

کاهش هزینه‌های تأمین انرژی مصرف کننده خانگی با بهره‌برداری مبتنی بر قیمت ریزواد حمما برق و حرارت

مرتضی یوسفیان^{*}، مهرداد ستایش نظر^۲

^۱ کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

iviortega1991@gmail.com

^۲ استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

setayeshnazar@gmail.com

چکیده: تجدید ساختار در صنعت برق موجب شده است تا مشارکت سمت توزیع شبکه قدرت، در تأمین توان مورد نیاز شبکه افزایش یابد. این مهم به موجب نفوذ گستردۀ منابع تولید پراکنده برای تولید توان در سمت تقاضا و نیز امکان مبادله انرژی الکتریکی میان خرده‌فروش و مصرف کننده ایجاد شده است. در میان انواع مختلف منابع تولید پراکنده، ریزوادهای تولید همما برق و حرارت، بهدلیل امکان استفاده توسط مصرف کننده کوچک، بازدهی بالا، امکان استفاده از حرارت خروجی و نیز امکان کنترل خروجی آن، با استقبال زیادی مواجه شده است. در این مقاله، هزینه‌های تأمین انرژی الکتریکی و حرارتی سالانه یک مصرف کننده خانگی، در دو حالت عدم درنظر گرفتن ریزواد تولید همما برق و حرارت (تأمین انرژی الکتریکی از طریق خرده‌فروش و انرژی حرارتی از طریق بویلر) و با درنظر گرفتن ریزواد تولید همما برق و حرارت، به دست آمده و با یکدیگر مقایسه شده است. در نهایت، خروجی ریزواد تولید همما برق و حرارت نیز، با انتخاب دو نوع کنترل کننده دنبال کننده حرارت بهبود یافته و کنترل کننده مبتنی بر قیمت تعیین شده و بدین ترتیب، نقش نوع کنترل کننده در بهره‌برداری از ریزواد تولید همما برق و حرارت، برای کاهش هزینه‌های تأمین انرژی مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: ریزواد تولید همما برق و حرارت، کنترل کننده مبتنی بر قیمت، کنترل کننده دنبال کننده حرارت بهبود یافته، منابع تولید پراکنده، خرده‌فروش، مصرف کننده خانگی.

۱. مقدمه

۱.۱. تولید پراکنده

تولید توان الکتریکی همواره با انتشار مقدار زیادی گازهای گلخانه‌ای همچون CO_2 همراه است [۱]. اخیراً مطالعات بسیار زیادی در زمینه تولید توان الکتریکی با انتشار کمتر گازهای آلاینده صورت گرفته است. نتیجه این مطالعات، ارائه فناوری‌هایی برای تولید توان الکتریکی است که میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا حد زیادی کاهش داده است [۲]. تعداد زیادی از این فناوری‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند تا امکان استفاده از آن‌ها تنها در سطح شبکه توزیع ممکن باشد که به مجموعه آن‌ها تولید پراکنده می‌گویند [۳]. تولیدات پراکنده علاوه بر کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی، تلفات توان الکتریکی ناشی از انتقال توان از تولید تا مصرف را به موجب نصب در سمت مصرف کاهش می‌دهند [۴]. نمونه‌هایی از فناوری‌های تولید پراکنده عبارت‌اند از: سیستم‌های فتوولتایک، توربین‌های بادی و واحدهای تولید همزمان برق و حرارت.

استفاده از فناوری‌های تولید پراکنده منافع بسیاری به همراه دارد که از جمله آن، منافع زیست‌محیطی فراوان به موجب استفاده از منابع سوخت طبیعی و تجدیدپذیر، به عنوان انرژی اولیه برای تولید توان الکتریکی در اغلب فناوری‌های تولید پراکنده است [۵]. همچنین، راندمان تولید انرژی آن‌ها، به موجب کاهش تلفات انتقال و نیز امکان تولید همزمان برق و حرارت، به مقدار چشمگیری بیش از نیروگاههای بخاری، گازی یا سیکل ترکیبی است. علاوه بر این موارد، سیستم‌های تولید پراکنده با توجه به تنوع سوخت و استقلال انرژی اولیه مورد نیاز توان و قابلیت اطمینان برق تحویلی، می‌توانند خطرات سرمایه‌گذاری را نیز کاهش دهند [۶]. در حال حاضر، به کارگیری سیستم‌های تولید پراکنده در سطوح ولتاژ پایین یا متوسط، به صورت متصل به شبکه توزیع یا اتصال مستقیم به برق مشترکین، در کشورهای توسعه‌یافته رو به گسترش است [۷-۱۰].

۱.۲. ریزوآحد تولید همزمان برق و حرارت

در میان تمامی سیستم‌های تولید پراکنده، واحدهای تولید همزمان برق و حرارت از استقبال بالاتری برخوردار بوده‌اند. این بدان دلیل است که سوخت اولیه مورد نیاز این سیستم‌های تولید پراکنده به شرایط محیطی وابسته نبوده و امکان استفاده از آن در هر مکان و زمان، فارغ از وضعیت جوی منطقه مورد نظر، قابل بهره‌برداری است. از طرفی، راندمان این واحدها، با توجه به مزیت تولید همزمان برق و حرارت،

نسبت به دیگر سیستم‌های تولید پراکنده بالاتر است. همچنین، انرژی خروجی آن‌ها قابل کنترل و تنظیم است [۱۱].

برای تولید انرژی در مقیاس مصرف خانگی که موضوع مورد نظر در این مقاله است، لازم است تا از ریزوآحدهای تولید همزمان برق و حرارت^۱ استفاده شود. براساس [۱۲] ریزوآحد تولید همزمان برق و حرارت عبارت است از: «واحد تبدیل انرژی که توان الکتریکی خروجی آن کمتر از ۱۵ کیلووات بوده و امکان تولید همزمان برق و حرارت را دارد».»

خروچی ریزوآحدهای تولید همزمان برق و حرارت، در حد نیاز می‌تواند انرژی مورد نیاز مصرف‌کننده خانگی (برق و حرارت) را تأمین کند. با توجه به تولید همزمان برق و حرارت، در مقیاس مناسب برای نیاز مصرف‌کننده خانگی، این فناوری گامی رو به جلو در سیستم‌های تأمین حرارت است [۱۲].

با تولید برق در محل مصرف و تولید همزمان برق و حرارت، بازده تولید انرژی تا حد زیادی افزایش می‌یابد. شکل (۱) روند عملکرد ریزوآحد تولید همزمان را نشان می‌دهد. این شکل بیان می‌کند که در وضعیت ایدئال و بدون درنظرگرفتن تلفات، اگر ۱۰۰ واحد سوخت وارد ریزوآحد تولید همزمان برق و حرارت گردد، این امکان وجود دارد تا ۸۰ واحد از آن به حرارت و ۲۰ واحد از آن به انرژی الکتریکی تبدیل شود. این در حالی است که در صورت تولید مجزای برق و حرارت، برای تأمین ۸۰ واحد حرارت و ۲۰ واحد انرژی الکتریکی، به ۱۲۴ واحد انرژی نیاز خواهد بود. ۸۰ واحد از انرژی الکتریکی، یا سیکل ترکیبی است. علاوه بر این موارد، سیستم‌های نیاز مصرف‌کننده خانگی، توسط نیروگاههای سیکل ترکیبی با بازده ۴۵ واحد از انرژی اولیه برای تأمین ۲۰ واحد انرژی الکتریکی مورد درصد تأمین می‌شود. بدین ترتیب دیده می‌شود که با استفاده از ریزوآحد تولید همزمان برق و حرارت می‌توان برای تأمین هر ۱۰۰ واحد انرژی مورد نیاز مصرف‌کننده خانگی، ۲۴ واحد در مصرف انرژی اولیه صرفه‌جویی کرد [۱۳].

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های زیادی در زمینه کاربرد ریزوآحدهای تولید همزمان برق و حرارت و کنترل خروجی‌های برق و حرارت این سیستم‌ها، متناسب با نیاز مصرف‌کننده صورت گرفته است. این پیشرفت‌ها در راستای تبدیل ریزوآحدهای تولید همزمان برق و حرارت، به عنوان یک سیستم گرمایش خانگی با بازدهی بالا می‌باشد [۱۴]. برخی شرکت‌های بزرگ تولیدی در حال آمده‌سازی

روش‌های مختلفی برای کنترل خروجی ریزوادهای تولید همزمان برق و حرارت وجود دارد. این روش‌ها بر مبنای دنبال کردن تقاضای حرارت یا برق مصرفی عمل می‌کنند. نمونه‌هایی از این روش‌های کنترل خروجی با اهداف مختلف، در مراجع [۲۲-۲۳] ارائه شده است. علاوه بر این روش‌ها می‌توان خروجی ریزوادهای تولید همزمان برق و حرارت را با توجه به هزینه‌های تأمین انرژی کنترل کرد. بر این اساس، تولید انرژی این سیستم‌ها با توجه به نوسانات لحظه‌ای قیمت برق و گاز مصرفی تنظیم می‌شود. هدف از این بررسی، تعیین کاهش هزینه‌های تأمین انرژی با استفاده از ریزواده تولید همزمان برق و حرارت با وضعیتی است که تأمین انرژی به صورت مجزا و از طریق بویلر (برای حرارت) و خرده‌فروش برق (برای انرژی الکتریکی) تأمین می‌شود. این مطالعات تحت دو وضعیت استفاده از کنترل کننده دنبال کننده تقاضای حرارت و کنترل کننده مبتنی بر قیمت بررسی می‌شود.

۴.۱. مطالب مورد بررسی در این مقاله

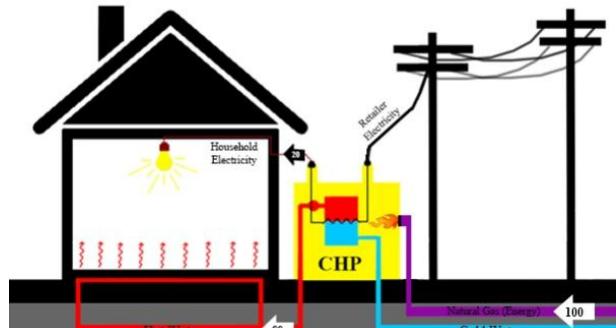
در ادامه و در بخش دوم، ابتدا ریزواده تولید همزمان برق و حرارت مدل‌سازی شده و ارتباط آن با خرده‌فروش انرژی تشریح می‌شود. سپس، نحوه عملکرد کنترل کننده دنبال کننده حرارت برای کنترل انرژی خروجی ریزواده تولید همزمان برق و حرارت بیان شده و در انتهای این بخش نیز، مسئله بهینه‌سازی بهره‌برداری از این واحدها با استفاده از کنترل کننده مبتنی بر قیمت فرمول‌بندی خواهد شد. در بخش سوم از این بررسی، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی مسئله ارائه می‌شود. بر این اساس، در ابتدای این بخش، داده‌های ورودی مورد نیاز برای این بررسی شرح داده می‌شود. در ادامه، به بیان نتایج بهره‌برداری ریزواده تولید همزمان برق و حرارت با توجه به کنترل کننده‌های دنبال کننده حرارت و کنترل کننده مبتنی بر قیمت و نیز صرفة اقتصادی به دست آمده در هریک از این حالت‌ها پرداخته می‌شود. در بخش چهارم و نهایی از این مقاله، نتایج حاصل از این بررسی ارائه می‌گردد. هدف از این بررسی، مقایسه دو وضعیت استفاده و عدم استفاده از ریزواده تولید همزمان برق و حرارت و نیز مقایسه روش‌های کنترلی این واحدهای تولید توان است.

