نشریه علمی‌پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی
سال پنجم، شمارهٔ چهارم/ زمستان ۱۳۹۴/ صفحه ۲ـ۱۱

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[۱] (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 سرمایش به‌کار رود، برق تولیدی نیز در منزل استفاده می‌شود. در این مقاله، عملکرد دو نمونه Micro CHP موتور گازی و پیل سوختی برای ساختمان های مسکونی تحلیل می‌شود. برای هریک از تأسیسات دو شیوهٔ عملکردی متفاوت که شامل مینیمم کردن هزینهٔ عملکردی و مینیمم کردن انتشار آلاینده‌هاست، در نظر گرفته شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که سیستم‌های پیل سوختی گزینهٔ بهتری برای ساختمان‌های مسکونی مورد مطالعه از هر دو منظر اقتصادی و زیست‌محیطی می‌باشند. در این سیستم‌ها هزینهٔ انرژی سالانه تقریباً ۲۶ درصد کاهش یافته است. از طرف دیگر، انتشار سالانهٔ دی‌اکسیدکربن تقریباً ۹ درصد کاهش یافته است.

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

---

* نویسندهٔ مسئول

1. Micro Combined Heat and Power

۱. مقدمه

در سال ۲۰۰۷، مجموع گازهای گل‌خانه‌ای شمرده شده تقریباً معادل ۱/۳ میلیون تن کربن بوده که در مقایسه با سال ۱۹۹۰، ۱۲/۲درصد افزایش داشته است. در این میان، همگام با کاهش انتشار از بخش صنعتی، انتشار گازهای گلخانه‌ای از بخش خانگی ۱۰/۸درصد افزایش یافته است (۶۲/۷ میلیون تن) [۱ـ۴]. براساس این سوابق، سیستم‌های تولید انرژی دوستدار محیط‌زیست در بخش خانگی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند.

در کنار سیستم‌های فتوولتائیک متصل به شبکه[1] 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 تلف‌شده 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 مولفهٔ اصلی در برنامهٔ 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 انجام‌شده 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 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 به‌جای موتورهای گاز سوز که پیش‌تر توسعه یافته بودند، سیستم‌های پیل سوختی خانگی بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۴ـ۱۶].

برای اینکه استفاده از Micro CHP برای مصرف‌کنندهٔ نهایی آسان باشد، باید خصوصیاتی مانند قیمت پایین و عملکرد آسان داشته باشد [۱۷ـ۱۹]. تحقیقات عملی و تجربی مختلفی بر سیستم‌های Micro CHP به‌ویژه سیستم‌های پیل سوختی میکرو انجام شده است [۲۰ـ۲۸]. اما نکتهٔ مهم این است که توجهات نباید تنها بر خود سیستم معطوف شود، بلکه همچنین بر هماهنگ‌سازی بهینه بین خروجی سیستم و پروفیل بار مصرف‌کنندهٔ نهایی و همچنین فواید اقتصادی و زیست‌محیطی متناظر باید در نظر گرفته شود. پیکوک و نیوبوروگ [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 درنظرگرفتن 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 ذخیرهٔ برق و حرارت نیز دارند، عرضه کرده است. هاوکیس و لیچ [۳۶] استراتژی عملکرد مقرون‌به‌صرفه را برای سیستم‌های Micro CHP خانگی، با مقایسهٔ استراتژی‌های عملکردی پیگرد الکتریکی و پیگرد حرارتی مورد مطالعه قرار دادند. احیایی و بهادری [۳۷] امکان‌پذیری پذیرش میکرو توربین‌های گازی را برای برآورده کردن تمام نیاز انرژی ساختمان‌های مسکونی ایران با درنظرگرفتن سایر اقدامات حفاظت از انرژی مورد مطالعه قرار دادند. بوایت [۳۸] با استفاده از مدل تجزیه و تحلیل نشان داد که کاربرد سیستم‌های Micro CHP نه‌تنها به خواص انرژی بلکه همچنین به شیوهٔ زندگی و دیگر تصمیمات ذهنی حساس است. دورر [۳۹] عملکرد سیستم‌های Micro CHP پیل‌سوختی جایگزین را برای ساختمان‌های مسکونی مختلف ارزیابی کرد. واتسون [۴۰] سیاست‌های سرمایه‌گذاری و توصیه‌های قانونی را که می‌تواند فرایند

