

طراحی کنترل کننده فازی پاسخگویی بار هوشمند برای واحدهای استخراج رمزارز تغذیه شده با سامانه فتوولتائیک در شهرک‌های صنعتی

امید محمدی^۱، امین کریمی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد مهندسی برق، گرایش سیستم‌های قدرت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج، سنندج، ایران

omid.m521368@gmail.com

۲- استادیار مهندسی برق، گرایش سیستم‌های قدرت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج، سنندج، ایران

a.karimi@iausdj.ac.ir

خلاصه

افزایش مصرف انرژی در واحدهای استخراج رمزارز و گسترش استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک، ضرورت توسعه راهکارهای هوشمند مدیریت انرژی را بیش از پیش آشکار ساخته است. هدف این پژوهش، طراحی و ارزیابی یک کنترل کننده فازی برای مدیریت پاسخگویی بار واحدهای استخراج رمزارز تغذیه شده با سامانه فتوولتائیک در شبکه توزیع است. در این پژوهش، یک مدل شبیه‌سازی از سامانه شامل آرایه فتوولتائیک، الگوریتم ردیابی نقطه بیشینه توان (MPPT)، بار پایه، واحد استخراج رمزارز و کنترل کننده فازی در محیط MATLAB/Simulink توسعه یافت. عملکرد روش پیشنهادی در سه سناریوی «بدون پاسخگویی بار»، «پاسخگویی بار سنتی» و «پاسخگویی بار مبتنی بر کنترل کننده فازی» مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که کنترل کننده فازی با تنظیم هوشمند توان مصرفی واحد استخراج رمزارز متناسب با شرایط تولید سامانه فتوولتائیک و وضعیت شبکه، موجب افزایش بهره‌برداری از انرژی خورشیدی و کاهش وابستگی به شبکه توزیع می‌شود. همچنین، به‌کارگیری روش پیشنهادی سبب کاهش توان دریافتی از شبکه، کاهش تلفات خطوط، بهبود پروفیل ولتاژ، کاهش هزینه تأمین انرژی و افزایش هماهنگی میان تولید و مصرف انرژی شد. یافته‌های پژوهش بیانگر آن است که کنترل فازی می‌تواند به‌عنوان راهکاری کارآمد برای مدیریت بارهای انعطاف‌پذیر در شبکه‌های توزیع دارای منابع انرژی تجدیدپذیر مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، از آنجا که ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی بر پایه شبیه‌سازی انجام شده است، تعمیم نتایج به شرایط واقعی مستلزم انجام مطالعات آزمایشگاهی و میدانی خواهد بود.

کلمات کلیدی: پاسخگویی بار، کنترل کننده فازی، استخراج رمزارز، سامانه فتوولتائیک، مدیریت انرژی، شبکه توزیع.

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد روزافزون تقاضای انرژی الکتریکی، توسعه فناوری‌های دیجیتال و افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، صنعت برق را با چالش‌های متعددی مواجه ساخته است. وابستگی گسترده به سوخت‌های فسیلی، علاوه بر افزایش هزینه‌های تولید انرژی، موجب تشدید انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی شده است. از این‌رو، بهره‌گیری از منابع انرژی تجدیدپذیر، به‌ویژه سامانه‌های فتوولتائیک، به یکی از مهم‌ترین راهبردهای کشورهای مختلف برای دستیابی به توسعه پایدار



و افزایش امنیت انرژی تبدیل شده است. در سال‌های اخیر، پیشرفت فناوری سلول‌های خورشیدی، کاهش هزینه نصب سامانه‌های فتوولتائیک و حمایت سیاست‌گذاران از توسعه انرژی‌های پاک، زمینه را برای گسترش استفاده از این سامانه‌ها در بخش‌های صنعتی، تجاری و خانگی فراهم کرده است [۱،۲]. با وجود این پیشرفت‌ها، ماهیت متناوب تولید انرژی خورشیدی و وابستگی آن به شرایط جوی، چالش‌های جدیدی را در بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های قدرت ایجاد کرده است. از این رو، استفاده از فناوری‌های هوشمند مدیریت انرژی و پاسخگویی بار به عنوان یکی از راهکارهای مؤثر برای افزایش انعطاف‌پذیری شبکه‌های برق، مورد توجه گسترده پژوهشگران قرار گرفته است. [3]

در کنار توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، گسترش فناوری زنجیره بلوکی و ارزهای دیجیتال موجب افزایش قابل توجه تعداد مراکز استخراج رمزارز در بسیاری از کشورها شده است. فعالیت این مراکز به دلیل استفاده از تجهیزات پردازشی با توان بالا، مصرف انرژی الکتریکی بسیار زیادی را به شبکه تحمیل می‌کند. با این حال، برخلاف بسیاری از بارهای صنعتی، واحدهای استخراج رمزارز از قابلیت کنترل‌پذیری و انعطاف‌پذیری عملیاتی بالایی برخوردار هستند و می‌توانند بدون ایجاد اختلال اساسی در فرآیند استخراج، متناسب با شرایط شبکه یا میزان تولید انرژی تجدیدپذیر، توان مصرفی خود را تنظیم کنند. این ویژگی موجب شده است که استخراج رمزارز از یک بار صرفاً پرمصرف، به یک منبع بالقوه برای اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار تبدیل شود [۴،۵]. در همین راستا، پژوهش‌های متعددی استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک را برای تأمین بخشی از انرژی مورد نیاز مراکز استخراج رمزارز پیشنهاد کرده‌اند تا ضمن کاهش هزینه‌های انرژی، وابستگی این مراکز به شبکه سراسری و آثار زیست‌محیطی ناشی از مصرف برق نیز کاهش یابد [۶،۷]. همچنین، توسعه سامانه‌های مدیریت انرژی، الگوریتم‌های بهینه‌سازی و روش‌های کنترل هوشمند، امکان هماهنگ‌سازی میان تولید انرژی خورشیدی، مصرف بار و شرایط شبکه را تا حد زیادی فراهم کرده است.

با وجود پیشرفت‌های یادشده، بررسی ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که همچنان شکاف‌های مهمی در این حوزه وجود دارد. بخش عمده‌ای از مطالعات پیشین بر بهینه‌سازی اقتصادی مراکز استخراج رمزارز، زمان‌بندی بار یا مدیریت انرژی متمرکز بوده‌اند و کمتر به طراحی یک راهکار کنترلی هوشمند که بتواند به صورت هم‌زمان شرایط متغیر تولید فتوولتائیک، وضعیت شبکه و میزان مصرف بار استخراج را مدیریت کند، پرداخته‌اند [۲،۳]. افزون بر این، بسیاری از روش‌های کنترلی ارائه‌شده مبتنی بر مدل‌های دقیق ریاضی هستند، در حالی که رفتار سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر و بارهای استخراج رمزارز با عدم قطعیت‌های متعددی مانند تغییرات تابش خورشیدی، نوسانات دمای محیط، تغییرات قیمت برق و شرایط بهره‌برداری شبکه همراه است. در چنین شرایطی، استفاده از کنترل‌کننده‌های کلاسیک ممکن است عملکرد مطلوبی نداشته باشد. از سوی دیگر، مطالعات اندکی به بررسی کاربرد کنترل‌کننده‌های فازی در مدیریت پاسخگویی بار واحدهای استخراج رمزارز تغذیه‌شده از سامانه‌های فتوولتائیک، به‌ویژه در شهرک‌های صنعتی، پرداخته‌اند؛ در حالی که این محیط‌ها به دلیل تمرکز بارهای صنعتی، محدودیت ظرفیت شبکه توزیع و ضرورت حفظ کیفیت توان، نیازمند راهکارهای مدیریتی دقیق و هوشمند هستند.

