بهینه‌سازی چندهدفه برای برنامه‌ریزی پاسخگویی به تقاضا منازل مسکونی با استفاده از تجمیع‌کننده‌های هوشمند

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

چکیده

این مقاله به بررسی بهینه‌سازی چندهدفه برای برنامه‌ریزی پاسخگویی به تقاضای منازل مسکونی با استفاده از تجمیع‌کننده‌های هوشمند می‌پردازد. تجمیع‌کننده‌های هوشمند به‌عنوان ابزارهای مؤثر در بهینه‌سازی مصرف انرژی خانگی و کاهش هزینه‌ها، با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته و فناوری‌های نوین، نقش مهمی در مدیریت تقاضای انرژی دارند. در این تحقیق، هدف اصلی کاهش هزینه‌های انرژی و به حداقل رساندن نارضایتی مشتریان در فرآیند پاسخگویی به تقاضا است. برای رسیدن به این اهداف، از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II استفاده شده است که قادر است مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه را با توجه به اهداف مختلف ارائه دهد. این الگوریتم از تکنیک‌های انتخاب طبیعی و فرآیندهای ژنتیکی برای پیدا کردن تعادل میان اهداف مختلف استفاده می‌کند. در مرحله بعد، برای انتخاب بهترین پاسخ مصالحه‌شده بین اهداف متضاد، از روش فازی چندهدفه بهره گرفته می‌شود. این روش به کمک تابع عضویت فازی، پاسخ‌های مختلف را بر اساس درجه انطباق‌شان با اهداف مختلف ارزیابی می‌کند. به‌کارگیری الگوریتم NSGA-II و تکنیک‌های فازی در بهینه‌سازی مصرف انرژی خانگی منجر به کاهش قابل توجه هزینه‌ها و نارضایتی مشتریان می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهند که این روش‌ها به‌طور مؤثری تعادل بهینه‌ای میان کاهش هزینه‌ها و بهبود رفاه مصرف‌کنندگان در شبکه‌های توزیع هوشمند ایجاد می‌کنند. در نهایت، این پژوهش به اهمیت استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته در بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی خانگی و دستیابی به یک سیستم پایدار و هوشمند اشاره دارد.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی چندهدفه، پاسخگویی به تقاضا، تجمیع‌کننده‌های هوشمند، NSGA-II، تکنیک فازی، بهترین پاسخ مصالحه‌شده

دریافت مقاله: ۰۵/۰۹/۱۴۰۳

پذیرش مقاله: ۰۵/۰۲/۱۴۰۴

۱-مقدمه

مدیریت تقاضای انرژی در شبکه‌های توزیع به‌عنوان یک استراتژی کلیدی برای بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌ها برای مصرف‌کنندگان شناخته می‌شود. در این راستا، تجمیع‌کننده‌های هوشمند نقش برجسته‌ای در بهینه‌سازی مصرف انرژی ایفا می‌کنند. این تجمیع‌کننده‌ها با ترکیب منابع مختلف انرژی از چندین مصرف‌کننده و استفاده از فناوری‌های پیشرفته، مانند سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و الگوریتم‌های هوشمند، به بهبود هماهنگی مصرف در شبکه‌های توزیع کمک می‌کنند و موجب کاهش نوسانات بار و بهبود پایداری شبکه می‌شوند [1, 2, 3, 4]. علاوه بر این، تجمیع‌کننده‌ها با استفاده از استراتژی‌های بهینه‌سازی مانند مدل‌های پیش‌بینی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی مقاوم، می‌توانند هزینه‌ها را کاهش دهند و انعطاف‌پذیری سیستم را افزایش دهند [5] [6]. این فرآیند نه‌تنها به کاهش هزینه‌های عملیاتی کمک

* kamyabgolamreza@yahoo.com ۲

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

می‌کند، بلکه پایداری شبکه را نیز در مواجهه با نوسانات تولید انرژی تجدیدپذیر بهبود می‌بخشد [7, 8].

یکی از اهداف اصلی این مطالعه، کاهش هزینه‌های انرژی است. در این راستا، تلاش می‌شود تا با بهره‌گیری از تجمیع‌کننده‌های هوشمند، هزینه‌های مصرف انرژی در منازل مسکونی کاهش یابد. تجمیع‌کننده‌ها با استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند الگوریتم‌های بهینه‌سازی و مدل‌های پیش‌بینی، می‌توانند مصرف انرژی را به‌طور هوشمندانه مدیریت کرده و به کاهش هزینه‌ها و بهبود بهره‌وری انرژی کمک کنند [9, 10, 11]. این کاهش هزینه‌ها نه‌تنها به‌طور مستقیم بر بهبود وضعیت اقتصادی مصرف‌کنندگان تأثیر می‌گذارد، بلکه موجب ارتقاء بهره‌وری انرژی در سطح کل سیستم می‌شود. همچنین، مطالعات متعدد بر اهمیت بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش هزینه‌ها در بهبود عملکرد شبکه‌های توزیع هوشمند تأکید کرده‌اند، که این امر در نهایت به افزایش پایداری و کاهش فشار بر منابع انرژی کمک می‌کند [1] [2, 4].

حداقل‌سازی نارضایتی مشتریان یکی دیگر از اهداف اصلی این مطالعه است. در این راستا، با بهینه‌سازی الگوی مصرف انرژی، تلاش بر این است که نارضایتی مصرف‌کنندگان به حداقل برسد. تجمیع‌کننده‌های هوشمند با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و مدیریت هوشمند بار، قادرند مصرف انرژی را به‌طور دایم و مطابق با نیازهای مصرف‌کنندگان تنظیم کنند و از این طریق، سطح رضایت مشتریان را افزایش دهند [12, 13, 14]. تحقیقات موجود نشان داده‌اند که بهینه‌سازی مصرف انرژی و تنظیم دقیق بار می‌تواند تأثیرات مثبتی بر کاهش نارضایتی و افزایش رضایت مشتریان داشته باشد [9] [15]. این بهینه‌سازی نه‌تنها موجب بهره‌وری بیشتر انرژی می‌شود، بلکه به‌طور قابل توجهی از فشارهای غیرضروری بر مصرف‌کنندگان می‌کاهد و احساس کنترل و راحتی بیشتری برای آن‌ها به ارمغان می‌آورد [2, 6].

