مقاله

استفاده از موتورهای استرلینگ
جهت تولید همزمان برق و حرارت در مصارف خانگی

مصطفی محمودی*
استادیار مجتمع دانشگاهی هوافضا
دانشگاه صنعتی مالک اشتر
mostafamahmoodi@engineer.com

جاماسب پیرکندی
استادیار مجتمع دانشگاهی هوافضا
دانشگاه صنعتی مالک اشتر
jamasb_p@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۱۳

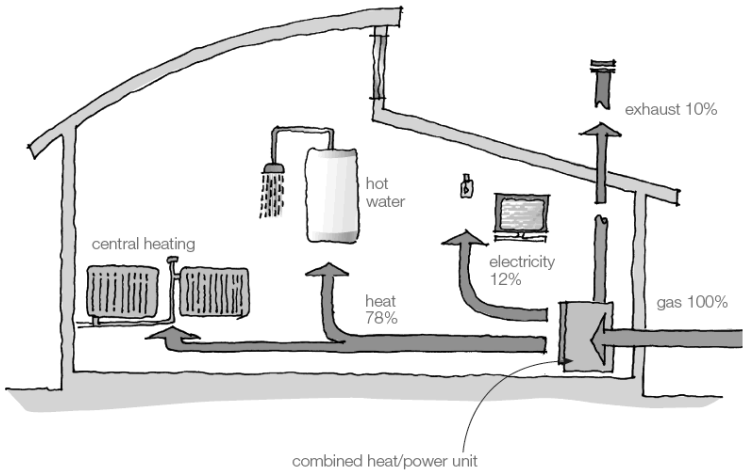
چکیده
طی سالیای اخیر، استفاده از نیروگاه‌های کوچک خانگی جهت تولید همزمان برق و حرارت افزایش چشمگیری داشته است. در میان فناوری‌های مطرح در این حوزه، استفاده از موتورهای استرلینگ مقیاس‌کوچک از اهمیت خاصی برخوردار است. هدف از این مقاله، شناسایی فناوری‌های موجود و روش‌های تجاری‌سازی این فناوری در بازار مصرف انرژی خانگی است. برای این منظور لازم است مطالعهٔ دقیقی درخصوص مزایا و معایب استفاده از موتورهای استرلینگ، جهت تولید همزمان، انجام شود. در این مقاله برخی از انواع موفق موتور استرلینگ و برنامه‌های توسعهٔ آنها درخصوص تولید همزمان تشریح شده است. موتورهای استرلینگ با توجه به مزایای بالایی چون بازده بالا، آلودگی کم، سطح تولید سروصدای پایین و انعطاف‌پذیری درخصوص استفاده از انواع منابع سوختی اعم از فسیلی، خورشیدی، بیوگاز و اتمی، به‌عنوان یک فناوری امیدبخش برای تولید همزمان برق و حرارت شناخته می‌شوند. براساس نتایج به‌دست آمده، آلایندگی مشعل یک موتور استرلینگ ۱۰ برابر کمتر از آلایندگی یک موتور احتراق داخلی سیکل اتو با مبدل مجهز به کاتالیست است. در حال حاضر، واحدهای تولید همزمان برق و حرارت بر پایهٔ موتورهای استرلینگ، بازده الکتریکی در حدود ۳۰ درصد و بازده کل ۸۵ تا ۹۸ درصد دارند.

واژگان کلیدی: تولید همزمان برق و حرارت، موتور استرلینگ، مقیاس‌کوچک، مصارف خانگی

۱. مقدمه
به‌تازگی استفاده از سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت[1] در بازار انرژی از اهمیت بالایی برخوردار شده است. این سیستم‌ها مقوله‌ای اثبات‌شده با تکیه بر فناوری و منابع انرژی است. سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت به‌عنوان یک روش مؤثر برای بهبود بازده سیستم‌های تبدیل انرژی و کاهش آلایندگی و اثار نامطلوب بر تغییرات آب‌وهوا معرفی شده‌اند [۱-۴]. سیستم‌های تولید همزمان، برای تولید برق در محدودهٔ ۱ تا ۱۰ کیلووات طراحی