تداوم این شکاف پژوهشی می‌تواند پیامدهای فنی و اقتصادی قابل توجهی به همراه داشته باشد. عدم هماهنگی میان تولید متغیر انرژی خورشیدی و مصرف بالای تجهیزات استخراج رمزارز، موجب افزایش نوسانات بار، کاهش بهره‌وری استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، افزایش وابستگی به شبکه سراسری و در نهایت افزایش هزینه‌های بهره‌برداری خواهد شد. علاوه بر این، تحمیل بارهای سنگین در ساعات اوج مصرف می‌تواند موجب افزایش بارگذاری تجهیزات شبکه، افت ولتاژ، کاهش قابلیت اطمینان شبکه توزیع و افزایش هزینه‌های توسعه زیرساخت‌های برق شود [۵،۸]. در شهرک‌های صنعتی که معمولاً محدودیت ظرفیت ترانسفورماتورها و خطوط توزیع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، نبود یک سامانه کنترل هوشمند برای مدیریت هم‌زمان تولید و مصرف انرژی، بهره‌برداری اقتصادی و پایدار از این مراکز را با چالش‌های جدی مواجه می‌سازد. بنابراین،



طراحی راهکاری که بتواند در شرایط عدم قطعیت، تصمیمات کنترلی مناسب را به صورت بلادرنگ اتخاذ کند، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر به شمار می‌رود.

بر همین اساس، پژوهش حاضر با هدف طراحی یک کنترل‌کننده فازی پاسخگویی بار هوشمند برای واحدهای استخراج رمزارز تغذیه‌شده با سامانه فتوولتائیک در شهرک‌های صنعتی انجام می‌شود. سؤال اصلی پژوهش به این صورت مطرح است: چگونه می‌توان با طراحی یک کنترل‌کننده فازی هوشمند، پاسخگویی بار واحدهای استخراج رمزارز تغذیه‌شده با سامانه فتوولتائیک در شهرک‌های صنعتی را به گونه‌ای مدیریت کرد که ضمن افزایش بهره‌برداری از انرژی خورشیدی، فشار وارد بر شبکه برق کاهش یافته و شاخص‌های فنی و اقتصادی سیستم بهبود یابد؟

در این پژوهش تلاش خواهد شد با بهره‌گیری از قابلیت‌های منطق فازی در تصمیم‌گیری تحت شرایط عدم قطعیت، راهکاری برای مدیریت هوشمند توان مصرفی تجهیزات استخراج متناسب با میزان تولید انرژی خورشیدی، وضعیت شبکه و شرایط بهره‌برداری ارائه شود. انتظار می‌رود نتایج این پژوهش، ضمن افزایش بهره‌برداری از انرژی خورشیدی، کاهش وابستگی به شبکه سراسری، بهبود انعطاف‌پذیری بار، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و ارتقای پایداری شبکه توزیع، زمینه مناسبی برای توسعه مراکز استخراج رمزارز مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر در شهرک‌های صنعتی فراهم آورد و به توسعه پایدار صنعت برق و استفاده بهینه از منابع انرژی کمک کند.

۲. مبانی نظری

۲-۱. مقدمه

توسعه فناوری‌های هوشمند در صنعت برق، افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر و حرکت به سوی شبکه‌های هوشمند، مدیریت بهینه انرژی را به یکی از مهم‌ترین موضوعات پژوهشی سال‌های اخیر تبدیل کرده است. افزایش سهم منابع تولید پراکنده، به‌ویژه سامانه‌های فتوولتائیک، اگرچه مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجهی به همراه دارد، اما به دلیل نوسانات ذاتی تولید، چالش‌های متعددی را در بهره‌برداری از شبکه‌های قدرت ایجاد کرده است. از این رو، پژوهشگران استفاده از راهکارهایی نظیر مدیریت سمت تقاضا، پاسخگویی بار و روش‌های کنترل هوشمند را برای افزایش قابلیت اطمینان، انعطاف‌پذیری و پایداری شبکه‌های برق پیشنهاد کرده‌اند. [9,10]

۲-۲. پاسخگویی بار

پاسخگویی بار یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های مدیریت سمت تقاضا در شبکه‌های هوشمند محسوب می‌شود و به مجموعه اقداماتی اطلاق می‌شود که طی آن مشتریان در پاسخ به سیگنال‌های قیمتی یا درخواست بهره‌بردار شبکه، الگوی مصرف انرژی خود را تغییر می‌دهند. این تغییر می‌تواند به صورت کاهش توان مصرفی، انتقال بار به ساعات کم‌باری یا کنترل موقت تجهیزات الکتریکی انجام شود. هدف اصلی اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار، ایجاد تعادل میان تولید و مصرف انرژی، کاهش بار اوج، افزایش قابلیت اطمینان شبکه و کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری در توسعه زیرساخت‌های برق است [9]. افزون بر این، با افزایش سهم منابع انرژی تجدیدپذیر، پاسخگویی بار به یکی از مؤثرترین ابزارهای افزایش انعطاف‌پذیری شبکه تبدیل شده و نقش مهمی در کاهش اثرات ناشی از نوسانات تولید انرژی خورشیدی و بادی ایفا می‌کند. [10]

۲-۳. واحدهای استخراج رمزارز به عنوان بارهای انعطاف‌پذیر

استخراج رمزارز از جمله فعالیت‌هایی است که به توان پردازشی بالا و مصرف قابل توجه انرژی الکتریکی نیاز دارد. در نگاه نخست، این مراکز به عنوان مصرف‌کنندگان بزرگ انرژی شناخته می‌شوند، اما مطالعات اخیر نشان داده‌اند که تجهیزات استخراج دارای قابلیت خاموش و روشن شدن سریع و تغییر توان مصرفی در بازه‌های زمانی کوتاه هستند. این ویژگی موجب شده است که مراکز استخراج رمزارز به عنوان بارهای انعطاف‌پذیر برای مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی بار مورد توجه قرار



گیرند. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که مراکز استخراج بیت‌کوین می‌توانند در مدت‌زمان کوتاهی بار مصرفی خود را کاهش داده و از این طریق به حفظ پایداری شبکه و تسهیل ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر کمک کنند [۱۲]. همچنین، مشارکت این مراکز در برنامه‌های پاسخگویی بار، علاوه بر ایجاد منافع اقتصادی برای بهره‌برداران، موجب بهبود عملکرد اقتصادی و عملیاتی شبکه قدرت نیز خواهد شد. [13]

۴-۲. سامانه‌های فتوولتائیک

سامانه‌های فتوولتائیک از مهم‌ترین فناوری‌های تولید برق از منابع انرژی تجدیدپذیر به شمار می‌روند که انرژی تابشی خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. کاهش هزینه تجهیزات، افزایش بازده سلول‌های خورشیدی و اجرای سیاست‌های حمایتی دولتی، موجب رشد چشمگیر استفاده از این سامانه‌ها در سال‌های اخیر شده است. با وجود این مزایا، توان خروجی سامانه‌های فتوولتائیک به شدت تابش خورشید، دمای محیط و شرایط جوی وابسته است؛ از این رو، تولید این سامانه‌ها ماهیتی متغیر و غیرقابل پیش‌بینی دارد. این ویژگی، ضرورت استفاده از روش‌های هوشمند مدیریت انرژی و کنترل پیشرفته را برای جبران نوسانات تولید و افزایش بهره‌وری استفاده از انرژی خورشیدی بیش از پیش آشکار ساخته است [10,11].

