

مدل فنی - اقتصادی سیستم‌های Micro CHP با روش‌های عملکردی مختلف

فاطمه تیموری حمزه‌کلایی^{۱*}، نیما امجدی^۲

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

teymoori_eng@yahoo.com

^۲ استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

namjadi@semnan.ac.ir

چکیده: افزایش تقاضای جهانی برای آلودگی کمتر انرژی منجر به استفاده از سیستم‌های Micro CHP (تکنولوژی تولید همزمان برق و حرارت در بخش خانگی) شده است. حرارت تولیدشده ممکن است برای گرمایش فضا و آب گرم و اگر با یک چیلر جذبی ترکیب شود برای سرمایه‌گذاری به کار رود، برق تولیدی نیز در منزل استفاده می‌شود. در این مقاله، عملکرد دو نمونه Micro CHP موتور گازی و پیل سوختی برای ساختمان‌های مسکونی تحلیل می‌شود. برای هر یک از تأسیسات دو شیوه عملکردی متفاوت که شامل مینیمم کردن هزینه عملکردی و مینیمم کردن انتشار آلاینده‌هاست، در نظر گرفته شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که سیستم‌های پیل سوختی گزینه بهتری برای ساختمان‌های مسکونی مورد مطالعه از هر دو منظر اقتصادی و زیست‌محیطی می‌باشند. در این سیستم‌ها هزینه انرژی سالانه تقریباً ۲۶ درصد کاهش یافته است. از طرف دیگر، انتشار سالانه دی‌اکسید کربن تقریباً ۹ درصد کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: سیستم Micro CHP، پیل سوختی، انتشار آلاینده‌ها، شیوه‌های عملکردی مختلف.

۱. مقدمه

سیستم‌های Micro CHP تجاری برای ساختمان‌های مسکونی در نظر گرفته است [۱۳].

در ژاپن، سیستم‌های تولید همزمان با موتورهای گازسوز خانگی در سال ۲۰۰۳ تجاری شدند. به هر حال، اخیراً به جای موتورهای گاز سوز که پیش‌تر توسعه یافته بودند، سیستم‌های پیل سوختی خانگی بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۴-۱۶].

برای اینکه استفاده از Micro CHP برای مصرف‌کننده نهایی آسان باشد، باید خصوصیتی مانند قیمت پایین و عملکرد آسان داشته باشد [۱۷-۱۹]. تحقیقات عملی و تجربی مختلفی بر سیستم‌های Micro CHP به‌ویژه سیستم‌های پیل سوختی میکرو انجام شده است [۲۰-۲۸]. اما نکته مهم این است که توجهات نباید تنها بر خود سیستم معطوف شود، بلکه همچنین بر هماهنگ‌سازی بهینه بین خروجی سیستم و پروفیل بار مصرف‌کننده نهایی و همچنین فواید اقتصادی و زیست‌محیطی متناظر باید در نظر گرفته شود. پیکوک و نیوورگ [۲۹] تأثیر محرک اولیه را بر هماهنگ‌سازی عرضه و تقاضا تحلیل کرده‌اند. دورر و وبر [۳۰] مقدار انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای سیستم‌های مختلف Micro CHP را برای تعدادی از انواع خانه‌های مسکونی مورد ارزیابی قرار دادند. آیو سانت و همکاران [۳۱] امکان‌پذیری سیستم Micro CHP را در کانادا با در نظر گرفتن آثار شرایط محلی بر خصوصیات اقتصادی و زیست‌محیطی بررسی کرده‌اند. هاواینگ [۳۴] ابهامات فنی، اقتصادی و نهادی را در طراحی و عملکرد سیستم‌های Micro CHP با استفاده از یک چارچوب جامع برای تجزیه و تحلیل عدم اطمینان مطرح کرد. اوناویونا [۳۵] یک مدل طراحی و ارزیابی فنی اقتصادی برای سیستم‌های موتور احتراق داخلی خانگی را که علاوه بر تولید برق سیستم‌های ذخیره برق و حرارت نیز دارند، عرضه کرده است. هاوکیس و لیچ [۳۶] استراتژی عملکرد مقرون‌به‌صرفه را برای سیستم‌های Micro CHP خانگی، با مقایسه استراتژی‌های عملکردی پیگرد الکتریکی و پیگرد حرارتی مورد مطالعه قرار دادند. احيایی و بهادری [۳۷] امکان‌پذیری پذیرش میکرو توربین‌های گازی را برای برآورده کردن تمام نیاز انرژی ساختمان‌های مسکونی ایران با در نظر گرفتن سایر اقدامات حفاظت از انرژی مورد مطالعه قرار دادند. بویات [۳۸] با استفاده از مدل تجزیه و تحلیل نشان داد که کاربرد سیستم‌های Micro CHP نه تنها به خواص انرژی بلکه همچنین به شیوه زندگی و دیگر تصمیمات ذهنی حساس است. دورر [۳۹] عملکرد سیستم‌های Micro CHP پیل سوختی جایگزین را برای ساختمان‌های مسکونی مختلف ارزیابی کرد. واتسون [۴۰] سیاست‌های سرمایه‌گذاری و توصیه‌های قانونی را که می‌تواند فرایند

در سال ۲۰۰۷، مجموع گازهای گلخانه‌ای شمرده شده تقریباً معادل ۱/۳ میلیون تن کربن بوده که در مقایسه با سال ۱۹۹۰، ۱۲/۲ درصد افزایش داشته است. در این میان، همگام با کاهش انتشار از بخش صنعتی، انتشار گازهای گلخانه‌ای از بخش خانگی ۱۰/۸ درصد افزایش یافته است (۶۲/۷ میلیون تن) [۴-۱]. براساس این سوابق، سیستم‌های تولید انرژی دوستدار محیط‌زیست در بخش خانگی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند.

در کنار سیستم‌های فتوولتائیک متصل به شبکه^۱ مثال دیگری از تولید انرژی خانگی غیر متمرکز سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت کوچک (Micro CHP) با حداکثر ظرفیت الکتریکی خروجی بین ۱ تا ۱۰ کیلووات هستند [۵ و ۶]. یک سیستم Micro CHP می‌تواند نیاز الکتریکی یک منزل مسکونی را تأمین کند، درحالی‌که از حرارت تلف شده می‌توان برای گرمایش فضا و تأمین آب گرم مصرفی استفاده کرد. پذیرش در مقیاس بزرگ واحدهای تولید پراکنده مانند Micro CHP اساساً سیستم‌های برق را تغییر خواهد داد و مشتریان را به تولیدکنندگان برق تبدیل خواهد کرد. در این روش برای شرکت‌های برق، هزینه‌های انتقال و توزیع کاهش خواهد یافت.

با توجه به تحقیقات پیشین، در حال حاضر ۵ کشور ژاپن، آلمان، انگلستان، هلند و آمریکا فعال‌ترین کشورها در تحقیق و ابداع سیستم‌های Micro CHP هستند [۷ و ۸] به‌ویژه ژاپن و آلمان برای در اختیار گرفتن بازار رقابت می‌کنند. در سال ۲۰۰۳، بیشتر از ۸۰۰۰ واحد Micro CHP با ظرفیت ۵ کیلووات در بخش تجاری آلمان و خانه‌های بزرگ، توسط عرضه‌کنندگان اصلی نصب شده است [۹]. دولت آلمان انتظار دارد که پیل‌های سوختی خانگی خود را تا تعدادی بیشتر از ۸۵۰۰۰۰ واحد افزایش دهد که تقریباً ۵٪ از مجموع خانه‌های آلمان را در بر می‌گیرد [۱۰].