برای دستیابی به اهداف ذکر شده، این مقاله از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II بهره می‌برد. الگوریتم NSGA-II به‌عنوان یکی از الگوریتم‌های پیشرفته و کارآمد در مسائل پیچیده با اهداف متضاد شناخته می‌شود. این الگوریتم با استفاده از اصول انتخاب طبیعی و فرآیندهای ژنتیک، قادر است مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه را که به‌طور همزمان چندین هدف مختلف را بهینه می‌کنند، ارائه دهد. با پیاده‌سازی NSGA-II، این مقاله قادر خواهد بود تعادلی دقیق بین اهداف مختلف مانند کاهش هزینه‌ها، بهبود پایداری شبکه و افزایش رضایت مشتریان برقرار کرده و تحلیل‌های مفصلی در خصوص تاثیرات متقابل این اهداف انجام دهد. استفاده از این الگوریتم موجب بهینه‌سازی همزمان عملکرد شبکه و رفاه مصرف‌کنندگان می‌شود، که در نهایت به تحقق یک سیستم انرژی هوشمند و پایدار کمک خواهد کرد [12] [7].

در سال‌های اخیر، مفهوم مدیریت تقاضا و پاسخگویی به تقاضا در بخش خانگی به‌طور گسترده‌ای برای بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، پژوهش‌های مختلفی به تحلیل و بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی مسکونی با استفاده از تجمیع‌کننده‌های هوشمند پرداخته‌اند.

در مرجع [1]، یک سیستم مدیریت انرژی هوشمند با ادغام برنامه‌های پاسخگویی به تقاضا و تجمیع‌کننده‌ها ارائه شده که هدف آن کاهش هزینه‌های انرژی و افزایش سود خالص برای مصرف‌کنندگان است. در این مدل، وسایل خانگی هوشمند، سیستم‌های ذخیره‌سازی باتری و خودروهای الکتریکی به‌عنوان بارهای انعطاف‌پذیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. مرجع [16] به بررسی استراتژی‌های مختلف برای فعال‌سازی پاسخگویی به تقاضای خانگی در مدیریت شبکه‌های توزیع فعال پرداخته و چالش‌ها و نوآوری‌های مربوط به این فناوری‌ها را بررسی می‌کند. این مطالعه نشان می‌دهد که پاسخگویی به تقاضا می‌تواند جایگزین مناسبی برای ارتقاء سیستم‌های سنتی توزیع باشد. در مرجع [15]، یک ساختار مبتنی بر چندعامل برای بهینه‌سازی تجمیع‌کننده‌های پاسخگویی به تقاضا در صنایع و مساکن پیشنهاد شده است که با استفاده از قابلیت‌های ذخیره‌سازی حرارتی و الکتریکی به‌دنبال افزایش انعطاف‌پذیری سیستم انرژی است. مرجع [17] به پیش‌بینی ظرفیت تجمیع‌شده بارهای خانگی در برنامه‌های مبتنی بر انگیزش پرداخته و یک مدل پیش‌بینی برای ارزیابی ظرفیت بار پاسخگو به تقاضا در بازار روز بعد معرفی می‌کند. این مدل به تجمیع‌کننده‌ها کمک می‌کند تا برنامه‌های پاسخگویی به تقاضا را به‌طور دقیق‌تری پیش‌بینی کنند. در مرجع [2]، تحلیل‌هایی در مورد کاربردهای پیشرفته و روش‌های بهینه‌سازی در سیستم‌های انرژی هوشمند در زمینه پاسخگویی به تقاضا انجام شده است. این مطالعه به اهمیت

پیوستگی و تعامل مصرف‌کنندگان (پروسومرها) در بازارهای برق هوشمند اشاره دارد. در مرجع [3]، یک چارچوب دو سطحی برای برنامه‌ریزی عملیات شبکه‌های توزیع هوشمند در حضور تجمیع‌کننده‌های پاسخگوی به تقاضا[1] و مالکان میکروگریدها[2] ارائه شده است که هدف آن کاهش هزینه‌های عملیاتی شبکه توزیع و افزایش سود تجمیع‌کننده‌ها و مالکان میکروگرید است. این مدل با استفاده از شرایط KKT و روش Big-M به یک مسأله تک‌سطحی تبدیل شده است. مرجع [4] به بررسی چالش‌ها و فرصت‌های پاسخگویی به تقاضا در شبکه‌های توزیع فعال پرداخته است. این مطالعه بر اهمیت استفاده از منابع ذخیره‌سازی توزیع‌شده مانند خودروهای الکتریکی و پمپ‌های حرارتی برای بهبود یکپارچگی منابع تجدیدپذیر و مدیریت بار در سیستم‌های توزیع تأکید دارد. در مرجع [5]، یک استراتژی بهینه برای تجمیع‌کننده‌ها در بازار پاسخگویی به تقاضا بر اساس پیش‌بینی بار و استفاده از بهینه‌سازی مقاوم[3] ارائه شده است. این استراتژی به تجمیع‌کننده‌ها کمک می‌کند تا از پیش‌بینی‌های نادرست جلوگیری کنند و ظرفیت کاهش بار را به‌طور دقیق‌تری پیشنهاد دهند. مرجع [9] به بررسی نقش تجمیع‌کننده‌ها در بهینه‌سازی روابط بین تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان انرژی در جهت افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در شبکه پرداخته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که پذیرش برنامه‌های پاسخگویی به تقاضا در بین مصرف‌کنندگان و تجمیع‌کننده‌ها می‌تواند به بهبود کارایی بازار انرژی کمک کند. در مرجع [10]، یک استراتژی بهینه‌سازی پیشنهاد شده که به تجمیع‌کننده‌ها این امکان را می‌دهد تا بر اساس رفتار پاسخگویی مصرف‌کنندگان، استراتژی مناقصه‌ای بهینه را برای شرکت در بازار پاسخگویی به تقاضا طراحی کنند. این مدل با استفاده از داده‌های تجربی از پروژه Pecan Street در آستین، عملکرد آن را ارزیابی کرده است. مرجع [12] به بررسی برنامه‌های خودکار پاسخگویی به تقاضا در شبکه‌های توزیع هوشمند پرداخته و به نیاز به زیرساخت‌های اندازه‌گیری و فناوری‌های ارتباطی برای پیاده‌سازی این برنامه‌ها اشاره کرده است. این مقاله مدل‌های بهینه‌سازی مختلف برای مدیریت پاسخگوئی به تقاضا را بررسی و چالش‌ها و فرصت‌های آن را ارائه می‌دهد. در مرجع [6]، تعامل استراتژیک بین تجمیع‌کننده‌ها، مصرف‌کنندگان خانگی و بازار روزانه برق[4] در یک چارچوب بهینه‌سازی دو سطحی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که همکاری بین تجمیع‌کننده و مصرف‌کنندگان می‌تواند منافع مالی قابل توجهی به همراه داشته باشد. مرجع [11] به استفاده از تجزیه و تحلیل پیش‌بینی برای ارزیابی ظرفیت کاهش بار در برنامه‌های پاسخگوئی به تقاضا پرداخته و آن را به‌عنوان یک مدل ذخیره‌سازی مجازی برای مدیریت بار در زمان‌های اوج مصرف معرفی کرده است. این مقاله از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی عملکرد این برنامه استفاده کرده است. در مرجع [13]، استفاده از سیستم‌های چندعاملی برای مدیریت پاسخگویی به تقاضا در شبکه‌های توزیع با ولتاژ پایین بررسی شده است. این تحقیق از یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای تعیین مکان‌های بهینه و میزان کاهش بار مورد نیاز برای حفظ محدودیت‌های شبکه استفاده کرده است. مرجع [18] به بررسی ادغام پروسه‌های تولید انرژی تجدیدپذیر و مصرف‌کنندگان در سیستم‌های پاسخگوئی به تقاضا پرداخته است. این مطالعه تأکید دارد که تجمیع‌کننده‌ها می‌توانند تقاضا را بر اساس عرضه انرژی تجدیدپذیر مدیریت کنند و منافع اقتصادی قابل توجهی برای مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان به همراه داشته باشد. در مرجع [14]، استفاده از عامل‌های هوشمند تجمیع‌کننده برای کنترل پیشرفته برنامه‌های پاسخگوئی به تقاضا بررسی شده است. در این مقاله، الگوریتم یادگیری Q تقریبی برای زمان‌بندی پاسخگویی به تقاضا در شبکه‌های توزیع پیشنهاد شده است که در مقایسه با سایر روش‌ها، کمترین تخلف در زمان‌بندی را ایجاد می‌کند. مرجع [7] به بررسی برنامه‌ریزی عملیاتی چندهدفه برای سیستم‌های توزیع هوشمند با در نظر گرفتن برنامه‌های پاسخگوئی به تقاضا پرداخته و از یک روش بهینه‌سازی تصادفی برای برنامه‌ریزی منابع انرژی توزیع‌شده[5] استفاده کرده است. این تحقیق به منظور کاهش هزینه‌های عملیاتی و آلایندگی، به‌ویژه در مواجهه با منابع تجدیدپذیر ناپایدار، بهینه‌سازی

