه تجمیع‌کننده بار ارائه شده است. این مدل از سیستم مدیریت انرژی خانگی و تحلیل مولفه‌های اصلی استفاده می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که این مدل در پیش‌بینی ظرفیت پاسخگویی دقیق و قابل اعتماد است. در مرجع [۲]، استراتژی بهینه‌سازی مناقصه برای تجمیع‌کننده بار با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت در مشارکت مصرف‌کنندگان بررسی شده است. این مدل از سیستم فازی برای ارزیابی تمایل به مشارکت استفاده می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند هزینه‌ها را کاهش داده و درآمد تجمیع‌کننده را افزایش دهد. در مرجع [۳]، یک چارچوب بهینه‌سازی برای تجمیع پاسخگویی تقاضا در بازارهای عمده‌فروشی برق ارائه شده است. این چارچوب، از قراردادها و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی برای کاهش بار استفاده می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که این مدل قادر به تعیین برنامه‌های بهینه‌سازی است. در مرجع [۴]، یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی برای تجمیع‌کنندگان پاسخگویی تقاضا در محیط رقابتی ارائه شده است. این مدل به مدیریت عدم‌قطعیت‌ها و کاهش ریسک‌ها کمک می‌کند. نتایج حاکی از افزایش سود و کاهش ریسک‌ها برای تجمیع‌کننده است. در مرجع [۵]، الگوریتم یادگیری Q تقریبی (AQL[2]) برای کنترل پیشرفته برنامه‌های پاسخگویی تقاضا ارائه شده است. این الگوریتم به بهبود عملکرد اقتصادی و کاهش نقض برنامه‌ریزی کمک می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که AQL می‌تواند عملکرد اقتصادی را حفظ کند و جریمه‌های برنامه‌ریزی را کاهش دهد. در مرجع [۶]، یک استراتژی بهینه‌سازی برای پیشنهادات تجمیع‌کننده بر اساس رفتار

[1] Intelligent aggregation

[2] Approximate Q-learning

پاسخگویی مشتریان به مشوق‌ها ارائه شده است. این استراتژی شامل تنظیمات بهینه برای سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی است. نتایج نشان می‌دهد که این روش به دقت بیشتر در پیش‌بینی و بهینه‌سازی پیشنهادات منجر می‌شود. در مرجع [۷]، طرحی برای پاسخگویی تقاضا مبتنی بر مشوق‌ها در یک ساختار غیرمتمرکز بررسی شده است. این طرح به تحلیل بارهای انعطاف‌پذیر در زمان واقعی می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که این روش انعطاف‌پذیری و مشارکت مشتریان را افزایش می‌دهد. در مرجع [۸]، یک روش جدید برای ادغام تجمیع‌کنندگان پاسخگویی تقاضا با اپراتورهای شبکه توزیع پیشنهاد شده است. این روش به ارزیابی در یک فیدر نامتعادل پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد که رعایت محدودیت‌های عملیاتی شبکه بر تخصیص پاسخگویی تقاضا تأثیر می‌گذارد. در مرجع [۹]، زمان‌بندی بارهای پاسخگو در سیستم توزیع تحت هماهنگی تجمیع‌کننده پاسخگویی تقاضا ارائه شده است. این روش به بهینه‌سازی زمان‌بندی بارها و تعادل بین اهداف پاسخگویی تقاضا و شبکه توزیع می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که این روش بهبود منافع اقتصادی و کاهش هزینه‌ها را به همراه دارد.

نتیجه‌گیری کلی از این دسته نشان می‌دهد که مدل‌های ریاضی برای برنامه‌ریزی بهینه پاسخگویی تقاضا می‌توانند دقت، ثبات، و کارایی را در بهینه‌سازی و کاهش هزینه‌ها و ریسک‌ها افزایش دهند.

۳-۲- دسته ۲: روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی و هوشمند برای پاسخگویی تقاضا

در مرجع [۱۰]، یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی پاسخگویی تقاضا در بازارهای تعامل‌پذیر[1] با ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر پیشنهاد شده است. این مدل با در نظر گرفتن نیازهای مصرف‌کننده و پاسخ پویا به شرایط بازار و شبکه، بهینه‌سازی را بر اساس صرفه‌جویی در هزینه و راحتی مشتریان انجام می‌دهد. نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که این مدل به بهبود انعطاف‌پذیری شبکه و تعادل تقاضا و عرضه کمک می‌کند. در مرجع [۱۱]، یک چارچوب دو سطحی برای پاسخگویی یکپارچه بار در هاب‌های انرژی هوشمند[2] مسکونی ارائه شده است. این چارچوب شامل مناقصه پیش‌رو[3] و برنامه‌ریزی زمان واقعی[4] است و با مدل‌سازی بارهای قابل انعطاف[5]، تأثیرات منفی بر کاربران مسکونی را کاهش می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این چارچوب می‌تواند منافع مشترکی برای شبکه هوشمند، اپراتورهای هاب و کاربران مسکونی فراهم آورد. در مرجع [۱۲]، یک مدل پیش‌بینی ظرفیت تجمعی[6] پاسخگویی تقاضا در بازار روزانه با استفاده از سیستم مدیریت انرژی خانگی (HEMS[7]) و روش‌های پیش‌بینی مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان (SVM[8]) ارائه شده است. این مدل به تجمیع‌کنندگان کمک می‌کند تا ظرفیت پاسخگویی تقاضا موجود را به درستی پیش‌بینی کرده و برای برنامه‌ریزی بازار روزانه آماده شوند. نتایج نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند به بهبود دقت و ثبات پیش‌بینی‌ها کمک کند. در مرجع [۱۳]، یک چارچوب بهینه‌سازی دو مرحله‌ای برای هماهنگی کاربران پاسخگویی تقاضا با تمرکز بر حفظ حریم خصوصی[9] و کارایی محاسباتی ارائه شده است. در مرحله اول، به بهینه‌سازی مصرف خانگی و در مرحله دوم به هماهنگی بارهای تجمیع شده توسط تجمیع‌کننده پرداخته می‌شود. این چارچوب به طور مؤثر نیازهای کاربران را در نظر می‌گیرد و به بهبود کارایی محاسبات و مقیاس‌پذیری[10] سیستم کمک می‌کند. در مرجع [۱۴]، تکنیک‌های بهینه‌سازی برای برنامه‌ریزی وسایل برقی مسکونی در شبکه‌های هوشمند بررسی شده است. این مقاله به تحلیل چالش‌ها و راه‌حل‌های موجود در مدیریت تقاضا و زمان‌بندی وسایل برقی در ساعات اوج مصرف می‌پردازد. روش‌های مختلف بهینه‌سازی معرفی شده در این مطالعه می‌توانند به کاهش هزینه‌های برق و بهبود رضایت کاربران کمک کنند. در مرجع [۱۵]، یک مدل و استراتژی چندعامله[11] برای هماهنگی پاسخگویی تقاضا مسکونی با استفاده از تجمیع‌کنندگان ارائه شده است. این سیستم از دارایی‌هایی مانند خودروهای الکتریکی هیبریدی[12] و واحدهای تهویه مطبوع برای کاهش بار

[1] Interactive market
[2] Smart Energy Hubs
[3] day-ahead bidding
[4] real-time scheduling
[5] flexible loads
[6] Aggregated Capacity
[7] Home Energy Management System
[8] Support Vector Machine
[9] users' privacy
[10] scalability
[11] multi-agent
[12] plug-in hybrid electric vehicles

استفاده می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این سیستم قادر به حفظ بار تجمعی[1] زیر آستانه معین است و تأثیر کمی بر راحتی مشتریان دارد. در مرجع [۱۶]، یک رویکرد استراتژیک برای پیشنهاد قیمت در برنامه‌های پاسخگویی تقاضا مسکونی با استفاده از الگوریتم یادگیری تقویتی عمیق[2] ارائه شده است. این رویکرد با استفاده از مدل‌های احتمالی و الگوریتم نرم‌افزار-عملکرد[3] به بهبود قابل توجهی در قابلیت اطمینان سیستم و مزایای مالی تجمیع‌کنندگان منجر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که این روش در مقایسه با روش‌های سنتی و دیگر رویکردهای یادگیری تقویتی، عملکرد بهتری دارد. در مرجع [۱۷]، یک استراتژی تجاری ترکیبی و بهینه برای تجمیع‌کنندگان پاسخگویی تقاضا در بازار عمده‌فروشی با استفاده از بهینه‌سازی تصادفی-مقاوم[4]، بررسی عدم قطعیت‌های بازار برق و نرخ مشارکت مصرف‌کنندگان ارائه شده است. این مدل شامل برنامه‌های پاسخگویی تقاضا مبتنی بر زمان و مشوق‌ها[5] است و به بهینه‌سازی برنامه‌ریزی و پیشنهاددهی[6] در بازار روز بعد کمک می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این مدل به بهبود مدیریت عدم قطعیت‌ها و افزایش سود تجمیع‌کننده کمک می‌کند. در مرجع [۱۸]، یک سیستم چندعاملی برای مدیریت پاسخ به تقاضا تحت برنامه‌های مبتنی بر انگیزه[7] بررسی شده است. این مطالعه از کنترل پیش‌بینی‌پذیر[8] و پیش‌بینی دما برای مدیریت بارهای حرارتی استفاده می‌کند و نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که این چارچوب به تجمیع‌کنندگان اجازه می‌دهد تا تکنیک‌های بهینه‌سازی را ارزیابی کرده و هزینه‌ها را بهینه کنند. همچنین، این رویکرد می‌تواند عملکرد اقتصادی تجمیع‌کنندگان را بهبود بخشد.

در مجموع، این دسته از مقالات نشان می‌دهند که استفاده از روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی و هوشمند، همراه با الگوریتم‌های پیشرفته، می‌تواند به بهبود کارایی سیستم، کاهش هزینه‌های انرژی، و افزایش رضایت کاربران در برنامه‌های پاسخگویی تقاضا کمک کند. این رویکردها در مواجهه با عدم قطعیت‌های بازار و شبکه، انعطاف‌پذیری و مقیاس‌پذیری بیشتری را به ارمغان می‌آورند.