1. Photo Voltaic

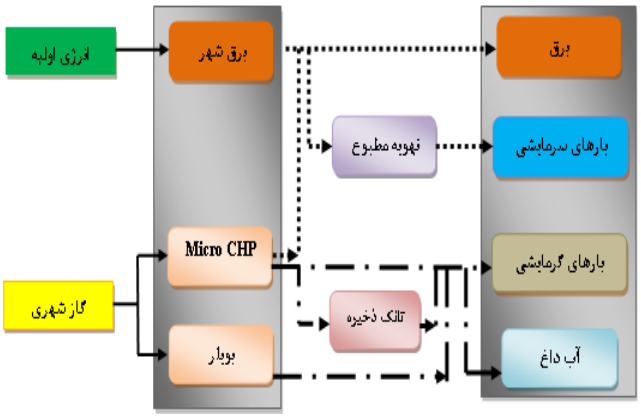
توسعهٔ فناوری Micro CHP را سرعت بخشد، بیان کرده است. براساس تحقیقات انجام‌شده، می‌توان دریافت که به‌عنوان یکی از ابزارهای نویدبخش برای فائق آمدن بر افزایش انتشار دی‌اکسیدکربن در بخش خانگی سیستم‌های Micro CHP مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. اما تا کنون تحقیقات کمتری در رابطه با عملکرد و تبعات استفاده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

در این مقاله، دو سیستم Micro CHP که شامل موتورهای گازی و پیل‌سوختی هستند، مورد مطالعه قرار گرفته است. به‌منظور بررسی اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی، دو استراتژی عملکردی مختلف برای کمینه کردن هزینهٔ 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. روش‌شناسی

۱.۲. مدل‌سازی 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 به‌وسیلهٔ گاز شهری کار می‌کند، بخشی از نیاز برق ساختمان را تأمین می‌کند (که شامل بارهای سرمایشی با استفاده از تهویهٔ مطبوع می‌باشد)، کمبود برق از شبکه تأمین می‌شود. به‌سبب 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 گزینهٔ خوب برای گسترش Micro CHP در نظر گرفته شود.



شکل (۱): ساختار یک سیستم Micro CHP خانگی

حرارت بازیافت‌شده 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

به‌منظور 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 بررسی‌شده، هزینه‌های انرژی (قیمت برق و گاز شهری) و خصوصیات عملکردی دستگاه Micro CHP، یک مدل فنی اقتصادی توسعه داده شده است [۴۱]. درحالی‌که تعادل بین عرضه و تقاضا، سهم منابع و هزینه‌ها (هزینهٔ اولیه و هزینه‌های عملکردی)، برنامهٔ 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، به‌منظور اعتبارسنجی سیستم Micro CHP از جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی، تابع هدفی توسعه یافته که شامل دو مد عملکردی متفاوت است؛ یعنی برای مینیمم کردن هزینهٔ انرژی سالانه و برای مینیمم کردن انتشار دی‌اکسیدکربن سالانه به‌کار خواهد رفت.

در روش اول، واحد راه‌اندازی می‌شود تا هزینهٔ انرژی سالانه را مینیمم کند که شامل تحلیل هزینهٔ سرمایه‌گذاری سیستم، هزینه‌های عملیاتی و مدیریتی، هزینهٔ سوخت و... است. فرض می‌شود سیستم Micro CHP توان عملکرد بین ۰ تا ۱۰۰درصد، 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 سالانهٔ دی‌اکسیدکربن ترکیبی از انتشار احتراق گاز طبیعی و انتشار از برق شبکه است.

به‌منظور بهره‌برداری بهینه، یک مسئله برنامه‌ریزی خطی اعداد مختلط توسعه داده شده است که می‌تواند به‌وسیلهٔ نرم‌افزار LINGO با استفاده از روش شاخه و کران یا با روش سیمپلکس[1] حل شود. این روش‌ها می‌تواند کران پایین تابع هدف را به‌وسیلهٔ تقریب خطی و در