[1] Demand Response Aggregator
[2] Microgrid Owner
[3] Robust optimization
[4] day-ahead electricity market
[5] Distributed Energy Resources

می‌کند. در مرجع [8]، مدل بازار سلسله مراتبی برای پاسخگوئی به تقاضا در شبکه‌های هوشمند پیشنهاد شده است که در آن تجمیع‌کننده‌ها به عنوان واسطه‌ای بین اپراتور شبکه و مصرف‌کنندگان عمل می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد که چنین مدلی می‌تواند منافع بیشتری نسبت به قیمت‌گذاری ثابت برای تمام ذینفعان داشته باشد.

مطالعات فوق نشان می‌دهند که پاسخگویی به تقاضا و تجمیع‌کننده‌ها نقش حیاتی در بهینه‌سازی عملکرد شبکه‌های توزیع هوشمند دارند. این برنامه‌ها با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته مانند مدل‌های پیش‌بینی، الگوریتم‌های بهینه‌سازی، و تعاملات استراتژیک می‌توانند به کاهش هزینه‌ها، افزایش انعطاف‌پذیری سیستم و بهبود یکپارچگی انرژی‌های تجدیدپذیر کمک کنند.

در ادامه این مقاله، ابتدا فرموله‌سازی مسأله بهینه‌سازی چندهدفه ارائه می‌شود که در آن دو هدف اصلی کاهش هزینه‌های انرژی و حداقل‌سازی نارضایتی مشتریان برای برنامه‌ریزی پاسخگویی به تقاضای منازل مسکونی در نظر گرفته شده است. سپس در بخش بعدی، روش حل مسأله با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II توضیح داده می‌شود که به شناسایی مجموعه پاسخ‌های پارتو کمک می‌کند. در ادامه، روش فازی چندهدفه برای انتخاب بهترین پاسخ مصالحه‌شده بین اهداف مختلف معرفی می‌شود. بخش بعدی به تشریح جزئیات اجرای الگوریتم NSGA-II و مراحل مختلف آن اختصاص دارد و در نهایت نتایج مطالعات عددی در یک شبکه توزیع انرژی مسکونی با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی بررسی می‌شود. در پایان، نتایج به‌دست‌آمده و تأثیرات بهینه‌سازی در کاهش هزینه‌ها و نارضایتی مشتریان جمع‌بندی و نتیجه‌گیری می‌شود که نشان می‌دهد استفاده از روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته مانند NSGA-II و تکنیک‌های فازی می‌تواند در بهبود کارایی سیستم‌های توزیع انرژی خانگی و دستیابی به تعادل بهینه بین اهداف مختلف مؤثر باشد.

۲-فرموله سازی مساله

در این تحقیق، فرض بر آن است که تجمیع‌کننده‌های هوشمند، برنامه‌ریزی پاسخگویی به تقاضای منازل مسکونی را با دو هدف اصلی بهینه‌سازی می‌کنند.

هدف اول، کاهش هزینه‌های انرژی است. این هدف به این معناست که با استفاده از تجمیع‌کننده‌های هوشمند، باید هزینه‌های کلی مصرف انرژی در سطح منازل مسکونی به حداقل برسد. در این راستا، هزینه‌های انرژی به‌طور مستقیم از طریق مصرف انرژی و قیمت‌های مربوط به هر ساعت محاسبه می‌شود. تابع هدف برای کاهش هزینه‌های انرژی، با تجمیع هزینه‌های مصرف انرژی در طول زمان، به‌صورت رابطه (۱) محاسبه خواهد شد:

$$cost = \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{t=1}^{T} \left(P_{j,t} \times Price_t \right) \qquad (۱)$$

که در آن:

$P_{j,t}$ متغیر بهینه‌سازی است که بار مصرفی را برای هر مشترک j و هر ساعت t مشخص می‌کند.

$Price_t$ قیمت انرژی در ساعت t است.

T تعداد ساعات در طول روز و N تعداد مشترکین است.

هدف دوم، حداقل‌سازی نارضایتی مشتریان است. این هدف به‌منظور کاهش نارضایتی مشتریان از طریق کاهش تفاوت بین بار مصرفی نهایی و بار مصرفی اولیه تعریف شده است. به‌عبارت دیگر، نارضایتی مشتری با توجه به اختلاف بین مصرف اولیه (پیشنهادی) و مصرف نهایی محاسبه می‌شود؛ هرچه این اختلاف کمتر باشد، نارضایتی مشتری کاهش می‌یابد. تابع هدف برای حداقل‌سازی نارضایتی مشتریان[1] به‌صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$\text{Dissatisfaction} = \frac{\sum_{j=1}^{N} \sum_{t=1}^{T} \left| P_{j,t}^{0} - P_{j,t} \right|}{\sum_{j=1}^{N} \sum_{t=1}^{T} P_{j,t}^{0}} \qquad (۲)$$

که $P_{j,t}$ بار مصرفی نهایی و $P_{j,t}^{0}$ بار مصرفی اولیه برای مشترک j در ساعت t هستند.