۳-۳- دسته ۳: تجمیع‌کننده‌های توان و مدل‌سازی اقتصادی آنها

در مرجع [۱۹]، روشی برای تجمیع تقاضای مصرف‌کنندگان خانگی با استفاده از سیستم صف چندکلاسه[9] ارائه شده است. این روش به منظور کاهش هزینه‌های مصرف برق تحت قیمت‌گذاری پیشرو[10] طراحی شده و نشان داده است که می‌تواند کاهش هزینه‌ای نزدیک به بهترین حالت ممکن را فراهم کند. نتایج این مطالعه اثربخشی مدل را در کاهش هزینه‌ها تأیید می‌کند. در مرجع [۲۰]، سیستم مدیریت انرژی برای سیستم‌های توزیع مسکونی هوشمند[11] با کمک تجمیع‌کننده و برنامه پاسخگویی تقاضا معرفی شده است. این سیستم با استفاده از برنامه‌های قیمت‌گذاری واقعی[12] و برنامه‌های انعطاف‌پذیری به کاهش هزینه‌های برق و بهبود کارایی کلی سیستم می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که این سیستم توانسته هزینه‌های کل برق را کاهش داده و کارایی اقتصادی را بهبود بخشد. در مرجع [۲۱]، یک ساختار مبتنی بر چندین عامل برای تجمیع پاسخگویی تقاضا صنعتی و مسکونی پیشنهاد شده است. این ساختار به هماهنگی طرح‌های پاسخگویی تقاضا و تجمیع انعطاف‌پذیری[13] از طریق سیستم‌های ذخیره‌سازی و مدیریت انرژی خانگی می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که این روش می‌تواند به پایداری سیستم‌های قدرت در برابر نوسانات انرژی کمک کند. در مرجع [۲۲]، یک الگوریتم توزیع‌شده سریع برای تجمیع پاسخگویی تقاضا در مقیاس بزرگ با ترکیب سطوح انرژی گسسته و پیوسته ارائه شده است. این روش به تجزیه مسئله پاسخگویی تقاضا به سطوح خانگی و استفاده از الگوریتم‌های توزیع‌شده سریع[14] برای حل آن می‌پردازد. نتایج عددی نشان می‌دهد که این الگوریتم به سرعت به راه‌حل‌های نزدیک به بهینه می‌رسد. در مرجع [۲۳]، یک طرح برای کنترل بار مستقیم توزیع

[1] aggregate load
[2] deep reinforcement learning (DRL) algorithm
[3] soft actor-critic algorithm
[4] stochastic-robust
[5] time-of-use and incentive-based DR program
[6] bidding
[7] incentive-based
[8] predictive control
[9] multi-class queueing system
[10] day-ahead pricing
[11] smart residential distribution system
[12] real-time pricing (RTP)
[13] integrated flexibility
[14] fast distributed algorithms

شده در مقیاس بزرگ برای پاسخگویی تقاضا مسکونی ارائه شده است. این طرح شامل یک معماری کنترل دو لایه بر پایه ارتباطات[1] است که به کاهش عدم تطابق بین تقاضای واقعی تجمعی و پروفایل تقاضای مورد نظر می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که این رویکرد باعث نزدیک‌تر شدن تقاضای تجمعی به پروفایل مورد نظر می‌شود. در مرجع [۲۴]، یک استراتژی بهینه‌سازی برای مشارکت تجمیع‌کننده‌ها در بازار پاسخگویی تقاضا ارائه شده است. این استراتژی بر مبنای پیش‌بینی بار مشتری و بهینه‌سازی مقاوم برای جلوگیری از تغییرات غیرمنتظره در بار طراحی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این روش به طور مؤثری ظرفیت مشارکت در بازار پاسخگویی تقاضا را تعیین می‌کند. در مرجع [۲۵]، چارچوب تصمیم‌گیری تصادفی[2] برای تجارت انرژی بین تولیدکننده باد و تجمیع‌کنندگان پاسخگویی تقاضا در ساختار همتا به همتا (P2P[3]) پیشنهاد شده است. این چارچوب به تولیدکننده باد اجازه می‌دهد تا ظرفیت ذخیره انرژی را از تجمیع‌کنندگان خریداری کرده و انرژی را تحت قراردادهای دوجانبه[4] خریداری کند. نتایج مدل دوسطحی تصادف[5]ی نشان می‌دهد که این چارچوب می‌تواند نوسانات سود را کاهش دهد. در مرجع [۲۶]، چارچوب پیش‌بینی پتانسیل پاسخگویی تقاضا با استفاده از یادگیری انتقال آنلاین[6] برای تجمیع‌کنندگان بار پیشنهاد شده است. این روش با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر داده‌های تاریخی[7] و داده‌های محلی[8] جدید، پیش‌بینی دقیقی از پتانسیل پاسخگویی تقاضا فراهم می‌آورد. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که این چارچوب به طور مؤثری تغییرات در رفتار پاسخگویی مشتریان جدید را پیگیری می‌کند. در مرجع [۲۷]، تأثیر سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی بر عملکرد تجمیع‌کنندگان پاسخگویی تقاضا مورد بررسی قرار گرفته است. این مقاله مدل بهینه‌سازی مقاوم[9] برای مقابله با عدم‌قطعیت‌های قیمت‌های بازار برق را پیشنهاد می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی به بهبود انعطاف‌پذیری و افزایش سود تجمیع‌کنندگان کمک می‌کند.

نتیجه‌گیری کلی از این دسته مطالعات نشان می‌دهد که تجمیع‌کنندگان توان با استفاده از روش‌های مختلف می‌توانند هزینه‌ها را کاهش داده، کارایی سیستم‌های قدرت را بهبود بخشند و با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی، پایداری و سودآوری بیشتری ایجاد کنند.

۳-۴- دسته ۴: اثرات زیست‌محیطی و بهره‌وری انرژی در پاسخگویی تقاضا

در مرجع [۲۸]، الگوریتمی برای برنامه‌ریزی پاسخگویی تقاضا در جوامع مسکونی هوشمند[10] با استفاده از خوشه‌بندی فازی و چارچوب بازی نش ارائه شده است. این الگوریتم به تطابق بهتر تقاضاهای متنوع و کاهش هزینه انرژی کمک می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این روش می‌تواند هزینه انرژی جامعه را حدود ۱۰٪ کاهش دهد. در مرجع [۲۹]، یک چارچوب بهینه‌سازی دو سطحی برای تعاملات استراتژیک بین تجمیع‌کنندگان، مصرف‌کنندگان، و بازار برق روزانه پیشنهاد شده است. این تعاملات به صورت بازی‌های استکلبرگ و نَش[11] مدل‌سازی شده و تأثیرات عدم قطعیت بازار و محدودیت‌های بارهای مصرف‌کنندگان بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که همکاری میان تأمین‌کنندگان پاسخگویی تقاضا و تجمیع‌کنندگان می‌تواند منافع مالی و کارایی مدیریت عدم قطعیت را بهبود بخشد. در مرجع [۳۰]، مدلی برای برنامه‌ریزی پاسخگویی تقاضا در جوامع مسکونی هوشمند با تمرکز بر طبقه‌بندی بارهای مسکونی و تولید پراکنده معرفی شده است. این مدل به کاهش هزینه‌های برق و تفاوت بار اوج و کف[12] بدون ناراحتی[13] کاربران کمک می‌کند. همچنین به تصمیم‌گیری در مورد استراتژی‌های قیمت‌گذاری برق یاری می‌رساند. مرجع [۳۱] به معرفی یک مدل بازار سلسله‌مراتبی[14] برای پاسخگویی تقاضا در شبکه‌های هوشمند پرداخته است که در آن چندین تجمیع‌کننده به عنوان واسطه بین اپراتور و کاربران خانگی

[1] two-layer communication-based control architecture
[2] stochastic decision-making
[3] peer-to-peer
[4] bilateral contracts
[5] bilevel stochastic model
[6] online transfer learning-based
[7] historical data
[8] local response data
[9] robust optimization
[10] smart residential communities
[11] Stackelberg or Nash Bargaining Game
[12] peak load and peak-valley difference
[13] discomfort
[14] hierarchical market

عمل می‌کنند. این مدل به تجمیع‌کنندگان اجازه می‌دهد تا خدمات پاسخگویی تقاضا را به اپراتور بفروشند و به کاربران برای تغییر الگوی مصرف پاداش دهند. این روش نسبت به قیمت‌گذاری ثابت مزایای قابل توجهی را برای هر یک از طرفین تضمین می‌کند. مرجع [۳۲] به بررسی الگوریتم‌های پاسخگویی تقاضا مسکونی در چارچوب شبکه هوشمند و تکنیک‌های بهینه‌سازی برای برنامه‌ریزی لوازم خانگی پرداخته است. این مطالعه چالش‌های مرتبط با پیاده‌سازی پاسخگویی تقاضا مسکونی را تحلیل می‌کند و نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی به بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها منجر می‌شود. نتیجه‌گیری این است که این روش‌ها می‌توانند نقش مهمی در بهره‌وری انرژی ایفا کنند. مرجع [۳۳] به بررسی چالش‌ها و مسائل اجرای برنامه‌های پاسخگویی تقاضا برای بارهای کوچک مانند ساختمان‌های مسکونی پرداخته است. این مطالعه نقش تجمیع‌کنندگان در پیاده‌سازی و گسترش پاسخگویی تقاضا در شبکه‌های هوشمند آینده را تحلیل می‌کند. همچنین مشکلات فنی و مدیریتی مرتبط با این روند مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۳۴]، چارچوبی برای بهینه‌سازی پاسخگویی تقاضا در خانه‌های هوشمند تحت قیمت‌گذاری واقعی با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی محدب[1] و روش‌های منظم‌سازی L_1[2] ارائه شده است. این چارچوب به حل مساله برنامه‌ریزی بار به‌صورت مؤثر کمک می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که این روش می‌تواند زمان‌بندی انرژی لوازم خانگی مختلف را بهینه کند. مرجع [۳۵] مدلی برای شارژ خودروهای الکتریکی در بخش مسکونی تحت برنامه پاسخگویی تقاضا با استفاده از بهینه‌سازی محدب ارائه کرده است. این مدل تأثیرات نفوذ خودروهای الکتریکی بر سیستم قدرت را ارزیابی می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که شارژ برنامه‌ریزی شده به بهبود ثبات سیستم قدرت و کاهش پرداخت‌های برق کاربران منجر می‌شود.

در مجموع، مطالعات این دسته نشان می‌دهند که استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی و چارچوب‌های پیشرفته در برنامه‌ریزی پاسخگویی تقاضا می‌تواند به بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی در جوامع مسکونی کمک کند.

[1] convex
[2] L_1 regularization

۳-۵- دسته ۵: تحلیل‌های آماری و داده‌کاوی در پاسخگویی تقاضا

در مرجع [۳۶] ، یک الگوریتم توزیع‌شده برای برنامه‌ریزی بار در شبکه هوشمند پیشنهاد شده که چندین کلاس از وسایل برقی را در نظر می‌گیرد. این الگوریتم بهینه‌سازی بار را برای هر خانه به صورت مجزا انجام می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که این روش می‌تواند رضایت کلی از برنامه‌ریزی بار را بهبود بخشد. در مرجع [۳۷]، رویکرد بهینه‌سازی چندعامله برای ادغام انعطاف‌پذیری پاسخگویی تقاضا مسکونی[3] در سیستم برق ارائه شده است. عوامل به طور مشترک منافع خود را با استفاده از مدل برنامه‌ریزی محدب بهینه می‌کنند. تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد که این روش به کاهش هزینه‌های برق و زمان تأخیر کمک می‌کند. مرجع [۳۸] به بررسی تکنیک‌های برنامه‌ریزی بار و چالش‌های پاسخگویی تقاضا مسکونی می‌پردازد. این مطالعه چالش‌های مرتبط با نرخ‌های قیمت در دوره‌های اوج مصرف را بررسی کرده و پیشنهاد می‌کند که استفاده از قیمت‌گذاری چندسطحی تطبیقی[4] می‌تواند مؤثر باشد. این مرور به طور خاص به حل مشکلات مصرف بالا در دوره‌های اوج توجه دارد. در مرجع [۳۹]، ساختار جدیدی برای تجمیع‌کنندگان پاسخگویی تقاضا صنعتی معرفی شده است. این ساختار به بهینه‌سازی فرآیندهای تولید و کاهش هزینه انرژی می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که این مدل انعطاف‌پذیری عملیاتی سیستم برق را در شرایط بحرانی تضمین می‌کند. در مرجع [۴۰]، مدلی برای برنامه‌ریزی روزانه پاسخگویی تقاضا در میان انواع مختلف مشتریان مسکونی پیشنهاد شده است. این مدل بهینه‌سازی پاسخگویی تقاضا را بر اساس استراتژی‌های مختلف هدف قرار می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند راحتی مشتریان را به حداقل رسانده و عملکرد پاسخگویی تقاضا را بهبود بخشد. در مرجع [۴۱]، استراتژی بهینه‌سازی زمان‌بندی برای تجمیع‌کنندگان پاسخگویی تقاضا با در نظر گرفتن ویژگی‌های پیچیده پاسخ مشتریان ارائه شده است.