می‌شوند و قادرند بار حرارتی مشابهی را نیز تولید کنند. با توجه به افزایش روزافزون مصرف انرژی و نیاز به فناوری‌های جدید در حوزهٔ تأمین انرژی به‌نظر می‌رسد سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت فرصت خوبی برای رفع نیازهای انرژی بخش مسکونی می‌باشند (شکل ۱). تاکنون فناوری‌های متفاوتی به لحاظ ساختار، نحوهٔ عملکرد، میزان پیچیدگی، محدودهٔ تولید توان و بازده، مطالعه، طراحی و ساخته شده‌اند [۵]. در این میان، رایج‌ترین فناوری‌های موجود در تولید همزمان برق و حرارت، موتورهای رفت‌وبرگشتی[۲]، سیکل‌های توربین گاز[۳]، سلول‌های سوختی[۴] و موتورهای استرلینگ[۵] است. معمولاً این فناوری‌ها با توجه به مشخصات فنی، آلودگی‌های زیست محیطی و بهره‌وری اقتصادی، که در بازار مصرف انرژی خانگی و در مقیاس کوچک دارند، با هم مقایسه می‌شوند. با وجود این تنوع فناوری، موتور استرلینگ ویژگی‌های منحصر به‌فردی برای استفاده در واحدهای تولید همزمان برق و حرارت در مقیاس کوچک دارد. اگرچه هنوز فناوری‌های مرتبط با آن هنوز به‌طور کامل توسعه نیافته است.

با توجه به پیشرفت های به‌دست آمده و پتانسیل بالقوه در موتور استرلینگ به‌لحاظ بالابودن بازده آن به‌صورت ذاتی، انعطاف‌پذیری در استفاده از انواع سوخت، سطح تولید آلایندگی کم، سطح تولید سروصدای پایین و عملکرد خوب در بارهای حرارتی کم، می‌توان چشم‌انداز خوبی برای توسعهٔ سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت در آینده ترسیم کرد (شکل ۲) [۷].



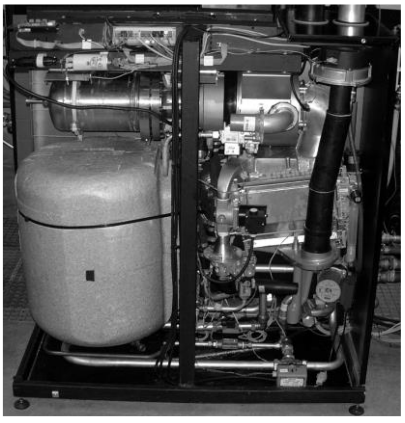
شکل ۱. استفاده از نیروگاه‌های کوچک در تولید همزمان برق و حرارت در مصارف خانگی [۶]

شکل ۲. موتورهای استرلینگ خورشیدی [٦]

امروزه مجموعه‌ها و مراکز تحقیقاتی متعددی در سطح جهان بر روی استفاده از موتور استرلینگ در تولید همزمان برق و حرارت متمرکز شده‌اند و در این‌خصوص به نتایج بسیار خوبی نیز دست یافته‌اند و برخی از محصولات خود را نیز تجاری نموده‌اند. به‌عنوان مثال شرکت ویسپر تک[۶]، واقع در نیوزیلند، یک موتور استرلینگ چهار سیلندر نوع آلفا برای تولید همزمان برق و حرارت جهت مصارف خانگی طراحی و ساخته است (شکل ۳) [۸]. شرکت انا تک[۷]، واقع در هلند، نیز طراحی و ساخت موتور استرلینگ را برای نیروگاه‌های کوچک خانگی انجام داده است(شکل ۴) [۹]. کیلین انرژی[۸]، واقع در سوئد، نیز بعد از خریداری امتیاز موتور استرلینگ شرکت سولو[۹] آلمان [۱۰]، کنسرسیوم جدیدی متشکل از گروه باکسی[۱۰] و سایر شرکای اروپایی با نام میکروجن[۱۱] تشکیل داد و موتور جدیدی جهت استفاده در بازار گرمایشی اروپا طراحی و ساخت [۱۱].