در انگلستان Micro CHP به‌عنوان یک مولفه اصلی در برنامه کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن در بخش خانگی شناسایی شده است. تا سال ۲۰۰۲ در حدود هزار سیستم Micro CHP در حال کار بودند. به‌علاوه مطابق تحقیقات انجام شده به نظر می‌رسد تقریباً ۱۳.۵ میلیون خانه پتانسیل نصب واحدهای Micro CHP با ظرفیت ۱ تا ۳ کیلووات را داشته باشند [۱۱]. در هلند Micro CHP در حدود سال ۲۰۰۸، با موتور استرلینگ ۱.۲ کیلوواتی معرفی شده است [۱۲]. علاوه بر کشورهای اروپایی بالا، دولت آمریکا ۱۰ درصد مالیات را برای

حرارت بازیافت شده از Micro CHP برای نیازمندی‌های گرمایش و تأمین آب گرم استفاده می‌شود. اگر گرمایش کاملاً تأمین نشود، از یک مشعل اضافی استفاده می‌شود. نقش تانک ذخیره این است که انرژی گرمایشی را در طول دوره‌هایی که تقاضای انرژی حرارتی پایین است، ذخیره کند و این انرژی را در طول دوره‌های تقاضا بالا تحویل دهد.

۲.۲. تشریح و ارزیابی مدل

به منظور شناسایی و راه‌اندازی سیستم Micro CHP در یک روش کارآمد، ضروری است که شرایط محیطی، نیاز انرژی و همچنین اطلاعات مالی و فنی به‌طور کامل در نظر گرفته شود. بر مبنای بارهای گرمایشی و الکتریکی بررسی شده، هزینه‌های انرژی (قیمت برق و گاز شهری) و خصوصیات عملکردی دستگاه Micro CHP، یک مدل فنی اقتصادی توسعه داده شده است [۴۱]. در حالی که تعادل بین عرضه و تقاضا، سهم منابع و هزینه‌ها (هزینه اولیه و هزینه‌های عملکردی)، برنامه عملکردی و خصوصیات متناظر اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم در نظر گرفته شده است. محاسبات برای هر ساعت در کل سال اجرا شده است (۸۷۶۰ ساعت).

در این مطالعه، به منظور اعتبارسنجی سیستم Micro CHP از جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی، تابع هدفی توسعه یافته که شامل دو مد عملکردی متفاوت است؛ یعنی برای مینیمم کردن هزینه انرژی سالانه و برای مینیمم کردن انتشار دی‌اکسیدکربن سالانه به‌کار خواهد رفت.

در روش اول، واحد راه‌اندازی می‌شود تا هزینه انرژی سالانه را مینیمم کند که شامل تحلیل هزینه سرمایه‌گذاری سیستم، هزینه‌های عملیاتی و مدیریتی، هزینه سوخت و... است. فرض می‌شود سیستم Micro CHP توان عملکرد بین ۰ تا ۱۰۰ درصد، بار نامی را داشته باشد.

در روش دوم، عملکرد سیستم Micro CHP به‌گونه‌ای کنترل می‌شود که بتواند به ماکسیمم فواید زیست‌محیطی برسد که از طریق انتشار گاز دی‌اکسیدکربن ارزیابی می‌شود. انتشار سالانه دی‌اکسیدکربن ترکیبی از انتشار احتراق گاز طبیعی و انتشار از برق شبکه است.

به منظور بهره‌برداری بهینه، یک مسئله برنامه‌ریزی خطی اعداد مختلط توسعه داده شده است که می‌تواند به وسیله نرم‌افزار LINGO با استفاده از روش شاخه و کران یا با روش سیمپلکس^۱ حل شود. این روش‌ها می‌تواند کران پایین تابع هدف را به وسیله تقریب خطی و در

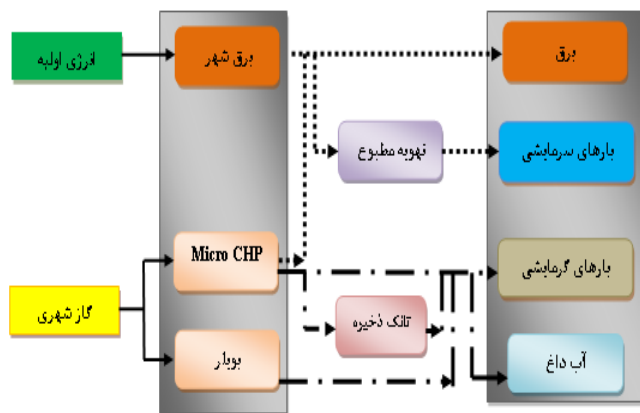
توسعه فناوری Micro CHP را سرعت بخشد، بیان کرده است. براساس تحقیقات انجام شده، می‌توان دریافت که به‌عنوان یکی از ابزارهای نویدبخش برای فائق آمدن بر افزایش انتشار دی‌اکسیدکربن در بخش خانگی سیستم‌های Micro CHP مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. اما تا کنون تحقیقات کمتری در رابطه با عملکرد و تبعات استفاده از سیستم‌های Micro CHP برای ساختمان‌های مسکونی در ایران گزارش شده است.

در این مقاله، دو سیستم Micro CHP که شامل موتورهای گازی و پیل سوختی هستند، مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور بررسی اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی، دو استراتژی عملکردی مختلف برای کمینه کردن هزینه انرژی سالانه و مقدار انتشار دی‌اکسیدکربن سالانه در نظر گرفته شده است. یک مدل ارزیابی و برنامه‌ریزی که در تحقیقات گذشته توسعه داده، برای تحلیل به‌کار رفته است [۴۱].

۲. روش شناسی

۱.۲. مدل سازی سیستم Micro CHP خانگی

شکل (۱) سیستم Micro CHP مورد مطالعه برای کاربردهای خانگی را نشان می‌دهد. سیستم شامل یک دستگاه CHP، یک تانک ذخیره و یک مشعل پشتیبان است. واحد CHP که به وسیله گاز شهری کار می‌کند، بخشی از نیاز برق ساختمان را تأمین می‌کند (که شامل بارهای سرمایشی با استفاده از تهویه مطبوع می‌باشد)، کمبود برق از شبکه تأمین می‌شود. به سبب مشکلات مربوط به اتصال این سیستم‌ها به شبکه و همچنین قراردادهای فروش برق که در ایران وجود دارد، در این مطالعه فروش برق به شبکه در نظر گرفته نشده است، اگرچه باید به‌عنوان یک گزینه خوب برای گسترش Micro CHP در نظر گرفته شود.



شکل (۱): ساختار یک سیستم Micro CHP خانگی

سیستم‌های قدیمی) بیان می‌گردد، همان‌گونه که در معادله (۴) نشان داده شده است.

$$ERR = \frac{E_{CON} - E_{CHP}}{E_{CON}} \times 100\% \quad (4)$$

که در آن، (ERR (Emission Reduction Ratio) نسبت کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن است، E_{CON} و E_{CHP} به ترتیب انتشار سالانه دی‌اکسیدکربن از سیستم‌های سنتی و سیستم Micro CHP هستند.