[3] residential DR flexibility
[4] adaptive multi-consumption level pricing

این استراتژی از داده‌های تاریخی[1] و تحلیل منحنی‌های پاسخ[2] استفاده می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که این روش سود تجمیع‌کنندگان را افزایش داده و نیازهای ظرفیت پاسخگویی تقاضا را به طور کامل برآورده می‌کند. در مرجع [۴۲]، یک رویکرد هوشمند برای برنامه‌ریزی پاسخگویی تقاضا در بازار عمده‌فروشی با استفاده از هوش فازی[3] ارائه شده است. این روش با مدل‌سازی رفتار بار مشتریان و استفاده از سیستم‌های استنتاج فازی، عملکرد تجمیع‌کننده پاسخگویی تقاضا را بهبود می‌بخشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این رویکرد در مقایسه با مدل‌های سنتی بهبود قابل توجهی در سودآوری دارد. در مرجع [۴۳]، سیستم‌های چندعامله برای تجمیع‌کنندگان پاسخگویی تقاضا در زمینه صنعتی توسعه داده شده است. این سیستم به انتقال تکنولوژی‌های تحقیقاتی به محیط‌های واقعی کمک می‌کند. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که این راهکار برای پذیرش واقعی در آینده مناسب است.

نتیجه‌گیری کلی این دسته از مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از تحلیل‌های آماری و داده‌کاوی در بهینه‌سازی سیستم‌های پاسخگویی تقاضا، نقش مهمی در کاهش هزینه‌ها و افزایش انعطاف‌پذیری این سیستم‌ها دارد.

۳-۶- دسته ۶: شبکه‌های هوشمند و ارتباط آنها با پاسخگویی تقاضا

در مرجع [۴۴]، مزایای پاسخگویی تقاضا مسکونی در بازار انرژی توزیع واقعی[4] با استفاده از قیمت‌های حاشیه‌ای توزیع (D-LMP[5]) بررسی شده است. این مطالعه با استفاده از کنترل‌کننده‌های تعاملی[6] و شبیه‌سازی‌های تصادفی تأثیر انتخاب‌های پاسخگویی تقاضا بر صرفه‌جویی در هزینه و بهبود قابلیت اطمینان شبکه را ارزیابی کرده است. نتایج نشان می‌دهد که این روش به کاهش هزینه‌ها و بهبود قابلیت اطمینان شبکه توزیع کمک می‌کند. در مرجع [۴۵]، رویکردی نوآورانه برای رتبه‌بندی مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی تقاضا و بهبود برنامه‌ریزی تجمعی مصرف‌کنندگان ارائه شده است. این روش شامل تخصیص و به‌روزرسانی نرخ اعتماد به هر مصرف‌کننده[7] بر اساس پاسخ‌های واقعی آن‌ها است و سه روش مختلف برای ارزیابی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که این رویکرد به شناسایی مصرف‌کنندگان قابل‌اعتماد و بهبود اهداف کاهش مصرف در رویدادهای پاسخگویی تقاضا کمک می‌کند. در مرجع [۴۶]، الگوریتم برنامه‌ریزی بهینه برای یک تجمیع‌کننده خودروهای الکتریکی با در نظر گرفتن منافع سه طرف (شبکه توزیع، تجمیع‌کننده و کاربران خودروهای برقی) ارائه شده است. این الگوریتم هدفش حداکثر کردن منافع تجمیع‌کننده تحت محدودیت‌های رضایت کاربران و قابلیت جابه‌جایی بار شبکه توزیع است. نتایج تحلیل نشان می‌دهند که برنامه‌ریزی بهینه می‌تواند منافع سه طرف را به طور مؤثر مدیریت کند. در مرجع [۴۷]، یک سیستم مدیریت انرژی خانگی شخصی‌سازی شده[8] برای پاسخگویی تقاضا و قیمت‌گذاری بر اساس زمان استفاده[9] پیشنهاد شده است. این سیستم با استفاده از کنترلر انرژی هوشمندِ ANFIS[10]، پیش‌بینی تقاضای انرژی آینده را انجام داده و برنامه‌ریزی زمان‌بندی را مدیریت می‌کند. این سیستم قابلیت‌های قابل توجهی برای مدیریت تقاضای انرژی فراهم می‌آورد. در مرجع [۴۸]، استراتژی زمان‌بندی خودروهای الکتریکی در برنامه‌های پاسخگویی تقاضا خانگی با ارتباط بین همسایگان ارائه شده است. این مدل شامل دستگاه‌های غیرقابل جابه‌جایی، دستگاه‌های قابل جابه‌جایی و خودروهای الکتریکی است که پرداخت‌های انرژی خانگی را کاهش می‌دهد و تشکیل پیک‌های جدید را محدود می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این سیستم کاهش قابل توجهی در هزینه‌های انرژی روزانه و افزایش انعطاف‌پذیری کاربران را فراهم می‌آورد. در مرجع [۴۹]، مشکلات احتمالی ناشی از افزایش پیک‌های بازگشتی در الگوریتم‌های خودکار پاسخگویی تقاضا خانگی بررسی شده است. این مطالعه راه‌حل‌هایی برای کاهش این پیک‌های بازگشتی و الگوریتم‌هایی برای مدیریت بار در هر خانه ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این الگوریتم‌ها می‌تواند هزینه‌های کل تأمین برق را کاهش دهد. در مرجع [۵۰]، روش بهینه‌سازی پاسخگویی تقاضا با استفاده از

[1] historical demand response data
[2] customers' typical response curves
[3] Fuzzy Intelligence
[4] real time distribution energy market
[5] Distribution Locational Marginal Price
[6] transactive controller
[7] Reliability Rate to each consumer
[8] personalized home energy management system
[9] Time-of-Use (TOU) pricing
[10] daptive neuro-fuzzy inference system

الگوریتم ازدحام ذرات[1] برای یک خانه مسکونی پیشنهاد شده است که شامل تولید فوتوولتائیک و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی می‌شود. این مدل به کاربران امکان می‌دهد بدون نیاز به قرارداد با ارائه‌دهندگان خدمات پاسخگویی تقاضا، اقدامات پاسخگویی تقاضا را انجام دهند. نتایج نشان می‌دهد که این روش می‌تواند هزینه‌های عملیاتی روزانه را کاهش دهد و عملکرد مدل را اثبات کند. در مرجع [۵۱]، اصول و مدل‌های تجاری برای تجمیع‌کننده منابع در بازارهای برق بررسی شده است. این مقاله بر روی نقش‌های تجمیع‌کنندگان منابع[2] و مدل‌های تجاری مختلف آن‌ها تمرکز دارد. نتایج نشان می‌دهد که تجمیع‌کنندگان منابع به افزایش انعطاف‌پذیری سیستم و بهره‌برداری کامل از منابع قابل انعطاف کمک می‌کنند. در مرجع [۵۲]، چارچوب عملیاتی برای طراحی بهینه پرتفوی[3] پاسخگویی تقاضا با توجه به روانشناسی مصرف‌کنندگان ارائه شده است. این مدل به بهینه‌سازی قراردادهای پاسخگویی تقاضا و مدیریت پرتفوی به‌منظور افزایش سود تجمیع‌کننده‌ها و رفاه مشتریان[4] کمک می‌کند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند بهینه‌سازی سود و رفاه مشتریان را همزمان انجام دهد.

در مجموع، مطالعات این دسته بر روی بهبود عملکرد شبکه‌های توزیع و پاسخگویی تقاضا از طریق فناوری‌های هوشمند و مدل‌های بهینه‌سازی تمرکز دارند. مراجع شامل الگوریتم‌های متنوع و مدل‌های کاربردی هستند که به کاهش هزینه‌ها، افزایش انعطاف‌پذیری و بهینه‌سازی مدیریت انرژی کمک می‌کنند. این پژوهش‌ها به بهبود کارایی سیستم‌های توزیع انرژی و افزایش رضایت مصرف‌کنندگان می‌پردازند.

۳-۷- دسته ۷: استراتژی‌های قیمت‌گذاری و تاثیر آنها بر پاسخگویی تقاضا

در مرجع [۵۳]، مدل برنامه‌ریزی بار دو مرحله‌ای[5] برای منابع پاسخگویی تقاضا صنعتی ارائه شده که شامل بهینه‌سازی استراتژی‌های قطع بار و حداکثر کردن بازده اقتصادی تجمیع‌کننده با برنامه‌ریزی محدودیت تصادفی است. این مدل نیازهای تولید و رضایت کاربران را به طور مؤثر مدیریت کرده و سود تجمیع‌کننده را بهینه می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که این رویکرد در عمل کاربردی است. در مرجع [۵۴]، چارچوبی جامع برای برنامه‌ریزی پاسخگویی تقاضا مسکونی با استفاده از روش ترکیبی از برنامه نویسی تصادفی و روش جهت متناوب ضرب کننده ها (SP-ADMM[6]) معرفی شده که شامل محاسبه وضعیت دستگاه‌های پاسخگو و مقدار برق خریداری شده یا فروخته شده در بازار برق است. مدل توزیع شده با توجه به سناریوهای نامطمئن حل می‌شود و نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که برای کاربردهای مقیاس بزرگ مؤثر است. در مرجع [۵۵]، رویکردی برای برنامه‌ریزی بار روزانه با استفاده از پیش‌بینی‌های قیمت بازار و حداکثر کردن منافع اقتصادی تجمیع‌کننده ارائه شده است. این رویکرد به محدودیت‌های راحتی کاربران توجه دارد و نتایج نشان می‌دهند که تجمیع تقاضا می‌تواند انعطاف‌پذیری و سود تجمیع‌کننده را افزایش دهد. در مرجع [۵۶]، استراتژی بهینه برای تجمیع بار سیستم‌های تهویه مطبوع اینورتری[7] جهت پاسخگویی تقاضا معرفی شده است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از ۳۰۰۰ سیستم تهویه مطبوع به مدت ۴ ساعت، کاهش بار و سود خالص قابل توجهی را فراهم می‌آورد. در مرجع [۵۷]، بهینه‌سازی زمان‌بندی در میکروگریدهای هوشمند با توجه به محدودیت‌های پاسخگویی تقاضا بررسی شده است. این روش شامل بهینه‌سازی منابع انرژی و بررسی عملکرد توابع محدودیت ۱-۰[8] است و نتایج نشان می‌دهد که تابع پاسخگوئی تقاضا عملکرد بهتری دارد. در مرجع [۵۸]، خدمات جدید اپراتورهای موبایل در جوامع مسکونی هوشمند بررسی شده و مدل کسب‌وکار[9] جدیدی با بهره‌گیری از نسل پنجم شبکه‌های موبایل (5G) معرفی شده است. این مدل اپراتورهای موبایل را به عنوان تجمیع‌کننده معرفی کرده و زیرساخت‌های پاسخگویی تقاضا را برای کاربران فراهم می‌آورد. در مرجع [۵۹]، یک رویکرد بهینه‌سازی