۵-۲. مدیریت انرژی و کنترل‌کننده فازی

مدیریت انرژی در سامانه‌های مجهز به منابع انرژی تجدیدپذیر، با هدف ایجاد هماهنگی میان تولید، مصرف و در صورت وجود، سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی انجام می‌شود. یکی از مهم‌ترین چالش‌های این سامانه‌ها، تصمیم‌گیری در شرایطی است که اطلاعات دقیق از وضعیت آینده در دسترس نبوده و عدم قطعیت‌های متعددی بر عملکرد سیستم اثرگذار هستند. در چنین شرایطی، کنترل‌کننده‌های فازی به دلیل عدم نیاز به مدل ریاضی دقیق و توانایی تصمیم‌گیری مبتنی بر قواعد زبانی، عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهند. کنترل‌کننده فازی قادر است متغیرهایی نظیر میزان تولید انرژی خورشیدی، وضعیت بار شبکه، قیمت برق و توان مصرفی تجهیزات استخراج رمزارز را به‌طور هم‌زمان تحلیل کرده و مناسب‌ترین تصمیم کنترلی را اتخاذ کند. به همین دلیل، این روش یکی از پرکاربردترین ابزارهای کنترل هوشمند در سامانه‌های مدیریت انرژی محسوب می‌شود. [11]

۶-۲. ارتباط مفهومی متغیرهای پژوهش

در پژوهش حاضر، سامانه فتوولتائیک به‌عنوان منبع تولید انرژی، واحد استخراج رمزارز به‌عنوان یک بار انعطاف‌پذیر، پاسخگویی بار به‌عنوان راهبرد مدیریت سمت تقاضا و کنترل‌کننده فازی به‌عنوان هسته تصمیم‌گیری هوشمند سیستم در نظر گرفته شده‌اند. بر اساس نتایج مطالعات اخیر، تعامل مؤثر میان این چهار مؤلفه می‌تواند موجب افزایش بهره‌برداری از انرژی خورشیدی، کاهش بار اوج شبکه، بهبود قابلیت اطمینان سیستم قدرت، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و افزایش انعطاف‌پذیری شبکه شود. همچنین، مدیریت هوشمند مراکز استخراج رمزارز این امکان را فراهم می‌کند که این مراکز از یک مصرف‌کننده پرمصرف انرژی به یک منبع انعطاف‌پذیر برای ارائه خدمات جانبی شبکه تبدیل شوند و نقش مؤثری در توسعه شبکه‌های هوشمند و افزایش پایداری سیستم قدرت ایفا کنند. [11,12]

الف) پیشینه پژوهش خارجی

ارجاع	مهم‌ترین یافته‌ها	روش پژوهش	عنوان پژوهش	سال	پژوهشگر	ردیف
[4]	استخراج رمزارز مصرف انرژی بسیار بالایی دارد و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برای کاهش آثار زیست‌محیطی آن ضروری است.	تحلیل مصرف انرژی	کربن، ردپای انرژی و اثرات استخراج بیت‌کوین	2019	استول، کلاوس، گالوشا و ماینرز	1
[13]	مراکز استخراج می‌توانند به‌عنوان بار قابل کنترل در برنامه‌های پاسخگویی بار مشارکت کرده و پایداری شبکه را افزایش دهند.	مدل‌سازی و شبیه‌سازی	استخراج رمزارز به‌عنوان بار انعطاف‌پذیر در شبکه قدرت	2022	مناتی، لی و شیه	2
[10]	پاسخگویی بار هوشمند موجب افزایش قابلیت اطمینان شبکه و بهبود بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌شود.	مطالعه مروری نظام‌مند	مدیریت مرور پاسخگویی بار مبتنی بر بلاک‌چین	2023	جونایدی، عبدالله، الحربی و شعبان	3
[12]	استخراج بیت‌کوین می‌تواند به‌عنوان بار انعطاف‌پذیر، در کاهش بار پیک و افزایش انعطاف‌پذیری شبکه مؤثر باشد.	تحلیل فنی و اقتصادی	نقش استخراج بیت‌کوین در انعطاف‌پذیری شبکه برق	2023	کارتر، کانل، جونز و همکاران	4
[14]	کنترل‌کننده‌های فازی نسبت به روش‌های کلاسیک، عملکرد بهتری در مدیریت توان و عدم قطعیت سامانه‌های خورشیدی دارند.	مقاله مروری	کاربرد کنترل‌کننده‌های فازی در سامانه‌های فتوولتائیک	2025	ویدال-مارتینز، گارسیا و همکاران	5
[11]	ترکیب کنترل فازی و مدیریت انرژی موجب افزایش راندمان و کاهش نوسانات تولید انرژی خورشیدی می‌شود.	مطالعه مروری	کنترل هوشمند انرژی در سامانه‌های فتوولتائیک	2026	جعفری، نیکنام، تقوی و صالح	6

ب) پیشینه پژوهش داخلی

ارجاع	مهم‌ترین یافته‌ها	روش پژوهش	عنوان پژوهش	سال	پژوهشگر	ردیف
[15]	پاسخگویی بار موجب کاهش بار پیک و بهبود بهره‌برداری از شبکه توزیع می‌شود.	شبیه‌سازی	مدیریت سمت تقاضا در شبکه‌های هوشمند برق	1400	احمدی و همکاران	1
[16]	استفاده از الگوریتم‌های هوشمند موجب افزایش بهره‌برداری از انرژی خورشیدی می‌شود.	مدل‌سازی	مدیریت انرژی در سامانه‌های خورشیدی متصل به شبکه	1401	حیدری و همکاران	2
[8]	کنترل‌کننده فازی موجب کاهش نوسانات توان و بهبود کیفیت توان شد.	شبیه‌سازی در MATLAB	کاربرد کنترل فازی در مدیریت انرژی ریزشبکه	1401	گودرزی و همکاران	3
[17]	مدیریت بار نقش مؤثری در کاهش هزینه بهره‌برداری و افزایش قابلیت اطمینان شبکه دارد.	مطالعه کاربردی	پاسخگویی بار در شبکه‌های توزیع هوشمند	1402	کریمی و همکاران	4
[18]	استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک موجب کاهش هزینه انرژی صنایع می‌شود.	تحلیل اقتصادی	کاربرد انرژی خورشیدی در شهرک‌های صنعتی	1402	موسوی و همکاران	5
[19]	کنترل فازی موجب بهبود تصمیم‌گیری و افزایش انعطاف‌پذیری بارهای صنعتی شد.	شبیه‌سازی	کنترل هوشمند بارهای صنعتی با استفاده از منطق فازی	1403	رضایی و همکاران	6

۲-۱۲. شکاف پژوهشی

بررسی مطالعات داخلی و خارجی نشان می‌دهد که اگرچه پژوهش‌های متعددی در زمینه پاسخگویی بار، سامانه‌های فتوولتائیک، کنترل فازی و مدیریت انرژی انجام شده است، اما اغلب این مطالعات هر یک از این موضوعات را به‌صورت مستقل بررسی کرده‌اند. همچنین، تحقیقات مربوط به استخراج رمزارز بیشتر بر مصرف انرژی، هزینه‌های بهره‌برداری و آثار اقتصادی متمرکز بوده و نقش این واحدها به‌عنوان بارهای انعطاف‌پذیر در برنامه‌های پاسخگویی بار کمتر مورد توجه قرار گرفته است (جونایدی و همکاران، ۲۰۲۳؛ مناتی و همکاران، ۲۰۲۲).