1. Simplex Method

طول محاسبات ارزیابی کند. ازاین‌رو 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 دربارهٔ نحوهٔ استفاده از منابع اقتصادی (سرمایه‌گذاری، سوخت و...) به‌منظور تأمین نیاز مشتریان ارائه می‌دهند. همان‌طور که می‌دانیم، سیستم‌های Micro CHP معمولاً هزینهٔ 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 سیستمMicro CHP و سیستم‌های سنتی به هزینهٔ انرژی سالانهٔ سیستم‌های سنتی بیان می‌شود، همان‌طوری که در معادلهٔ (۱) نشان داده شده است.

$$CSR = \frac{C_{CON} - C_{CHP}}{C_{CON}} \times 100\% \qquad (۱)$$

که در رابطه بالا (Cost Saving Ratio) CSR 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) به‌ترتیب نشان داده شده‌اند.

$$C_{CON} = C_{CON}^{Inv} + C_{CON}^{Ele} + C_{CON}^{Gas} \qquad (۲)$$

$$C_{CHP} = C_{CHP}^{Inv} + C_{CHP}^{Ele} + C_{CHP}^{Gas} \qquad (۳)$$

که C_{CON}^{Inv} و C_{CON}^{Ele} به‌ترتیب، هزینه‌های سرمایه‌گذاری سالانه، هزینهٔ خرید برق و گاز شهری برای سیستم‌های مرسوم هستند. به‌طور مشابه C_{CHP}^{Inv} ، C_{CHP}^{Ele} و C_{CHP}^{Gas} هزینه‌های سرمایه‌گذاری سالانه، هزینهٔ 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 سیستم‌های قدیمی) بیان می‌گردد، همان‌گونه که در معادلهٔ (۴) نشان داده شده است.

$$ERR = \frac{E_{CON} - E_{CHP}}{E_{CON}} \times 100\% \qquad (۴)$$

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

انتشار سالانهٔ 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 رابطهٔ (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 Micro CHP E_{CHP}^{CGas} و گاز طبیعی برای مشعل پشتیبان E_{CHP}^{BGas} است، همان‌گونه که در معادلهٔ (۶) نشان داده شده است.

$$E_{CON} = E_{CON}^{Ele} + E_{CON}^{Gas} \qquad (۵)$$

$$E_{CHP} = E_{CHP}^{Ele} + E_{CHP}^{CGas} + E_{CHP}^{BGas} \qquad (۶)$$

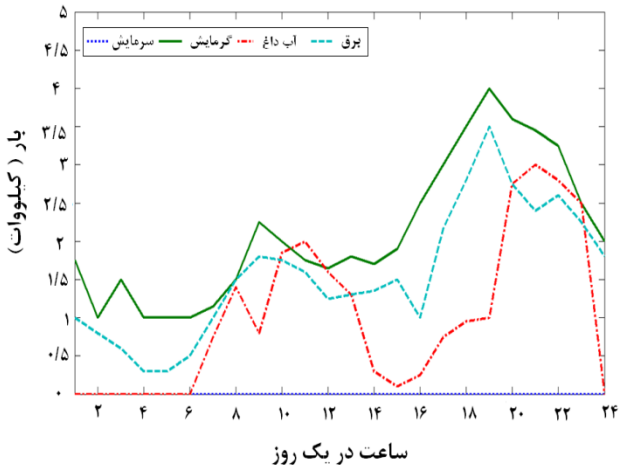
۳. مطالعهٔ موردی

۱.۳. تقاضای انرژی

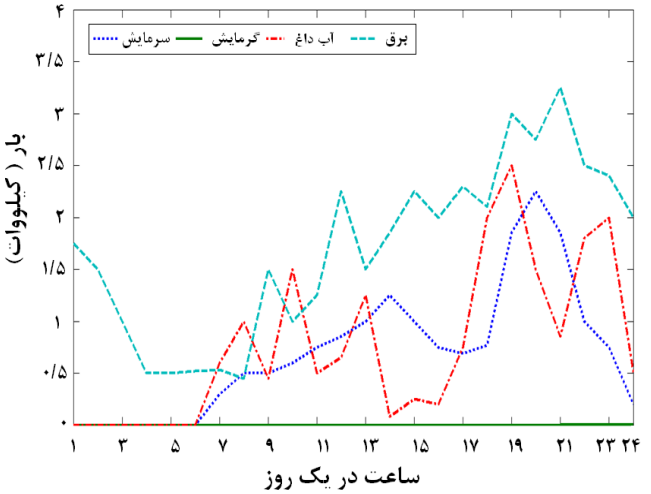
برای انتخاب یک سیستم Micro CHP خانگی مناسب باید در ابتدا اطلاعات دقیقی از بار مصرف‌کنندگان به‌دست آورد. تقاضای انرژی در بخش خانگی می‌تواند به دو بخش تقاضای الکتریکی و تقاضای گرمایشی تقسیم شود که شامل گرمایش فضا، آب گرم و بارهای سرمایشی است. باید توجه کرد که بارهای سرمایشی برای تهویهٔ مطبوع نیز جزء تقاضای 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[1] برای محاسبهٔ 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