[1] particle swarm optimization
[2] Resource Aggregators
[3] portfolio
[4] customers' welfare
[5] Two-stage load-scheduling model
[6] a combination of stochastic programming and the alternating direction method of multipliers
[7] Inverter Air Conditioner
[8] 0-1 knapsack
[9] business model

چندهدفه[1] برای برنامه‌ریزی بار مسکونی در شبکه‌های هوشمند با استفاده از الگوریتم ژنتیک معرفی شده است. این روش به کاهش بار پیک و هزینه‌های برق و تأمین راحتی ساکنان پرداخته و نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مؤثر است. در مرجع [۶۰]، مدل پاسخ به تقاضا با استفاده از کنترل‌کننده‌های هوشمند کم‌هزینه[2] برای خانه‌های هوشمند معرفی شده است. برنامه‌ریزی خطی مختلط[3] برای بهینه‌سازی عملکرد تجمیع‌کننده‌ها و مصرف‌کنندگان استفاده می‌شود و نتایج نشان می‌دهند که می‌تواند به کاهش هزینه‌های انرژی کمک کند. در مرجع [۶۱]، مدل مزایده استراتژیک[4] برای پاسخگویی تقاضا در بازار برق به‌منظور بهبود قابلیت اطمینان و حداکثر کردن سود تجمیع‌کنندگان ارائه شده است. این مدل از مدل‌های احتمالاتی و الگوریتم یادگیری تقویتی عمیقِ[5] SAC[6] استفاده کرده و نتایج نشان می‌دهند که این الگوریتم کارایی بهتری دارد.

به طور کلی، دسته ۷ به بررسی روش‌های متنوع استراتژی‌های قیمت‌گذاری و تأثیر آنها بر پاسخگویی تقاضا می‌پردازد. این روش‌ها شامل الگوریتم‌های پیشرفته، بهینه‌سازی زمان‌بندی، و استفاده از تکنولوژی‌های جدید هستند که به بهبود عملکرد تجمیع‌کنندگان و افزایش سود آنها کمک می‌کنند. نتایج نشان می‌دهند که این استراتژی‌ها می‌توانند به طور مؤثری پاسخگویی تقاضا و منافع اقتصادی را بهبود دهند.

۳-۸- دسته ۸: فناوری‌های نوین و کاربردهای اینترنت اشیاء در پاسخگویی تقاضا

در مرجع [۶۲]، یک الگوریتم توزیع‌شده برای کاهش هزینه‌های برق تجمعی از طریق مدیریت بارهای قابل جابه‌جایی[7] و هماهنگی تقاضا ارائه شده است. این الگوریتم با استفاده از سیستم‌های مدیریت انرژی و تجمیع‌کننده‌ها عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های متمرکز دارد. نتایج نشان می‌دهند که این رویکرد به حفظ حریم خصوصی مصرف‌کنندگان[8] و رضایت از منابع مشترک[9] کمک می‌کند. در مرجع [۶۳]، چارچوبی برای مدیریت انرژی مسکونی با استفاده از تجمیع‌کنندگان و در راستای پاسخگویی بار از طریق تشویق‌های اقتصادی ارائه شده است. این تجمیع‌کنندگان به عنوان واسطه‌ای بین اپراتور مستقل سیستم[10] و مصرف‌کنندگان عمل کرده و به مدیریت بهینه دارایی‌های انرژی[11] خانگی کمک می‌کنند. نتایج تحقیق نشان می‌دهند که این روش می‌تواند مزایای قابل توجهی برای تمامی ذینفعان ایجاد کند. در مرجع [۶۴]، مدل بهینه‌سازی روزانه‌ای برای تجمیع‌کنندگان منابع انرژی توزیع‌شده[12] با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌های پاسخ مشتریان و قیمت‌گذاری زمان واقعی[13] ارائه شده است. این مدل به بهبود پیشنهادات و زمان‌بندی کمک کرده و هزینه‌ها را کاهش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که این مدل سود تجمیع‌کنندگان را افزایش می‌دهد. در مرجع [۶۵]، چارچوب سلسله‌مراتبی بازار محور[14] برای پاسخگویی تقاضا مسکونی با تمرکز بر سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارتی توسعه یافته است. این چارچوب شامل مراحل بازار انرژی و بازار متوازن کننده توان[15] است و به بهینه‌سازی تصمیم‌گیری‌های انرژی کمک می‌کند. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که این چارچوب به صرفه‌جویی در هزینه‌های انرژی و بهره‌مندی از پاسخگویی تقاضا کمک می‌کند. در مرجع [۶۶]، تأثیر عدم‌قطعیت تولید انرژی خورشیدی بر عدم‌تعادل‌های تجمیع‌کننده‌ها[16] بررسی شده و مدل کنترل پیش‌بینی‌پذیر[17] برای کاهش عدم‌تعادل‌ها معرفی شده است. این مدل به کاهش عدم‌تعادل‌ها کمک می‌کند، اما از نظر اقتصادی انگیزه‌ای برای تجمیع‌کننده‌ها برای پیاده‌سازی این روش وجود ندارد. نتایج به کاهش عدم‌تعادل‌ها اشاره دارند. در مرجع [۶۷]، نقش تجمیع‌کنندگان پاسخگویی تقاضا و تأثیر پیشنهادات استراتژیک تولید برق بر انعطاف‌پذیری تقاضا مورد بررسی

[1] Multi-objective optimization
[2] low cost smart controllers
[3] Mixed Integer Linear Programming
[4] strategic bidding model
[5] deep reinforcement learning
[6] soft actor-critic
[7] shiftable loads
[8] consumer's privacy
[9] the shared resources among consumers
[10] independent-system operator
[11] energy assets
[12] distributed energy resources
[13] real-time pricing
[14] market-oriented hierarchical framework
[15] balancing power market
[16] imbalances of aggregators
[17] Predictive Control model

قرار گرفته است. مدل‌سازی دو سطحی با استفاده از نظریه دوگانی لاگرانژی[1] ارائه شده که به کاهش هزینه‌های تعامل پاسخگویی تقاضا و مدیریت تقاضا کمک می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که این مدل می‌تواند به کاهش قیمت‌های بالای برق و هزینه‌های عملیاتی شبکه کمک کند. در مرجع [۶۸]، مدل نظری رقابت بین تجمیع‌کنندگان پاسخگویی تقاضا در فروش انرژی ذخیره‌شده با استفاده از بازی‌های ناتمام اطلاعات[2] توسعه یافته است. این مدل به تحلیل استراتژی‌های بهینه برای پیشنهادات انرژی پرداخته و نتایج نشان می‌دهند که برنامه‌ریزی بازار می‌تواند نتایج بهتری نسبت به ساختارهای سنتی داشته باشد. در مرجع [۶۹]، یک طرح مدیریت زمان واقعی مبتنی بر اینترنت اشیا[3] برای تجمیع‌کنندگان پاسخگویی تقاضا و تعاملات با اپراتورهای سیستم توزیع ارائه شده است. دو الگوریتم برای تعادل توان و تنظیم ولتاژ توسعه یافته و عملکرد آنها در شبیه‌سازی واقعی آزمایش شده است. نتایج نشان می‌دهند که این راهکارها می‌توانند به بهبود هماهنگی و کاهش نوسانات در شبکه‌های توزیع کمک کنند. در مرجع [۷۰]، مدل بهینه‌سازی برای برنامه پاسخگویی تقاضا در مدیریت انرژی میکروگریدهای متصل به شبکه ارائه شده است. این مدل به کاهش وابستگی انرژی میکروگرید به منابع سنتی و افزایش کارایی کمک می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از برنامه‌های مبتنی بر انگیزه[4] می‌تواند بهره‌وری انرژی را بهبود بخشد و وابستگی به شبکه‌های سنتی را کاهش دهد.

در مجموع، این دسته از مراجع به بهینه‌سازی و مدیریت انرژی از طریق مدل‌های نوین و تکنیک‌های مختلف پرداخته‌اند. رویکردهای پیشنهادی به کاهش هزینه‌ها و بهبود کارایی انرژی کمک کرده و مزایای متعددی برای تجمیع‌کنندگان و مصرف‌کنندگان به همراه دارند.

۳-۹- دسته ۹: مطالعات موردی و شبیه‌سازی‌های کاربردی در برنامه‌ریزی پاسخگویی تقاضا

در مرجع [۷۱]، استراتژی برنامه‌ریزی منابع پاسخگویی تقاضا تحت عدم‌قطعیت با مدل‌سازی انعطاف‌پذیری بارها[5] بررسی شده است. الگوریتم ارائه شده به بهینه‌سازی جابه‌جایی بارها و مقابله با عدم‌قطعیت‌ها کمک می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که استراتژی‌های انعطاف‌پذیر به بهبود عملکرد در مواجهه با عدم‌قطعیت کمک می‌کنند. در مرجع [۷۲]، استراتژی مزایده مقاوم[6] برای تجمیع‌کنندگان پاسخگویی تقاضا در بازار برق با استفاده از نظریه بازی‌ها پیشنهاد شده است. این روش شامل مدل بار پاسخگو و بهینه‌سازی استراتژی‌های تصمیم‌گیری تحت عدم‌قطعیت قیمت است. بهینه‌سازی مقاوم می‌تواند به بهبود استراتژی‌های مزایده و کاهش ریسک‌ها کمک کند. در مرجع [۷۳]، رویکردی برای به حداکثر رساندن سود از منابع پاسخگویی تقاضا مسکونی با استفاده از بازار برق عمده‌فروشی ارائه شده است. این رویکرد شامل بهینه‌سازی تصادفی برای پیش‌بینی قیمت بازار و پیشنهادهای قیمت تقاضا[7] است. پیش‌بینی دقیق قیمت و استفاده از قراردادهای کاهش بار می‌تواند به بهبود سود و کارایی سیستم کمک کند. در مرجع [۷۴]، یک مکانیزم توزیع‌شده برای به اشتراک‌گذاری هزینه برق میان مصرف‌کنندگان خانگی با اطلاعات خصوصی ارائه شده است. این مکانیزم با استفاده از طرح جریمه/پاداش به تعادل استراتژیک می‌رسد. نتایج نشان می‌دهند که این مکانیزم منصفانه و کارآمد در مدیریت هزینه‌ها است. در مرجع [۷۵]، رفتار استراتژیک تجمیع‌کننده پاسخگویی تقاضا در بازار عمده‌فروشی با استفاده از نظریه مذاکره نش[8] بررسی شده است. این مدل شامل تحلیل رفتار تجمیع‌کننده و مدل‌های بار فیزیکی است. نتایج نشان می‌دهند که منابع کنترل‌پذیر محدود می‌توانند سود مالی را کاهش دهند. در مرجع [۷۶]، طرح پاسخگویی تقاضا مبتنی بر انگیزه برای سیستم‌های HVAC[9] در خانه‌های مسکونی با استفاده از بازی استکلبرگ[10] ارائه شده است. این مدل شامل تعاملات بین تجمیع‌کننده و مصرف‌کنندگان برای بهینه‌سازی بار است. نتایج نشان می‌دهند که انگیزه‌های مناسب می‌تواند به تغییر الگوهای مصرف و بهبود بهره‌وری منجر شود. در مرجع [۷۷]، استراتژی کنترل بهینه برای تجمیع‌کننده بار با پاسخگویی تقاضا معرفی شده است. این مدل بهینه‌سازی شامل