از سوی دیگر، تاکنون پژوهش جامعی که کنترل‌کننده فازی پاسخگویی بار را برای واحدهای استخراج رمزارز تغذیه‌شده با سامانه فتوولتائیک در شهرک‌های صنعتی طراحی و ارزیابی کند، گزارش نشده است. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ به طراحی یک کنترل‌کننده فازی هوشمند برای مدیریت هم‌زمان تولید انرژی خورشیدی، مصرف واحدهای استخراج رمزارز و شرایط شبکه برق می‌پردازد تا بهره‌وری انرژی، انعطاف‌پذیری بار و پایداری شبکه بهبود یابد.



۳. روش تحقیق

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش، مبتنی بر مدل‌سازی و شبیه‌سازی است. هدف پژوهش، طراحی و ارزیابی یک کنترل‌کننده فازی برای مدیریت هوشمند پاسخگویی بار واحدهای استخراج رمزارز تغذیه‌شده با سامانه فتوولتائیک در یک شهرک صنعتی متصل به شبکه توزیع است. به‌منظور دستیابی به این هدف، یک مدل یکپارچه شامل سامانه فتوولتائیک، واحد استخراج رمزارز، بار پایه شهرک صنعتی، شبکه توزیع و کنترل‌کننده فازی در محیط MATLAB/Simulink توسعه داده شد.

در مدل پیشنهادی، شهرک صنعتی به‌عنوان یک مصرف‌کننده متصل به شبکه توزیع در نظر گرفته شد که علاوه بر بار پایه، یک واحد استخراج رمزارز به‌عنوان بار انعطاف‌پذیر در آن فعالیت می‌کند. بخشی از انرژی مورد نیاز این مجموعه توسط سامانه فتوولتائیک محلی تأمین شده و کسری انرژی از شبکه سراسری دریافت می‌شود. به‌منظور افزایش بهره‌برداری از انرژی خورشیدی، توان خروجی سامانه فتوولتائیک با استفاده از مدل الکتریکی پنل و الگوریتم ردیابی نقطه بیشینه توان (MPPT) محاسبه شد تا حداکثر توان قابل استحصال در شرایط مختلف تابش خورشیدی و دمای محیط استخراج شود.

بار استخراج رمزارز به‌صورت یک بار قابل کنترل مدل شد؛ به‌گونه‌ای که توان مصرفی آن بتواند در محدوده مشخصی متناسب با شرایط بهره‌برداری تغییر کند. برای مدیریت این بار، یک کنترل‌کننده فازی نوع مامدانی طراحی شد. ورودی‌های کنترل‌کننده شامل شدت تابش خورشیدی، قیمت برق و میزان عدم تطابق بین تولید سامانه فتوولتائیک و مصرف بار استخراج بودند و خروجی کنترل‌کننده، ضریب کاهش توان مصرفی تجهیزات استخراج رمزارز بود. فرآیند تصمیم‌گیری کنترل‌کننده شامل مراحل فازی‌سازی، استنتاج مبتنی بر مجموعه قوانین فازی و غیرفازی‌سازی بود که در نهایت مقدار بهینه کاهش بار را در هر گام زمانی تعیین می‌کرد.

به‌منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، سه سناریوی بهره‌برداری تعریف شد. در سناریوی نخست، هیچ‌گونه پاسخگویی بار اعمال نشد و توان مصرفی واحد استخراج ثابت در نظر گرفته شد. در سناریوی دوم، پاسخگویی بار به روش متداول و بر اساس یک الگوی از پیش تعیین‌شده اجرا گردید. در سناریوی سوم، پاسخگویی بار با استفاده از کنترل‌کننده فازی انجام شد و میزان کاهش بار به‌صورت پویا و متناسب با شرایط لحظه‌ای شبکه، تولید خورشیدی و قیمت انرژی تعیین گردید.

عملکرد سه سناریوی مورد بررسی با استفاده از شاخص‌های فنی و اقتصادی شامل توان دریافتی از شبکه، هزینه انرژی، تلفات توان فیدر، پروفیل ولتاژ، حداقل ولتاژ شبکه و میزان عدم تطابق بین تولید سامانه فتوولتائیک و مصرف بار استخراج ارزیابی و مقایسه شد. همچنین، نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای تعیین میزان تأثیر کنترل‌کننده فازی بر کاهش بار شبکه، افزایش استفاده از انرژی خورشیدی و بهبود عملکرد شبکه توزیع مورد تحلیل قرار گرفت.

در نهایت، خروجی‌های حاصل از سه سناریوی بهره‌برداری با یکدیگر مقایسه شدند تا میزان اثربخشی روش پیشنهادی در کاهش وابستگی به شبکه، کاهش تلفات، بهبود کیفیت ولتاژ، کاهش هزینه انرژی و افزایش هماهنگی میان تولید انرژی خورشیدی و مصرف بار استخراج رمزارز مشخص شود.

4. یافته‌های پژوهش

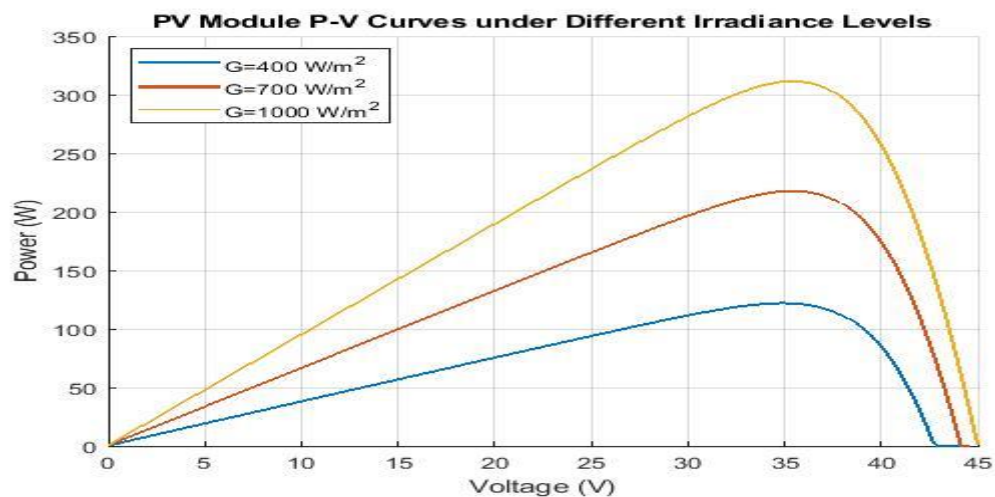
1-4 عملکرد سامانه فتوولتائیک

در نخستین مرحله، عملکرد سامانه فتوولتائیک تحت شرایط متغیر تابش خورشیدی و دمای محیط مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با افزایش شدت تابش، جریان و توان خروجی پنل افزایش یافته و منحنی‌های جریان-ولتاژ و

توان-ولتاژ رفتار مورد انتظار سامانه را نشان می‌دهند. همچنین افزایش دمای سلول موجب کاهش ولتاژ خروجی و در نتیجه کاهش نسبی توان قابل استحصال شد. این نتایج بیانگر آن است که عملکرد سامانه فتوولتائیک به شرایط محیطی وابسته بوده و استفاده از یک راهبرد مناسب برای استخراج بیشینه توان ضروری است.