1. Carrier

گرمایش، سرمایش، آب گرم مصرفی و همچنین تقاضای الکتریکی به‌دست آمده است. گفتنی است که یک روز نمونه به‌صورت پروفیل تقاضای انرژی برای یک روز که انتخاب شده است تا نمایندهٔ 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 به‌کار 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) تعرفهٔ برق را برای ساختمان‌های مسکونی با توجه به میزان انرژی مصرفی نشان می‌دهد. برای این نوع تعرفه‌ها هزینهٔ برق در فصول مختلف (که ماه‌های تابستانی شامل تیر تا شهریور است)، دورهٔ بار (بر پیک، پیک متوسط و بدون پیک) و همچنین مناطق مختلف گرمسیری و سردسیری تغییر می‌کند.

جدول (۱): تعرفهٔ برق برای ساختمان‌های مسکونی

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

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

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

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

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

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

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

۴. انواع سیستم‌های Micro CHP

معمولاً فناوری‌های Micro CHP که از نظر تجاری در دسترس‌اند، شامل موتورهای احتراق داخلی، موتورهای استرلینگ[1]، 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 شناخته‌شده‌ترند. در این مطالعه، دو نمونهٔ Micro CHP که موتور گازی و پیل‌سوختی نامیده می‌شوند، بررسی شده‌اند. جزئیات فنی و اطلاعات هزینه در جدول (۴) نشان داده شده است.

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

مشخصهٔ مورد نظر	توربین گازی	پیل سوختی
ظرفیت نامی (کیلووات)	۱	۱
هزینهٔ 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 تهویهٔ 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

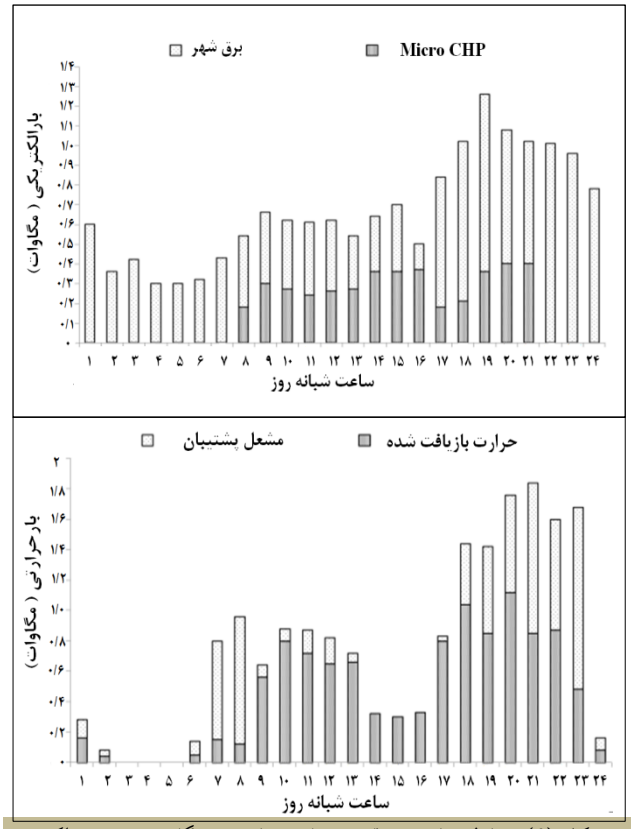
مشخصه مورد نظر	داده مفروض	مقدار
برق شهر	راندمان(٪)	۳۶
	شدت کربن ($kg.kWh^{-1}$)	۰/۳۷
گاز طبیعی	شدت کربن ($kg.m^{-3}$)	۲/۳۵
تهویه مطبوع	ضریب عملکرد (COP)	۴
	راندمان(٪)	۸۰
مشعل پشتیبان	طول عمر (سال)	۲۰
تانک ذخیره	ضریب اتلاف حرارت (٪)	۱
دیگر داده‌ها	نرخ تنزیل(٪)	۱۰