۲. فرمولاسیون مسئله

۲.۱. شرح مسئله

در این مسئله، یک مصرف‌کننده خانگی با دو نوع تقاضای انرژی الکتریکی و حرارتی در نظر گرفته شده است و بررسی می‌گردد که در صورت تأمین مستقیم انرژی مورد تقاضا از خرده‌فروش انرژی یا تولید

بازار برای ارائه محصولات خود بوده و برخی تولیدکنندگان خرد، نمونه‌هایی از ریزوادهای تولید همزمان برق و حرارت را به فروش رسانده‌اند [۱۵-۱۶].

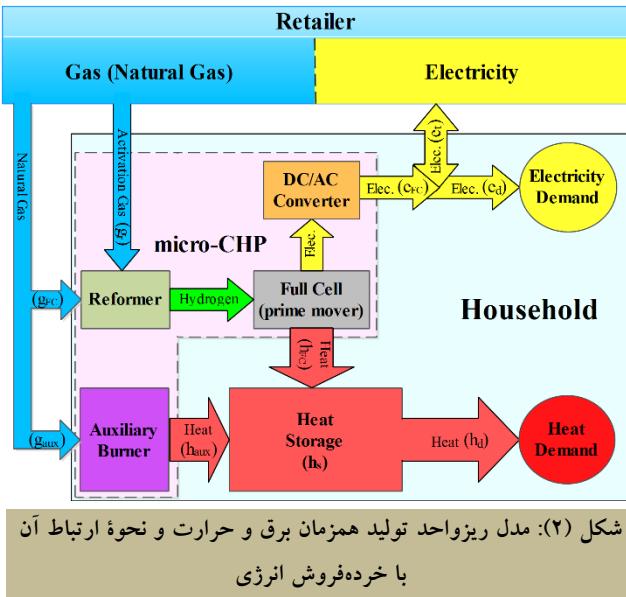


شکل (۱): بازده انرژی با ریزواده تولید همزمان برق و حرارت

انرژی اولیه مناسب برای تولید برق و حرارت در سیستم‌های تولید همزمان، گاز طبیعی است که در تمامی فناوری‌های ریزواده تولید همزمان از آن استفاده می‌شود. این خود عاملی است که ریزواده‌های تولید همزمان برق و حرارت را به یک فناوری مناسب و قابل استفاده گسترشده برای کشورهای دارای منابع گاز طبیعی تبدیل می‌کند [۱۷-۱۹]. در بسیاری از کشورها همچون ایران، از گاز طبیعی به عنوان انرژی اولیه در بویلرها، برای تأمین آب گرم مورد نیاز خانگی استفاده می‌شود. این در حالی است که می‌توان از این انرژی، با استفاده از ریزواده‌های تولید همزمان برق و حرارت، برای تولید همزمان انرژی الکتریکی و آب گرم مورد نیاز مصرف‌کننده خانگی، با بازدهی بالا استفاده کرد [۲۰].

۳.۱. هدف از این بررسی

در مقایسه با دیگر سیستم‌های تولید پراکنده، همچون توربین‌باد و سلول‌های فتوولتاییک، ریزواده‌های تولید همزمان برق و حرارت، تنها سیستم تولید پراکنده‌ای است که خروجی آن به راحتی قابل کنترل است. همچنین، ریزواده‌های تولید همزمان برق و حرارت همواره با یک ذخیره‌ساز حرارتی همراه است که امکان ذخیره‌سازی انرژی تولید را فراهم می‌سازد. این دو ویژگی باعث می‌شود تا خروجی ریزواده‌های تولید همزمان برق و حرارت بسیار منعطف بوده و امکان سازگاری با هر نوع تقاضای برق و حرارت را داشته باشد [۲۱]. در این بررسی، سعی می‌گردد تا با بهره‌گیری از این ویژگی‌ها، از ریزواده‌های تولید همزمان و حرارت برای تأمین نیاز مصرف‌کننده خانگی به انرژی، به گونه‌ای بهره‌برداری شود تا هزینه‌های تأمین انرژی به حداقل مقدار ممکن برسد.



شکل (۲): مدل ریزواده تولید همزمان برق و حرارت و نحوه ارتباط آن با خردهفروش انرژی

سه نوع فناوری برای مبدل اصلی انرژی در ریزواده‌های تولید همزمان برق و حرارت پیشنهاد می‌شود: موتورهای احتراق داخلی، موتورهای استرلينگ^۱ و پیلهای سوختی [۱۲]. فناوری موتورهای احتراق داخلی به صورت تجاری به عنوان مبدل انرژی در ریزواده‌های تولید همزمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از فناوری موتورهای استرلينگ در مرحله تجاری شدن قرار داشته و استفاده از پیلهای سوختی، در مرحله تکمیل طراحی است. در بین تمامی این فناوری‌ها، پیلهای سوختی با بازده‌ای در حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد، بالاترین نسبت تبدیل انرژی اولیه به انرژی الکتریکی را دارند [۲۴-۲۵].

در این بررسی فرض شده است که مبدل اصلی ریزواده تولید همزمان برق و حرارت، برای تبدیل انرژی اولیه به انرژی الکتریکی، پیلهای سوختی با بازده ۳۰ درصد باشد. در این شیوه مدل‌سازی ریزواده تولید همزمان که بازده تبدیل انرژی تنها مشخصه مبدل اصلی است، این مکان وجود دارد تا با تغییر این بازده، فرض استفاده از پیلهای سوختی، به عنوان مبدل اصلی انرژی را تغییر داده و فناوری‌های دیگر را جایگزین فناوری مورد استفاده در این مقاله نمود. بدین ترتیب، این انعطاف‌پذیری در مدل ارائه شده وجود دارد تا با اعمال تغییری کوچک، شرایط مسئله برای فناوری‌های مختلف تولید همزمان بررسی شود.

اغلب از پیلهای سوختی الکتروولیت پلیمر با غشاء مبادله‌کننده پرومیون (PEMFC) برای طراحی ریزواده‌های تولید همزمان برق و حرارت با این فناوری استفاده می‌شود. این بدان دلیل است که پیلهای سوختی الکتروولیت پلیمر با غشاء مبادله‌کننده پرومیون در دمای پایین،

آن به صورت شخصی و با استفاده از ریزواده تولید همزمان برق و حرارت، چه مقدار در هزینه‌های تأمین انرژی سالانه صرفه‌جویی می‌شود. همچنین در این بین، تأثیر استفاده از روش مناسب برای کنترل خروجی ریزواده تولید همزمان برق و حرارت نیز مورد بررسی قرار گرفته به گونه‌ای است که با توجه به شرایط قطعی و به موقع پیوسته سیستم، به دنبال محاسبه سود اقتصادی به دست آمده ناشی از استفاده از ریزواده‌های تولید همزمان برق و حرارت است. بنابراین، اطلاعات ورودی مسئله از نوع اطلاعات تقاضای توان ثابت و قیمت‌های مشخصی می‌باشد که در گذشته روی داده است و بر این اساس عدم قطعیتی به مسئله وارد نمی‌شود. همچنین، با توجه به عدم رویکرد این مقاله نسبت به مسائل اقتصاد مهندسی، هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری و سرمایه‌گذاری اولیه برای خرید ریزواده تولید همزمان برق و حرارت لحاظ نشده و می‌تواند در مطالعات دیگری، به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرد.

۲.۲. مدل‌سازی ریزواده تولید همزمان برق و حرارت

شکل (۲) مدل ساده‌ای از یک ریزواده تولید همزمان برق و حرارت، نصب شده در محیط یک مصرف‌کننده خانگی و نحوه ارتباط آن با خردهفروش انرژی را نشان می‌دهد. در این شکل دیده می‌شود که انرژی الکتریکی و حرارت در داخل محیط مصرف‌کننده خانگی بین ریزواده تولید همزمان برق و حرارت، ذخیره‌ساز حرارتی و نیز، نقاط مصرف در جریان است. همچنین، مصرف‌کننده قادر به مبادله برق با خردهفروش برق است. مصرف‌کننده خانگی برای راهاندازی ریزواده تولید همزمان برق و حرارت به انرژی اولیه‌ای نیاز دارد که در اینجا گاز طبیعی در نظر گرفته شده است و آن را از طریق خردهفروش گاز طبیعی تأمین می‌کند. بر این اساس، مصرف‌کننده خانگی با خردهفروش برق و گاز طبیعی در ارتباط است. گاز مصرفی برای تبدیل انرژی و راهاندازی مبدل موجود در ریزواده تولید همزمان برق و حرارت و نیز، مشعل کمکی استفاده می‌شود. حرارت خروجی ریزواده تولید همزمان برق و حرارت و مشعل کمکی در ذخیره‌ساز حرارتی ذخیره شده و در زمان نیاز به مصرف می‌رسد. انرژی الکتریکی خروجی ریزواده تولید همزمان نیز، پس از تبدیل به جریان متناوب در اینورتر، نیاز برق لحظه‌ای مصرف‌کننده خانگی را تأمین می‌کند. کمبود انرژی الکتریکی لحظه‌ای یا تولید اضافه آن، از طریق مبادلات برق میان مصرف‌کننده خانگی و خردهفروش به تعادل می‌رسد.

ذخیره‌ساز حرارتی، برای تأمین حرارت در خواستی مصرف کننده کافی نباشد، کمبود حرارت مورد نیاز را تأمین می‌کند. در زمان روشن‌سازی پیل سوختی، مقداری گاز طبیعی برای عملیات روشن‌سازی در مبدل استفاده می‌شود (g_r) که این موضوع نیز در مدل ارائه شده در نظر گرفته شده است.