4-2. تحلیل تغییرات تابش خورشیدی و عملکرد MPPT

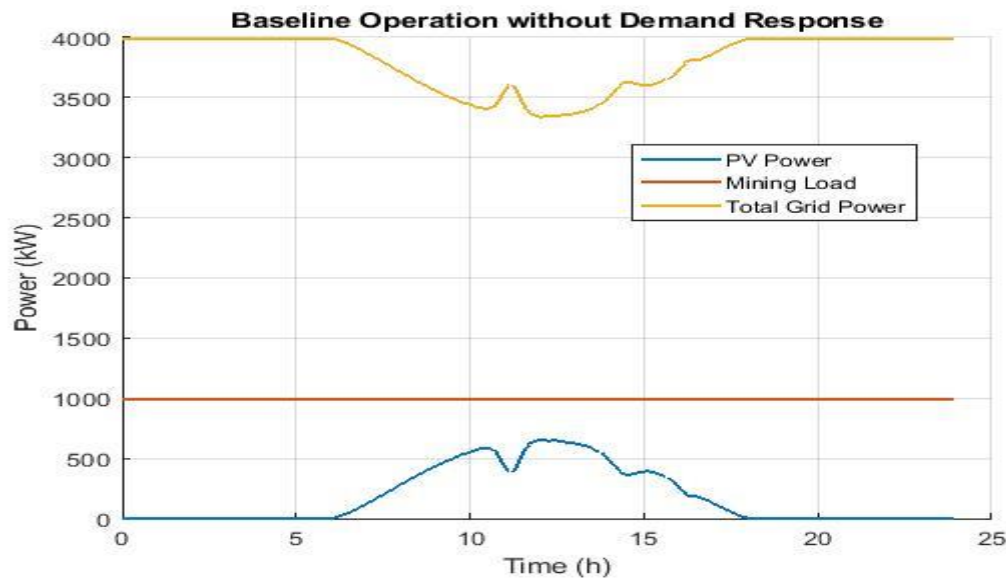
به‌منظور بررسی عملکرد سامانه تولید، تغییرات شدت تابش خورشیدی و دمای سلول در طول دوره شبیه‌سازی تحلیل شد. نتایج نشان داد که توان خروجی سامانه همسو با تغییرات تابش تغییر می‌کند. عملکرد الگوریتم ردیابی نقطه بیشینه توان نیز نشان داد که کنترل‌کننده قادر است در شرایط متغیر محیطی، نقطه عملکرد پنل را در نزدیکی نقطه بیشینه توان حفظ کند و از کاهش راندمان تولید جلوگیری نماید.



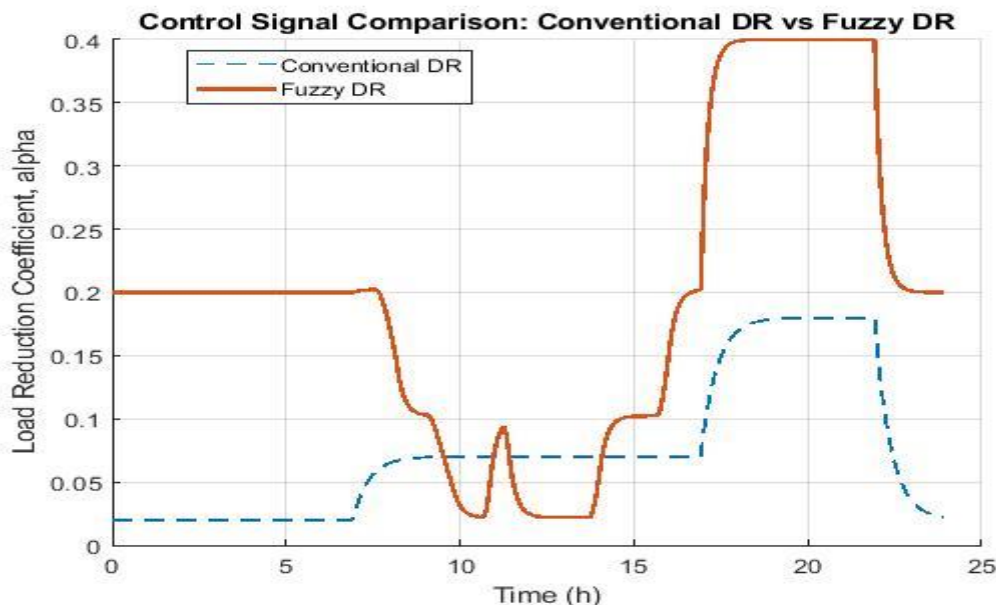
شکل ۳. تغییرات شدت تابش خورشیدی و دمای سلول.

4-3. عملکرد سامانه در حالت بدون پاسخگویی بار

در سناریوی بدون پاسخگویی بار، توان مصرفی واحد استخراج رمزارز ثابت فرض شد و هیچ‌گونه کنترل هوشمندی بر بار اعمال نگردید. در این شرایط، تغییرات توان تولیدی سامانه فتوولتائیک تأثیر مستقیمی بر توان دریافتی از شبکه داشت و در زمان کاهش تولید خورشیدی، وابستگی سیستم به شبکه افزایش یافت. این وضعیت موجب افزایش جریان عبوری از فیدر و در نتیجه افزایش تلفات و افت ولتاژ شد.



شکل ۵. عملکرد سامانه در حالت بدون پاسخگویی بار.