۶. نتایج شبیه‌سازی

۱.۶. استراتژی‌های عملکردی بهینه

۱.۱.۶.Micro CHP با موتور گاز سوز

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

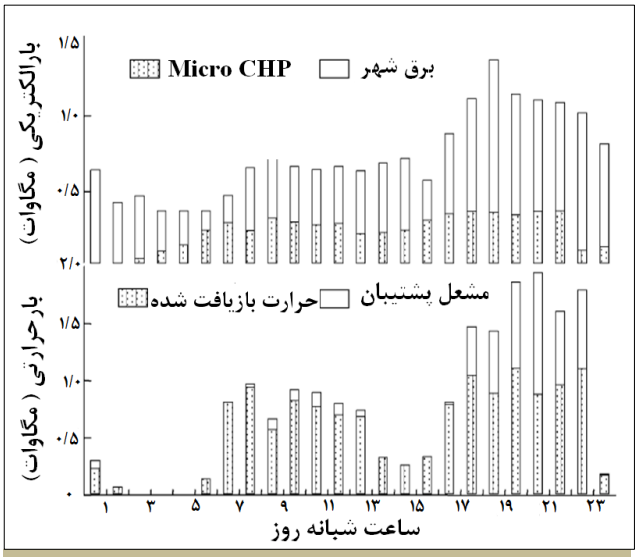


شکل (۴): تعادل ساعتی برق و حرارت با موتور گازسوز در عملکرد کمترین هزینهٔ انرژی

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 هزینهٔ نسبتاً پایین برق شبکه در طول دورهٔ خارج از پیک است. فواید بازیافت حرارت نمی‌تواند هزینهٔ بالای تولید توان خروجی موتور گازی را جبران کند. بنابراین از دیدگاه اقتصادی، ترجیح داده می‌شود که برق از شبکه خریداری شود به‌جای اینکه در محل تولید گردد. در این سناریو تنها ۲۴٪ از مجموع تقاضای برق در محل تولید شده و تقریباً ۶۰٪ از بار حرارتی به‌وسیلهٔ بازیافت حرارت از سیستم Micro CHP تأمین می‌شود.

1. Stirling

حداقل انتشار دی‌اکسیدکربن: گزینهٔ دومی که در نظر گرفته شده، عملکرد دستگاه برای رسیدن به کمترین میران انتشار دی‌اکسیدکربن سالانه است. شکل (۵) تعادل تقاضا- تولید برق و حرارت را نشان می‌دهد.

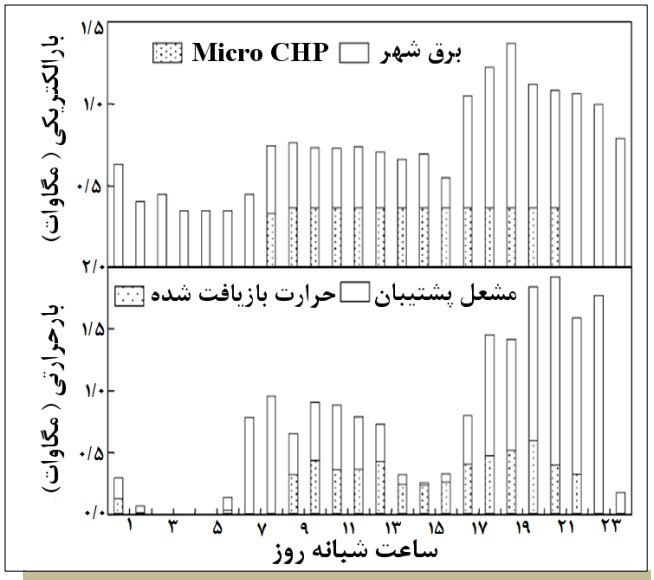


شکل (۵): تعادل ساعتی برق و حرارت با موتور گازسوز در عملکرد کمترین مقدار انتشار دی‌اکسیدکربن سالانه