در ادامه، مدل ریاضی عملکرد ریزوآحد تولید همزمان برق و حرارت و نحوه ارتباط آن با خرده‌فروش و مصرف کننده بیان می‌شود. با توجه به عدم امکان اجرای مطالعات به صورت پیوسته، این بررسی در بازه‌های زمانی گسسته صورت می‌پذیرد. بازه‌های زمانی در نظر گرفته شده برابر با ۳۰ دقیقه و با نشان داده شده است.

قید تعادل انرژی الکتریکی به صورت زیر است:

$$e_{FC}[t] + e_i[t] = e_d[t] \quad (1)$$

$$e_{FC}[t] = g_{FC}[t] \eta_e = h_{FC}[t] \eta_e / \eta_{th} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، η_e و η_{th} به ترتیب، بازده پیل سوختی در تبدیل گاز طبیعی به انرژی الکتریکی و انرژی حرارتی هستند.

رابطه (۳) حرارت ذخیره‌ساز حرارتی را در بازه نشان می‌دهد.

$$h_s[t+1] = h_s[t] - h_d[t] + h_{FC}[t] + h_{aux}[t] \quad (3)$$

از رابطه (۳) مشخص است که برای بررسی این مطالعات بایستی مقادیر اولیه (بازه زمانی صفر پیش از اجرای مطالعات) متغیرهای h_{FC} ، h_d و h_{aux} در دسترس باشد. حرارت تولیدی توسط پیل سوختی و مشعل کمکی، همچنین تقاضای حرارت مصرف کننده در بازه $t=0$ برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. حرارت ذخیره شده در ذخیره‌ساز نیز پیش از شروع مطالعات، برابر با حرارت تعادلی (h_{ave}) در نظر گرفته شده که در ادامه معرفی می‌شود.

قیود دمای ذخیره‌ساز حرارتی، حرارت خروجی پیل سوختی و مشعل کمکی، به ترتیب در روابط (۴-۶) بیان شده است.

$$h_{s,min} \leq h_s[t] \leq h_{s,max} \quad (4)$$

$$h_{FC,min} \leq h_{FC}[t] \leq h_{FC,max} \quad (5)$$

$$h_{aux,min} \leq h_{aux}[t] \leq h_{aux,max} \quad (6)$$

کمینه و بیشینه حرارت قابل ذخیره‌سازی در ذخیره‌ساز حرارتی، تولیدی توسط پیل سوختی و تولیدی توسط مشعل کمکی هستند. حرارت خروجی مشعل کمکی از رابطه (۶) قابل محاسبه است:

$$h_{aux}[t] = g_{aux}[t] \eta_{aux} \quad (7)$$

در حدود ۸۰ درجه سانتی گراد کار می‌کند. این دما برای ذخیره‌سازی حرارت و استفاده خانگی بسیار مناسب است [۲۶]. سوخت مناسب برای پیل‌های سوختی هیدروژن است. با استفاده از مبدل می‌توان دیگر سوخت‌ها، همچون گاز طبیعی را به هیدروژن تبدیل کرد و به عنوان سوخت اولیه برای پیل سوختی استفاده نمود. در مدل ارائه شده نیز فرض می‌شود گاز طبیعی توسط مبدل به هیدروژن تبدیل شده و برای مصرف توسط پیل سوختی آماده می‌گردد. برای سادگی، بازده مبدل برابر با ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شده و فرض شده است که به هر میزان گاز طبیعی وارد مبدل می‌شود، به همان اندازه هیدروژن نیز خارج می‌گردد.

با توجه به آنکه توان الکتریکی خروجی پیل سوختی به صورت جریان مستقیم است، برای اتصال به شبکه و مصرف توسط مصرف کننده خانگی، لازم است تا به جریان متناوب تبدیل شود. بدین منظور، همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده، از یک اینورتر^۱ استفاده شده است. در اینجا نیز برای سادگی مدل، بازده اینورتر برابر با ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شده و فرض می‌شود توان ورودی و خروجی اینورتر یکسان باشد.

شکل (۲) نشان می‌دهد که گاز طبیعی از خرده‌فروش دریافت شده (g_{FC}) و توسط مبدل به هیدروژن تبدیل می‌شود و وارد پیل سوختی می‌گردد. توان الکتریکی خروجی پیل سوختی که به صورت جریان مستقیم است، با عبور از اینورتر به جریان متناوب قابل اتصال به شبکه و مصرف توسط مصرف کننده خانگی تبدیل می‌شود (e_{FC}). با توجه به آنکه تقاضای انرژی الکتریکی (e_d) به صورت لحظه‌ای تأمین می‌گردد، (ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی در نظر گرفته نشده است)، تعادل برق توسط انرژی الکتریکی انتقالی از خرده‌فروش برق صورت می‌پذیرد (e). در صورتی که انرژی الکتریکی بیشتر از مصرف برق باشد، اضافه آن به خرده‌فروش برق فروخته می‌شود (توضیح مبنی نشان داده می‌شود) و اگر بر عکس، انرژی الکتریکی تولیدی توسط پیل سوختی برای تأمین برق مصرفی مورد نیاز کافی نباشد، کمبود برق از خرده‌فروش خریداری می‌شود (توضیح مثبت نشان داده می‌شود).

حرارت خروجی پیل سوختی (h_{FC}) به همراه حرارت تولیدی توسط مشعل کمکی (h_{aux}) در ذخیره‌ساز حرارتی ذخیره شده (h_s) و حرارت مورد نیاز مصرف کننده (h_d) توسط حرارت ذخیره شده در ذخیره‌ساز حرارتی تأمین می‌شود. مشعل کمکی در زمان‌هایی که مجموع انرژی حرارتی خروجی پیل سوختی و حرارت ذخیره شده در

ریزو احدهای تولید همزمان برق و حرارت، روش‌های مبتنی بر برق قیمت را به عنوان نسل آینده کنترل کننده‌ها معرفی کرده است. در [۲۸-۳۰] نیز توضیحات بیشتری در این زمینه ارائه می‌شود. در این مراجع بیان می‌شود که صرفه اقتصادی استفاده از این واحد، در محدوده ۸ تا ۴۰ درصد است که مقدار دقیق آن وابسته به عواملی همچون روش کنترلی در نظر گرفته شده، مقدار تقاضای برق و حرارت مصرف‌کننده خانگی و قیمت برق و گاز طبیعی است.

برای مدل‌سازی کنترل کننده دنبال کننده حرارت که به عنوان روش کنترلی پایه برای این بررسی در نظر گرفته شده است، ابتدا لازم است دمای تعادلی و نحوه محاسبه آن معرفی شود. دمای تعادلی دمایی است که کنترل کننده سعی دارد دمای ذخیره‌ساز حرارتی را در آن مقدار، به صورت ثابت نگه دارد. این دما به صورت میانگین دمای کمینه و بیشینه ممکن، برای ذخیره‌ساز حرارتی در نظر گرفته می‌شود.

$$T_a = \frac{(T_{min} + T_{max})}{2} \quad (9)$$

با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول (۱)، مقدار دمای تعادلی T_a برابر با ۷۰ درجه سانتی گراد خواهد بود. رابطه (۱۰) نحوه محاسبه حرارت تعادلی ذخیره‌ساز حرارتی را نشان می‌دهد.

$$h_{s,a} = m.c.(T_a - T_{env}) \quad (10)$$

برای مدل‌سازی کنترل کننده دنبال کننده حرارت، لازم است تا متغیرهای کنترلی این کنترل کننده که عبارت‌اند از: حرارت خروجی پیل سوتی، h_{FC} (مقدار صفر برای این متغیر بیانگر خاموش بودن پیل سوتی است) و حرارت خروجی مشعل کمکی، h_{aux} ، به صورت روابط ریاضی بیان شوند. رابطه (۱۱) مقدار حرارت خروجی پیل سوتی برای هر بازه زمانی را مشخص می‌کند:

$$h_{FC}[t] = \begin{cases} \max[(h_{s,a} - h_s[t] + h_d[t]), h_{FC,min}], \\ \text{if } [(h_s[t] - h_d[t] < h_{s,a}) \wedge (h_{FC}[t-1] > 0) \wedge \\ \quad (h_{s,a} - h_s[t] + h_d[t] < h_{FC,max})] \\ h_{FC,max}, \quad \text{if } [(h_s[t] - h_d[t] < h_{s,a}) \wedge (h_{FC}[t-1] > 0) \wedge \\ \quad (h_{s,a} - h_s[t] + h_d[t] > h_{FC,max})] \\ h_{s,max}, \quad \text{if } [(h_{FC}[k-1] > 0) \wedge \\ \quad (h_s[t] - h_d[t] - h_d[t+1] < h_{s,min})] \\ 0, \quad \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

براساس رابطه (۱۱)، برای خروجی حرارتی پیل سوتی چهار شرط در نظر گرفته شده است. براساس این رابطه، در صورتی که تفاضل حرارت ذخیره‌ساز حرارتی و تقاضای حرارتی کمتر از حرارت تعادلی ذخیره‌ساز حرارتی باشد، پیل سوتی، مقداری را میان کمینه و بیشینه تولید ممکن خود (با توجه به شرایط) انتخاب می‌کند و در غیر این صورت خاموش می‌شود. شرط سوم به شرایط متعارف در کنترل کننده‌های حرارتی افزوده شده است تا از خاموش و روشن

قید دیگری که بر خروجی پیل سوتی حاکم است، قید نرخ افزایشی و کاهشی خروجی الکتریکی پیل سوتی است که در رابطه (۸) به آن اشاره شده است.

$$e_{FC}[t-1] - e_{ramp} \leq e_{FC}[t] \leq e_{FC}[t-1] + e_{ramp} \quad (8)$$

در رابطه (۸)، e_{ramp} نرخ افزایشی و کاهشی انرژی الکتریکی خروجی پیل سوتی است (نرخ افزایشی و کاهشی انرژی الکتریکی خروجی پیل سوتی یکسان در نظر گرفته شده است). مقادیر پارامترهای روابط (۸-۱) و برخی دیگر از پارامترهایی که در ادامه بیان می‌شوند، در جدول (۱) ارائه شده است. این پارامترها با توجه به مقادیر ارائه شده در مراجع [۱۳] و [۲۴-۲۵] تعیین شده‌اند.