[1] Lagrangian duality theory
[2] incomplete information games
[3] IoT-Enabled Real-Time Management
[4] incentive-based DR program
[5] load flexibility
[6] Robust bidding strategy
[7] demand bids
[8] Nash Bargaining Theory
[9] Heating, ventilation, and air conditioning
[10] Stackelberg game

برنامه‌ریزی با محدودیت‌های مربعی[1] و استراتژی کنترل ژنراتور-باتری[2] است. نتایج نشان می‌دهند که این استراتژی‌ها اقتصاد عملیاتی[3] سیستم را بهبود می‌بخشند.
به طور کلی، این دسته از مطالعات به بررسی و توسعه استراتژی‌های مختلف در زمینه مدیریت بار و پاسخگویی به تغییرات قیمت و تقاضا پرداخته‌اند و به بهبود عملکرد سیستم‌های پاسخگویی تقاضا، کاهش عدم‌قطعیت‌ها، و افزایش بهره‌وری اقتصادی و عملیاتی کمک کرده‌اند.

۳-۱۰- دسته ۱۰: نقش تجمیع‌کننده‌ها در شبکه‌های توزیع و تاثیرات اجتماعی

در مرجع [۷۸]، رویکردی برای پاسخگویی تقاضا تجمعی با حفظ حریم خصوصی ارائه شده است که به تجمیع‌کنندگان بار امکان می‌دهد بدون افشای اطلاعات خصوصی، بهینه‌سازی مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی تقاضا را انجام دهند. این مدل با استفاده از یک چارچوب دو لایه و روش‌های تقسیم و انتشار اطلاعات حساس[4]، مزایای زیادی را برای تجمیع‌کنندگان بار به ارمغان می‌آورد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که این روش می‌تواند مشارکت مؤثر در پاسخگویی تقاضا را در حالی که حریم خصوصی حفظ می‌شود، ممکن سازد. در مرجع [۷۹]، رویکرد بهینه‌سازی تصادفی لایه‌ای[5] برای پاسخ به تقاضا تحت قیمت‌گذاری زمان واقعی و مکانیسم مبتنی بر انگیزه معرفی شده است. این مدل سه مرحله‌ای برای پیش‌بینی بار، تجمیع بارهای قابل کنترل و کنترل بارها به‌منظور کاهش تقاضا در اوج و هزینه‌های انرژی استفاده می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که این رویکرد می‌تواند به طور مؤثری بارهای فردی[6] را برای شرکت در بازار برق تجمیع کند. در مرجع [۸۰]، یک چارچوب بازار جامع با استفاده از شبیه‌سازی مبتنی بر مدل‌های عامل[7] برای برنامه‌های پاسخگویی تقاضا مسکونی ارائه شده است. این روش شامل مدل‌سازی بار و یادگیری تقویتی[8] برای بهبود تعاملات بازار و اقدامات پاسخگویی تقاضا است. نتایج نشان می‌دهند که این روش می‌تواند به افزایش بهره‌وری و بهینه‌سازی استراتژی‌های پاسخگویی تقاضا در مقیاس بزرگ کمک کند. در مرجع [۸۱]، یک چارچوب چندسطحی برای عملیات بهینه شبکه‌های توزیع هوشمند در حضور تجمیع‌کنندگان پاسخگویی تقاضا و مالکین میکروگرید ارائه شده است. این روش شامل بهینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی و حداکثر کردن سودها برای بازیکنان مختلف است. نتایج نشان می‌دهند که این مدل چندسطحی به بهبود هماهنگی و افزایش بهره‌وری در شبکه‌های توزیع کمک می‌کند. در مرجع [۸۲]، روش بهینه‌سازی زمان‌بندی برای پاسخگویی تقاضا مسکونی با در نظر گرفتن مشارکت بارهای انعطاف‌پذیر ارائه شده است. این روش شامل استفاده از الگوریتم K-means برای خوشه‌بندی بارهای انعطاف‌پذیر و به کارگیری مکانیزم پاسخگویی تقاضا به صورت بار مجازی است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این روش می‌تواند به طور مؤثری بارهای اوج را کاهش داده و دره‌های بار را پر کند. در مرجع [۸۳] ، یک چارچوب بهینه برای تجمیع‌کنندگان بار مسکونی ارائه شده که شامل مدیریت تقاضای پاسخگویی تقاضا برای کاهش هزینه‌ها و توزیع منصفانه جوایز است. این چارچوب به تجمیع‌کنندگان بار مسکونی امکان می‌دهد تا استراتژی‌های کنترل بهینه را برای وسایل خانگی اجرا کنند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این چارچوب به طور مؤثری هزینه‌های جوایز را کاهش داده و توان بالقوه بارها را بهبود می‌بخشد. در مرجع [۸۴]، یک مدل بهینه‌سازی برای عملیات تجمیع‌کننده‌های پاسخگویی تقاضا در بازارهای عمده‌فروشی برق ارائه شده است. این مدل شامل مدیریت پرتفوی برنامه‌های مختلف بار و انعطاف‌پذیر است که به صورت استوکاستیک و با استفاده از برنامه‌ریزی مختلط‌عدد صحیح مدل‌سازی شده است. نتایج مطالعه‌های موردی نشان می‌دهد که این مدل قادر به مدیریت مؤثر منابع مختلف و کاهش عدم قطعیت‌های قیمت بازار است. در مرجع [۸۵]، روش زمان‌بندی بهینه برای تجمیع‌کنندگان بار در بازار پاسخگویی تقاضا تحت سیستم قدرت کم‌کربن[9] ارائه شده است. این مطالعه شامل تعریف و تحلیل عملکرد تجمیع‌کنندگان بار، استانداردهای فنی و مشخصات شبکه است و بهینه‌سازی مدل عملیاتی برای کمترین هزینه شبکه و کاهش انتشار کربن را بررسی می‌کند. شبیه‌سازی‌های

[1] quadratical constraint quadratic programming
[2] generator-battery control strategy
[3] operational economy
[4] interacting insensitive information
[5] Layered stochastic optimization
[6] individual load
[7] Agent-based models
[8] reinforcement learning
[9] Low-Carbon Power System

عددی نشان می‌دهند که این روش بهینه‌سازی می‌تواند به طور مؤثری به اهداف کم‌کربن و بهبود عملیات شبکه کمک کند.

بطور کلی، دسته ۱۰ شامل روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی عملکرد تجمیع‌کنندگان بار در شبکه‌های توزیع است. این مراجع به طور کلی نشان می‌دهند که استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی پیشرفته می‌تواند به حفظ حریم خصوصی، کاهش هزینه‌ها، و بهبود عملکرد شبکه‌های توزیع و کاهش انتشار کربن کمک کند. بهبود بهره‌وری و هماهنگی در این سیستم‌ها با استفاده از چارچوب‌ها و مدل‌های نوین امکان‌پذیر است.

با توجه به مرور انجام شده، منابع دسته های فوق می‌توانند به درک عمیق‌تر از استراتژی‌های بهینه‌سازی در برنامه‌ریزی پاسخگویی تقاضا و تجمیع‌کنندگان کمک کنند و راهکارهای مختلفی برای بهبود کارایی و کاهش هزینه‌های انرژی در محیط‌های مسکونی و صنعتی ارائه دهند. در ادامه با توجه به مرور فوق، مزایا، چالشها و راهکارهای برنامه‌ریزی بهینه پاسخگویی تقاضا منازل مسکونی از طریق تجمیع‌کننده بیان خواهند شد.

۴- مزایای برنامه‌ریزی بهینه پاسخگویی تقاضا منازل مسکونی از طریق تجمیع‌کننده

برنامه‌ریزی بهینه پاسخگویی تقاضا در منازل مسکونی از طریق تجمیع‌کننده‌ها به بهبود عملکرد سیستم‌های انرژی و کاهش هزینه‌ها کمک می‌کند. یکی از مزایای کلیدی این رویکرد، کاهش هزینه‌های تأمین برق است. استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مدیریت بار، هزینه‌های کل تأمین برق را کاهش می‌دهد و به بهبود کارایی سیستم انرژی کمک می‌کند [۴۹]. تجمیع‌کننده‌ها با بهینه‌سازی زمان‌بندی انرژی لوازم خانگی، بهره‌وری و کاهش هزینه‌های انرژی را بهبود می‌بخشند [۳۴].

مدل‌های بهینه‌سازی با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌های تولیدات تجدیدپذیر و پاسخ مشتریان، به کاهش هزینه‌های پیشنهاد و زمان‌بندی و افزایش سوددهی کمک می‌کنند [۶۴]. چارچوب‌های تصمیم‌گیری مبتنی بر بازی‌های استکلبرگ و نظریه‌های رقابت نیز به کاهش نوسانات سود و بهینه‌سازی خرید و فروش انرژی در ساختار همتا به همتا[1] کمک می‌کنند [۲۵]. بهینه‌سازی زمان‌بندی بارهای پاسخگو منافع اقتصادی و کاهش هزینه‌ها را در سیستم‌های توزیع بهبود می‌دهد [۹].

استفاده از شبکه‌های نسل پنجم موبایل (5G) برای ارائه زیرساخت‌های پاسخگویی بار به جوامع مسکونی هوشمند، بهبود دسترسی و کارایی را به همراه دارد [۵۸]. همچنین، تجمیع‌کننده‌ها با استفاده از مدل‌های هوشمند و سیستم‌های استنتاج فازی، عملکرد بازارهای عمده‌فروشی را بهبود داده و سودآوری را افزایش می‌دهند [۴۲]. استراتژی‌های بهینه‌سازی الگوریتم‌ها می‌توانند به کاهش هزینه‌های عملیاتی روزانه و افزایش بهره‌وری سیستم‌ها کمک کنند [۵۰].