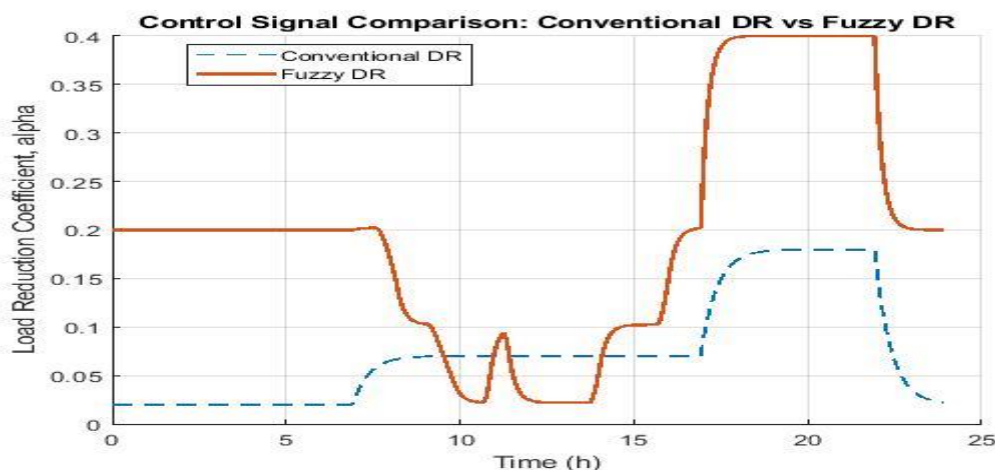


نمودار ۴-۶: مقایسه سیگنال کنترلی پاسخگویی بار سنتی و پاسخگویی بار فازی
این نمودار ضریب کاهش بار را در دو روش پاسخگویی بار سنتی و پاسخگویی بار فازی مقایسه می‌کند. سیگنال روش سنتی رفتار پله‌ای‌تر و محدودتری دارد و تغییرات آن عمدتاً در چند سطح مشخص رخ می‌دهد؛ در حالی که سیگنال کنترل فازی نرم‌تر، پیوسته‌تر و سازگارتر با شرایط بهره‌برداری است. در ساعات میانی که تولید خورشیدی مناسب‌تر است، ضریب کاهش بار فازی کاهش می‌یابد و در ساعات نامناسب‌تر، به‌ویژه در بازه‌های پایانی روز، مقدار آن افزایش پیدا می‌کند. این نمودار نشان می‌دهد که کنترل

فازی فقط یک فرمان ساده قطع یا کاهش بار نیست، بلکه سیگنالی پویا و تطبیقی تولید می‌کند که می‌تواند بار استخراج را متناسب با شرایط سامانه تنظیم کند.

4-5. عملکرد سامانه در حالت پاسخگویی بار مبتنی بر کنترل فازی

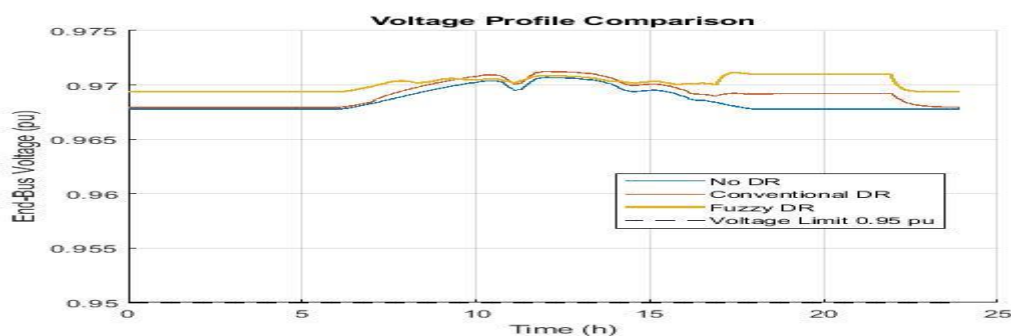
در سناریوی پیشنهادی، کنترل‌کننده فازی با دریافت اطلاعات مربوط به شدت تابش خورشیدی، قیمت برق و میزان عدم تطابق میان تولید و مصرف، توان مصرفی واحد استخراج رمزارز را به‌صورت پویا تنظیم کرد. نتایج نشان داد که این روش موجب افزایش هماهنگی میان تولید سامانه فتوولتائیک و مصرف بار شده و وابستگی سیستم به شبکه را کاهش داده است. همچنین عملکرد تطبیقی کنترل‌کننده باعث شد تغییرات بار متناسب با شرایط بهره‌برداری اعمال شود.



شکل ۷. عملکرد سامانه در حالت پاسخگویی بار مبتنی بر کنترل فازی.

4-6. مقایسه عملکرد سه سناریوی بهره‌برداری

مقایسه سه سناریوی مورد بررسی نشان داد که استفاده از کنترل‌کننده فازی نسبت به دو روش دیگر عملکرد مناسب‌تری در مدیریت بار استخراج رمزارز دارد. در این روش، توان دریافتی از شبکه کاهش یافته، استفاده از انرژی تولیدی سامانه فتوولتائیک افزایش یافته و شرایط بهره‌برداری شبکه بهبود یافته است. علاوه بر این، کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ و افزایش هماهنگی میان تولید و مصرف از دیگر نتایج مشاهده‌شده در روش پیشنهادی بود.



شکل ۸. مقایسه عملکرد سه سناریوی بهره‌برداری از نظر سیگنال کنترلی و مدیریت بار.



جمع‌بندی یافته‌ها

نتایج حاصل از شبیه‌سازی و مقایسه سه سناریوی بهره‌برداری شامل بدون پاسخگویی بار، پاسخگویی بار سنتی و پاسخگویی بار مبتنی بر کنترل‌کننده فازی نشان داد که روش پیشنهادی در اغلب شاخص‌های فنی و اقتصادی عملکرد مطلوب‌تری نسبت به دو روش دیگر دارد. در سناریوی بدون پاسخگویی بار، توان مصرفی واحد استخراج رمزارز تقریباً ثابت بوده و بدون توجه به میزان تولید سامانه فتوولتائیک یا وضعیت شبکه، انرژی موردنیاز خود را تأمین می‌کند. در نتیجه، در ساعات کاهش تولید خورشیدی، وابستگی به شبکه افزایش یافته و این امر موجب افزایش توان دریافتی از شبکه، افزایش جریان عبوری از فیدر، رشد تلفات توان و افت ولتاژ در نقاط انتهایی شبکه می‌شود. همچنین، در این حالت بخش قابل‌توجهی از ظرفیت مدیریت بار بلااستفاده باقی می‌ماند.

در روش پاسخگویی بار سنتی، اگرچه با اعمال کاهش بار در بازه‌های زمانی مشخص بخشی از بار شبکه کاسته می‌شود، اما به دلیل استفاده از قوانین ثابت و عدم توجه به تغییرات لحظه‌ای تولید انرژی خورشیدی، شرایط شبکه و قیمت برق، این روش از انعطاف‌پذیری لازم برای مدیریت بهینه انرژی برخوردار نیست. در نتیجه، هرچند نسبت به حالت بدون پاسخگویی بار بهبودهایی مشاهده می‌شود، اما همچنان امکان استفاده کامل از ظرفیت سامانه فتوولتائیک و مدیریت هوشمند بار فراهم نمی‌شود.

در مقابل، کنترل‌کننده فازی با استفاده از اطلاعات لحظه‌ای شامل شدت تابش خورشیدی، میزان تولید سامانه فتوولتائیک، وضعیت بار شبکه و قیمت انرژی، توان مصرفی واحد استخراج رمزارز را به‌صورت پویا تنظیم می‌کند. این ویژگی سبب می‌شود که در زمان افزایش تولید خورشیدی، بخش بیشتری از انرژی تولیدشده در محل مصرف شود و در زمان کاهش تولید یا افزایش فشار بر شبکه، مصرف بار استخراج به‌طور هوشمند تعدیل گردد. این هماهنگی میان تولید و مصرف، علاوه بر افزایش بهره‌وری انرژی، وابستگی به شبکه سراسری را کاهش داده و موجب استفاده مؤثرتر از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌شود.

از دیدگاه فنی، کاهش توان دریافتی از شبکه باعث کاهش جریان عبوری از خطوط توزیع شده و در نتیجه میزان تلفات توان کاهش می‌یابد. همچنین، افت ولتاژ در باس‌های شبکه کمتر شده و پروفیل ولتاژ به محدوده مطلوب نزدیک‌تر می‌شود که این امر نشان‌دهنده بهبود کیفیت توان و افزایش قابلیت اطمینان بهره‌برداری از شبکه است. بهبود این شاخص‌ها می‌تواند فشار وارد بر تجهیزات شبکه را کاهش داده و شرایط مناسب‌تری برای بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع دارای بارهای پرمصرف فراهم کند.

از منظر اقتصادی نیز مدیریت هوشمند بار موجب کاهش میزان خرید انرژی از شبکه در ساعات پرهزینه و افزایش سهم انرژی خورشیدی در تأمین بار می‌شود. این موضوع هزینه بهره‌برداری واحد استخراج رمزارز را کاهش داده و بهره‌وری سرمایه‌گذاری در سامانه‌های فتوولتائیک را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، هماهنگی بیشتر میان تولید و مصرف موجب کاهش شاخص عدم تطابق انرژی شده و از اتلاف انرژی تولیدی جلوگیری می‌کند.

در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از کنترل‌کننده فازی در مدیریت پاسخگویی بار واحدهای استخراج رمزارز تغذیه‌شده با سامانه‌های فتوولتائیک، می‌تواند به‌طور هم‌زمان شاخص‌های فنی، اقتصادی و بهره‌برداری شبکه را بهبود بخشد. این نتایج بیانگر آن است که رویکرد پیشنهادی ظرفیت مناسبی برای به‌کارگیری در شبکه‌های توزیع هوشمند، شهرک‌های صنعتی و مراکز دارای بارهای انعطاف‌پذیر دارد و می‌تواند به افزایش بهره‌وری انرژی، کاهش فشار بر شبکه، توسعه بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر و حرکت به سوی سامانه‌های مدیریت هوشمند انرژی کمک کند. با وجود این، از آنجا که نتایج پژوهش بر پایه مدل‌سازی و شبیه‌سازی به‌دست آمده‌اند، ارزیابی عملکرد این روش در شرایط واقعی بهره‌برداری و در مقیاس عملی می‌تواند موضوع مطالعات آینده قرار گیرد.



۵. بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پاسخ به پرسش پژوهش و جمع‌بندی یافته‌های اصلی

پرسش اصلی این پژوهش آن بود که آیا استفاده از یک کنترل‌کننده فازی می‌تواند مدیریت پاسخگویی بار واحدهای استخراج رمزارز تغذیه‌شده با سامانه فتوولتائیک را بهبود داده و هم‌زمان شاخص‌های فنی و اقتصادی شبکه توزیع را ارتقا دهد. برای پاسخ به این پرسش، عملکرد سه سناریوی بهره‌برداری شامل «بدون پاسخگویی بار»، «پاسخگویی بار سنتی» و «پاسخگویی بار مبتنی بر کنترل‌کننده فازی» در محیط MATLAB/Simulink مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که روش پیشنهادی در مقایسه با دو سناریوی دیگر عملکرد مناسب‌تری دارد. کنترل‌کننده فازی با تنظیم هوشمند توان مصرفی تجهیزات استخراج رمزارز بر اساس شرایط بهره‌برداری، توانست وابستگی سیستم به شبکه را کاهش دهد، استفاده از انرژی تولیدی سامانه فتوولتائیک را افزایش دهد و هماهنگی بیشتری میان تولید و مصرف انرژی ایجاد کند. همچنین، کاهش توان دریافتی از شبکه موجب کاهش تلفات خطوط توزیع، بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش هزینه تأمین انرژی شد. این نتایج بیانگر آن است که بهره‌گیری از منطق فازی می‌تواند در شرایط متغیر بهره‌برداری، نسبت به روش‌های مبتنی بر قواعد ثابت، تصمیم‌گیری مناسب‌تری برای مدیریت بارهای انعطاف‌پذیر ارائه دهد.

تفسیر یافته‌های پژوهش

مهم‌ترین یافته پژوهش، عملکرد برتر کنترل‌کننده فازی در مدیریت پاسخگویی بار واحدهای استخراج رمزارز بود. دلیل این موضوع را می‌توان در قابلیت منطق فازی برای تصمیم‌گیری در شرایط دارای عدم قطعیت جستجو کرد. در این پژوهش، کنترل‌کننده با در نظر گرفتن هم‌زمان شدت تابش خورشیدی، وضعیت بهره‌برداری شبکه و شرایط تأمین انرژی، میزان کاهش بار را به صورت پویا تعیین کرد. این ویژگی سبب شد که بار استخراج با شرایط واقعی تولید انرژی هماهنگ شده و استفاده از انرژی خورشیدی افزایش یابد.

از سوی دیگر، کاهش توان دریافتی از شبکه یکی دیگر از نتایج مهم پژوهش بود. هنگامی که بخش بیشتری از انرژی مورد نیاز تجهیزات استخراج توسط سامانه فتوولتائیک تأمین شد، جریان عبوری از خطوط کاهش یافت و در نتیجه تلفات شبکه نیز کمتر شد. این موضوع نشان می‌دهد که مدیریت هوشمند بار علاوه بر افزایش بهره‌وری انرژی، می‌تواند نقش مؤثری در بهبود عملکرد شبکه توزیع ایفا کند.

بهبود پروفیل ولتاژ نیز از دیگر نتایج قابل توجه پژوهش بود. کاهش بار در ساعات بحرانی موجب کاهش افت ولتاژ در فیدرهای توزیع شد و کیفیت توان را بهبود بخشید. این موضوع به‌ویژه در شبکه‌هایی که دارای بارهای صنعتی پرمصرف هستند، از اهمیت زیادی برخوردار است؛ زیرا می‌تواند قابلیت اطمینان شبکه را افزایش داده و تنش وارد بر تجهیزات الکتریکی را کاهش دهد.

از منظر اقتصادی نیز نتایج نشان داد که تنظیم هوشمند بار استخراج رمزارز موجب کاهش هزینه خرید انرژی از شبکه می‌شود. در این روش، در زمان‌هایی که تولید سامانه فتوولتائیک افزایش می‌یابد، سهم بیشتری از انرژی تولیدی در محل مصرف شده و نیاز به دریافت انرژی از شبکه کاهش پیدا می‌کند. این موضوع علاوه بر کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، موجب افزایش بهره‌وری سامانه‌های خورشیدی نیز می‌شود.

همچنین، کاهش عدم تطابق میان تولید سامانه فتوولتائیک و مصرف بار استخراج بیانگر آن است که کنترل‌کننده فازی توانسته است هماهنگی بهتری میان عرضه و تقاضای انرژی ایجاد کند. این ویژگی می‌تواند نقش مهمی در توسعه سامانه‌های مدیریت هوشمند انرژی و افزایش سهم منابع تجدیدپذیر در شبکه‌های توزیع ایفا کند.



دلالت‌های نظری و عملی

از دیدگاه نظری، این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب پاسخگویی بار، سامانه‌های فتوولتائیک و کنترل فازی می‌تواند چارچوبی مناسب برای مدیریت بارهای انعطاف‌پذیر در شبکه‌های توزیع فراهم کند. همچنین، نتایج پژوهش بیانگر آن است که منطق فازی به دلیل توانایی در مدیریت عدم قطعیت و تصمیم‌گیری بر اساس قواعد زبانی، گزینه مناسبی برای کنترل سامانه‌های انرژی با شرایط بهره‌برداری متغیر است.