انتشار سالانه دی‌اکسیدکربن برای سیستم‌های سنتی شامل انتشار دی‌اکسیدکربن ناشی از مصرف گاز طبیعی E_{CON}^{Gas} و انتشار دی‌اکسیدکربن ناشی از تولید برق شبکه E_{CON}^{Ele} است و از رابطه (۵) محاسبه می‌شود. به‌طور مشابه انتشار سالانه دی‌اکسیدکربن از سیستم Micro CHP ترکیب انتشار برق شبکه E_{CHP}^{Ele} و گاز طبیعی برای عملکرد سیستم E_{CHP}^{CGas} و گاز طبیعی برای مشعل پشتیبان E_{CHP}^{BGas} است، همان‌گونه که در معادله (۶) نشان داده شده است.

$$E_{CON} = E_{CON}^{Ele} + E_{CON}^{Gas} \quad (5)$$

$$E_{CHP} = E_{CHP}^{Ele} + E_{CHP}^{CGas} + E_{CHP}^{BGas} \quad (6)$$

۳. مطالعه موردی

۱.۳. تقاضای انرژی

برای انتخاب یک سیستم Micro CHP خانگی مناسب باید در ابتدا اطلاعات دقیقی از بار مصرف‌کنندگان به‌دست آورد. تقاضای انرژی در بخش خانگی می‌تواند به دو بخش تقاضای الکتریکی و تقاضای گرمایشی تقسیم شود که شامل گرمایش فضا، آب گرم و بارهای سرمایشی است. باید توجه کرد که بارهای سرمایشی برای تهویه مطبوع نیز جزء تقاضای الکتریکی است. معمولاً مصارف انرژی از روش اندازه‌گیری مستقیم در محل یا شبیه‌سازی با تعدادی از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی جریان انرژی ساختمان به‌دست می‌آید. در این روش، تقاضای بارهای ساعتی مختلف از ۸۷۶۰ ساعت، پیک بار ساعتی و مجموع بار سالانه برای ساختمان مسکونی مفروض می‌تواند محاسبه شود. در این تحقیق، از نرم‌افزار کریر^۱ برای محاسبه بارهای ساعتی ساختمان مورد مطالعه استفاده شده و با استفاده از اطلاعات موجود در رابطه، با مشخصات ساختمان مورد نظر که یک ساختمان مسکونی مجزا با ۲۵۰ متر مربع مساحت زیر بناست، بارهای ساعتی برای یک روز نمونه از چهار فصل مختلف سال برای تقاضاهای

طول محاسبات ارزیابی کند. از این رو تضمین می‌کند که نتایج به‌دست‌آمده بهینه هستند.

۳.۲. ارزیابی شاخص‌های اقتصادی

اقتصاد یک عامل قطعی و مهم است که باید توجه اصلی را در احداث سیستم‌های Micro CHP به آن معطوف کرد. ارزیابی اقتصادی اطلاعاتی را درباره نحوه استفاده از منابع اقتصادی (سرمایه‌گذاری، سوخت و...) به‌منظور تأمین نیاز مشتریان ارائه می‌دهند. همان‌طور که می‌دانیم، سیستم‌های Micro CHP معمولاً هزینه سرمایه‌گذاری بالاتر و هزینه‌های اجرایی کمتری در مقایسه با سیستم‌های تأمین انرژی معمول که برق را از شبکه و بار گرمایشی را توسط یک بویلر گازی تأمین می‌کنند، دارند. بنابراین در ارزیابی‌های اقتصادی، یک شاخص مهم، نسبت صرفه‌جویی در هزینه به‌کار گرفته می‌شود. این شاخص سوددهی سیستم Micro CHP را بیان می‌کند و به‌صورت نسبت مجموع تفاوت بین هزینه‌های انرژی سیستم Micro CHP و سیستم‌های سنتی به هزینه انرژی سالانه سیستم‌های سنتی بیان می‌شود، همان‌طوری که در معادله (۱) نشان داده شده است.

$$CSR = \frac{C_{CON} - C_{CHP}}{C_{CON}} \times 100\% \quad (1)$$

که در رابطه بالا (CSR (Cost Saving Ratio) نسبت صرفه‌جویی در هزینه (سوددهی سیستم) را نشان می‌دهد. C_{CON} و C_{CHP} هزینه‌های انرژی سالانه از سیستم‌های قدیمی و سیستم Micro CHP هستند که در معادلات (۲) و (۳) به ترتیب نشان داده شده‌اند.

$$C_{CON} = C_{CON}^{Inv} + C_{CON}^{Ele} + C_{CON}^{Gas} \quad (2)$$

$$C_{CHP} = C_{CHP}^{Inv} + C_{CHP}^{Ele} + C_{CHP}^{Gas} \quad (3)$$

که C_{CON}^{Inv} و C_{CON}^{Ele} به ترتیب، هزینه‌های سرمایه‌گذاری سالانه، هزینه خرید برق و گاز شهری برای سیستم‌های مرسوم هستند. به‌طور مشابه C_{CHP}^{Inv} ، C_{CHP}^{Ele} و C_{CHP}^{Gas} هزینه‌های سرمایه‌گذاری سالانه، هزینه برق شبکه و هزینه گاز شهری برای سیستم Micro CHP هستند.

۴.۲. ارزیابی شاخص‌های زیست‌محیطی

به‌عنوان یکی از انگیزه‌های ترویج احداث این سیستم‌ها، عملکرد عالی زیست‌محیطی در کنار جذابیت‌های اقتصادی همیشه مورد انتظار است. در این مطالعه، نسبت کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی سیستم مورد مطالعه استفاده می‌شود که به‌صورت نسبت کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن (اختلاف بین انتشار دی‌اکسیدکربن از سیستم‌های معمول و سیستم Micro CHP) به میزان انتشار از

متوسط و بدون پیک) و همچنین مناطق مختلف گرمسیری و سردسیری تغییر می‌کند.

جدول (۱): تعرفه برق برای ساختمان‌های مسکونی

قیمت برق ($RLS.kWh^{-1}$)	متوسط انرژی مصرفی ماهانه (کیلووات ساعت در ماه)
۴۰۹	۱۰۰ تا ۰
۴۷۷	۲۰۰ تا ۱۰۰
۱۰۲۳	۳۰۰ تا ۲۰۰
۱۸۴۱	۴۰۰ تا ۳۰۰
۲۱۱۴	۵۰۰ تا ۴۰۰
۲۶۶۰	۶۰۰ تا ۵۰۰
۲۹۳۳	مازاد بر ۶۰۰

جداول (۲) و (۳) تعرفه گاز خانگی را در ماه‌های گرم و سرد سال نشان می‌دهند. برای سیستم‌های Micro CHP قیمت گاز با ۲۰ درصد تخفیف محاسبه خواهد شد.