جدول (۱): پارامترهای ثابت و مقادیر آن‌ها

پارامتر	نماد	مقدار	واحد
بازدۀ خروجی الکتریکی پیل سوتی	η_e	0.3	-
بازدۀ خروجی حرارتی پیل سوتی	η_{th}	0.7	-
بازدۀ مشعل کمکی	η_{aux}	1	-
کمینه خروجی حرارتی پیل سوتی	$h_{FC,min}$	0.7	kW
بیشینه خروجی حرارتی پیل سوتی	$h_{FC,max}$	7	kW
کمینه خروجی حرارتی مشعل کمکی	$h_{aux,min}$	0	kW
بیشینه خروجی حرارتی مشعل کمکی	$h_{aux,max}$	6	kW
نرخ افزایشی و کاهشی پیل سوتی	e_{ramp}	0.2	kW/30min
کمینه دمای ذخیره‌ساز حرارتی	T_{min}	60	°C
بیشینه دمای ذخیره‌ساز حرارتی	T_{max}	80	°C
دمای محیط	T_{env}	20	°C
جرم آب موجود در ذخیره‌ساز حرارتی	m	150	kg
ظرفیت ویژه آب	c	0.00116	kW/kg. °C
گاز مورد نیاز برای راهاندازی مبدل	g_{ref}	0.5	kW/30min

۳.۲. مدل‌سازی کنترل کننده دنبال کننده حرارت

بررسی مسئله بهره‌برداری از ریزو احادیه تولید همزمان برق و حرارت با توجه به کنترل کننده دنبال کننده حرارت، بدان سبب حائز اهمیت است که در ابتدا با روند کنترلی اغلب ریزو احدهای تولید همزمان برق و حرارت آشنا خواهیم شد و سپس، مرجعی برای مقایسه نتایج به دست آمده از روش مبتنی بر قیمت به دست می‌آید تا مزیت استفاده از کنترل کننده هوشمند و براساس قیمت آشکار شود.

در [۲۷] روش‌های کنترل خروجی ریزو احدهای تولید همزمان برق و حرارت و مزایای هریک مورد بررسی قرار گرفته است. این مرجع، ضمن معرفی روش‌های دنبال کننده حرارت و دنبال کننده انرژی الکتریکی به عنوان روش‌های متدال برای کنترل خروجی

به عبارتی، تولید این واحد را به صورتی تنظیم می‌نماید تا بیشترین صرفه اقتصادی را برای مصرف کننده به همراه داشته باشد.

برای مدل سازی ریاضی کنترل کننده مبتنی بر قیمت، یک مسئله بهینه سازی با هدف کمینه سازی هزینه های تأمین انرژی مورد نیاز مصرف کننده خانگی، به همراه مجموعه ای از قیود حاکم بر انرژی الکتریکی و حرارتی خروجی ریزو احاد تولید همزمان برق و حرارت تعریف می شود. تابع هدف این مسئله به صورت رابطه (۱۵) است.

$$C = \sum_{t=1}^N \{p_g[t]^*(g_{FC}[t] + g_{aux}[t] + g_r[t]) + p_t[t]^*e_t[t]\} \quad (15)$$

در این رابطه، $p_g[t]$ برابر با قیمت گاز طبیعی و $p_t[t]$ قیمت برق در بازه زمانی t می باشد. همچنین، N تعداد کل بازه های زمانی مورد بررسی است. با توجه به اجرای یک ساله این بررسی در بازه های زمانی ۳۰ دقیقه ای، مقدار N برابر با ۱۷۵۲۰ خواهد بود.

قيود اين مسئله نيز عبارت اند از:

$$e_{FC}[t] + e_t[t] = e_d[t], \quad \forall t \quad (16)$$

$$h_s[t] = h_s[t-1] - h_d[t-1] + h_{FC}[t-1] + h_{aux}[t-1], \quad \forall t \quad (17)$$

$$h_{s,min} \leq h_s[t] \leq h_{s,max}, \quad \forall t \quad (18)$$

$$V_{FC}[t]^*h_{FC,min} \leq h_{FC}[t] \leq V_{FC}[t]^*h_{FC,max}, \quad \forall t \quad (19)$$

$$V_{aux}[t]^*h_{aux,min} \leq h_{aux}[t] \leq V_{aux}[t]^*h_{aux,max}, \quad \forall t \quad (20)$$

$$\begin{aligned} & e_{FC}[t-1] - e_{ramp} + e_{FC,min}^*(V_{FC}[t] - V_{FC}[t-1]) \\ & - BigN*(1 - V_{FC}[t]) \leq e_{FC}[t] \leq +BigN*(1 - V_{FC}[t]) \\ & + e_{FC}[t-1] + e_{ramp} + e_{FC,min}^*(V_{FC}[t] - V_{FC}[t-1]), \quad \forall t \end{aligned} \quad (21)$$

$$g_r[t] = g_{ref}^*(1 - V_{FC}[t]), \quad \forall t \quad (22)$$

$$e_{FC}[t] = g_{FC}[t]^*\eta_e, \quad \forall t \quad (23)$$

$$h_{FC}[t] = g_{FC}[t]^*\eta_{h_f}, \quad \forall t \quad (24)$$

$$h_{aux}[t] = g_{aux}[t]^*\eta_{aux}, \quad \forall t \quad (25)$$

در این روابط، $V_{aux}[t]$ و $V_{FC}[t]$ متغیرهای باینری نشان دهنده وضعیت روشنی یا خاموشی پیل سوختی و مشعل کمکی هستند. رابطه (۱۶) قید تعادل انرژی الکتریکی است و بیان می کند که مجموع انرژی الکتریکی تولیدی توسط پیل سوختی و خریداری شده از خرده فروش برق، در هر بازه زمانی برابر با مصرف آن توسط مصرف کننده خانگی است. رابطه (۱۷) نیز قید تعادل انرژی حرارتی است و حرارت ذخیره شده در ذخیره ساز حرارتی را در هر بازه زمانی، با توجه به مقادیر دیگر متغیرها در یک بازه قبل تر محاسبه می کند.

قيود بيان شده در روابط (۲۰-۱۸) قيود کمینه و بيشينه حرارت مجذز ذخیره شده در ذخیره ساز حرارتی و تولیدی توسط پیل سوختی و

شدنهای متوالی پیل سوختی جلوگیری شود. براساس آن، تفاضل حرارت ذخیره ساز حرارتی با تقاضای حرارتی دو بازه بعد به دست آمده و تنها در صورت بزرگ تر بودن آن از مقدار کمینه قابل ذخیره سازی در ذخیره ساز حرارتی، اجازه خاموش شدن پیل سوختی وجود خواهد داشت. $h_{s,min}$ در این رابطه برابر با کمینه حرارت مجذز برای ذخیره ساز حرارتی است که با قرار دادن T_{min} به جای T_a در رابطه (۱۰) به دست می آید.

خروجی مشعل کمکی در رابطه (۱۳) به صورت مدل ریاضی بیان شده است. پیش از آن پارامتر $h_{s,new}$ در رابطه (۱۲) تعریف شده و این پارامتر برای ساده سازی رابطه (۱۳) تعریف شده است.

$$h_{s,new}[t] = h_s[t] - h_d[t] + h_{FC}[t] \quad (12)$$

$$h_{aux}[t] = \begin{cases} \max[h_{s,a} - h_{s,new}[t], h_{aux,min}] \\ \text{if } \{h_{s,new}[t] < h_{s,a}\} \wedge \\ \quad (h_{s,a} - h_{s,new}[t] < h_{aux,max}) \\ h_{aux,max}, \quad \text{if } \{(h_{s,new}[t] < h_{s,a}) \wedge \\ \quad (h_{s,a} - h_{s,new}[t] > h_{aux,max})\} \\ 0, \quad \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

همان طور که از رابطه (۱۳) مشخص است، مشعل کمکی تنها زمانی که خروجی حرارتی پیل سوختی برای نگاه داشتن دمای ذخیره ساز حرارتی در دمای تعادلی کافی نباشد، شروع به تولید حرارت می کند. در نهایت، مقدار گاز طبیعی مورد نیاز برای راه اندازی پیل سوختی، از رابطه (۱۴) قابل محاسبه است.

$$g_r[t] = \begin{cases} g_{ref}, & \text{if } h_{FC}[t] = 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

براساس رابطه (۱۴)، پیل سوختی پس از خاموش شدن، با اندک گاز طبیعی مصرفی در مبدل، جهت روشن سازی مجدد صورت پذیرد. داشته می شود تا به محض نیاز، روشن سازی مجدد صورت پذیرد.

برای شبیه سازی کنترل کننده دنبال کننده حرارت در بهره برداری از ریزو احاد تولید همزمان برق و حرارت، کافی است طی یک روند ترتیبی، متغیرهای تصمیم در هر مرحله، با شروع از اولین بازه زمانی محاسبه شوند. برای بازه زمانی اول، از شرایط اولیه و برای دیگر بازه های زمانی، از شرایط مربوط به بازه زمانی قبلی آن ها، به عنوان شرایط اولیه در محاسبه متغیرهای تصمیم استفاده می شود. نرم افزار Matlab بهترین محیط برای شبیه سازی این فرایند است.

۴.۲. مدل سازی کنترل کننده مبتنی بر قیمت

کنترل کننده مبتنی بر قیمت، خروجی ریزو احاد تولید همزمان برق و حرارت را با توجه به قیمت لحظه ای برق و گاز طبیعی تعیین می کند و

دوره یک‌ساله (از ۱ دسامبر ۲۰۱۳ تا ۳۰ نوامبر ۲۰۱۴) اخذ شده است. داده‌های با مقیاس بزرگ‌تر از ۳۰ دقیقه، دارای مقادیر برابر برای هر بازه میانی خواهند بود.

شکل (۳) نمودار تقاضای برق و حرارت را با توجه به داده‌های ورودی بیان شده، برای تمام ۱۷۵۲۰ بازه ۳۰ دقیقه‌ای، در دوره یک‌ساله مورد نظر، بر حسب واحد kWh نشان می‌دهد. همچنین شکل (۴) نیز قیمت برق و گاز طبیعی را برای این دوره، بر حسب سنت بر کیلووات ساعت (€/kWh) نشان می‌دهد.

۲.۳ نتایج بهره‌برداری یک‌ساله ریزوآحد تولید همزمان برق و حرارت با درنظرگرفتن کنترل کننده دنبال‌کننده حرارت

روابط لازم برای شبیه‌سازی کنترل کننده دنبال‌کننده حرارت برای بهره‌برداری ریزوآحد تولید همزمان برق و حرارت که در بخش ۲.۲ بیان شد، در محیط نرم‌افزار Matlab پیاده‌سازی شده و نتایج بهره‌برداری یک‌ساله از ریزوآحد تولید همزمان برق و حرارت بر این اساس به دست آمده است. این نتایج شامل ۳ مقدار عددی و ۳ نمودار است. مقادیر عددی به ترتیب، کل هزینه تأمین انرژی مصرف‌کننده خانگی برای دوره یک‌ساله مورد بررسی، بدون استفاده از ریزوآحد تولید همزمان برق و حرارت (خرید تمام نیاز برق مصرفی از خردفروش برق و تأمین انرژی حرارتی مورد نیاز با استفاده از بویلری با بازده ۱) و با استفاده از ریزوآحد تولید همزمان برق و حرارت، مجهرز به کنترل کننده دنبال‌کننده حرارت برای کنترل خروجی آن و در نهایت، سود سالانه به دست آمده برای مصرف‌کننده خانگی، حاصل از استفاده ریزوآحد تولید همزمان برق و حرارت (تفاضل دو مقدار قبل) است که در جدول (۲) ارائه شده است.