۳- روش حل مساله ی بهینه سازی دو هدفه فوق

مسئله بهینه‌سازی برنامه‌ریزی پاسخگویی به تقاضای منازل مسکونی که در بخش قبل فرموله شد، یک مسأله بهینه‌سازی غیرخطی ترکیبی با دو هدف است که باید به‌طور همزمان حداقل شوند. از آنجا که این اهداف نامتجانس و غیرقابل مقایسه هستند، به‌طور مستقیم نمی‌توان آن‌ها را با یکدیگر مقایسه کرد. علاوه بر این، این اهداف در تضاد با یکدیگر قرار دارند؛ به‌عنوان مثال، کاهش

[1] Customers Dissatisfaction

هزینه‌های انرژی ممکن است منجر به افزایش نارضایتی مشتری شود. به همین دلیل، تأمین همزمان هر دو هدف به‌صورت ایده‌آل غیرممکن است و از این رو، استفاده از تکنیک بهینه‌سازی چندهدفه برای دستیابی به یک تعادل بهینه بین آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد.

از تکنیک بهینه‌سازی چندهدفه مناسب به نظر می‌رسد.

در این راستا، در این تحقیق پیشنهاد می‌شود که پاسخ‌های پارتو (نامغلوب) مسئله شناسایی و سپس یکی از این پاسخ‌ها بر اساس مصالحه بین اهداف انتخاب گردد. برای شناسایی مجموعه پاسخ‌های پارتو، یکی از روش‌های متداول استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) است که در ادامه به‌طور مفصل معرفی خواهد شد و در این تحقیق به کار گرفته شده است. همچنین، برای انتخاب پاسخ مصالحه‌شده، استفاده از نظریه فازی به‌عنوان روشی مناسب پیشنهاد می‌شود تا تعادل بهینه بین اهداف متضاد به‌طور مؤثر و دقیق‌تری محقق گردد.

۴-بهینه سازی چند هدفه

بهینه‌سازی چندهدفه فرآیند یافتن بهترین تعادل میان چندین هدف متضاد است. در این نوع بهینه‌سازی، ممکن است اهداف مختلف با یکدیگر در تضاد باشند، به‌طوری که بهبود در یک هدف می‌تواند به هزینه هدف دیگری تمام شود. در این زمینه، مفاهیم غلبه و پاسخ‌های پارتو مطرح می شوند:

غلبه: پاسخ x نسبت به پاسخ y در یک مسئله چندهدفه بعنوان غالب[1] شناخته می‌شود اگر و تنها اگر x در تمامی اهداف بهتر یا مساوی با y باشد و در حداقل یکی از اهداف از y بهتر باشد.

پاسخ‌های پارتو (نامغلوب): مجموعه‌ای از پاسخ‌ها که در آن‌ها هیچ‌یک از پاسخ‌ها بر دیگری غلبه نمی‌کند، پاسخ‌های پارتو[2] نامیده می‌شوند. این پاسخ‌ها نمایانگر بهترین تعادل ممکن بین اهداف مختلف در نظر گرفته می‌شوند.

در واقع، پاسخ‌های پارتو به مجموعه‌ای از پاسخ‌ها اطلاق می‌شود که در آن‌ها هیچ‌یک از اهداف نمی‌تواند بدون آسیب رساندن به یکی از اهداف دیگر بهبود یابد. به‌عنوان مثال، در این تحقیق دو هدف وجود دارند: کمینه‌کردن هزینه انرژی و حداقل کردن نارضایتی مشتریان. در این شرایط، پاسخ‌های پارتو ترکیب‌های بهینه‌ای از هزینه انرژی و نارضایتی مشتریان را نشان می‌دهند که تصمیم‌گیرندگان می‌توانند از میان آن‌ها انتخاب کنند، بدون اینکه به‌طور عمدی یکی از اهداف را فدای دیگری کنند.

با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، مجموعه‌ای از پاسخ‌های پارتو با تنوع مناسب ارائه می‌شود که به کاربران این امکان را می‌دهد تا بر اساس اولویت‌های خود یکی از پاسخ‌های بهینه را از میان مجموعه پاسخ‌های پارتو انتخاب کنند. این پاسخ به‌عنوان بهترین پاسخ توافقی شناخته می‌شود.

۵- الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه بندی نامغلوب (NSGA-II)

در این پژوهش، الگوریتم NSGA-II[3] برای یافتن مجموعه‌ای از پاسخ‌های پارتو مورد استفاده قرار می‌گیرد. این الگوریتم که در سال ۲۰۰۰ توسط دب و همکارانش [19] معرفی شد، یک روش کارآمد و ترکیبی برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است. NSGA-II نسخه بهبود یافته الگوریتم NSGA است که با هدف افزایش سرعت و کیفیت نتایج به کار می‌رود. این الگوریتم از مفهوم مرتب‌سازی غیرمسلط برای دسته‌بندی و نمره‌دهی به پاسخ‌ها بهره می‌برد و برای حفظ تنوع جمعیت در فرآیند جستجو، از تکنیک‌هایی مانند کمینه‌سازی فاصله بین پاسخ‌ها (فاصله ازدحامی) و اعمال عملگرهای ژنتیک مانند انتخاب، تقاطع و جهش استفاده می‌کند. این ویژگی‌ها باعث شده‌اند که NSGA-II به یکی از پرکاربردترین و متداول‌ترین الگوریتم‌ها در زمینه بهینه‌سازی چندهدفه تبدیل شود. فلوچارت الگوریتم NSGA-II در شکل (۱) آورده شده است.

با توجه به فلوچارت شکل (۱)، مراحل انجام الگوریتم NSGA-II بشرح زیر است :

- ایجاد جمعیت اولیه: در این مرحله، یک جمعیت اولیه از پاسخ‌های تصادفی تولید می‌شود که شامل مقادیر بار مصرفی برای هر مشترک در ساعات مختلف است.
- ارزیابی: در این گام، مقادیر توابع هدف برای هر پاسخ در جمعیت محاسبه می‌شود. این ارزیابی برای تعیین

[1] dominant
[2] Pareto Front
[3] Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

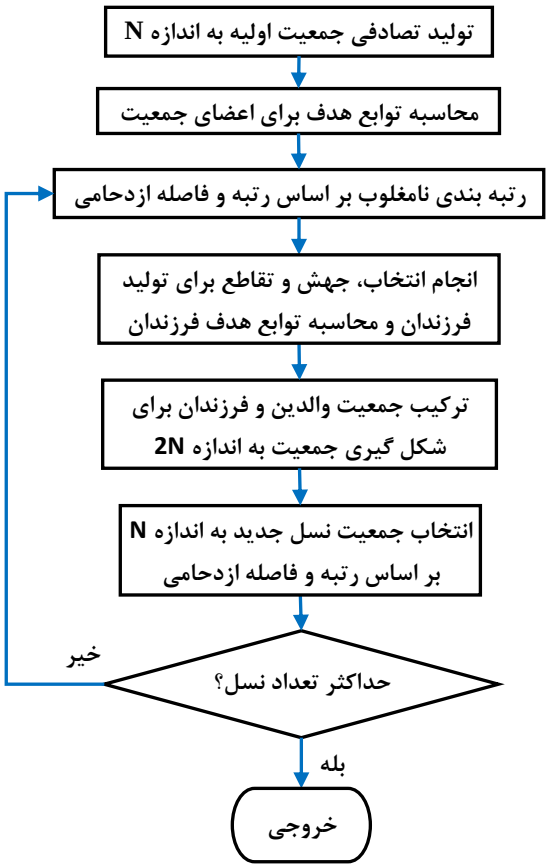
کیفیت پاسخ‌ها و مقایسه آنها در راستای بهینه‌سازی انجام می‌گیرد.