جدول (۲): تعرفه گازبهای خانگی در ماه‌های گرم سال ۱۳۹۴

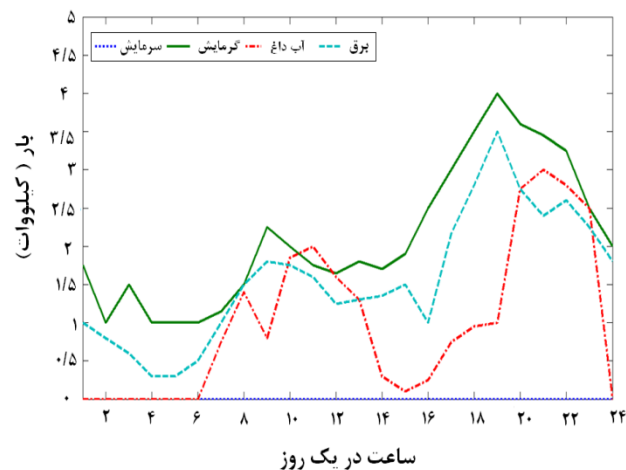
قیمت گاز ($RLS.m^{-3}$)	دامنه (متر مکعب)	دامنه مصرف
۱۰۸۱	۰-۴۵	۱
۱۳۱۱	۴۶-۹۵	۲
۱۶۵۶	۹۶-۱۴۵	۳
۲۱۱۶	۱۴۶-۱۹۵	۴
۲۵۷۶	۱۹۶-۲۴۵	۵
۲۸۰۶	۲۴۶-۲۹۵	۶
۳۱۵۱	۲۹۶-۳۴۵	۷
۳۴۹۶	۳۴۶-۳۹۵	۸
۳۷۲۶	۳۹۶-۴۴۵	۹
۳۹۵۶	۴۴۶-۴۹۵	۱۰
۴۱۸۶	۴۹۶-۵۴۵	۱۱
۴۳۰۱	مازاد بر ۵۴۵	۱۲

*ماه‌های گرم از اول اردیبهشت ماه لغایت ۳۰ مهر ماه است.

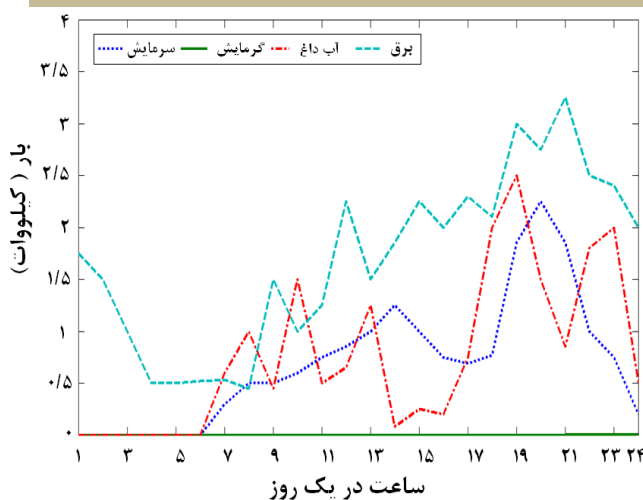
جدول (۳): تعرفه گازبهای خانگی در ماه‌های سرد سال ۱۳۹۴

قیمت گاز ($RLS.m^{-3}$)	دامنه (متر مکعب)	دامنه مصرف
۴۱۴	۲۰۰ تا	۱
۶۹۰	۲۰۱-۳۰۰	۲
۹۶۶	۳۰۱-۴۰۰	۳
۱۲۴۲	۴۰۱-۵۰۰	۴
۱۵۱۸	۵۰۱-۶۰۰	۵
۲۲۰۸	۶۰۱-۷۰۰	۶
۲۶۲۲	۷۰۱-۸۰۰	۷
۳۰۳۶	۸۰۱-۹۰۰	۸
۳۴۵۰	۹۰۱-۱۰۰۰	۹
۳۸۶۴	۱۰۰۱-۱۱۰۰	۱۰
۴۴۱۶	۱۱۰۱-۱۲۰۰	۱۱
۴۸۳۰	مازاد بر ۱۲۰۰	۱۲

گرمایش، سرمایش، آب گرم مصرفی و همچنین تقاضای الکتریکی به دست آمده است. گفتنی است که یک روز نمونه به صورت پروفیل تقاضای انرژی برای یک روز که انتخاب شده است تا نماینده خصوصیات کلی تقاضای انرژی سالانه/فصلی/روزانه و ساعتی خانوارهای هدف باشد، تعریف می‌شود. عموماً در یک تحلیل، مجموعه‌ای از روزهای نمونه برای توصیف تمام جنبه‌های تقاضا به کار می‌رود. شکل‌های (۲) و (۳) متوسط بار ساعتی مصرف‌کنندگان را در دو فصل گرمایشی و سرمایشی نشان می‌دهند.



شکل (۲): متوسط بار ساعتی مصرف‌کنندگان در فصل گرمایشی



شکل (۳): متوسط بار ساعتی مصرف‌کنندگان در فصل سرمایشی

۲.۳. تعرفه‌های برق و گاز

تعرفه‌های گاز و برق فاکتورهای کلیدی هستند که فواید اقتصادی نصب سیستم Micro CHP را نشان می‌دهند. جدول (۱) تعرفه برق را برای ساختمان‌های مسکونی با توجه به میزان انرژی مصرفی نشان می‌دهد. برای این نوع تعرفه‌ها هزینه برق در فصول مختلف (که ماه‌های تابستانی شامل تیر تا شهریور است)، دوره بار (بر پیک،

۴. انواع سیستم‌های Micro CHP

معمولاً فناوری‌های Micro CHP که از نظر تجاری در دسترس‌اند، شامل موتورهای احتراق داخلی، موتورهای استرلینگ^۱، میکروتوربین‌ها و پیل‌های سوختی هستند. در این میان موتورهای استرلینگ عمدتاً در برخی از کشورهای اروپایی شناخته شده‌اند. از طرف دیگر، پیل‌های سوختی در ژاپن و آمریکا بسیار شناخته شده‌ترند. در این مطالعه، دو نمونه Micro CHP که موتور گازی و پیل سوختی نامیده می‌شوند، بررسی شده‌اند. جزئیات فنی و اطلاعات هزینه در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول (۴): خصوصیات سیستم‌های Micro CHP [۴۲]

مشخصه مورد نظر	توربین گازی	پیل سوختی
ظرفیت نامی (کیلووات)	۱	۱
هزینه سرمایه‌گذاری (میلیون ریال)	۲۴۰	۲۷۰
راندمان الکتریکی (%)	۲۰	۳۷
راندمان حرارتی (%)	۶۵	۵۰
طول عمر (سال)	۱۰	۱۰
حجم تانک ذخیره (لیتر)	۱۵۰	۲۰۰

۵. فرضیات دیگر

در این مطالعه، یک سیستم Micro CHP خانگی در نظر گرفته شده است که در ترکیب با برق شبکه و تهویه مطبوع نیازهای مختلف انرژی را تأمین می‌کند. علاوه بر ویژگی‌های فنی این دو گزینه Micro CHP مورد بررسی، داده‌های مالی، زیست‌محیطی و فنی دیگری نیز برای این تحلیل فرض شده‌اند که در جدول (۵) خلاصه شده‌اند.