نمودارهای خروجی به ترتیب، نمودار حرارتی، شامل حرارت موجود در ذخیره‌ساز حرارتی، تولیدی توسط پیل سوختی و مشعل کمکی، مصرفی برای روشن‌سازی مبدل و مصرفی توسط مصرف‌کننده، نمودار الکتریکی، شامل برق تولیدی توسط پیل سوختی، مبالغه شده میان مصرف‌کننده خانگی و خردفروش و مصرفی توسط مصرف‌کننده و نمودار هزینه، شامل هزینه‌های خرید گاز طبیعی و برق و پرداختی برای تأمین انرژی، بدون استفاده از ریزوآحد تولید همزمان برق و حرارت و با استفاده از آن است. این نمودارها به ترتیب در شکل‌های (۷-۵) نشان داده شده‌اند.

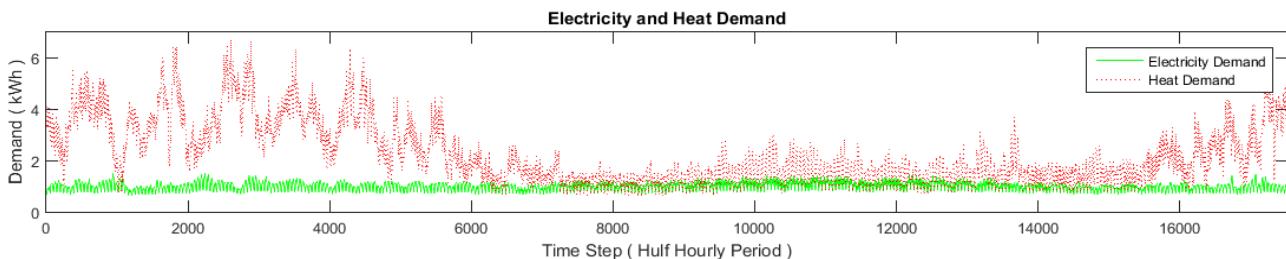
مشعل کمکی هستند. رابطه (۲۱) قید نرخ افزایشی و کاوشی انرژی الکتریکی خروجی پیل سوختی را بیان می‌کند. براساس این رابطه، خروجی الکتریکی پیل سوختی به هنگام روشن‌سازی برابر با مقدار کمینه قابل تولید آن بوده و به هنگام خاموش شدن، وضعیت برای صفر شدن خروجی فراهم می‌شود. همچنین، در شرایط کار عادی پیل سوختی، رابطه (۲۱) مشابه آنچه در رابطه (۸) نشان داده شده است، خواهد بود. مقدار $BigN$ برابر با عدد بزرگی است که با قرار دادن مقدار خروجی الکتریکی پیل سوختی بین دو عدد مثبت و منفی، شرایط صفر شدن را به هنگام خاموشی آن فراهم می‌سازد (با استی $BigN \geq e_{FC,max}$). رابطه (۲۲) نیز مقدار گاز طبیعی مصرفی برای روشن‌سازی مبدل را محاسبه می‌کند. در نهایت، روابط (۲۵-۲۳) ارتباط گاز مصرفی ورودی به پیل سوختی و مشعل کمکی با خروجی هریک را بیان می‌کند.

مرجع [۱۳] برای مدل‌سازی مسئله‌ای مشابه، از روش کنترل مدل پیش‌بین (MCP) استفاده کرده است. براساس این روش، مسئله به زیرمسئله‌های کوچک‌تر تبدیل شده و طی یک فرایند ترتیبی حل می‌شود. با این روش، امکان حل مسائل با ابعاد بسیار بزرگ نیز فراهم می‌شود، اما زمان حل مسئله به مقدار زیادی افزایش می‌یابد. در این مرجع، برای حل مسئله از جعبه ابزار Tomlab در استفاده شده است و شاید دلیل استفاده از مدل پیش‌بین، ناتوانی جعبه ابزار Tomlab در حل مسائل با ابعاد بزرگ باشد. این در حالی است که نرم‌افزار GAMS توانایی حل مسائل با ابعاد بسیار بزرگ را با دقت و سرعت بسیار بالا دارد. مسئله شرح‌داده شده در این بخش، برای بهره‌برداری یک‌ساله از ریزوآحد تولید همزمان برق و حرارت، با بازه‌های زمانی هر ۳۰ دقیقه، در حدود ۸۷۶۰۰ متغیر تصمیم مستقل را دراست که نرم‌افزار GAMS به راحتی قادر به حل آن است.

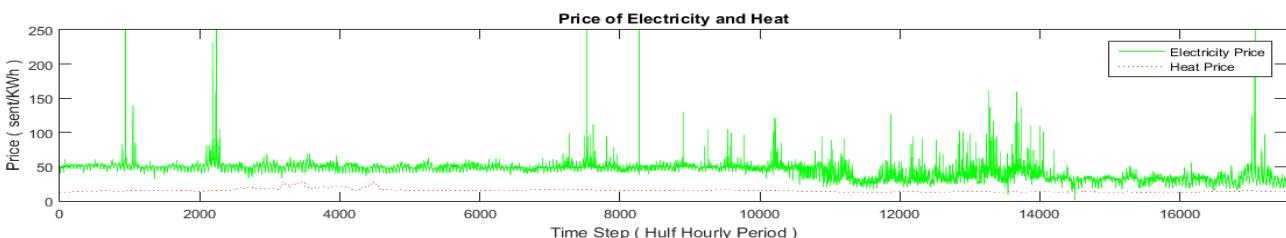
۳. نتایج عددی

۱.۳. داده‌های ورودی مسئله

اجرای مسئله بهره‌برداری از ریزوآحد تولید همزمان برق و حرارت، به چهار گروه داده ورودی، مقدار حرارت و برق مورد نیاز مصرف‌کننده، همچنین قیمت گاز طبیعی (حرارت) و برق در بازه‌های زمانی مورد نظر نیاز دارد (در این بررسی بازه‌های ۳۰ دقیقه‌ای برای دوره یک‌ساله در نظر گرفته شده است). این مقادیر به ترتیب از مراجع [۳۱-۳۴] برای



شکل (۳): تقاضای برق و حرارت مصرف کننده خانگی برای ۱۷۵۲۰ بازه ۳۰ دقیقه‌ای یک سال



شکل (۴): قیمت برق و حرارت برای ۱۷۵۲۰ بازه ۳۰ دقیقه‌ای یک سال

کرده و به مقداری کمتر از مصرف برق توسط مصرف کننده تنزل می‌یابد. این روند تولید انرژی الکتریکی توسط پیل سوختی به دلیل نوع کنترل کننده استفاده شده برای کنترل خروجی ریزواد تولید همزمان برق و حرارت است. با توجه به آنکه داده‌های ورودی برای بازه زمانی ۱ دسامبر ۲۰۱۳ تا ۳۰ نوامبر ۲۰۱۴ می‌باشد، بازه‌های زمانی ۶۰۰۰ تا ۱۶۰۰۰ مربوط فصول گرم سال است که تقاضای حرارت توسط مصرف کننده بسیار کمتر از دیگر زمان‌هاست و با توجه به این موضوع که کنترل کننده دنبال کننده حرارت سعی می‌کند خروجی ریزواد تولید همزمان برق و حرارت را به گونه‌ای تنظیم کند که تقاضای حرارت تأمین شود، تولید حرارت و به تبع آن تولید برق توسط پیل سوختی، در این محدوده زمانی کاهش یافته و مصرف کننده مجبور به خرید برق از خرده‌فروش است.

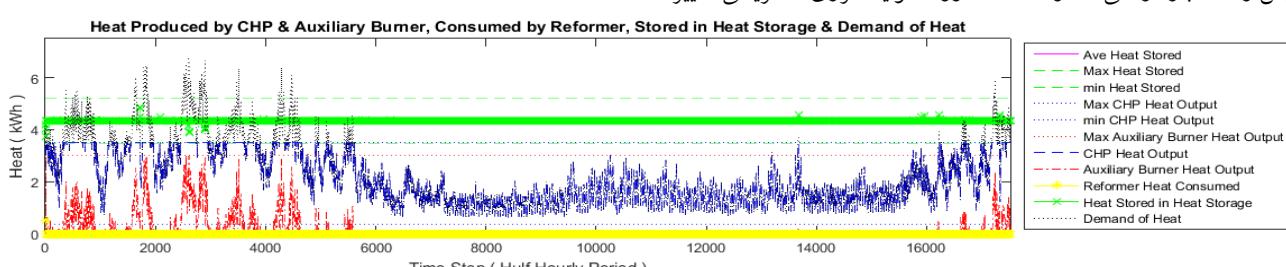
از شکل (۷) که هزینه‌های تأمین انرژی مصرف کننده خانگی را نشان می‌دهد، دیده می‌شود که هزینه‌های تأمین انرژی برای مصرف کننده، بدون استفاده از ریزواد تولید همزمان برق و حرارت، همواره در مقایسه با زمانی که از این واحد تولید توان استفاده شده است، بیشتر می‌باشد که این امر کارآمدی آن را نشان می‌دهد.