- انتخاب: پاسخ‌های مناسب برای نسل بعدی انتخاب می‌شوند. این انتخاب بر اساس رتبه‌بندی و حفظ تنوع جمعیت صورت می‌گیرد. رتبه‌بندی با استفاده از معیارهای پارتو انجام شده و تنوع جمعیت برای جلوگیری از همگرایی زودهنگام حفظ می‌شود.
- کراس‌اور و جهش: پاسخ‌های انتخاب‌شده ترکیب شده و نسل جدیدی تولید می‌شود. علاوه بر این، تغییرات تصادفی (جهش) به پاسخ‌ها اعمال می‌شود تا تنوع جمعیت افزایش یابد و الگوریتم از کشف نقاط بهینه محلی جلوگیری کند.
- ادغام : در این مرحله، نسل جدید با نسل قبلی ادغام می‌شود و بهترین پاسخ‌ها بر اساس معیارهای پارتو برای نسل بعدی انتخاب می‌گردند. این فرایند باعث بهبود تدریجی کیفیت پاسخ‌ها در طول نسل‌ها می‌شود.
- تکرار: مراحل انتخاب، کراس‌اور و جهش تا رسیدن به تعداد نسل‌های مشخص‌شده تکرار می‌شوند تا به یک مجموعه پاسخ بهینه و تعادلی از اهداف مختلف دست یابیم.

در این مطالعه، پس از اتمام مراحل الگوریتم، از تکنیک فازی چندهدفه برای شناسایی بهترین پاسخ مصالحه‌شده از میان پاسخ‌های پارتو استفاده می‌شود. این روش به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا پاسخ‌های بهینه را بر اساس اولویت‌ها و معیارهای فازی انتخاب کنند، بدون اینکه یکی از اهداف را به‌طور عمدی فدای دیگری کنند.

۶-انتخاب بهترین پاسخ مصالحه شده با تکنیک فازی

پس از محاسبه مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه پارتو با استفاده از الگوریتم NSGA-II، نیاز است تا یک پاسخ بهینه که تعادل مناسبی بین تمامی اهداف ایجاد می‌کند، انتخاب شود. برای این منظور، از تکنیک فازی چندهدفه استفاده می‌شود. در این تکنیک، برای هر تابع هدف یک تابع عضویت فازی تعریف می‌شود که نشان‌دهنده درجه عضویت هر پاسخ در تابع هدف مربوطه است. این تابع عضویت یک عدد حقیقی در بازه [۰،۱] را به خود اختصاص می‌دهد، که نشان‌دهنده میزان انطباق یا تطابق پاسخ با آن هدف خاص است.



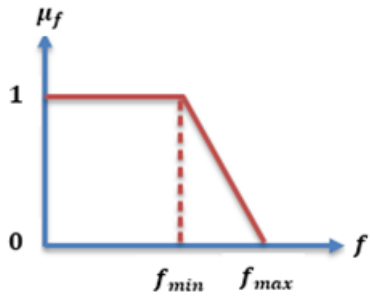
شکل ۱- فلوچارت الگوریتم NSGA-II

در این تحقیق، به‌منظور انتخاب بهترین پاسخ مصالحه‌شده از میان پاسخ‌های بهینه پارتو، از تکنیک فازی چندهدفه استفاده می‌شود. بر اساس این روش، هر تابع هدف با استفاده از یک تابع عضویت فازی مدل می‌شود و پاسخ‌های مختلف بر اساس درجه عضویت آنها در اهداف مختلف ارزیابی می‌شوند. انتخاب نوع تابع عضویت به ویژگی‌ها و ماهیت مطالعه بستگی دارد. در این پژوهش، از تابع عضویت ذوزنقه‌ای استفاده شده است که مطابق با شکل (۲) ارائه می‌شود. این نوع تابع عضویت برای مدل‌سازی تقاضاهای مختلف و انتخاب پاسخ‌های مصالحه‌ای که تعادل مناسبی بین اهداف بهینه‌شده فراهم می‌آورد، مناسب است.

بر اساس شکل (۲)، ضابطه‌ی تابع عضویت ذوزنقه‌ای برای محاسبه‌ی درجه‌ی عضویت مربوط به هر تابع هدف را می توان بصورت رابطه (۳) فرموله نمود [20]:

$$\mu_i(f_i) = \begin{cases} 1 & if \quad f_i \le f_i^{min} \\ \dfrac{f_i^{max} - f_i}{f_i^{max} - f_i^{min}} & if \quad f_i^{min} < f_i < f_i^{max} \\ 0 & if \quad f_i \ge f_i^{max} \end{cases} \quad (۳$$

در اینجا، μ_i نمایانگر درجه عضویت تابع هدف iام، f_i مقدار تابع هدف iام، f_i^{min} مقدار بهینه ایده‌آل[1] تابع هدف iام و f_i^{max} مقدار کاملا نامطلوب[2] این تابع می‌باشد. مقادیر f_i^{min} و f_i^{max} می توانند از بهینه سازی تک‌هدفه نیز بدست آیند.



شکل ۲- منحنی تابع عضویت ذوزنقه ای

در اینجا برای شناسایی بهترین پاسخ مصالحه‌شده، از تابع عضویت نرمال شده مربوط به پاسخ kام (μ^k) استفاده می‌شود. این مقدار با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌گردد:

$$\mu^k = \frac{\sum_{i=1}^{Nobj} \mu_i^k}{\sum_{k=1}^{M} \sum_{i=1}^{Nobj} \mu_i^k} \qquad (۴)$$

که μ_i^k نمایانگر تابع عضویت تابع هدف iام در پاسخ بهینه پارتوی kام است. همچنین، M تعداد پاسخهای بهینه ی پارتو و $Nobj$ تعداد توابع هدف (در اینجا دو هدف: هزینه و نارضایتی مشتریان) را نشان می دهد. بهترین پاسخ مصالحه‌شده، پاسخی است که بالاترین مقدار تابع عضویت نرمال‌شده (بیشترین μ^k) را داشته باشد و به عنوان پاسخی که تعادل مطلوب بین اهداف مختلف را برقرار می‌سازد، انتخاب می‌شود.