دستگاه Micro CHP در طول روز با ظرفیت بالا و در طول شب با ظرفیت پایین کار می‌کند و این به‌سبب بار حرارتی نسبتاً پایین در طول شب است. سیستم Micro CHP می‌تواند تقریباً ۳۰درصد از برق مورد نیاز منزل را تأمین کند که بیشتر از حالت عملکرد با مینیمم هزینهٔ سالانه است. به این معنی که گاهی اوقات بهینه است که سیستم Micro CHP از دیدگاه فواید زیست‌محیطی راه‌اندازی شود، اگرچه از لحاظ اقتصادی سودمند نباشد. علاوه بر این از شکل (۵) می‌توان دریافت که تقریباً ۷۵ درصد (۱۵٪ بیشتر از عملکرد مینیمم هزینهٔ سالانه) بار حرارتی به‌وسیلهٔ بازیافت حرارت اتلافی تأمین می‌شود. در اواسط شب زمانی که بار حرارتی کمی نیاز است، سیستم CHP هنوز با ظرفیت پایین‌تر کار می‌کند، حرارت برای ساعت‌های آتی در طی روز ذخیره می‌شود. بنابراین با یک تانک ذخیره نیاز حرارت برای گرمایش فضا و آب گرم در زمان پیک می‌تواند کاهش یافته و از انرژی حرارتی بهتر بهره‌برداری شود.

۲.۱.۶. Micro CHP با پیل سوختی

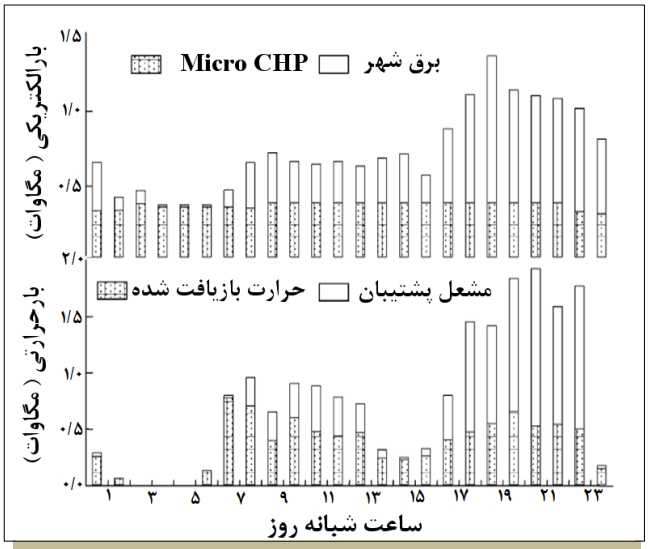
کمترین هزینهٔ انرژی: در این سناریو، سیستم Micro CHP با پیل سوختی به‌کار می‌رود تا هزینهٔ انرژی سالانه را مینیمم کند. تعادل برق و حرارت در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۶): تعادل ساعتی برق و حرارت با پیل سوختی در عملکرد کمترین هزینهٔ 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 راه‌اندازی می‌شود و این به‌دلیل راندمان بالای تولید توان دستگاه پیل‌سوختی در مقایسه با موتورهای گازی است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از موتور گازی به‌جای پیل سوختی می‌تواند ساعت کارکرد سیستم‌های 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 می‌کند. علاوه بر این بر طبق پروفیل‌های نشان داده‌شده در شکل (۶) تقریباً ۳۰٪ از بار حرارتی به‌وسیلهٔ بازیافت حرارت تأمین می‌شود. در مقایسه با نتایج به‌دست‌آمده از موتورهای گازی می‌توان نتیجه گرفت که سیستم‌های پیل سوختی برق بیشتر اما حرارت کمتری را تأمین می‌کنند. این موضوع در تحقیقات گذشته نیز تأیید شده است [۳۶].

حداقل انتشار دی‌اکسیدکربن: برای این گزینه فرض می‌شود که دستگاه پیل سوختی بدین منظور راه‌اندازی می‌شود که انتشار دی‌اکسیدکربن را حداقل کند. شکل (۷) تعادل ساعتی برق و حرارت را نشان می‌دهد.