هدف از این مقاله، انجام مطالعه روی کاربرد موتورهای استرلینگ در سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت است. برای این منظور لازم است تحلیلی جامع براساس دانش فنی موجود درخصوص مشخصات عملکردی موتور استرلینگ به‌لحاظ بازده الکتریکی، ظرفیت بازیافت حرارتی، آلودگی محیطی، کیفیت برق تولیدی، تعمییر و نگهداری، عمر سیستم و انواع سوخت‌های مورد استفاده در آن انجام شود. در ادامه فناوری استرلینگ با انواع فناوری‌های موجود تولید همزمان برق و حرارت مقایسه و در نهایت توانمندی و نقایص آن در مقایسه با سایر فناوری‌های کاربردی مشخص شود.

شکل ۳. نیروگاه تولید همزمان برق و حرارت شرکت ویسپر تک [۸]



شکل ٤. نیروگاه تولید همزمان برق و حرارت شرکت انا تک [۹]

شکل ۵. نیروگاه تولید برق شرکت کلین انرژی [۱۰]

شکل ٦. نیروگاه تولید برق شرکت میکروجن [۱۱]

شکل ۷. نیروگاه دیواری شرکت باکسی [۱۱]

۲. موتور استرلینگ

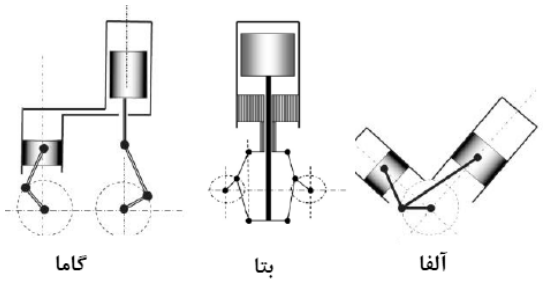
از زمان اختراع موتور استرلینگ توسط رابرت استرلینگ[۱۲] در سال ۱۸۱۶ م، موتورهای استرلینگ برای مقاصد و کاربردهای متنوع توسعه یافته‌اند. استفاده از موتور استرلینگ در کاربردهای متنوع بر این واقعیت استوار است که منبع حرارتی در موتورهای استرلینگ خارجی است، لذا طیف گسترده‌ای از انواع سوخت‌ها همچون سوخت‌های فسیلی، بیوگاز، خورشیدی، زمین‌گرمایی و انرژی هسته‌ای در آن قابل استفاده‌اند. نکتهٔ قابل توجه دیگر در استفاده از موتورهای استرلینگ، انجام فرایند احتراق خارجی در حالت پایدار و در نتیجه کنترل راحت‌تر آن است. موتورهای استرلینگ درخصوص استفاده از انواع سوخت‌ها، بسیار انعطاف‌پذیرند و شاید بتوان ویژگی برجستهٔ آنها را عملکرد موتور در دماهای پایین دانست. به‌همین دلیل می‌توان از برخی منابع در دسترس انرژی همچون آب گرم نیز به‌عنوان منبع تأمین حرارت مورد نیاز در آنها استفاده کرد. از دیگر ویژگی‌های این موتورها تولید آلایندگی کم، سطح سروصدای پایین و دورهٔ تعمیرات طولانی در مدت عملکرد است که مزایای استفاده از آنها را افزایش می‌دهد.

۲-۱. سازوکار عملکرد

موتور استرلینگ شامل یک پیستون توان[۱۳] و یک پیستون جابه‌جایی[۱۴] و سه مبدل حرارتی با نام‌های خنک‌کننده[۱۵]، گرم‌کننده[۱۶] و بازیاب حرارتی[۱۷] است. پیستون توان فشار گاز را به نیروی مکانیکی تبدیل می‌کند، در حالی‌که وظیفهٔ پیستون جابه‌جایی، حرکت‌دادن گاز میان منطقهٔ گرم و سرد موتور است. موتورهای استرلینگ براساس نوع پیکربندی و سازوکار حرکتی، به انواع آلفا، بتا، گاما و پیستون آزاد تقسیم می‌شوند.