در واقع، پاسخ مصالحه‌شده بهترین ترکیب از اهداف مختلف را فراهم می‌آورد، به‌طوریکه کمترین تعارض میان اهداف وجود داشته باشد. این انتخاب بر اساس درجه تطابق پاسخ‌ها با اهداف مورد نظر صورت می‌گیرد و پاسخی که دارای بیشترین درجه عضویت (یا μ^k) باشد، به‌عنوان بهترین انتخاب برای تعادل میان اهداف مختلف در نظر گرفته می‌شود.

۷-نتایج مطالعات عددی

در این بخش نتایج اعمال روش پیشنهادی برای یک شبکه توزیع با مصارف مسکونی با مشخصات زیر بررسی می شود.

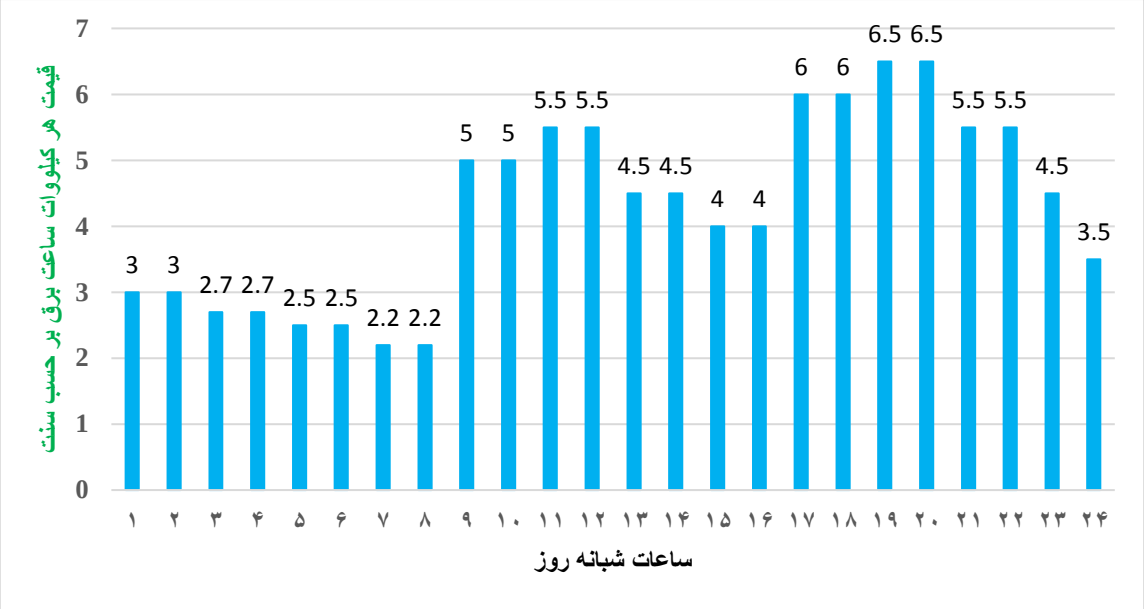
تعداد کل مشترکین سیستم برابر با N=50 مشترک در نظر گرفته شده است. هر مشترک در طول یک بازه زمانی ۲۴ ساعته (T=24) دارای بار مصرفی مشخصی است که به صورت تصادفی برای هر ساعت بین ۰ تا ۱۰ کیلووات تعیین گردیده است. این بار مصرفی نمایانگر مصرف انرژی هر مشترک در ساعات مختلف روز است. همچنین، قیمت انرژی در هر ساعت از طول ۲۴ ساعت به صورت شکل (۳) در نظر گرفته شد.

بر طبق روش پیشنهادی، به منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی و برنامه‌ریزی بارها، از الگوریتم NSGA-II استفاده شد. پارامترهای این الگوریتم به گونه‌ای تنظیم شدند که تعداد جمعیت اولیه برابر با ۲۰ فرض شده و الگوریتم تا حداکثر ۲۰ نسل تکرار می‌شود. همچنین، احتمال کراس‌اور برای تبادل اطلاعات بین کروموزوم‌ها برابر ۰,۷ در نظر گرفته شد که نشان‌دهنده اهمیت ترکیب پاسخهای مختلف است. احتمال جهش نیز که باعث تغییرات جزئی در پاسخها و افزایش تنوع جمعیت می‌شود، برابر با ۰,۳ در نظر گرفته شد. این پارامترها با هدف یافتن پاسخ‌های بهینه در مسئله بهینه‌سازی چندهدفه تنظیم گردیدند.

ابتدا با استفاده از الگوریتم NSGA-II بهینه‌سازی چندهدفه انجام شد و مجموعه ای از پاسخهای پارتو بدست آمدد. تعداد ۱۸ پاسخ پارتوی متمایز بدست آمد که مجموع هزینه انرژی و مجموع نارضایتی مشتریان برای این پاسخها در جدول (۱) به ترتیب افزایش نارضایتی آورده شده اند. همچنین در شکل (۴)، نمودار جبهه پاسخ‌های پارتو نمایش داده شده‌است. پاسخ شماره ۱، بیشترین مجموع هزینه انرژی را دارد ولی نارضایتی مشتریان را به صفر می رساند. پاسخ شماره ۱۸، بیشترین مجموع هزینه انرژی را دارد و در عین حال بیش از ۵۲ درصد نارضایتی ایجاد می کند. در این شرایط، تجمیع کننده باید با انجام مصالحه بین هزینه انرژی و نارضایتی مشتریان، یکی از پاسخ‌های پارتو را انتخاب کند تا تعادلی مطلوب میان این دو هدف به‌دست آید.