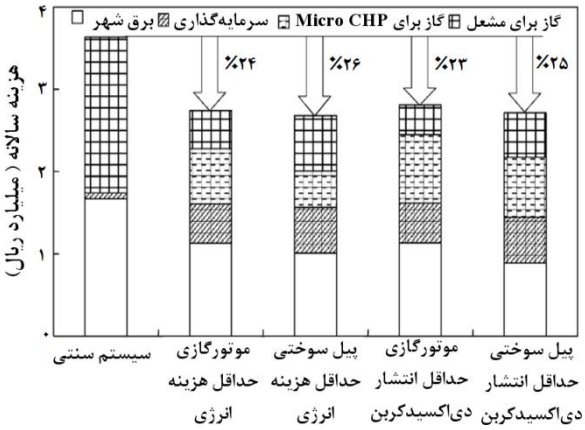


شکل (۷): تعادل ساعتی حرارت و برق با سیستم پیل‌سوختی در عملکرد حداقل انتشار دی‌اکسیدکربن

همان‌گونه که در شکل (۷) نشان داده شده است، سیستم پیل سوختی تقریباً در تمامی زمان ها با ظرفیت نامی کار می‌کند. فقط در برخی از زمان‌های بدون پیک، به‌سبب قیمت نسبتاً پایین برق، با بار جزئی راه‌اندازی می‌شود. در مجموع تقریباً ۴۹درصد از برق در محل تولید می‌شود. به هر حال همان‌گونه که در شکل (۷) نشان داده شده است، این نوع از سیستم‌های Micro CHP به‌دلیل نسبت حرارت به برق نسبتاً پایینی که دارند، بار حرارتی کمتری را نسبت به انواع موتورهای گاز سوز عرضه می‌کنند. تقریباً ۵۰درصد 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 ذخیرهٔ حرارت، ذخیره شده و در ساعات مورد نیاز آزاد می‌شود. اما به ناچار این کار موجب اتلاف حرارت می‌شود. تنها تقریباً ۷۸درصد از حرارت بازیافت‌شده برای مصرف‌کنندهٔ 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) هزینهٔ 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 سوختی با عملکرد مینیمم هزینه، کمترین هزینهٔ انرژی سالانه را دارد که تقریباً ۲۶درصد کمتر از سیستم‌های انرژی سنتی است. علاوه بر این سیستم Micro CHP پیل سوختی اگرچه هزینهٔ سرمایه‌گذاری بالاتری دارد، راندمان اقتصادی بالاتری نسبت به موتورهای گازی دارد و این به‌دلیل 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 هزینهٔ سالانه بسیار اقتصادی‌تر از عملکرد با حداقل انتشار دی‌اکسیدکربن سالانه است.

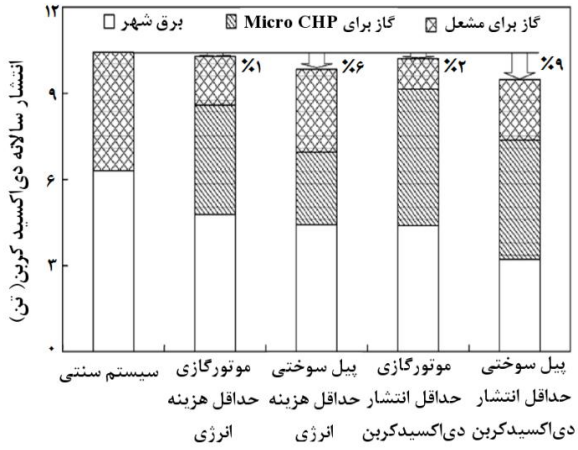


شکل (۸): هزینهٔ سالانه انرژی برای انواع سیستم‌های تولید انرژی

اقتصاد سیستم‌های Micro CHP به‌شدت وابسته به مقدار مصرف انرژی خانگی، به‌ویژه تقاضای انرژی حرارتی است. در حقیقت، علاوه بر بار انرژی و اندازهٔ سیستم، تعدادی از فاکتورهای بازار (هزینهٔ 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 سالانهٔ 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 به‌نظر 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 مد عملکردی، کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن مشهود نیست (بین ۱ تا ۲ درصد). این به‌دلیل مصرف سوخت نسبتاً بالای موتورهای گازی و اتلاف حرارت از تانک ذخیره است.



شکل (۹): انتشار سالانهٔ دی‌اکسیدکربن برای انواع سیستم‌های انرژی خانگی

۷. مباحث دیگر

با توجه به نتایج شبیه‌سازی نشان داده‌شده در بالا، در دو مد عملکردی که جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی در نظر گرفته شده است، سیستم‌های Micro CHP پیل‌سوختی عملکرد بهتری نسبت به موتورهای گازی نشان دادند.