جدول (۵): داده‌های فرضی دیگر برای این تحلیل

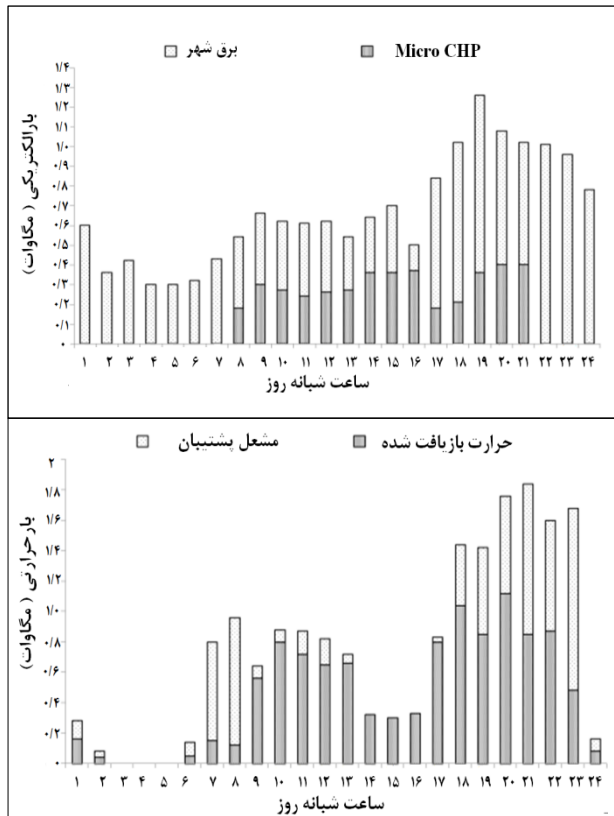
مشخصه مورد نظر	داده مفروض	مقدار
برق شهر	راندمان (%)	۳۶
گاز طبیعی	شدت کربن (kg.kWh^{-1})	۰/۳۷
تهویه مطبوع	شدت کربن (kg.m^{-3})	۲/۳۵
مشعل پشیمان	ضریب عملکرد (COP)	۴
تانک ذخیره	راندمان (%)	۸۰
دیگر داده‌ها	طول عمر (سال)	۲۰
	ضریب اتلاف حرارت (%)	۱
	نرخ تنزیل (%)	۱۰

۶. نتایج شبیه‌سازی

۱.۶. استراتژی‌های عملکردی بهینه

۱.۱.۶. Micro CHP با موتور گاز سوز

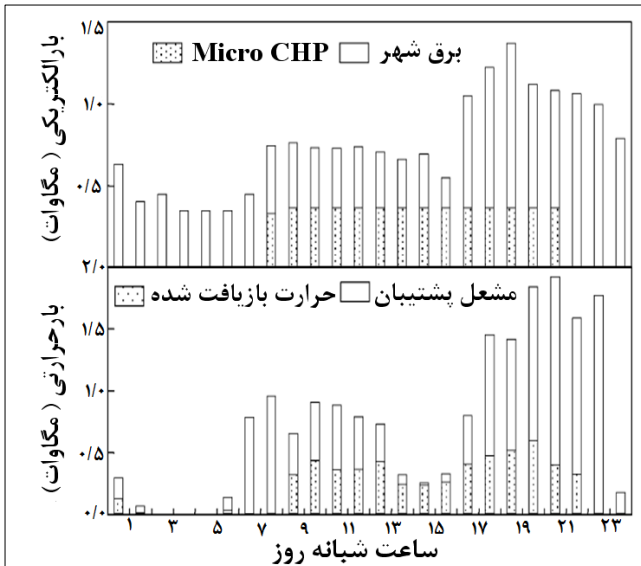
کمترین هزینه انرژی: در این گزینه، یک سیستم یک کیلووات با موتور گازی در نظر گرفته شده است تا هزینه انرژی سالانه را مینیمم کند. تقاضای ساعتی برق و حرارت و مقدار برق و حرارت تولیدی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل (۴): تعادل ساعتی برق و حرارت با موتور گازسوز در عملکرد کمترین هزینه انرژی

با توجه به شکل (۴) سیستم Micro CHP از ساعت ۱۲ شب تا ۷ صبح خارج از عملکرد قرار می‌گیرد. و این کار به خاطر هزینه نسبتاً پایین برق شبکه در طول دوره خارج از پیک است. فواید بازیافت حرارت نمی‌تواند هزینه بالای تولید توان خروجی موتور گازی را جبران کند. بنابراین از دیدگاه اقتصادی، ترجیح داده می‌شود که برق از شبکه خریداری شود به جای اینکه در محل تولید گردد. در این سناریو تنها ۲۴٪ از مجموع تقاضای برق در محل تولید شده و تقریباً ۶۰٪ از بار حرارتی به وسیله بازیافت حرارت از سیستم Micro CHP تأمین می‌شود.

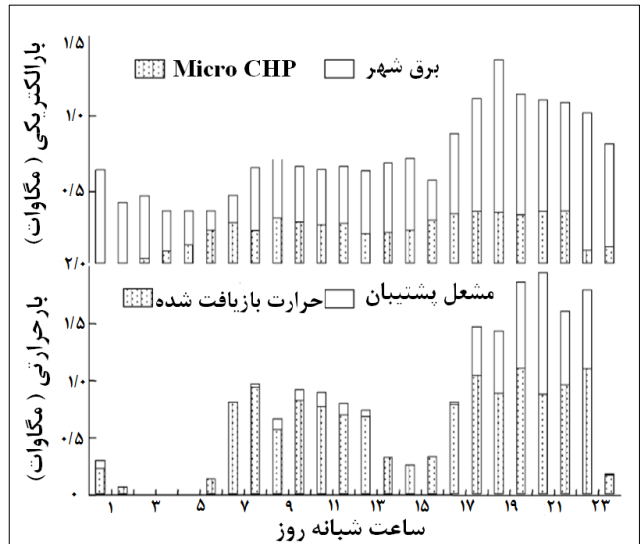
حداقل انتشار دی اکسید کربن: گزینه دومی که در نظر گرفته شده، عملکرد دستگاه برای رسیدن به کمترین میزان انتشار دی اکسید کربن سالانه است. شکل (۵) تعادل تقاضا- تولید برق و حرارت را نشان می دهد.



شکل (۶): تعادل ساعتی برق و حرارت با پیل سوختی در عملکرد کمترین هزینه انرژی

مشابه با سیستم موتورهای گازی (شکل ۴) سیستم پیل سوختی در طول ساعاتی که پیک نداریم، کار نخواهد کرد. به هر حال در طول روز (شامل ساعات پیک و پیک متوسط) تقریباً در تمامی زمانها با ظرفیت نامی راه اندازی می شود و این به دلیل راندمان بالای تولید توان دستگاه پیل سوختی در مقایسه با موتورهای گازی است. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که استفاده از موتور گازی به جای پیل سوختی می تواند ساعت کارکرد سیستم های Micro CHP را طولانی کند. به هر حال حتی اگر دستگاه پیل سوختی با ظرفیت نامی کار کند، تنها کمتر از نیمی از مجموع برق مورد نیاز را تأمین می کند. علاوه بر این بر طبق پروفیل های نشان داده شده در شکل (۶) تقریباً ۳۰٪ از بار حرارتی به وسیله بازیافت حرارت تأمین می شود. در مقایسه با نتایج به دست آمده از موتورهای گازی می توان نتیجه گرفت که سیستم های پیل سوختی برق بیشتر اما حرارت کمتری را تأمین می کنند. این موضوع در تحقیقات گذشته نیز تأیید شده است [۳۶].

حداقل انتشار دی اکسید کربن: برای این گزینه فرض می شود که دستگاه پیل سوختی بدین منظور راه اندازی می شود که انتشار دی اکسید کربن را حداقل کند. شکل (۷) تعادل ساعتی برق و حرارت را نشان می دهد.