جدول (۲): نتایج بهره‌برداری یک ساله از ریزواد تولید همزمان برق و حرارت با کنترل کننده دنبال کننده حرارت

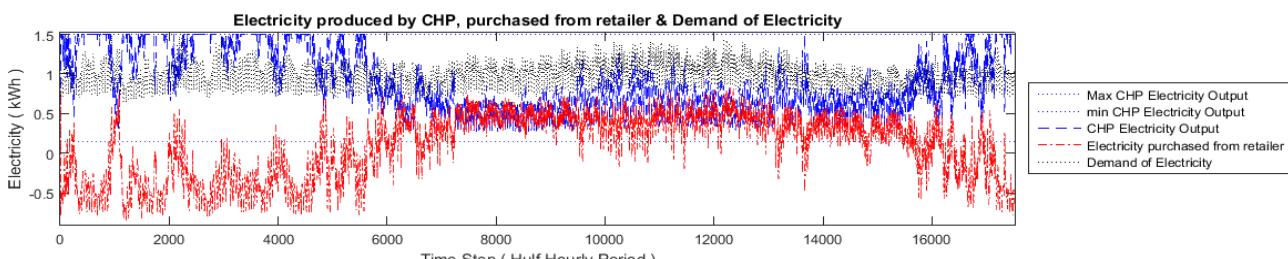
روش تأمین انرژی	هزینه تأمین انرژی (\$)	هزینه هزینه‌ها (\$)	سود (%)
بدون بهره‌گیری از ریزواد تولید همزمان برق و حرارت	۱۴۱۴/۸۳	۰	%۰
ریزواد تولید همزمان با کنترل کننده دنبال کننده حرارت	۹۳۳/۷۵	۴۸۱/۰۸	%۳۴

همان‌طور که در شکل (۵) دیده می‌شود، با توجه به نوع کنترل کننده در نظر گرفته شده، خروجی پیل سوختی، تقاضای حرارت را دنبال کرده و کمبود آن توسط مشعل کمکی جبران می‌شود. بر این اساس، دما و حرارت ذخیره‌ساز حرارتی همواره روی مقدار تعادلی قرار می‌گیرد.

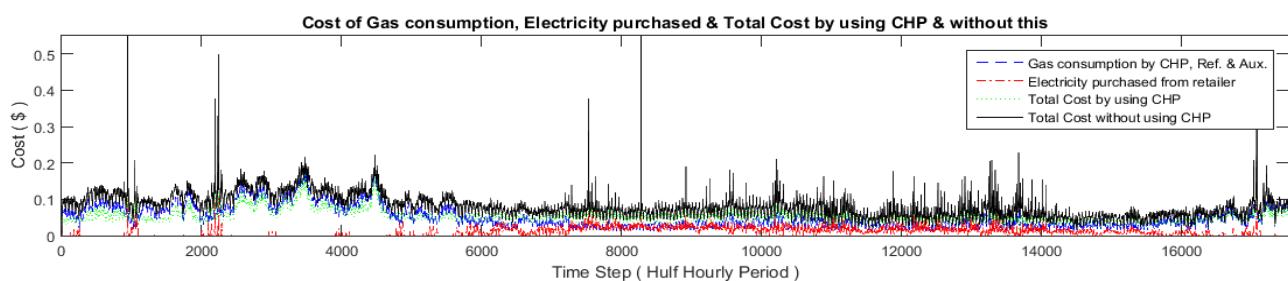
در شکل (۶) دیده می‌شود که برق تولیدی توسط پیل سوختی تا بازه زمانی حدود ۱۶۰۰۰، بیشتر از تقاضای برق توسط مصرف کننده بوده و بنابراین برای شارش توان از سمت مصرف کننده به خرده‌فروش برق می‌باشد و فروش انرژی الکتریکی صورت گرفته است. اما پس از آن تا بازه زمانی حدود ۱۶۰۰۰ روند تولید انرژی الکتریکی تغییر



شکل (۵): نمودار حرارتی خروجی بهره‌برداری یک ساله ریزواد تولید همزمان برق و حرارت با کنترل کننده دنبال کننده حرارت



شکل (۶): نمودار الکتریکی خروجی بهره‌برداری یکساله ریزواد تولید همزمان برق و حرارت با کنترل کننده دنبال کننده حرارت



شکل (۷): نمودار هزینه خروجی بهره‌برداری یکساله ریزواد تولید همزمان برق و حرارت با کنترل کننده دنبال کننده حرارت

از ریزواد تولید همزمان برق و حرارت مجهز به کنترل کننده مبتنی بر قیمت و بدون استفاده از آن و همچنین، سود به دست آمده در جدول (۳) ارائه شده‌اند.

نتایج ارائه شده در جدول (۳) نشان می‌دهد که با استفاده از روش کنترلی مبتنی بر قیمت، هزینه‌های تأمین انرژی به میزان ۳۵ درصد کنترل کننده دنبال کننده حرارت، ۱/۵ درصد سود بیشتر مشاهده می‌شود. شاید این سؤال پیش آید که دلیل تغییر اندک در مقدار سود به دست آمده چیست؟ پاسخ این سؤال در ادامه بیان خواهد شد.

شکل های (۸-۱۰) نمودارهای حرارتی، الکتریکی و هزینه برای بهره‌برداری یکساله ریزواد تولید همزمان برق و حرارت، با استفاده از کنترل کننده پاسخ‌بار را نشان می‌دهند.

جدول (۳): نتایج بهره‌برداری یکساله از ریزواد تولید همزمان برق و حرارت با کنترل کننده مبتنی بر قیمت

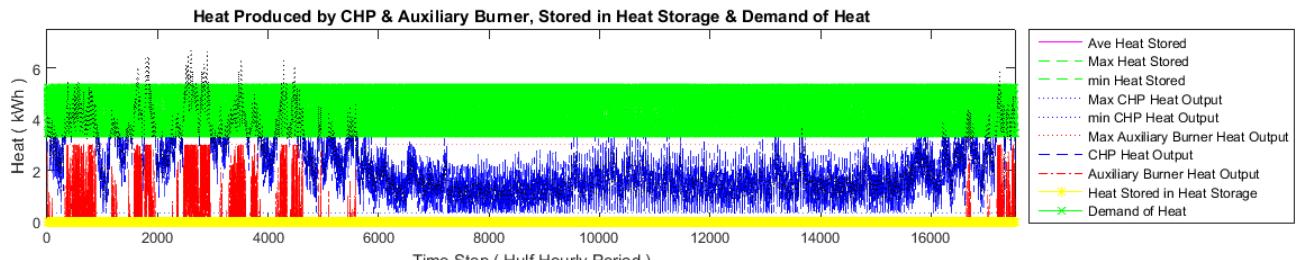
سود (%)	مقدار کاهش هزینه‌ها (\$)	هزینه تأمین انرژی (\$)	روش تأمین انرژی
%۰	۰	۱۴۱۴/۸۳	بدون بهره‌گیری از ریزواد تولید همزمان برق و حرارت
%۳۵	۴۹۴/۶۵	۹۲۰/۱۸	ریزواد تولید همزمان برق و حرارت با کنترل کننده مبتنی بر قیمت

تا اینجا و با توجه به نتایج به دست آمده، کاهش چشمگیر در هزینه‌های تأمین انرژی مصرف‌کننده خانگی تا ۳۴ درصد، با استفاده از ریزواد تولید همزمان برق و حرارت، مجهز به کنترل کننده دنبال کننده حرارت دیده شده است، اما این امکان وجود دارد تا با هوشمند نمودن کنترل کننده خروجی ریزواد تولید همزمان برق و حرارت، هزینه‌های تأمین انرژی به مقدار بیشتری کاهش یابند.

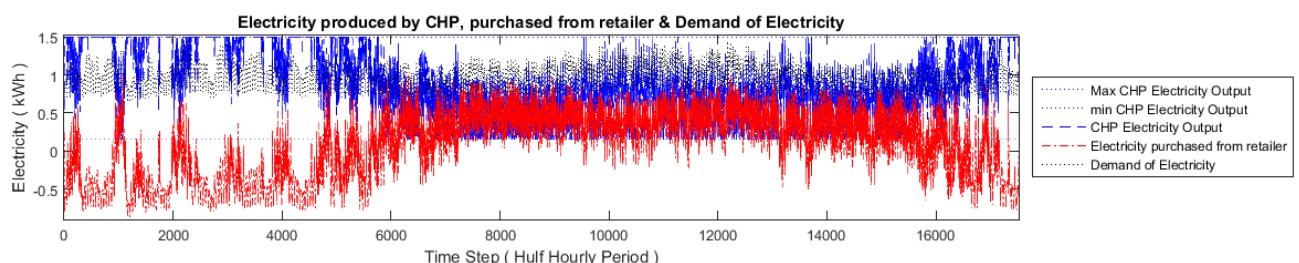
۳.۳. نتایج بهره‌برداری یکساله ریزواد تولید همزمان برق و حرارت با درنظر گرفتن کنترل کننده مبتنی بر قیمت

برای به دست آوردن نتایج بهره‌برداری از ریزواد تولید همزمان برق و حرارت با به کار گیری کنترل کننده مبتنی بر قیمت، برای دوره یکساله مورد نظر، باید مسئله بهینه‌سازی معرفی شده در بخش ۳.۲ شبیه‌سازی گردد. با توجه به ماهیت خطی - عدد صحیح مسئله، بهترین گزینه برای شبیه‌سازی، نرم افزار GAMS است که توانایی بالایی در حل مسائل خطی دارد. با شبیه‌سازی مسئله و اجرای آن، ۵ نمودار به عنوان خروجی مسئله به دست خواهد آمد که عبارت‌اند از: حرارت ذخیره شده در ذخیره‌ساز حرارتی، گاز طبیعی مصرفی توسط پیل سوختی، گاز طبیعی مصرفی برای مشعل کمکی، گاز طبیعی مورد نیاز برای روشن سازی مبدل و توان الکتریکی مبادله شده میان خرد فروش بر قر و مصرف‌کننده خانگی، برای هر یک از ۱۷۵۲۰ بازه زمانی. این اطلاعات توسط برنامه‌ای دیگر قابل تبدیل به همان ۳ مقدار عددی و ۳ نمودار معرفی شده در بخش قبل هستند.