[1] completely satisfactory

[2] completely unsatisfactory



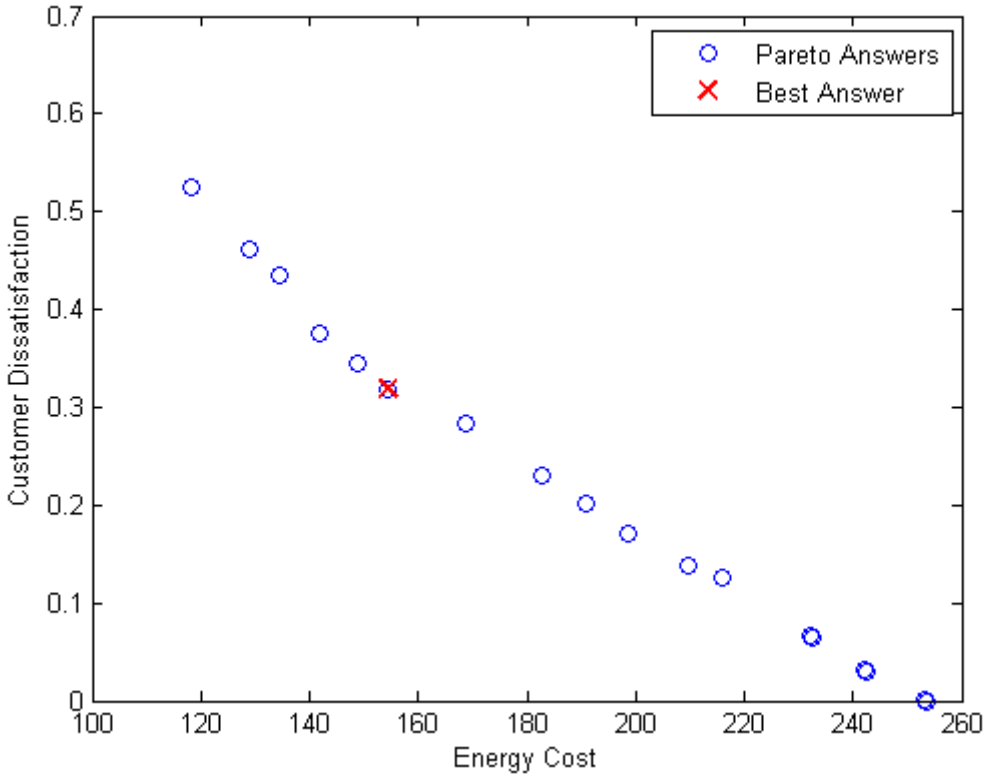
شکل ۳- : نمودار قیمت برق در ساعات مختلف شبانه روز

جدول ۱- مشخصات پاسخهای پارتو

شماره پاسخ	هزینه (Cost)	نارضایتی مشتریان (Dissatisfaction)
1	253.518	0.000
2	253.199	0.001
3	242.370	0.030
4	242.025	0.031
5	232.646	0.065
6	232.216	0.067
7	215.793	0.127
8	209.495	0.139
9	198.478	0.171
10	190.826	0.202
11	182.920	0.230
12	168.590	0.283
13	154.415	0.318
14	148.914	0.345
15	141.904	0.375
16	134.651	0.436
17	129.116	0.462
18	118.132	0.526

پس از بدست آوردن پاسخهای پارتو، برای تعیین بهترین پاسخ مصالحه شده با استفاده از تکنیک فازی پیشنهادی، مقادیر حداقل و حداکثر هر یک از توابع هدف به عنوان پارامترهای فازی تعیین شدند. بطور خاص، برای تابع هدف هزینه، کمترین هزینه ی ایجاد شده در میان پاسخهای پارتو بعنوان مقدار حد پائین (ایده آل) تابع هدف هزینه (f_{cost}^{min}) انتخاب شد و بیشترین هزینه ای ایجاد شده در میان پاسخ‌های پارتو بعنوان مقدار حد بالا (کاملا نامطلوب) تابع هدف هزینه (f_{cost}^{max}) انتخاب گردید. این مقادیر به منظور محاسبه میزان عضویت فازی برای هر پاسخ بهینه استفاده می‌شوند. بطور مشابه برای تابع هدف نارضایتی مشتریان، کمترین و بیشترین میزان نارضایتی در میان پاسخ‌های پارتو بترتیب بعنوان مقادیر حد پائین تابع هدف نارضایتی (f_{dissat}^{min}) و حد بالای تابع هدف نارضایتی (f_{dissat}^{max}) انتخاب شدند. بدین ترتیب با توجه به مقادیر ارائه‌شده در جدول (۱)، پارامترهای فازی بشرح زیر انتخاب شدند:

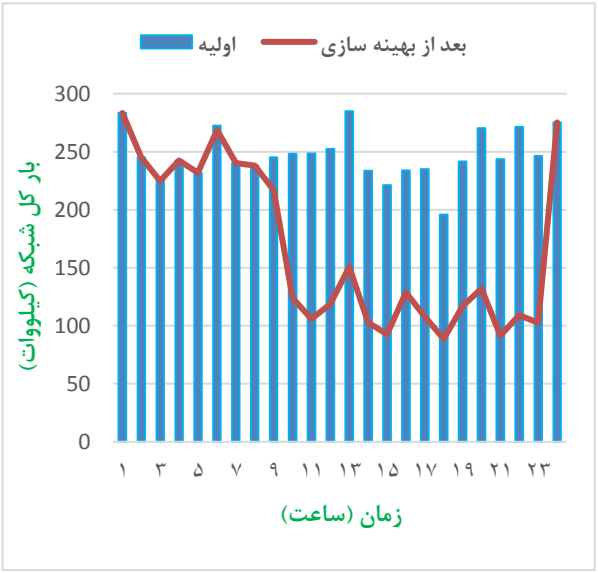
$$f_{cost}^{min} = 118.13 \qquad f_{cost}^{max} = 253.52$$
$$f_{dissat}^{min} = 0 \qquad f_{dissat}^{max} = 0.526$$



شکل ۴- : نمودار جبهه ی پاسخهای پارتو

سپس مقادیر عضویت برای هر هدف در هر پاسخ پارتو با استفاده از رابطه (۳) محاسبه گردیدند و مقادیر عضویت نرمال شده نیز با بهره گیری از رابطه (۴) محاسبه شدند تا بهترین پاسخ مصالحه‌شده شناسایی گردد. پاسخ شماره ۱۳ در جدول (۱)، بهترین پاسخ مصالحه شده ی بدست آمده است و در شکل (۴)، این پاسخ با یک علامت ویژه مشخص شده است. در صورتیکه تجمیع کننده پاسخ مصالحه شده ی تکنیک فازی پیشنهادی را انتخاب کند، با برنامه ریزی مبتنی بر این پاسخ، مجموع هزینه انرژی مشتریان از ۲۵۳,۵۱۸ دلار در روز به ۱۵۴,۴۱۵ دلار در روز کاهش می یابد که معادل بیش از ۳۹ درصد کاهش است. همچنین، نارضایتی مشتریان به میزان ۳۱,۸ درصد خواهد بود.

شکل (۵) نمودار بار کل مصرفی اولیه (بدون بهینه سازی) و همچنین نمودار بار مصرفی پس از بهینه سازی بر اساس پاسخ مصالحه شده را نشان می دهد. چنانکه در این شکل دیده می شود، بار مصرفی شبکه در ساعات ۹ تا ۲۳ که قیمت برق گران بوده است به میزان زیادی کاهش می یابد ولی در ساعات ۱ تا ۹ صبح که قیمت برق پائین تر است، بار مصرفی کاهش داده نمی شود.