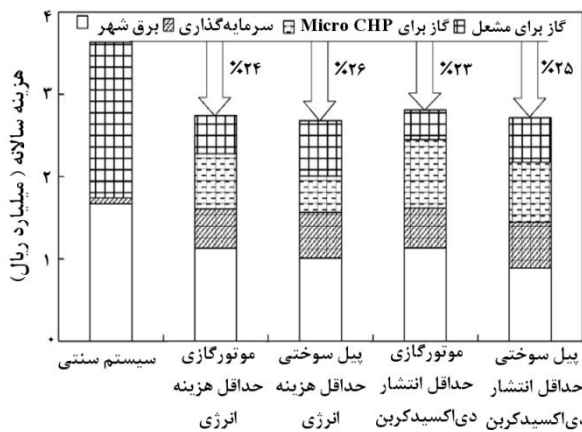
شکل (۵): تعادل ساعتی برق و حرارت با موتور گازسوز در عملکرد کمترین مقدار انتشار دی اکسید کربن سالانه

دستگاه Micro CHP در طول روز با ظرفیت بالا و در طول شب با ظرفیت پایین کار می کند و این به سبب بار حرارتی نسبتاً پایین در طول شب است. سیستم Micro CHP می تواند تقریباً ۳۰ درصد از برق مورد نیاز منزل را تأمین کند که بیشتر از حالت عملکرد با مینیمم هزینه سالانه است. به این معنی که گاهی اوقات بهینه است که سیستم Micro CHP از دیدگاه فواید زیست محیطی راه اندازی شود، اگرچه از لحاظ اقتصادی سودمند نباشد. علاوه بر این از شکل (۵) می توان دریافت که تقریباً ۷۵ درصد (۱۵٪ بیشتر از عملکرد مینیمم هزینه سالانه) بار حرارتی به وسیله بازیافت حرارت اتلافی تأمین می شود. در اواسط شب زمانی که بار حرارتی کمی نیاز است، سیستم CHP هنوز با ظرفیت پایین تر کار می کند، حرارت برای ساعت های آتی در طی روز ذخیره می شود. بنابراین با یک تانک ذخیره نیاز حرارت برای گرمایش فضا و آب گرم در زمان پیک می تواند کاهش یافته و از انرژی حرارتی بهتر بهره برداری شود.

۲.۱.۶. Micro CHP با پیل سوختی

کمترین هزینه انرژی: در این سناریو، سیستم Micro CHP با پیل سوختی به کار می رود تا هزینه انرژی سالانه را مینیمم کند. تعادل برق و حرارت در شکل (۶) نشان داده شده است.

سوختی با عملکرد مینیمم هزینه، کمترین هزینه انرژی سالانه را دارد که تقریباً ۲۶ درصد کمتر از سیستم‌های انرژی سنتی است. علاوه بر این سیستم Micro CHP پیل سوختی اگرچه هزینه سرمایه‌گذاری بالاتری دارد، راندمان اقتصادی بالاتری نسبت به موتورهای گازی دارد و این به دلیل راندمان تولید بالاتر است که منجر به مصرف سوخت کمتر برای دستگاه Micro CHP می‌شود. از طرف دیگر، همان‌گونه که انتظار می‌رود عملکرد با مینیمم هزینه سالانه بسیار اقتصادی‌تر از عملکرد با حداقل انتشار دی‌اکسیدکربن سالانه است.

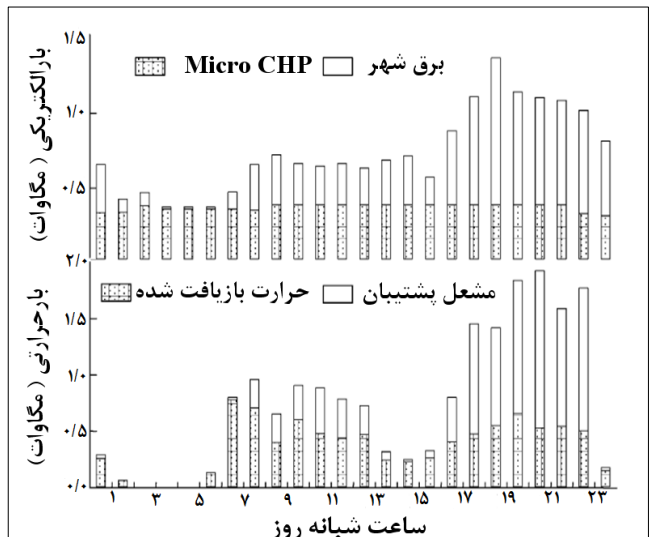


شکل (۸): هزینه سالانه انرژی برای انواع سیستم‌های تولید انرژی

اقتصاد سیستم‌های Micro CHP به شدت وابسته به مقدار مصرف انرژی خانگی، به ویژه تقاضای انرژی حرارتی است. در حقیقت، علاوه بر بار انرژی و اندازه سیستم، تعدادی از فاکتورهای بازار (هزینه برق و گاز) و فاکتورهای سیاسی (فروش برق به شبکه) نیز می‌تواند بر اقتصاد Micro CHP تأثیرگذار باشند.

۳.۶. ارزیابی‌های زیست‌محیطی

همان‌گونه که پیش از این بحث شد، کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن اصلی‌ترین دلیل توجه به ابداع سیستم‌های Micro CHP است. شکل (۹) مقدار انتشار سالانه سیستم‌های مختلف را نشان می‌دهد. پذیرش تمام انواع سیستم‌های Micro CHP فواید زیست‌محیطی دارد، اگرچه این جنبه در مقایسه با فواید اقتصادی که در بالا نشان داده شد، حاشیه‌ای به نظر می‌رسد. سیستم پیل سوختی با عملکرد مینیمم انتشار موجب کاهش بزرگی در انتشار دی‌اکسیدکربن می‌شود که تقریباً ۹ درصد کمتر از سیستم سنتی است. برای موتورهای گازی در هر دو مدل عملکردی، کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن مشهود نیست (بین ۱ تا ۲ درصد). این به دلیل مصرف سوخت نسبتاً بالای موتورهای گازی و اتلاف حرارت از تانک ذخیره است.



شکل (۷): تعادل ساعتی حرارت و برق با سیستم پیل سوختی در عملکرد حداقل انتشار دی‌اکسیدکربن

همان‌گونه که در شکل (۷) نشان داده شده است، سیستم پیل سوختی تقریباً در تمامی زمان‌ها با ظرفیت نامی کار می‌کند. فقط در برخی از زمان‌های بدون پیک، به سبب قیمت نسبتاً پایین برق، با بار جزئی راه‌اندازی می‌شود. در مجموع تقریباً ۴۹ درصد از برق در محل تولید می‌شود. به هر حال همان‌گونه که در شکل (۷) نشان داده شده است، این نوع از سیستم‌های Micro CHP به دلیل نسبت حرارت به برق نسبتاً پائینی که دارند، بار حرارتی کمتری را نسبت به انواع موتورهای گاز سوز عرضه می‌کنند. تقریباً ۵۰ درصد از بار حرارتی توسط سیستم Micro CHP تأمین می‌شود. در طول دوره‌هایی که بار حرارتی پایین است، اکثر حرارت از محل بازیافت حرارت‌های اتلافی تأمین می‌شود، در زمان‌های دیگر مشعل پشتیبان حرارت را تأمین می‌کند. چنانچه در ساعاتی از شبانه‌روز بار حرارتی بسیار پایین و حتی صفر باشد، دستگاه Micro CHP همچنان با ظرفیتی نزدیک ظرفیت نامی کار کرده و حرارت بازیافت شده در تانک ذخیره حرارت، ذخیره شده و در ساعات مورد نیاز آزاد می‌شود. اما به ناچار این کار موجب اتلاف حرارت می‌شود. تنها تقریباً ۷۸ درصد از حرارت بازیافت‌شده برای مصرف‌کننده نهایی قابل استفاده خواهد بود.