از دیدگاه فنی، پیل سوختی بر مبنای یک واکنش الکتروشیمیایی کار می‌کند؛ لذا درگیر بخش‌های متحرک، اغتشاش (نویز) و لرزش نمی‌شود و این فاکتورها آن را برای کاربردهای خانگی بسیار قابل قبول‌تر می‌کند.

از نظر جنبه‌های اقتصادی: با یک نسبت حرارت به برق پایین‌تر، پیل‌سوختی بهتر می‌تواند با ساختمان‌های مسکونی جدید هماهنگ شود که به نظر می‌رسد این ساختمان‌ها در نتیجهٔ توسعهٔ عایق‌کاری تقاضای کمتری برای حرارت داشته باشند. همان‌طوری که در بخش ۶ نشان داده شد، تعادل بهتر بین عرضه و تقاضا به کاهش تلفات انرژی و در نتیجه فواید اقتصادی منجر می‌شود.

از دیدگاه جنبه‌های زیست‌محیطی: پیل‌سوختی جذاب‌ترین گزینه از دیدگاه کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن است. از طرفی می‌تواند با راندمان بسیار بالایی کار کند و از طرف دیگر، استفاده از هیدروژن به‌عنوان سوخت تغذیه، منجر به کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن تا حد صفر می‌شود. حتی اگر در غیاب هیدروژن از گاز شهری استفاده شود، سیستم پیل سوختی عملکرد زیست‌محیطی عالی را نشان می‌دهد.

۸. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، دو سیستم Micro CHP با مدهای عملکردی متفاوت از هر دو دیدگاه اقتصادی و زیست‌محیطی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. یک ساختمان مسکونی نمونه برای مطالعهٔ موردی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، نتایج زیر به‌دست آمده است:

۱. با عملکرد مینیمم هزینهٔ سالانه، هم موتور گازی و هم سیستم پیل سوختی فقط در طول روز کار می‌کنند. سیستم پیل‌سوختی در مقایسه با سیستم موتور گازی برق بیشتر و حرارت کمتری تولید می‌کند.

۲. با عملکرد مینیمم انتشار دی‌اکسیدکربن سالانه، سیستم پیل سوختی تقریباً در تمامی زمان‌ها با ظرفیت نامی راه‌اندازی می‌شود، اما سیستم موتور گازی همیشه بار جزئی است، به‌ویژه در طی ساعات شب.

۳. از دیدگاه اقتصادی، سیستم پیل‌سوختی با عملکرد مینیمم هزینه، گزینهٔ بهینه برای ساختمان‌های مسکونی است، با نرخ کاهش هزینه‌ای در حدود ۲۶ درصد. این امر موجب می‌شود که برگزیدن سیستم‌های موتور گازی به‌دلیل هزینهٔ اولیه پایینشان مورد تأمل قرار گیرد.

۴. از دیدگاه زیست‌محیطی، سیستم پیل سوختی با عملکرد مینیمم انتشار دی‌اکسیدکربن بهترین نتایج را برای کاهش انتشار دی‌اکسید کربن با نرخ کاهش ۹درصد نشان داد.

عموماً، می‌توان دریافت که تولید سیستم‌های Micro CHP موجب مزایای اقتصادی زیادی می‌شود. هرچند به‌نظر می‌رسد که برای فائق آمدن بر گرم شدن جهانی زمین، مزایای زیست‌محیطی سیستم‌های Micro CHP به‌عنوان یکی از ابزارها کافی نباشد، به‌ویژه برای موتورهای گازی. بنابراین، در آینده، برخی از فعالیت‌های ابداعی باید به‌کار برده شود. برای مثال، برخی منابع انرژی تجدیدپذیر، مانند انرژی بیوماس، می‌توانند به‌عنوان سوخت سیستم‌های Micro CHP استفاده شود که منجر به کاهش چشمگیری در میزان انتشار دی‌اکسیدکربن می‌شود.

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 CO_2 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., Petruzzi, 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 Co-Generation 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 CO_2 Emissions*," Applied Thermal Engineering, Vol. 25, No.17, 18, pp.2653-2676, 2005.
[30] Dorer, V., Weber, A., "*Energy and CO_2 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, Nol.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.