شکل ۵- نمودار بار کل مصرفی شبکه اولیه و بعد از بهینه سازی برای پاسخ مصالحه شده

۸-نتیجه گیری

در این مقاله، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای برنامه‌ریزی پاسخگویی به تقاضای منازل مسکونی با استفاده از تجمیع‌کننده‌های هوشمند ارائه شد که دو هدف اصلی

کاهش هزینه‌های انرژی و حداقل‌سازی نارضایتی مشتریان را همزمان مدنظر قرار می‌دهد. به‌منظور دستیابی به این اهداف، از الگوریتم NSGA-II برای یافتن مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه پارتو استفاده شد و سپس تکنیک فازی چندهدفه برای انتخاب بهترین پاسخ مصالحه‌شده به‌کار گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که این رویکرد به‌طور مؤثر قادر به کاهش قابل توجه هزینه‌های انرژی مصرف‌کنندگان است، در حالی که نارضایتی مشتریان را به حداقل می‌رساند. انتخاب پاسخ مصالحه‌شده با استفاده از تکنیک فازی، تعادلی بهینه بین کاهش هزینه و حفظ رضایت مشتریان ایجاد می‌کند. این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از تجمیع‌کننده‌های هوشمند همراه با روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته مانند NSGA-II و تکنیک‌های فازی می‌تواند به‌طور قابل توجهی در بهبود بهره‌وری انرژی و مدیریت تقاضا در شبکه‌های توزیع انرژی مؤثر باشد. یافته‌های این مطالعه به‌ویژه در راستای پشتیبانی از توسعه سیستم‌های انرژی هوشمند و پایدار در مقیاس خانگی مفید است و می‌تواند به‌عنوان یک راهکار کاربردی برای مدیران شبکه‌های توزیع انرژی و سیاست‌گذاران در نظر گرفته شود.

مراجع

[1] P. Jadhav, D. More and S. R. Salkuti, "Smart residential distribution energy management system with integration of demand response and Aggregator," *Cleaner and Responsible Consumption*, vol. 9, 2023.

[2] Yonghua Song, Yi Ding, Pierluigi Siano, Christoph Meinrenken, Menglian Zheng and Goran Strbac, "Optimization methods and advanced applications for smart energy systems considering grid-interactive demand response," *Applied Energy*, vol. 259, 2020.

[3] S. Haghifam, M. Dadashi, K. Zare and H. 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, 2020.

[4] Pavani Ponnaganti, Jayakrishnan R Pillai and Birgitte Bak-Jensen, "Opportunities and challenges of demand response in active distribution networks," *Wiley Energy and Environment*, vol. 7, no. 1, 2018.

[5] M. Park, J. Lee and D.-J. Won, "Demand Response Strategy of Energy Prosumer Based on Robust Optimization Through Aggregator," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 202969-202979, 2020.

[6] K. Bruninx, H. Pandži´, H. L. Cadre and E. 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.

[7] Alireza Zakariazadeh, Shahram Jadid and Pierluigi Siano, "Stochastic multi-objective operational planning of smart distribution systems considering demand response programs," *Electric Power Systems Research*, vol. 111, pp. 156-168, 2014.

[8] L. Gkatzikis, I. Koutsopoulos and T. Salonidis, "The Role of Aggregators in Smart Grid Demand Response Markets," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 7, 2013.

[9] Adrian Tantau, András Puskás-Tompos, Laurentiu Fratila and Costel Stanciu, "Acceptance of Demand Response and Aggregators as a Solution to Optimize the Relation between Energy Producers and Consumers in order to Increase the Amount of Renewable Energy in the Grid," *Energies*, vol. 14, no. 12, 2021.

[10] Xiaoxing Lu, Xinxin Ge, Kangping Li, Fei Wang, Hongtao Shen and Peng Tao, "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.

[11] Saurav M.S. Basnet, Haneen Aburub and Ward Jewell, "Residential demand response program: Predictive analytics, virtual storage model and its optimization," *Journal of Energy Storage*, vol. 23, 2019.

[12] Abhishek Tiwari and Naran M. Pindoriya, "Automated Demand Response in Smart Distribution Grid: A Review on Metering Infrastructure, Communication Technology and Optimization Models," *Electric Power Systems Research*, vol. 206, 2022.

[13] Sima Davarzani, Ramon Granell, Gareth A. Taylor and Ioana Pisica, "Implementation of a novel multi-agent system for demand response management in low-voltage distribution networks," *Applied Energy*, vol. 253, 2019.

[14] Tomi Medved, Gašper Artač and Andrej F. Gubina, "The use of intelligent aggregator agents for advanced control of demand response," *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, vol. 7, no. 3, 2018.

[15] H. Golmohamadi, R. Keypour, B. Bak-Jensen and J. 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.

[16] Sima Davarzani, Ioana Pisica, Gareth A. Taylor and Kevin J. Munisami, "Residential Demand Response Strategies and Applications in Active Distribution Network Management," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 138, 2021.

[17] F. Wang, B. Xiang, K. Li, X. Ge, H. Lu, J. Lai and P. Dehghanian, "Smart Households' Aggregated Capacity Forecasting for Load Aggregators Under Incentive-Based Demand Response Programs," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 2, pp. 1086-1097, 2020.

[18] Carlos Cruz, Tarek Alskaif, Tarek Alskaif and Ignacio Bravo, "Prosumers integration in aggregated demand response systems," *Energy Policy*, vol. 182, 2023.

[19] Kalyanmoy Deb, Samir Agrawal, Amrit Pratap and T Meyarivan, "A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II," in *Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI*, 2000.

[20] D. Suchitra, R. Jegatheesan and T. Deepika, "Optimal design of hybrid power generation system and its integration in the distribution network," *Electrical Power and Energy Systems,* vol. 82, pp. 136-149, 2016.

Multi-Objective Optimization for Demand Response Planning in Residential Homes Using Smart 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 examines multi-objective optimization for demand response planning in residential households using smart aggregators. Smart aggregators play a crucial role as effective tools in optimizing home energy consumption and reducing costs, leveraging advanced algorithms and innovative technologies in energy demand management. The main objective of this research is to reduce energy costs and minimize customer dissatisfaction in the demand response process. To achieve these goals, the multi-objective optimization algorithm NSGA-II is employed, which can provide a set of optimal solutions considering various objectives. This algorithm utilizes natural selection techniques and genetic processes to find a balance between different goals. Subsequently, a multi-objective fuzzy method is used to select the best trade-off solution between conflicting objectives. This method evaluates different solutions based on their degree of alignment with various goals using fuzzy membership functions. The application of the NSGA-II algorithm and fuzzy techniques in optimizing home energy consumption leads to a significant reduction in costs and customer dissatisfaction. Numerical simulation results show that these methods effectively create an optimal balance between cost reduction and improving consumer welfare in smart distribution networks. Finally, this research highlights the importance of using advanced algorithms in optimizing home energy systems and achieving a sustainable and intelligent system.

Keywords:

Multi-objective optimization, Demand response, Smart aggregators, NSGA-II, Fuzzy technique, Best compromise solution