۲.۶. ارزیابی اقتصادی

در این بخش، جنبه‌های اقتصادی هر کدام از سناریوهایی که در بالا شرح داده شد، ارزیابی خواهد شد و نتایج با سیستم‌های سنتی مقایسه خواهند شد. شکل (۸) هزینه انرژی سالانه را برای سیستم‌های مختلف نشان می‌دهد. می‌توان فهمید که ابداع این دو نوع از سیستم‌های Micro CHP با مدهای عملکردی متفاوت منجر به کاهش قابل ملاحظه‌ای در هزینه‌های انرژی می‌شود. سیستم پیل

۸. نتیجه گیری

در این مطالعه، دو سیستم Micro CHP با مدهای عملکردی متفاوت از هر دو دیدگاه اقتصادی و زیست محیطی مورد بررسی قرار گرفته اند. یک ساختمان مسکونی نمونه برای مطالعه موردی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج شبیه سازی، نتایج زیر به دست آمده است:

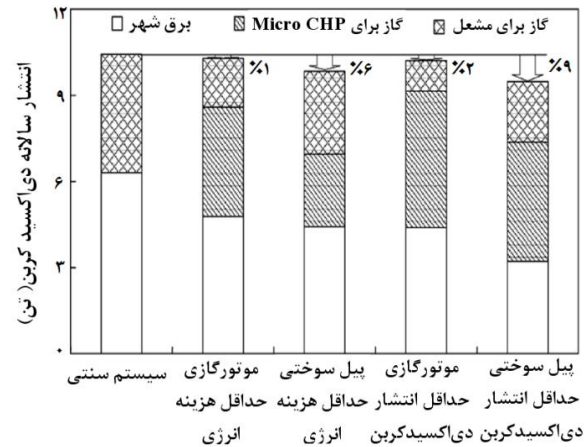
۱. با عملکرد مینیمم هزینه سالانه، هم موتور گازی و هم سیستم پیل سوختی فقط در طول روز کار می کنند. سیستم پیل سوختی در مقایسه با سیستم موتور گازی برق بیشتر و حرارت کمتری تولید می کند.

۲. با عملکرد مینیمم انتشار دی اکسید کربن سالانه، سیستم پیل سوختی تقریباً در تمامی زمانها با ظرفیت نامی راه اندازی می شود، اما سیستم موتور گازی همیشه بار جزئی است، به ویژه در طی ساعات شب.

۳. از دیدگاه اقتصادی، سیستم پیل سوختی با عملکرد مینیمم هزینه، گزینه بهینه برای ساختمانهای مسکونی است، با نرخ کاهش هزینه ای در حدود ۲۶ درصد. این امر موجب می شود که برگزیدن سیستم های موتور گازی به دلیل هزینه اولیه پایینشان مورد تأمل قرار گیرد.

۴. از دیدگاه زیست محیطی، سیستم پیل سوختی با عملکرد مینیمم انتشار دی اکسید کربن بهترین نتایج را برای کاهش انتشار دی اکسید کربن با نرخ کاهش ۹ درصد نشان داد.

عموماً می توان دریافت که تولید سیستم های Micro CHP موجب مزایای اقتصادی زیادی می شود. هرچند به نظر می رسد که برای فائق آمدن بر گرم شدن جهانی زمین، مزایای زیست محیطی سیستم های Micro CHP به عنوان یکی از ابزارها کافی نباشد، به ویژه برای موتورهای گازی. بنابراین، در آینده، برخی از فعالیت های ابداعی باید به کار برده شود. برای مثال، برخی منابع انرژی تجدیدپذیر، مانند انرژی بیوماس، می توانند به عنوان سوخت سیستم های Micro CHP استفاده شود که منجر به کاهش چشمگیری در میزان انتشار دی اکسید کربن می شود.



شکل (۹): انتشار سالانه دی اکسید کربن برای انواع سیستم های انرژی خانگی

۷. مباحث دیگر

با توجه به نتایج شبیه سازی نشان داده شده در بالا، در دو مدل عملکردی که جنبه های اقتصادی و زیست محیطی در نظر گرفته شده است، سیستم های Micro CHP پیل سوختی عملکرد بهتری نسبت به موتورهای گازی نشان دادند.

از دیدگاه فنی، پیل سوختی بر مبنای یک واکنش الکتروشیمیایی کار می کند؛ لذا درگیر بخش های متحرک، اغتشاش (نویز) و لرزش نمی شود و این فاکتورها آن را برای کاربردهای خانگی بسیار قابل قبول تر می کند.

از نظر جنبه های اقتصادی: با یک نسبت حرارت به برق پایین تر، پیل سوختی بهتر می تواند با ساختمان های مسکونی جدید هماهنگ شود که به نظر می رسد این ساختمانها در نتیجه توسعه عایق کاری تقاضای کمتری برای حرارت داشته باشند. همان طوری که در بخش ۶ نشان داده شد، تعادل بهتر بین عرضه و تقاضا به کاهش تلفات انرژی و در نتیجه فواید اقتصادی منجر می شود.

از دیدگاه جنبه های زیست محیطی: پیل سوختی جذاب ترین گزینه از دیدگاه کاهش انتشار دی اکسید کربن است. از طرفی می تواند با راندمان بسیار بالایی کار کند و از طرف دیگر، استفاده از هیدروژن به عنوان سوخت تغذیه، منجر به کاهش انتشار دی اکسید کربن تا حد صفر می شود. حتی اگر در غیاب هیدروژن از گاز شهری استفاده شود، سیستم پیل سوختی عملکرد زیست محیطی عالی را نشان می دهد.

مراجع

- [1] Lopes, L., Hokoi, S., Miura, H., Shuhei, K., "Energy Efficiency and Energy Savings in Japanese Residential Buildings—Research Methodology and Surveyed Results," Energy and Buildings, Vol. 37, No.7, pp.698-706, 2005.
- [2] Ashina, S., Nakata, T., "Energy-Efficiency Strategy for CO₂ Emissions in a Residential Sector in Japan," Applied Energy, Vol.85, No.2,3, pp.101-114, 2008.
- [3] National Institute for Environmental Studies, "National Greenhouse Gas Inventory Report of Japan," Ministry of the Environment, Japan, 2009.
- [4] EDMC, "Handbook of Energy & Economic Statistics in Japan," The Energy Conservation Center, Japan, 2009.
- [5] Systems Analysis Group, "International Comparisons of Energy Efficiency (Sectors of Electricity Generation, Iron and Steel, Cement)," Research Institute of Innovation Technology for the Earth, Japan, 2008.
- [6] Dash, G.H., "Investigation of a Combined Heat and Power Fuel Cell System for Small Scale Residential Applications," Master thesis, North Carolina State University, USA, 2003.
- [7] Kobayashi, K., Kawamura, M., Takahashi, T., Nishizaka, Y., Nishizaki, K., "Development of PEFC Co-Generation System for Japanese Residential Market," PEFC Project