پیکربندی نوع آلفا دارای دو پیستون مکانیکی متصل (پیستون تراکم و انبساط) در دو سیلندر جداگانه است که این دو سیلندر توسط خنک‌کن، بازیاب و گرم‌کن به هم متصل هستند. پیکربندی نوع بتا مدل کلاسیک موتور استرلینگ است که در آن پیستون تراکم و توان به‌همراه پیستون جابه‌جایی و انبساط داخل یک سیلندر قرار دارند. در این نوع پیکربندی هر دو پیستون به‌کمک یک محور و به شیوه‌ای نسبتاً پیچیده داخل یک سیلندر به هم متصل شده‌اند. در موتورهای استرلینگ نوع بتا وظیفهٔ پیستون جابه‌جایی، انتقال گاز مابین فضای تراکم و انبساط در حجم ثابت است. موتور گاما مشابه با موتور بتا از ترکیب پیستون توان - پیستون جابه‌جاکننده استفاده می‌کند. تفاوت اصلی میان موتور استرلینگ نوع بتا و گاما آن است که در موتور گاما، پیستون توان در یک سیلندر جداگانه در کنار سیلندر پیستون جابه‌جایی قرار دارد و گاز عامل به‌راحتی میان آنها حرکت می‌کند. پیکربندی نوع گاما نرخ تراکم کمتری تولید

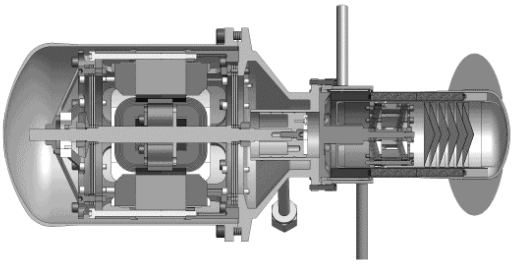
می‌کند، اما اجازه می دهد تا یک سازوکار مکانیکی میان پیستون‌ها آسان‌تر برقرار شود. در این ترکیب‌بندی گاز عامل به‌راحتی میان مبدل حرارتی گرم که به سیلندر جابه‌جایی متصل است و مبدل حرارتی سرد، که پیستون توان ارتباط دارد، حرکت کند (شکل ۸).



شکل ۸ انواع موتور استرلینگ

سازوکار حرکتی اجزاء در موتورهای استرلینگ به دو صورت است: روش اول برمبنای اتصال مکانیکی اجزاء است و سازوکار سینماتیکی نامیده می‌شود. در این روش اجزای مکانیکی برای تبدیل حرکت رفت‌وبرگشتی پیستون به حرکت چرخشی خروجی استفاده می‌شوند. در سازوکار سینماتیکی آب‌بندی‌های ویژه‌ای نیاز است تا از نشتی گاز پرفشار، که در واقع گاز عامل موتور برای ایجاد توان مکانیکی است، جلوگیری شود. موتورهای استرلینگ نوع آلفا، بتا و گاما سازوکار حرکتی مکانیکی دارند.

در سازوکار حرکتی نوع دوم از تغییرات فشار در فضای زیر پیستون‌ها، جهت حرکت اجزای رفت‌وبرگشتی استفاده می‌شود. موتورهای استرلینگ با این نوع سازوکار حرکتی به موتورهای استرلینگ پیستون آزاد مشهورند (شکل ۹). داخل این موتورها برای تولید جریان برق ساختاری به‌صورت یک ناحیهٔ القایی الکتریکی تعبیه و به‌صورت خطی به موتور متصل شده است. با توجه به سازوکار حرکتی در این موتورها، اصطکاک مکانیکی و نشت گاز عامل بسیار پایین است. موتورهای پیستون آزاد هزینه‌های نگهداری پایینی دارند و قابلیت‌های موتور اجازه می‌دهد تا عملکردی پیوسته با بازده بالا در آنها صورت گیرد.