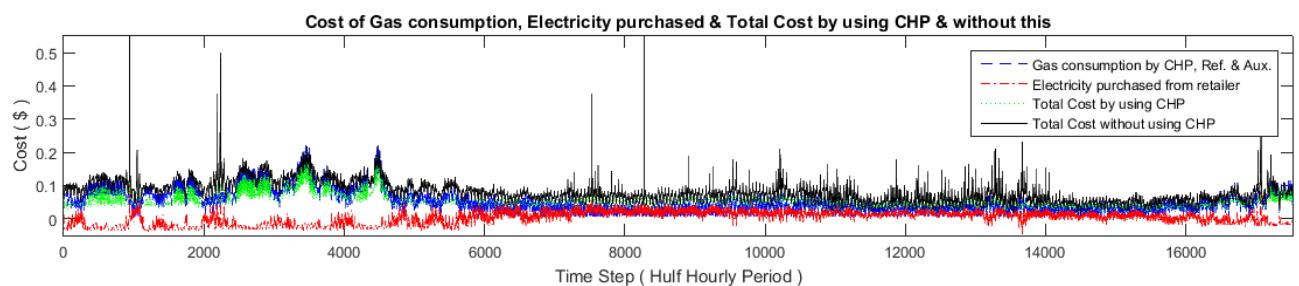
مقادیر عددی هزینه تأمین انرژی مورد نیاز مصرف‌کننده با استفاده



شکل (۸): نمودار حرارتی خروجی بهره‌برداری یکساله ریزواد تولید همزمان برق و حرارت با کنترل کننده مبتنی بر قیمت



شکل (۹): نمودار الکتریکی خروجی بهره‌برداری یکساله ریزواد تولید همزمان برق و حرارت با کنترل کننده مبتنی بر قیمت



شکل (۱۰): نمودار هزینه خروجی بهره‌برداری یکساله ریزواد تولید همزمان برق و حرارت با کنترل کننده مبتنی بر قیمت

اما دلیل تغییر اندک در کاهش هزینه‌های استفاده از ریزواد تولید همزمان برق و حرارت در مقایسه دو حالت استفاده از کنترل کننده دنبال کننده حرارت و کنترل کننده مبتنی بر قیمت چیست؟ دلیل آن محدودیت ذخیره‌سازی حرارت است. به عبارت دیگر، محدودیت در ذخیره‌سازی حرارت باعث می‌شود تا تولید برق پیل سوتختی با مقدار حرارت قابل ذخیره در ذخیره‌ساز حرارتی محدود شود. در محدوده بازه‌های زمانی ۶۰۰۰ تا ۱۶۰۰۰، با توجه به کاهش مصرف حرارت و اندک بودن قابلیت ذخیره‌سازی حرارت (با توجه به حجم آب در نظر گرفته شده برای ذخیره‌ساز حرارتی)، همچنین، عدم درنظر گرفتن امکان تلفات انرژی حرارتی، پیل سوتختی ملزم است تا خروجی خود را به نحوی تنظیم کند که قید حرارتی ذخیره‌ساز حرارتی ارضاء شود. بر این اساس، خروجی حرارتی و الکتریکی پیل سوتختی نیز به صورت پیوسته در نوسان است (افزایش خروجی تا سرحد رسیدن به قید بیشینه حرارت قابل ذخیره‌سازی در ذخیره‌ساز و سپس کاهش خروجی برای جلوگیری از نقض این قید).

شکل (۸) نشان می‌دهد که حرارت ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز حرارتی در مقدار تعادلی ثابت نمانده و میان مقدار کمینه و بیشینه حرارت مجاز برای ذخیره‌سازی، در نوسان است. حرارت خروجی پیل سوتختی نیز به طور دقیق، مقدار تقاضای حرارت را دنبال نمی‌کند اما در اطراف مقدار حرارت مورد نیاز مصرف کننده نوسان می‌نماید.

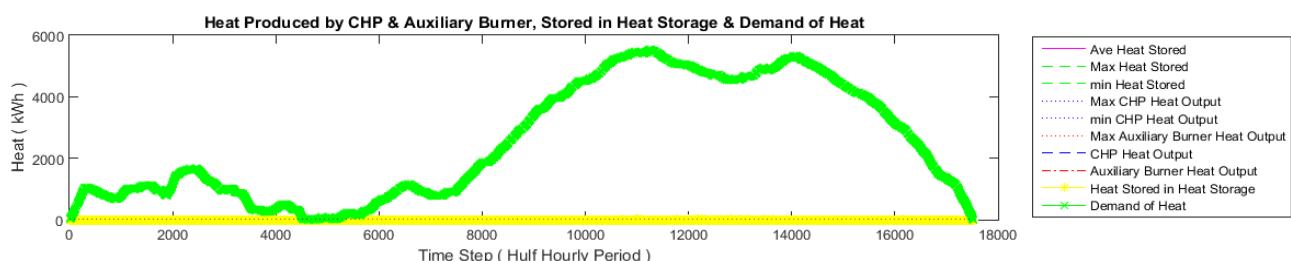
شکل (۹) نیز نشان می‌دهد که همچنان مقدار تولید برق پیل سوتختی در محدوده بازه‌های زمانی ۶۰۰۰ تا ۱۶۰۰۰ کاهش یافته و به طور کامل تأمین کننده برق مورد نیاز مصرف کننده نیست و مصرف کننده در این شرایط و با به کارگیری کنترل کننده مبتنی بر قیمت نیز، ملزم به خرید برق از خرده‌فروش است. نکته حائز اهمیت در این شکل، نوسانات زیاد توان الکتریکی خروجی پیل سوتختی است.

شکل (۱۰) که هزینه‌های تأمین انرژی مصرف کننده با استفاده از ریزواد تولید همزمان برق و حرارت و بدون استفاده از آن را نشان می‌دهد، تغییر محسوسی نسبت به آنچه در شکل (۷) نشان داده شده بود نداشته و بیانگر شرایط مشابهی است.

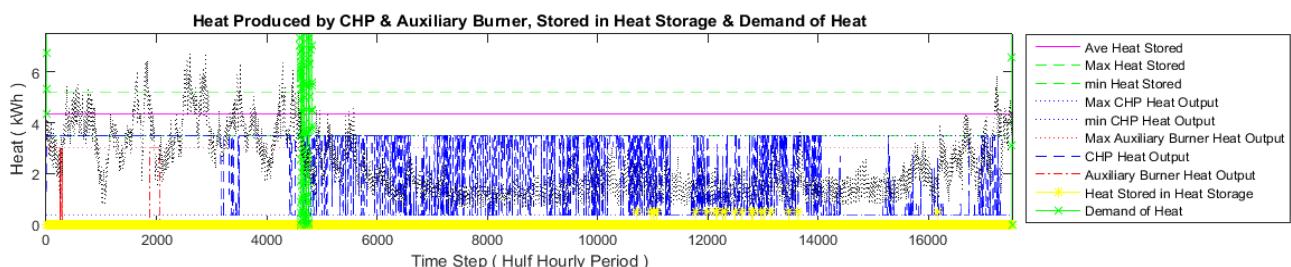
جدول (۴): نتایج بهره‌برداری یکساله از ریزواد تولید همزمان برق و حرارت با کنترل کننده مبتنی بر قیمت و اراضی قید حرارتی ذخیره‌ساز

روش تأمین انرژی	هزینه انرژی (\$)	هزینه تأمین (\$)	مقدار کاهش هزینه‌ها (\$)	سود (%)
بدون بهره‌گیری از ریزواد تولید همزمان برق و حرارت	۱۴۱۴/۸۳	۰	۱۴۱۴/۸۳	%۰
ریزواد تولید همزمان برق و حرارت با کنترل کننده مبتنی بر قیمت در شرایط بیان شده	۸۳۷/۰۵	۵۷۷/۷۸	۸۳۷/۰۵	%۴۱

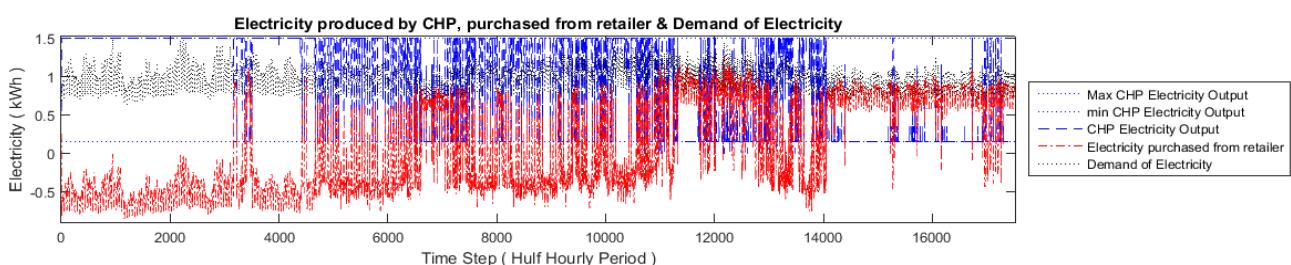
اکنون فرض می‌شود ذخیره‌ساز حرارتی قیدی برای مقدار حرارت ذخیره‌شده نداشته باشد (این کار با حذف قید بیان شده در رابطه ۱۸ از مجموعه دیگر قیود قابل اجراست). با اجرای دوباره شبیه‌سازی با شرایط جدید، نتایج به صورت آنچه در جدول (۴) و شکل‌های (۱۱-۱۴) نشان داده شده است، خواهد بود.



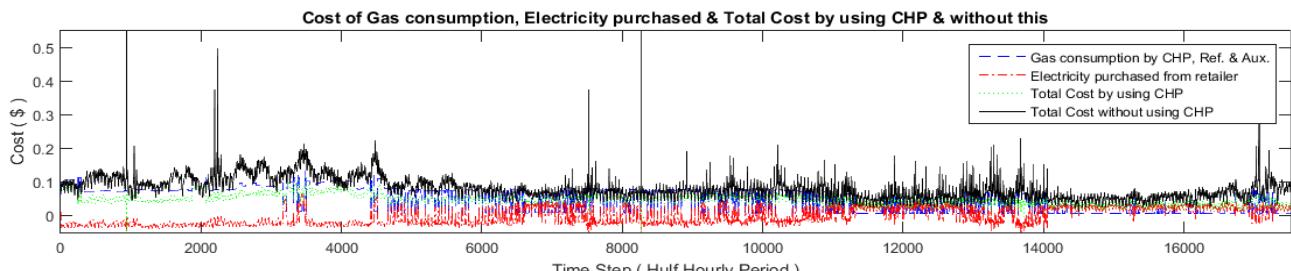
شکل (۱۱): نمودار اول حرارتی خروجی بهره‌برداری یکساله ریزواد تولید همزمان برق و حرارت با کنترل کننده مبتنی بر قیمت و اراضی قید حرارتی ذخیره‌ساز



شکل (۱۲): نمودار دوم حرارتی خروجی بهره‌برداری یکساله ریزواد تولید همزمان برق و حرارت با کنترل کننده مبتنی بر قیمت و اراضی قید حرارتی ذخیره‌ساز



شکل (۱۳): نمودار الکتریکی خروجی بهره‌برداری یکساله ریزواد تولید همزمان برق و حرارت با کنترل کننده مبتنی بر قیمت و اراضی قید حرارتی ذخیره‌ساز



شکل (۱۴): نمودار هزینه خروجی بهره‌برداری یکساله ریزواد تولید همزمان برق و حرارت با کنترل کننده مبتنی بر قیمت و اراضی قید حرارتی ذخیره‌ساز

داده شده در این شکل، منطبق بر تغییرات قیمت برق و گاز طبیعی نشان داده شده در شکل (۴) است.