تجمیع‌کننده‌ها با استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، انعطاف‌پذیری و کاهش هزینه‌ها در بازارهای برق را بهبود می‌بخشند [۲۷]. بهینه‌سازی قراردادها و مدیریت پرتفوی در برنامه‌های پاسخگوئی تقاضا نیز به بهبود سود تجمیع‌کننده‌ها و رفاه مشتریان کمک می‌کند [۵۲]. کاهش هزینه‌های عملیاتی و حداکثرسازی سودها، تجمیع‌کننده‌ها را قادر می‌سازد تا نقش کلیدی در بهبود بهره‌وری و هماهنگی در شبکه‌های توزیع ایفا کنند [۸۱].

علاوه بر این، بهینه‌سازی و استفاده از منابع انرژی میکروگریدها به کاهش وابستگی به منابع سنتی و افزایش کارایی سیستم‌های انرژی کمک می‌کند [۷۰]. مکانیزم‌های به اشتراک‌گذاری هزینه و اجرای طرح‌های جریمه/پاداش می‌توانند به توزیع منصفانه و کارآمد هزینه‌های انرژی کمک کنند [۷۴]. ارائه انگیزه‌های مناسب به مصرف‌کنندگان به تغییر الگوهای مصرف و بهبود بهره‌وری سیستم‌های انرژی کمک می‌کند [۷۶]. بهره‌برداری کامل از منابع قابل‌انعطاف و پل زدن بین تأمین‌کنندگان و خریداران پاسخگوئی تقاضا نیز از دیگر مزایای برنامه‌ریزی بهینه پاسخگویی تقاضا از طریق تجمیع‌کننده‌ها است [۵۱].

این مزایا به طور کلی نشان می‌دهند که برنامه‌ریزی بهینه پاسخگویی تقاضا در منازل مسکونی، با کاهش هزینه‌ها و بهبود بهره‌وری، به بهبود عملکرد سیستم‌های انرژی و افزایش رفاه مصرف‌کنندگان کمک می‌کند.

۵- چالشها و راهکارها

برنامه‌ریزی بهینه پاسخگویی بار منازل مسکونی از طریق تجمیع‌کننده با چالش‌های متعددی روبه‌رو است که هر

[1] peer-to-peer

کدام نیاز به توجه ویژه و راه‌حل‌های مؤثر دارند. یکی از چالش‌های اصلی، دقت پیش‌بینی ظرفیت پاسخگویی بار است. پیش‌بینی دقیق ظرفیت پاسخگویی بار برای تجمیع‌کننده‌ها بسیار حائز اهمیت است، و مدل‌های پیش‌بینی با دقت بالا می‌توانند به بهبود این پیش‌بینی‌ها کمک کنند. این مسئله به‌ویژه در شرایطی که نیاز به برنامه‌ریزی دقیق برای بهینه‌سازی مصرف و مدیریت منابع است، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند [۱].

عدم قطعیت در پیش‌بینی بار و تولید انرژی نیز از دیگر چالش‌های اساسی است که می‌تواند به ناکارآمدی در برنامه‌ریزی و هزینه‌های اضافی منجر شود. برای مدیریت این عدم قطعیت، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مقاوم و مدل‌های پیشرفته ضروری است. این روش‌ها باید به گونه‌ای طراحی شوند که بتوانند در شرایط متغیر و پیش‌بینی نشده عملکرد بهینه‌ای داشته باشند [۳۳].

مدیریت جریان انرژی و بهبود بهره‌وری نیز یکی از چالش‌های مهم در این زمینه است. کنترل بهینه جریان توان بین شبکه برق و مصرف‌کنندگان، و همچنین مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای برقی، نیازمند توسعه مدل‌های کارا و بهینه است تا هزینه‌ها کاهش یابد و راحتی مصرف‌کنندگان حفظ شود [۲۰]. این امر به ویژه در محیط‌های پیچیده‌ای که منابع انرژی متنوع و نیازهای مختلف وجود دارد، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

پیچیدگی مدل‌سازی به دلیل تنوع منابع انرژی تجدیدپذیر و مصرف‌کنندگان فعال، مساله دیگری است که نیاز به توجه دارد. مدل‌سازی پاسخگویی بار به دلیل این پیچیدگی‌ها باید به‌طور گسترده‌ای هماهنگ و بهینه‌سازی شود. این امر به معنای نیاز به هماهنگی در سطح وسیع شبکه برق است تا بتوان به بهترین نتیجه دست یافت [۳۳].

مسائل امنیت و حفظ حریم خصوصی داده‌ها نیز به عنوان چالش‌های مهم مطرح هستند. با گسترش استفاده از سیستم‌های مدیریت انرژی، نگرانی‌هایی درباره امنیت و حریم خصوصی داده‌های مصرف‌کنندگان افزایش یافته است. حفاظت از این داده‌ها برای تجمیع‌کننده‌ها به عنوان یک چالش اساسی مطرح می‌شود و نیاز به تدابیر و راه‌حل‌های خاص دارد [۴۰].

چالش‌های دیگری از جمله مدیریت عدم قطعیت در تولیدات تجدیدپذیر و پاسخگویی به برنامه قیمت‌گذاری زمان واقعی[1] نیز وجود دارد. در این راستا، توسعه مدل‌های بهینه‌سازی مقاوم برای کاهش هزینه‌ها و به حداکثر رساندن سود تجمیع‌کننده منابع تولید پراکنده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۶۴]. همچنین، حل مسائل ترکیبی عدد صحیح مرتبط با متغیرهای تصمیم باینری برای مدیریت بارهای خانگی با قیمت‌گذاری زمان واقعی[2]، از جمله مشکلات کلیدی است [۳۴].

پیش‌بینی پتانسیل پاسخگویی بار برای مشتریان جدید بدون داده‌های تاریخی و تعامل پیچیده بین بازار برق و مصرف‌کنندگان نیز از چالش‌های مهم دیگر است. این مشکلات به‌ویژه در مدیریت پارامترهای نامشخص و بهبود ارزیابی زمان‌بندی تأثیرگذار هستند [۲۶] و [۱۷]. در نهایت، مدیریت و هماهنگی بارهای خانگی و خودروهای برقی به منظور کاهش نوسانات شبکه، نیازمند طراحی الگوریتم‌های بهینه است که بتوانند تأثیرات این خودروها را به‌طور مؤثر مدیریت کنند [۳۵].

به‌طور کلی، این چالش‌ها نیازمند توسعه راه‌حل‌های نوآورانه و مدل‌های پیشرفته‌ای هستند تا بتوان به بهینه‌سازی پاسخگویی بار منازل مسکونی به بهترین نحو ممکن دست یافت.

۶-نتیجه گیری

در این مقاله، به بررسی جامع روش‌های مختلف برای برنامه‌ریزی بهینه پاسخگویی تقاضا منازل مسکونی از طریق تجمیع‌کنندگان توان پرداخته شد. پژوهش‌ها و مدل‌های بررسی‌شده نشان می‌دهند که تجمیع‌کنندگان توان می‌توانند نقش مهمی در بهبود کارایی مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های مرتبط ایفا کنند. مدل‌های پیش‌بینی و زمان‌بندی، مانند آنچه در مراجع [۱] و [۲۸] معرفی شده است، ابزارهای کلیدی برای افزایش دقت پیش‌بینی ظرفیت پاسخگویی تقاضا و کاهش هزینه‌های انرژی به شمار می‌روند. این مدل‌ها با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیچیده و تحلیل داده‌های دقیق، امکان بهینه‌سازی مصرف انرژی را فراهم می‌آورند.

از سوی دیگر، روش‌های پیشنهادی برای بهینه‌سازی قیمت‌گذاری و استراتژی‌های مالی، مانند مدل‌های فازی در

[1] real-time pricing

[2] real-time pricing

مرجع [۲] و روش‌های صف‌بندی در مرجع [۱۹]، به تجمیع‌کنندگان کمک می‌کنند تا به حداکثر درآمد ممکن دست یابند و در عین حال هزینه‌های پاسخگویی را کاهش دهند. این استراتژی‌ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و پیچیدگی‌های بازار انرژی، امکان برنامه‌ریزی دقیق‌تر و کارآمدتر را فراهم می‌آورند.

همچنین، استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی پیشرفته و مدل‌های برنامه‌ریزی تصادفی، نظیر آنچه در مراجع [۵۴] و [۲۴] آمده است، به کاهش پیچیدگی‌های محاسباتی و حفظ حریم خصوصی داده‌ها کمک می‌کند. این روش‌ها به ویژه در مواجهه با عدم قطعیت‌های محیطی و رفتار مصرف‌کنندگان، نقش بسزایی در بهبود عملکرد سیستم‌های مدیریت انرژی ایفا می‌کنند.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان نتیجه گرفت که تجمیع‌کنندگان توان با بهره‌گیری از مدل‌های پیشرفته و تکنیک‌های بهینه‌سازی، قادر به ارائه راهکارهای مؤثری برای پاسخگویی به تقاضا و کاهش هزینه‌های انرژی هستند. همچنین، استفاده از الگوریتم‌های توزیع‌شده و مدل‌های خودتنظیمی، مانند روش‌های ارائه‌شده در مراجع [۶۲] و [۵۶]، به بهبود هماهنگی و کاهش هزینه‌ها در سطح کلان کمک می‌کند.

در نهایت، تأکید بر اهمیت بهبود سیستم‌های مدیریت انرژی خانگی و تجمیع‌کنندگان توان در این مقاله، به‌ویژه با توجه به چالش‌های فنی و مدیریتی مطرح‌شده، نشان می‌دهد که تحقیقات آینده باید به توسعه و پیاده‌سازی این مدل‌ها با دقت بیشتری بپردازند. با ادامه پیشرفت در این حوزه و توجه به نیازهای خاص کاربران و شرایط بازار، می‌توان به بهینه‌سازی بیشتر در پاسخگویی تقاضا و مدیریت انرژی دست یافت.

مراجع

[1] Fei Wang, Biao Xiang, Kangping Li, Xinxin Ge, Hai Lu, Jingang Lai and Payman Dehghanian, "Smart Households' Aggregated Capacity Forecasting for Load Aggregators Under Incentive-Based Demand Response Programs," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, vol. 56, no. 2, 2020.

[2] Zhaofang Song, Jing Shi, Shujian Li, Zexu Chen, Wangwang Yang and Zitong Zhang, "Day ahead bidding of a load aggregator considering residential consumers demand response uncertainty modeling," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 20, p. 7310, 2020.

[3] Masood Parvania, Mahmud Fotuhi-Firuzabad and Mohammad Shahidehpour, "Optimal Demand Response Aggregation in Wholesale Electricity Markets," *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, vol. 4, no. 4, 2013.

[4] Homa Rashidizadeh-Kermani, Mostafa Vahedipour-Dahraie, Miadreza Shafie-khah and João P.S. Catalão, "Stochastic programming model for scheduling demand response aggregators considering uncertain market prices and demands," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 113, pp. 528-538, 2019.

[5] "The use of intelligent aggregator agents for advanced control of demand response," *WIREs Energy and Environment*, vol. 7, no. 3, p. https://doi.org/10.1002/wene.287, 2018.