- Technology Development Department, Tokyo Gas Co., Ltd., Japan, 2005.
- [8] 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, 2007.
- [9] Small M., "The Scope for Micro, Utility Week," 2003.
- [10] New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), "Move to a Distributed Generation in Germany," NEDO Oversea Report, Japan, 2003.
- [11] Crozier-Cole, T., Jones, G., "The Potential Market for Micro CHP in the UK," Report to the Energy Saving Trust, 2002.
- [12] Lempereur, D., Tesoriero, R., "A Macro Market for Micro-CHP," *Home Energy*, 2008.
- [13] Micro-CHP Technologies Roadmap Workshop, "The Micro-CHP Technologies Roadmap—Meeting 21st Century Residential Energy Needs," Department of Energy, USA, 2003.
- [14] Higashiguchi, S., Hirai, K., Shinke, N., Ibe, S., Yamazaki, O., Yasuhara, K., Hamabashiri, M., Koyama, Y., Tabata, T., "Development of Residential PEFC Cogeneration Systems at Osaka Gas," Residential Cogeneration Development Department, Osaka Gas Co., Ltd., Japan, 2005.
- [15] Aki, H., "The Penetration of Micro CHP in Residential Dwellings in Japan," IN: Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007.
- [16] Takahiro, K., "Development Strategies Toward Promotion and Expansion of Residential Fuel Cell Micro-CHP System in Japan," Osaka Gas Co., Japan, 2008.
- [17] Ruan, Y., "Integration Study on Distributed Energy Resource and Distribution System," Ph.D. thesis, Faculty of Environmental Engineering, The University of Kitakyushu, Japan, 2006.
- [18] Ballard Power Systems Inc. Press, Ballard helps to power the future in Japan," *The Historic Launch of Residential Cogeneration Systems*," Ballard Power Systems Inc., Canada, 2005.
- [19] Harrison, J., Redford, S., "Domestic CHP: What are the Benefits?," A Scoping Study to Examine the Benefits and Impacts of Domestic Scale CHP in the UK, EA Technology Ltd., UK, 2001.
- [20] El-Sharkh, M.Y., Rahman, A., Alam, M.S., Byrne, P.C., Sakla, A.A., Thomas, T., "A Dynamic Model for a Stand-Alone PEM Fuel Cell Power Plant for Residential Application," *Journal of Power Sources*, Vol.138, No.1,2, pp.199-204, 2004.
- [21] Cao, Y.Li., G, Yu, Q., "Daily Operation Optimization of a Residential Molten Carbonate Fuel Cell Power System Using Genetic Algorithm," *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol.14, No.3, pp.349-356, 2006.
- [22] Ferraro, M., Sergi, F., Brunaccini, G., Dispenza, G., Andaloro, L., Antonucci, V., "Demonstration and Development of a Polymer Electrolyte Fuel Cell System for Residential Use," *Journal of Power Sources*, Vol.193, No.1, pp.342-348, 2009.
- [23] Gigliucci, G., Petrucci, L., Cerelli, E., Garzisi, A., Mendola, A., "Demonstration of a Residential CHP System Based on PEM Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, Vol. 131, No.1, 2, pp.62-68, 2004.
- [24] Gencoglu, M.T., "Ural Design of a PEM Fuel Cell System for Residential Application," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, No.12, pp. 5242-5248, 2009.
- [25] Kazempoor, P., Dorer, V., Ommi, F., "Evaluation of Hydrogen and Methane-Fuelled Solid Oxide Fuel Cell Systems for Residential Applications: System Design Alternative and Parameter Study," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.34, No.20, pp. 8630-8644, 2009.
- [26] Braun, R.J., Klein, S.A., Reindl, D.T., "Evaluation of System Configurations for Solid Oxide Fuel Cell-Based Micro-Combined Heat and Power Generators in Residential Applications," *Journal of Power Sources*, Vol.158, No.2, pp.1290-1305, 2006.
- [27] Nig, P.Ko., Weber, A., Lewald, N., Aicher, T., Rissen, L.Jo., Ivers-Tiffe, E., Szolak, R., Brendel, M., Kaczerowski, J., "Testing and Model-Aided Analysis of a 2 kWel PEMFC CHP System," *Journal of Power Sources*, Vol.145, No.2, pp. 327-335, 2005.
- [28] Inaka, H., Sumi, S., Nishizaki, K., Tabata, T., Kataoka, A., Shinkai, H., "The Development of Effective Heat and Power Use Technology for Residential in a PEFC Cogeneration System," *Journal of Power Sources*, Vol.106, No.1, 2, pp.60-67, 2002.
- [29] Peacock, A.D., Newborough, M., "Impact of Micro-CHP Systems on Domestic Sector CO₂ Emissions," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, No.17, 18, pp.2653-2676, 2005.
- [30] Dorer, V., Weber, A., "Energy and CO₂ Emissions Performance Assessment of Residential Micro-Cogeneration Systems with Dynamic Whole-Building Simulation Programs," *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, No.3, pp.648-657, 2009.
- [31] Aussant, C.D., Fung, A.S., Ugursal, V.I., Taherian, H., "Residential Application of Internal Combustion Engine Based Cogeneration in Cold Climate—Canada," *Energy and Buildings*, Vol.41, No.12, pp.1288-1298, 2009.
- [32] Hawkes, A.D., Brett, D.J.L., Brandon, N.P., "Fuel Cell Micro-CHP Techno-Economics: part 1 Model Concept and Formulation," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, No.23, pp.9545-9557, 2009.
- [33] Hawkes, A.D., Brett, D.J.L., Brandon, N.P., "Fuel Cell Micro-CHP Techno-Economics: part 2—Model Application to Consider the Economic and Environmental Impact of Stack Degradation," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.34, No.23, pp. 9558-9569, 2009.
- [34] Houwing, M., Ajah, A.N., Heijnen, P.W., Bouwmans, I., Herder, P.M., "Uncertainties in the Design and Operation of Distributed Energy Resources: The Case of Micro-CHP Systems," *Energy*, Vol. 33, No.10, pp.1518-1536, 2008.
- [35] Onovwiona, H.I., Ismet Ugursal, V., Fung, A.S., "Modeling of Internal Combustion Engine Based Cogeneration Systems for Residential Applications," *Applied Thermal Engineering*, Vol.27, No.5, 6, pp. 848-861, 2007.
- [36] 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, 2007.
- [37] Ehyaei, M.A., Bahadori, M.N., "Selection of Micro Turbines to Meet Electrical and Thermal Energy Needs of Residential Buildings in Iran," *Energy and Buildings*, Vol.39, No.12, pp.1227-1234, 2007.
- [38] Boait, P.J., Rylatt, R.M., Stokes, M., "Optimization of Consumer Benefits from Micro Combined Heat and Power," *Energy and Buildings*, Vol.38, No.8, pp.981-987, 2006.
- [39] Dorer, V., Weber, R., Weber, A., "Performance Assessment of Fuel Cell Micro-Cogeneration Systems for Residential Buildings," *Energy and Buildings*, Vol.37, No.11, pp.1132-1146, 2005.
- [40] Watson, J., Sauter, R., Bahaj, B., James, P., Myers, L., Wing, R., "Domestic Micro Generation: Economic, Regulatory and Policy Issues for The UK," *Energy Policy*, Vol.36, No.8, pp.3095-3106, 2008.
- [41] Ren, H., Gao, W., Ruan, Y., "Optimal Sizing for Residential CHP System," *Applied Thermal Engineering*, Vol.28, No.5, 6, pp.514-523, 2008.
- [42] Saibu Gas Co., Ltd. Available at: <http://www.saibugas.co.jp>, 2015.