از شکل (۱۴) نیز مشخص است که هزینه های خرید انرژی اکتریکی مصرف کننده، نسبت به شرایط پیشین کاهش یافته است که به تبع آن، سود بیشتری را در پی استفاده از ریزو اند تولید هم زمان برق و حرارت برای مصرف کننده خانگی به همراه خواهد داشت.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله سعی شده است تا وضعیت بهره برداری از ریزو اند تولید هم زمان برق و حرارت، برای تأمین مصرف برق و حرارت یک مصرف کننده خانگی، با توجه به دو نوع سیستم کنترلی دنباله کننده حرارت و مبتنی بر قیمت تعیین شده و هزینه های به دست آمده در هر حالت، با یکدیگر و با شرایطی که مصرف کننده انرژی مورد نیاز خود را از خرده فروش انرژی تأمین می کند، مقایسه گردد.

نتایج به دست آمده حاکی از صرفه جویی ۳۴ درصدی در مقدار هزینه های تأمین انرژی مصرف کننده خانگی، با به کار گیری ریزو اند تولید هم زمان برق و حرارت است. این مقدار وابسته به طرح کنترلی مورد استفاده برای تعیین خروجی آن تا ۱ درصد قابل تغییر است. با آزادسازی قید حرارتی ذخیره ساز، ۷ درصد بیشتر از شرایط پیشین در مقدار هزینه های تأمین انرژی، صرفه جویی می شود و بدین ترتیب، مقدار سود سالانه استفاده از ریزو اند تولید هم زمان برق و حرارت، به ۴۱ درصد، با توجه به هزینه های سالانه تأمین انرژی، بدون استفاده از ریزو اند تولید هم زمان برق و حرارت می رسد.

با شرایط جدید، سود حاصل از استفاده ریزو اند تولید هم زمان برق و حرارت تا ۴۱ درصد افزایش یافته است و مقدار کاهش هزینه ها نسبت به شرایط قبل (بدون آزادسازی قید حرارتی ذخیره ساز حرارتی) برابر با ۸۳/۱۳ دلار معادل ۹ درصد است.

شکل (۱۱) نمودار حرارتی را با توجه به شرایط جدید نشان می دهد. دیده می شود که در این شرایط، حرارت ذخیره شده در ذخیره ساز حرارتی تا حدود ۶ مگاوات ساعت افزایش می یابد، به طوری که این افزایش دقیقاً در همان محدوده بازه های زمانی ۶۰۰۰ تا ۱۶۰۰۰ رخ داده است. شکل (۱۲) این نمودار را در محدوده حرارتی ۷ کیلووات ساعت نشان می دهد. در این شرایط، پیل سوختی با توجه به مقدار قیمت برق و گاز طبیعی، تولید خود را بر روی کمینه و پیشینه تنظیم می کند. اختیار هر مقداری میان این دو مقدار، به دلیل حضور قید نرخ افزایشی و کاهشی پیل سوختی است. در این شکل مشخص است که به دلیل حرارت بسیار زیاد ذخیره شده در ذخیره ساز حرارتی، مشعل کمکی به ندرت مورد استفاده قرار می گیرد.

شکل (۱۳) کاهش خرید برق از خرده فروش را در این شرایط نشان می دهد. در این شکل دیده می شود که برق مورد نیاز مصرف کننده، در محدوده بازه های زمانی ۶۰۰۰ تا ۱۶۰۰۰، تنها در زمان هایی که موجب کاهش هزینه های تأمین انرژی می گردد، از خرده فروش برق خریداری می شود. با توجه به آنکه خرید برق از خرده فروش تنها زمانی مقرر به صرفه است که قیمت برق کاهش یافته یا قیمت گاز طبیعی افزایش یابد، محدوده های زمانی خرید برق نشان

مراجع

- [1] IEAV World Energy Outlook. [Online]. Available: <http://www.worldenergyoutlook.org/>.
- [2] Hammons, T. J., "Integrating Renewable Energy Sources into European Grids", Int. J. Electric Power Energy System, Vol. 30, No. 8, pp. 462–475, Oct. 2008.
- [3] Ackermann, T., Andersson, G., Soder L., "Distributed Generation: a Definition", Electric Power Systems Research', Vol. 57, pp. 195-204, 2001.
- [4] Atwa, Y.M., El-Saadany, E.F., Salam M.M.A., Seethapathy, R., "Optimal Renewable Resources Mix for Distribution System Energy Loss Minimization", IEEE Transactions on power system, Vol. 25, No. 1, pp. 360 - 370, Jun. 2010.
- [5] Ochoa, L.F., Harrison, G.P., "Minimizing Energy Losses: Optimal Accommodation and Smart Operation of Renewable Distributed Generation", IEEE Transactions on power system, Vol. 26, No. 1, pp. 198 – 205, Jun. 2011.
- [6] Jenkins, N., Allan, R., Crossley, P., Kirschen, D., Strbac, G., "Embedded Generation", London, U.K.: IEE, 2000.
- [7] Chambers, A., Hamilton, S., Schnoor, B., "Distributed Generation: A Nontechnical Guide", Tulsa, OK: Penn Well, 2001.
- [8] Pec as Lopes, J. A., Hatziaargyriou, N., Mutale, J., Djapic, P., Jenkins, N., "Integrating Distributed Generation into Electric Power Systems: A Review of Drivers, Challenges and Opportunities", Electric Power System Resources, Vol. 77, No. 9, pp. 1189–1203, Jul. 2007.
- [9] Borbely, M., Brent, R., Brouwer, J., Cherian, S., Curtiss, P. S., "Distributed Generation: The Power Paradigm for the New Millennium", Boca Raton, FL: CRC Press, 2001.
- [10] Hatziaargyriou, N., Asano, H., Iravani, R., Marnay, C., "Microgrids: An Overview of Ongoing Research, Development, and Demonstration Projects", IEEE Power Energy Management, Vol. 5, No. 4, pp. 78–94, Jul. /Aug. 2007.

- [11] Pearce, J.M., "Expanding Photovoltaic Penetration with Residential Distributed Generation from Hybrid Solar Photovoltaic and Combined Heat and Power Systems", Elsevier, Energy, Vol 34, No 11, pp. 1947–1954, Nov. 2009.
- [12] Pehnt, M., Cames, M., Fischer, C., Praetorius, B., Schneider, L., Schumacher, K., Vob, J., "Micro Cogeneration: Towards Decentralized Energy Systems", Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2006.
- [13] Houwing, M., Negenborn, R. R., De Schutter, B., "Demand Response with Micro-CHP Systems", Proceedings of the IEEE, Vol. 99, Pp. 200-213, 2011.
- [14] Beith, R., Burdon, I. P., Knowles, M., "Micro Energy Systems: Review of Technology, Issues of Scale and Integration", Suffolk, U.K.: Professional Engineering Publishing, 2004.
- [15] Whisper Tech. (2009). [Online]. Available: <http://www.whispergen.com/>.
- [16] Ceres Power. (2009). [Online]. Available: <http://www.cerespower.com/>.
- [17] Peacock, A. D., Newborough, M., "Controlling Micro-CHP Systems to Modulate Electrical Load Profiles", Energy, Vol. 32, No. 7, pp. 1093–1103, Jul. 2007.
- [18] Peacock, A. D., Newborough, M., "Effect of Heat-Saving Measures on the CO₂ Savings Attributable to Micro-Combined Heat and Power (mCHP) Systems in UK Dwellings", Energy, Vol. 33, No. 4, pp. 601–612, Apr. 2008.
- [19] Brown, J. E., Hendry, C. N., Harborne, P., "An Emerging Market in Fuel Cells? Residential Combined Heat and Power in Four Countries", Energy Policy, Vol. 35, No. 4, pp. 2173–2186, Apr. 2007.
- [20] Teymouri Hamzeh kolaei, F., Sattari, S., "Technical and Economic Feasibility Study of Using Micro CHP in the Different Climate Zones of Iran", Elsevier, Energy, Vol. 36, No. 8, pp. 4790–4798, 2010.
- [21] Haeseldonckx, D., Peeters, L., Helsen, L., D'haeseleer, W., "The Impact of Thermal Storage on the Operational Behaviour of Residential CHP Facilities and the Overall CO₂ Emissions", Renewable Sustainable Energy Rev., Vol. 11, No. 6, pp. 1227–1243, Aug. 2007.
- [22] Pudjianto, D., Ramsay, C., Strbac, G., "Virtual Power Plant and System Integration of Distributed Energy Resources", IET Renewable Power Generation. J., Vol. 1, No. 1, pp. 10–16, Mar. 2007.
- [23] Cardell, J. B., "Distributed Resource Participation in Local Balancing Energy Markets", in Proc. IEEE Power Tech, Lausanne, Switzerland, pp. 510–515, Jul. 2007.
- [24] Staffell, I., Green, R., Kendall, K., "Cost Targets for Domestic Fuel Cell CHP", J. Power Sources, Vol. 181, No. 2, pp. 339–349, Jul. 2008.
- [25] Onovwionaa, H. I., Ugursal, V. I., "Residential Cogeneration Systems: Review of the Current Technology", Renewable Sustainable Energy Rev., Vol. 10, No. 5, pp. 389–431, Oct. 2006.
- [26] Kirubakaran, A., Jain, S., Nema, R. K., "A Review on Fuel Cell Technologies and Power Electronic Interface", Elsevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, No. 9, pp. 2430–2440, Dec. 2009.
- [27] Hawkes, A. D., Leach, M. A., "Cost-Effective Operating Strategy for Residential Micro-Combined Heat and Power", Energy, Vol. 32, No. 5, pp. 711–723, May 2007.
- [28] Peacock, A. D., Newborough, M., "Impact of Micro-Combined Heat-and-Power Sstems on Energy Flows in the UK Electricity Supply Industry", Energy, Vol. 31, No. 12, pp. 1804–1818, Sep. 2006.
- [29] Peacock, A. D., Newborough, M., "Impact of Mmicro-CHP Systems on Domestic Sector CO₂ Emissions", Appl. Thermal Eng., Vol. 25, No. 17–18, pp. 2653–2676, Dec. 2005.
- [30] Newborough, M., "Assessing the Benefits of Implementing Micro-CHP Systems in the UK", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, A, J. Power Energy, Vol. 218, No. 4, pp. 203–218, Aug. 2004.
- [31] Philadelphia Electric Company (PECO). [Online]. Available: <http://www.pecoprourement.com/index.cfm?s=dataRoom&p=monthl>.
- [32] Australian Energy Market Operator (AEMO). [Online]. Available: <http://www.aemo.com.au/Electricity/Data/Price-and-Demand/ Aggregated-Price-and-Demand-2011-to-2015>.
- [33] Energy Information Administration (EIA). [Online]. Available: <http://www.eia.gov/dnav/ng/hist/rngwhhdd.htm>.
- [34] Australian Energy Market Operator (AEMO). [Online]. Available: <http://www.aemo.com.au/Electricity/Data/Price-and-Demand/ Aggregated-Price-and-Demand-Data-Files/Aggregated-Price-and-Demand-2011-to-201>.