[6] Xiaoxing Lu, Xinxin Ge, Kangping Li, Fei Wang, Hongtao Shen, Peng Tao, Junjie Hu, Jingang Lai, Zhao Zhen, Miadreza Shafie-khah and João P. S. Catalão, "Optimal Bidding Strategy of Demand Response Aggregator Based On Customers' Responsiveness Behaviors Modeling Under Different Incentives," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, no. 4, pp. 3329-3340, 2021.

[7] Chaman Lal Dewangan, Vineeth Vijayan, Devesh Shukla, S. Chakrabarti, S.N. Singh, Ankush Sharma and Md. Alamgir Hossain, "An improved decentralized scheme for incentive-based demand response from residential customers," *Energy*, vol. 284, no. Article 128568, 2023.

[8] Valentín Rigoni, Damian Flynn and Andrew Keane, "Coordinating Demand Response Aggregation With LV Network Operational Constraints," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 2, pp. 979-990, 2021.

[9] Lokesh Kumar Panwar, Srikanth Reddy Konda, Ashu Verma, Bijaya K. Panigrahi and Rajesh Kumar, "Demand response aggregator coordinated two-stage responsive load scheduling in distribution system considering customer behavior," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 4, pp. 1023-1032, 2017.

[10] Ehsan Reihani, Mahdi Motalleb, Matsu Thornton and Reza Ghorbani, "A novel approach using flexible scheduling and aggregation to optimize demand response in the developing interactive grid market architecture," *Applied Energy*, vol. 183, pp. 445-455, 2016.

[11] Wenjie Lv, Jian Wu, Zhao Luo, Min Ding, Xiang Jiang, Hejian Li and Qian Wang, "Load Aggregator-Based Integrated Demand Response for Residential Smart Energy Hubs," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 1 (2019), no. Article 6925980, p. https://doi.org/10.1155/2019/6925980, 2019.

[12] Biao Xiang, Kangping Li, Xinxin Ge, Fei Wang, Jingang Lai and Payman Dehghanian, "Smart Households' Available Aggregated Capacity Day-ahead Forecast Model for Load Aggregators under Incentive-based Demand Response Program," in *2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Baltimore, MD, USA, 2019.

[13] Michael David de Souza Dutra and Natalia Alguacil, "Optimal residential users coordination via demand response: An exact distributed framework," *Applied Energy*, vol. 279, no. Article 115851, 2020.

[14] Amit Shewale, Anil Mokhade, Nitesh Funde and Neeraj Dhanraj Bokde, "An Overview of Demand Response in Smart Grid and Optimization Techniques for Efficient Residential Appliance Scheduling Problem," *Energies*, vol. 13, no. 16, p. 4266, 2020.

[15] Robin Roche, Siddharth Suryanarayanan, Timothy M. Hansen, Sila Kiliccote and Abdellatif Miraoui, "A multi-agent model and strategy for residential demand response coordination," in *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, Eindhoven, Netherlands, 2015.

[16] Zhenyuan Zhang, Zihan Chen and Wei-Jen Lee, "Soft Actor–Critic Algorithm Featured Residential Demand Response Strategic Bidding for Load Aggregators," *IEEE Transactions on Industry Application*, vol. 58, no. 4, pp. 4298-4308, 2022.

[17] Morteza Vahid-Ghavidel, Mohammad S. Javadi, Sergio F. Santos, Matthew Gough, Behnam Mohammadi-Ivatloo, Miadreza Shafie-Khah and João P. S. Catalão, "Novel Hybrid Stochastic-Robust Optimal Trading Strategy for a Demand Response Aggregator in the Wholesale Electricity Market," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, no. 5, pp. 5488-5498, 2021.

[18] Alejandro Fraija, Kodjo Agbossou, Nilson Henao and Sousso Kelouwani, "Peak-to-average ratio analysis of a load aggregator for incentive-based demand response," in *IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics*, Delft, Netherlands, 2020.

[19] Fadi Elghitani and Weihua Zhuang, "Aggregating a Large Number of Residential Appliances for Demand Response Applications," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 5, pp. 5092-5100, 2018.

[20] Pradnya Jadhav, Dagadu More and Surender Reddy Salkuti, "Smart residential distribution energy management system with integration of demand response and Aggregator," *Cleaner and Responsible Consumption*, vol. 9, p. 100115, 2023.

[21] Hessam Golmohamadi, Reza Keypour, Birgitte Bak-Jensen and Jayakrishnan R. Pillai, "A multi-agent based optimization of residential and industrial demand response aggregators," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 107, pp. 472-485, 2019.

[22] Sleiman Mhanna, Archie C. Chapman and Gregor Verbič, "A Fast Distributed Algorithm for Large-Scale Demand Response Aggregation," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 4, pp. 2094-2107, 2016.

[23] Chen Chen, Jianhui Wang and Shalinee Kishore, "A distributed direct load control approach for large-scale residential demand response," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 5, pp. 2219-2228, 2014.

[24] Minsu Park, Jihoan Lee and Dong-Jun Won, "Demand Response Strategy of Energy Prosumer Based on Robust Optimization Through Aggregator," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 202969-202979, 2020.

[25] Mostafa Vahedipour-Dahraie, Homa Rashidizadeh-Kermani, Miadreza Shafie-Khah and Pierluigi Siano, "Peer-to-Peer Energy Trading Between Wind Power Producer and Demand Response Aggregators for Scheduling Joint Energy and Reserve," *IEEE Systems Journal,* vol. 15, no. 1, pp. 705-714, 2021.

[26] Kangping Li, Zhenghui Li, Chunyi Huang and Qian Ai, "Online transfer learning-based residential demand response potential forecasting for load aggregator," *Applied Energy,* vol. 358, p. 122631, 2024.

[27] Morteza Vahid-Ghavidel, Mohammad Sadegh Javadi, Sérgio F. Santos, Matthew Gough, Miadreza Shafie-khah and João P.S. Catalão, "Energy storage system impact on the operation of a demand response aggregator," *Journal of Energy Storage,* vol. 64, no. Article 107222, 2023.

[28] X.M. Fan, X.H. Li, Y.M. Ding, J. He and M. Zhao, "Demand response scheduling algorithm for smart residential communities considering heterogeneous energy consumption," *Energy and Buildings,* vol. 279, p. 112691, 2023.

[29] Kenneth Bruninx, Hrvoje Pandži´, Hélène Le Cadre and Erik Delarue, "On the Interaction Between Aggregators, Electricity Markets and Residential Demand Response Providers," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS,* vol. 35, no. 2, pp. 840-853, 2020.

[30] Sibo Nan, Ming Zhou and Gengyin Li, "Optimal residential community demand response scheduling in smart grid," *Applied Energy,* vol. 210, pp. 1280-1289, 2018.

[31] Lazaros Gkatzikis, Iordanis Koutsopoulos and Theodoros Salonidis, "The Role of Aggregators in Smart Grid Demand Response Markets," *IEEE Journal on selected areas in communications,* vol. 31, no. 7, pp. 1247-1257, 2013.

[32] Rajasekhar Batchu and Naran M. Pindoriya, "Residential Demand Response Algorithms: State-of-the-Art, Key Issues and Challenges," in *Wireless and Satellite Systems: 7th International Conference, WiSATS 2015*, Bradford, UK, 2015.

[33] Amin Rajabi, Li Li, Jiangfeng Zhang and Jianguo Zhu, "Aggregation of Small Loads for Demand Response Programs - Implementation and Challenges: A review," in *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe*, Milan, Italy, 2017.

[34] K. M. Tsui and S. C. Chan, "Demand Response Optimization for Smart Home Scheduling Under Real-Time Pricing," *IEEE Transactions on Smart Grid,* vol. 3, no. 4, pp. 1812 - 1821, 2012.

[35] Zhanle Wang and Raman Paranjape, "Optimal scheduling algorithm for charging electric vehicle in a residential sector under demand response," in *2015 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, London, ON, Canada, 2015.

[36] Seokjae Moon and Jang-Won Lee, "Multi-Residential Demand Response Scheduling With Multi-Class Appliances in Smart Grid," *IEEE Transactions on Smart Grid,* vol. 9, no. 4, pp. 2518-2528, 2018.

[37] Zhanle Wang, Raman Paranjape, Zhikun Chen and Kai Zeng, "Multi-Agent Optimization for Residential Demand Response under Real-Time Pricing," *Energies,* vol. 12, no. 15, 2019.

[38] Haider Tarish Haider, Ong Hang See and Wilfried Elmenreich, "A review of residential demand response of smart grid," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 59, pp. 166-178, 2016.

[39] Hessam Golmohamadi, Reza Keypour, Birgitte Bak-Jensen, Jayakrishnan R. Pillai and Mohammad Hassan Khooban, "Robust Self-Scheduling of Operational Processes for Industrial Demand Response Aggregators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* vol. 67, no. 2, pp. 1387-1395, 2019.

[40] Aiming Chen, Lu Shan, Jingtao Wang, Xiuxin Chen and Xiao Chen, "Research on Demand Response Day-Ahead Scheduling Model for Multi-type Residential Customers," in *2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference*, Wuhan, China, 2021.

[41] Changhai Yang, Jianjun Tuo, Zhengying Liu, Yongcheng Liu, Jichuan Yan and Fei Wang, "Optimal Scheduling Strategy of Demand Response Aggregators Considering Customers' Complicated Response Characteristic," in *2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Taiyuan, China, 2021.

[42] Ameena Sumaiti, Srikanth Reddy Konda, Lokesh Panwar, Vishu Gupta, Rajesh Kumar and Bijaya Ketan Panigrahi, "Aggregated Demand Response Scheduling in Competitive Market Considering Load Behavior Through Fuzzy Intelligence," *IEEE Transactions on Industry Applications,* vol. 56, no. 4, pp. 4236 - 4247, 2020.

[43] Stefan Woltmann and Julia Kittel, "Development and implementation of multi-agent systems for demand response aggregators in an industrial context," *Applied Energy,* vol. 314, no. Article 118841, 2022.

[44] Pierluigi Siano and Debora Sarno, "Assessing the benefits of residential demand response in a real time distribution energy market," *Applied Energy,* vol. 161, pp. 533-551, 2016.

[45] Cátia Silva, Pedro Faria and Zita Vale, "Rating the Participation in Demand Response Programs for a More Accurate Aggregated Schedule of Consumers after Enrolment Period," *Electronics,* vol. 9, no. 2, p. 349, 2020.

[46] Hui Ren, Aiwei Zhang, Fei Wang, Xihui Yan, Yu Li, Neven Duić, Miadreza Shafie-khah and João P.S. Catalão, "Optimal scheduling of an EV aggregator for demand response considering triple level benefits of three-parties," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems,* vol. 125, p. 106447, 2021.

[47] Yusuf Ozturk, Prakash Jha, Sunil Kumar and Gordon Lee, "A personalized home energy management system for residential demand response," in *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Istanbul, Turkey, 2013.

[48] Shalini Pal and Rajesh Kumar, "Electric Vehicle Scheduling Strategy in Residential Demand Response Programs With Neighbor Connection," *IEEE Transactions on Industrial Informatics (Volume: 14, Issue: 3, March 2018),* vol. 14, no. 3, pp. 980 - 988, 2018.