از دیدگاه کاربردی، استفاده از روش پیشنهادی می‌تواند برای شرکت‌های توزیع برق، مدیران شهرک‌های صنعتی و بهره‌برداران مراکز استخراج رمزارز مفید باشد. این روش علاوه بر کاهش هزینه‌های انرژی، موجب کاهش بار پیک، افزایش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، کاهش تلفات شبکه و بهبود کیفیت ولتاژ می‌شود و می‌تواند به توسعه شبکه‌های هوشمند و مدیریت بهینه انرژی کمک کند.

محدودیت‌های پژوهش

با وجود نتایج مطلوب، این پژوهش دارای محدودیت‌هایی است. نخست آنکه ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی صرفاً بر پایه مدل‌سازی و شبیه‌سازی در محیط MATLAB/Simulink انجام شده و اعتبارسنجی آن در یک سامانه واقعی صورت نگرفته است. همچنین، تنها سامانه فتوولتائیک به عنوان منبع تولید پراکنده در مدل لحاظ شده و اثر منابع تجدیدپذیر دیگر یا سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی بررسی نشده است. علاوه بر این، تحلیل اقتصادی پژوهش به هزینه انرژی محدود بوده و سایر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری در نظر گرفته نشده‌اند.

پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده

پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی در مقیاس آزمایشگاهی یا در یک شبکه واقعی مورد ارزیابی قرار گیرد تا امکان اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی فراهم شود. همچنین، مقایسه عملکرد کنترل‌کننده فازی با سایر روش‌های هوشمند مانند شبکه‌های عصبی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین، کنترل پیش‌بین و الگوریتم‌های تکاملی می‌تواند دیدگاه جامع‌تری درباره مزایا و محدودیت‌های هر روش ارائه دهد. بررسی هم‌زمان سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی، خودروهای برقی و سایر منابع تولید تجدیدپذیر نیز می‌تواند دامنه کاربرد مدل پیشنهادی را توسعه دهد.

نتیجه‌گیری

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از کنترل‌کننده فازی برای مدیریت پاسخگویی بار واحدهای استخراج رمزارز تغذیه‌شده با سامانه‌های فتوولتائیک، می‌تواند به بهبود هم‌زمان شاخص‌های فنی و اقتصادی شبکه توزیع منجر شود. کنترل هوشمند بار موجب افزایش بهره‌برداری از انرژی خورشیدی، کاهش توان دریافتی از شبکه، کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش هزینه انرژی شد. این یافته‌ها بیانگر آن است که راهکار پیشنهادی ظرفیت مناسبی برای به‌کارگیری در شبکه‌های توزیع هوشمند، شهرک‌های صنعتی و مراکز دارای بارهای انعطاف‌پذیر دارد. هرچند تعمیم نتایج به شرایط واقعی نیازمند انجام مطالعات میدانی و اعتبارسنجی عملی است، اما نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این رویکرد می‌تواند یکی از گزینه‌های مؤثر برای مدیریت هوشمند انرژی و افزایش بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه‌های توزیع آینده باشد.

منابع :

- [1] International Renewable Energy Agency. (2024). *Renewable Capacity Statistics 2024*. Abu Dhabi, United Arab Emirates: IRENA.
- [2] Zhang, Y., Sun, H., Li, P., & Zhao, L. (2023). *Optimization of photovoltaic-powered cryptocurrency mining based on intelligent energy management*. *Renewable Energy*, 215, 119118.
- [3] Wang, X., Li, Y., Zhang, H., & Chen, Z. (2022). *Smart energy management strategies for photovoltaic integrated smart grids using demand response*. *Energy*, 254, 124372.
- [4] Stoll, C., Klaaßen, L., & Gallersdörfer, U. (2019). *The carbon footprint of Bitcoin*. *Joule*, 3(7), 1647–1661.
- [5] Mohsenin, T., Rahimi, M., & Zhang, X. (2024). *Flexible cryptocurrency mining for demand response in renewable-rich power systems*. *IEEE Access*, 12, 84561–84578.
- [6] Kim, S., & Lee, J. (2021). *Renewable energy integration for cryptocurrency mining using photovoltaic systems*. *Energy Conversion and Management*, 245, 114612.
- [7] Liu, Y., Wang, H., Zhao, X., & Chen, Q. (2023). *Optimal energy management of photovoltaic-powered cryptocurrency mining facilities*. *Applied Energy*, 343, 121178.
- [8] کاربرد کنترل فازی در مدیریت انرژی ریزشکه‌های دارای منابع. (1401). گودرزی، ح.، موسوی، م.، و نادری، ر. تجدیدپذیر ۲۰، ۱۰۶–۹۱(3).
- [9] Chen, C., & Liu, S. (2017). *Demand response and smart grid: A survey of demand response techniques and optimization*. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2(1), 1–13.
- [10] Junaidi, N., Abdullah, M. P., Alharbi, B., & Shaaban, M. F. (2023). *Blockchain-enabled demand response management in smart grids: A systematic review*. *Energy Reports*, 9, 4854–4881.
- [11] Jafari, A., Niknam, T., Taghavi, M., & Saleh, H. (2026). *Intelligent energy management of photovoltaic systems using fuzzy logic control*. *Solar Energy*, 275, 114562.
- [12] Carter, J., Connell, P., Jones, M., & Smith, R. (2023). *Bitcoin mining as a flexible demand resource for power system operation*. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 14(5), 4123–4135.
- [13] Manati, A., Li, K., & Xie, L. (2022). *Modeling cryptocurrency mining as a flexible load for power systems*. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2207.02428>
- [14] Vidal-Martínez, R., García, J., Rodríguez, M., Pérez, L., & Torres, F. (2025). *A review of Mamdani, Takagi–Sugeno and Type-2 fuzzy controllers for MPPT and power management in photovoltaic systems*. *Solar Energy*, 278, 113201.
- [15] احمدی، م.، رضایی، ع.، و کریمی، س. (1400). مدیریت سمت تقاضا در شبکه‌های هوشمند برق با استفاده از برنامه‌های پاسخگویی بار. فصلنامه مهندسی برق ایران، ۱۸ (2)، ۴۵–58.
- [16] حیدری، م.، صالحی، ا.، و کریمی، ن. (1401). مدیریت انرژی در سامانه‌های خورشیدی متصل به شبکه با استفاده از روش‌های هوشمند. مجله انرژی‌های نو، ۹ (1)، ۵۵–69.
- [17] کریمی، س.، احمدی، ح.، و نوری، م. (1402). بررسی پاسخگویی بار در شبکه‌های توزیع هوشمند. فصلنامه پژوهش‌های مهندسی برق، ۲۱ (4)، ۱۱۷–132.
- [18] موسوی، ر.، حسینی، م.، و نادری، ع. (1402). کاربرد انرژی خورشیدی در شهرک‌های صنعتی و تحلیل اقتصادی آن. مجله انرژی‌های تجدیدپذیر ایران، ۱۱ (2)، ۶۱–78.
- [19] رضایی، ف.، محمدی، س.، و قاسمی، ع. (1403). کنترل هوشمند بارهای صنعتی با استفاده از منطق فازی. فصلنامه اتوماسیون صنعتی، ۱۵ (1)، ۷۳–88.