[49] Ying Li, Boon Loong Ng, Mark Trayer and Lingjia Liu, "Automated Residential Demand Response: Algorithmic Implications of Pricing Models," *IEEE Transactions on Smart Grid,* vol. 3, no. 4, pp. 1712 - 1721, 2012.

[50] Ricardo Faia, Pedro Faria, Zita Vale and João Spinola, "Demand Response Optimization Using Particle Swarm Algorithm Considering Optimum Battery Energy Storage Schedule in a Residential House," *Energies,* vol. 12, no. 9, p. 1645, 2019.

[51] Xiaoxing Lu, Kangping Li, Hanchen Xu, Fei Wang, Zhenyu Zhou and Yagang Zhang, "Fundamentals and business model for resource aggregator of demand response in electricity markets," *Energy,* vol. 204, p. Article 117885, 2020.

[52] Yunwei Shen, Yang Li, Qiwei Zhang, Fangxing Li and Zhe Wang, "Consumer Psychology Based Optimal Portfolio Design for Demand Response Aggregators," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,* vol. 9, no. 2, pp. 431-439, 2021.

[53] Jingjing Zhang, Peng Zhang, Hongbin Wu, Xianjun Qi, Shihai Yang and Zhixin Li, "Two-stage load-scheduling model for the incentive-based demand response of industrial users considering load aggregators," *IET Generation, Transmission & Distribution,* vol. 12, no. 14, pp. 3518-3526, 2018.

[54] Xiao Kou, Fangxing Li, Jin Dong, Mohammed Olama, Michael Starke, Yang Chen and Helia Zandi, "A Comprehensive Scheduling Framework Using SP-ADMM for Residential Demand Response With Weather and Consumer Uncertainties," *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. 36, no. 4, pp. 3004-3016, 2021.

[55] X. Ayón, J.K. Gruber, B.P. Hayes, J. Usaola and M. Prodanović, "An optimal day-ahead load scheduling approach based on the flexibility of aggregate demands," *Applied Energy,* vol. 198, pp. 1-11, 2017.

[56] Qifen Li, Yihan Zhao, Yongwen Yang, Liting Zhang and Chen Ju, "Demand-Response-Oriented Load Aggregation Scheduling Optimization Strategy for Inverter Air Conditioner," *energies,* vol. 16, no. 1, 2023.

[57] Julian Garcia-Guarin, David Alvarez, Arturo Bretas and Sergio Rivera, "Schedule Optimization in a Smart Microgrid Considering Demand Response Constraints," *Energies,* vol. 13, no. 17, p. 4567, 2020.

[58] Zorica Bogdanović, Mirjana Stojanović, Miloš Radenković, Aleksandra Labus and Marijana Despotović-Zrakić , "Mobile Operator as the Aggregator in a Demand Response Model for Smart Residential

Communities," in *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Management Science and Engineering Management* , 2021.

[59] Zhe Chen, Yongbao Chen, Ruikai He, Jingnan Liu, Ming Gao and Lixin Zhang, "Multi-objective residential load scheduling approach for demand response in smart grid," *Sustainable Cities and Society,* vol. 76, p. 103530, 2022.

[60] T. Sarris, G. Messini and N. Hatziargyriou, "Residential demand response with low cost smart load controllers," in *Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*, 2016.

[61] Zhenyuan Zhang, Zihan Chen and Wei-Jen Lee, "Residential Demand Response Considered Strategic Bidding for Load Aggregators with Soft Actor-Critic Algorithm," in *2021 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, Vancouver, BC, Canada, 2021.

[62] Kaveh Paridari, Alessandra Parisio, Henrik Sandber and Karl Henrik Johansson, "Demand response for aggregated residential consumers with energy storage sharing," in *2015 54th IEEE Conference on Decision and Control*, Osaka, Japan, 2015.

[63] Berk Celik, Venkat Durvasulu, Fernando Bereta dos Reis, Timothy M. Hansen and Yingying Zheng, "A Framework for Large-Scale Incentive-Based Residential Demand Response using Aggregators," in *2019 IEEE International Conference on Electro Information Technology*, Brookings, SD, USA, 2019.

[64] Fei Wang, Xinxin Ge, Peng Yang, Kangping Li, Zengqiang Mi, Pierluigi Siano and Neven Duić, "Day-ahead optimal bidding and scheduling strategies for DER aggregator considering responsive uncertainty under real-time pricing," *Energy,* vol. 213, p. 118765, 2020.

[65] Mubbashir Ali, Antti Alahäivälä, Farhan Malik, Muhammad Humayun, Amir Safdarian and Amir Safdarian, "A market-oriented hierarchical framework for residential demand response," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems,* vol. 69, pp. 257-263, 2015.

[66] Özge Okur, Nina Voulis, Petra Heijnen and Zofia Lukszo, "Aggregator-mediated demand response: Minimizing imbalances caused by uncertainty of solar generation," *Applied Energy,* vol. 247, pp. 426-437, 2019.

[67] Nur Mohammad and Yateendra Mishra, "The Role of Demand Response Aggregators and the Effect of GenCos Strategic Bidding on the Flexibility of Demand," *Energies,* vol. 11, no. 12, p. 3296, 2018.

[68] Mahdi Motalleb and Reza Ghorbani, "Non-cooperative game-theoretic model of demand response aggregator competition for selling stored energy in storage devices," *Applied Energy,* vol. 202, pp. 581-596, 2017.

[69] Abouzar Estebsari, Pietro Rando Mazzarino, Lorenzo Bottaccioli and Edoardo Patti, "IoT-Enabled Real-Time Management of Smart Grids With Demand Response Aggregators," *IEEE Transactions on Industry Applications,* vol. 58, no. 1, pp. 102-112, 2022.

[70] Pratik Harsh and Debapriya Das, "Optimal coordination strategy of demand response and electric vehicle aggregators for the energy management of reconfigured grid-connected microgrid," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 160, no. Article 112251, 2022.

[71] Kaveh Paridari, Lars Nordstrom and Claes Sandels, "Aggregator strategy for planning demand response resources under uncertainty based on load flexibility modeling," in *2017 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, Dresden, Germany, 2017.

[72] Saeed Abapour, Behnam Mohammadi-Ivatloo and Mehrdad Tarafdar Hagh, "Robust bidding strategy for demand response aggregators in electricity market based on game theory," *Journal of Cleaner Production,* vol. 243, p. 118393, 2020.

[73] Mohammad Ostadijafari, Rahul Ranjan Jha and Anamika Dube, "Aggregation and Bidding of Residential Demand Response into Wholesale Market," in *2020 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, College Station, TX, USA, 2020.

[74] Sleiman Mhanna, Gregor Verbič and Archie C. Chapman, "A Faithful Distributed Mechanism for Demand Response Aggregation," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 3, pp. 1743-1753, 2016.

[75] K. Bruninx, H. Pandžic, H. Le Cadre and E. Delarue, "On Controllability of Demand Response Resources & Aggregators' Bidding Strategies," in *2018 Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Dublin, Ireland, 2018.

[76] Mehdi Tavakkoli, Sajjad Fattaheian-dehkordi, Mahdi Pourakbari-kasmaei, Matti Liski and Matti Lehtonen, "An Incentive Based Demand Response by HVAC Systems in Residential Houses," in *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, Bucharest, Romania, 2019.

[77] Xiao Zhou, Jing Shi and Shujian Li, "Optimal control strategy of load aggregators with demand response," *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 16, pp. 1033-1036, 2019.

[78] Heyang Yu, Jingchen Zhang, Junchao Ma, Changyu Chen and Guangchao Geng, "Privacy-preserving demand response of aggregated residential load," *Applied Energy 339*, vol. 339, p. Article 121018, 2023.

[79] Zhanle Wang, Raman Paranjape, Zhikun Chen and Kai Zeng, "Layered stochastic approach for residential demand response based on real-time pricing and incentive mechanism," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 14, no. 3, pp. 423-431, 2020.

[80] Shuyang Xu, Xingying Chen, Jun Xie, Saifur Rahman, Jixiang Wang, Hongxun Hui and Tao Chen, "Agent-based modeling and simulation for the electricity market with residential demand response," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 368-380, 2021.

[81] Sara Haghifam, Mojtaba Dadashi, Kazem Zare and Heresh Seyedi, "Optimal operation of smart distribution networks in the presence of demand response aggregators and microgrid owners: A multi follower Bi-Level approach," *Sustainable Cities and Society*, vol. 55, no. Article 102033, 2020.

[82] Xiaoyu Zhou, Xiaofeng Liu, Huai Liu, Zhenya Ji and Feng Li, "Optimal dispatching strategy for residential demand response considering load participation," *Global Energy Interconnection*, vol. 7, no. 1, pp. 38-47, 2024.

[83] Qinran Hu and Fangxing Li, "An Optimal Framework for Residential Load Aggregators," p. arXiv:1506.04447, 2015.

[84] Rodrigo Henríquez, George Wenzel, Daniel E. Olivares and Matías Negrete-Pincetic, "Participation of demand response aggregators in electricity markets: Optimal portfolio management," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 5, pp. 4861-4871, 2018.

[85] Lingqiao Zhang, Lin Zeng, Haiyan Wu, Hanlin Liu, Peng Liao and Yusi Chen, "Optimal Scheduling of Load Aggregators Participating in Demand Response Market under Low-Carbon Power System," in *2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration*, Taiyuan, China, 2021.

A Review of Optimal Demand Response Planning for Residential Households through Aggregators

Mohammad Hossein Erfani Majd[1], Gholam-Reza Kamyab[2,*], Saeed Balochian[2]

1. Department of Electrical Engineering, Gonabad Branch, Islamic Azadi University
2. Department of Electrical Engineering, Gonabad Branch, Islamic Azadi University
3. Department of Electrical Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azadi University

*****Corresponding Author: kamyabgolamreza@yahoo.com

ABSTRACT

This paper presents a comprehensive review of optimization strategies for residential demand response through aggregators. As the pressure on power networks increases significantly due to rising demand, effective planning and implementation of demand response strategies have become critically important. Key approaches discussed in the reviewed literature include the use of nonlinear and intelligent optimization methods, economic modeling, statistical analyses, and data mining processes, along with a focus on environmental aspects and energy efficiency improvements. The notable benefits of utilizing aggregators include reduced energy costs, enhanced grid stability, increased flexibility, and a significant decrease in emissions. However, challenges such as technical complexities, the need for effective coordination among various stakeholders, and infrastructural limitations exist in implementing these strategies. To overcome these challenges, the paper recommends employing advanced data analytics, developing novel and innovative aggregation models, and implementing effective energy management strategies. The review findings indicate that the appropriate and effective utilization of aggregators can achieve key optimization goals for demand response in residential sectors, which not only enhances the efficiency of power networks but also significantly helps in reducing consumer energy costs. Given the diversity and breadth of existing methods, further research and development in this area are encouraged, particularly regarding the integration of new technologies and the enhancement of active consumer participation in effective demand response programs.

Keywords: Demand response, Aggregator, Smart grid, Energy consumption management