شکل ۹. موتور استرلینگ پیستون آزاد [۷]

موتوهای استرلینگ به‌دلیل عملکرد نزدیک به چرخهٔ کارنو، به‌صورت بالقوه، پتانسیل بالایی برای کار در بازده بالا دارند. در حال حاضر موتورهای استرلینگ ساخته‌شده بازده الکتریکی در حدود ۳۰ درصد و بازده کل ۸۵ تا ۹۸ درصد را تولید می‌کنند. موتورهای استرلینگ همچنین توانایی خوبی در کارکرد در بارهای کم حرارتی دارند. در تئوری، موتور استرلینگ کارآمدترین فناوری برای تبدیل گرما به کار مکانیکی است.

۲-۲. مروری بر بهینه‌سازی‌های صورت گرفته

طی سالیان اخیر، موتورهای استرلینگ به‌همراه بازیاب حرارتی توسعهٔ زیادی یافته‌اند. موتور استرلینگ دارای یک چرخهٔ بستهٔ ترمودینامیکی است که گاز عامل در آن جرم ثابتی دارد. چرخهٔ استرلینگ ایده‌آل ترکیبی از چهار فرایند مجزای ترمودینامیکی (دو فرایند دما ثابت و دو فرایند حجم ثابت) است. در چرخهٔ موتور استرلینگ ایده‌آل، گاز عامل به‌صورت متناوب سرد و گرم می‌شود و با این عمل، تراکم و انبساط داخل سیلندر موتور انجام می‌گردد.

موتورهای استرلینگ واقعی در مقایسه با موتورهای استرلینگ ایده‌آل بازده پایین‌تری دارند. از جمله دلائل پایین‌بودن بازده این موتورها در شرایط واقعی نسبت به شرایط ایده‌آل، وجود افت‌های بازیاب است. به‌دلیل وجود اصطکاک در بازیاب حرارتی موتور، در هنگام عبور جریان گاز عامل، بازده کاهش می‌یابد. علت عمدهٔ دیگر، این حقیقت است که تمام گاز عامل در چرخهٔ تولید توان موتور استرلینگ شرکت نمی‌کند و همواره مقداری از گاز داخل

بازیاب، گرم‌کن و خنک‌کن باقی می‌ماند. کاهش بازده سیکل موتور به درصد حجم مردهٔ گاز درون قسمت‌های مختلف موتور نیز بستگی دارد. این حجم مرده سبب افزایش مقادیر حرارت ورودی و افزایش اندازه مبدل‌های حرارتی می‌شود. به‌دلیل آثار افت‌های موتور بر بازده و عملکرد آن، پژوهشگران زیادی آثار بازگشت‌ناپذیری‌ها، افت‌های حرارتی و پارامترهای طراحی را بر عملکرد ترمودینامیکی موتورهای استرلینگ بررسی کرده‌اند [۱۲-۱۴]. ماهیت و فشار گاز از دیگر عوامل تأثیرگذار بر توان خروجی و بازده موتور استرلینگ است. گاز هایی چون هلیوم و هیدروژن، که ظرفیت انتقال حرارت بالایی دارند و حین تبادل حرارتی تغییر فاز نمی‌دهند، در موتورهای استرلینگ استفاده می‌شوند. هیدروژن به‌دلیل خاصیت ترمودینامیکی بهتر، ضریب انتشار حرارتی بالاتر، لزجت پایین و افت فشار پایین‌تر در مبدل‌های حرارتی، انتخاب بهتری به‌عنوان گاز عامل، نسبت به هلیوم است. از طرف دیگر به‌دلیل شکل ساختاری هیدروژن، گاز هلیوم از گاز هیدروژن ایمن‌تر است. در نهایت استفاده از هوا نیز به‌عنوان سیال عامل در موتورهای استرلینگ مطرح است، اما بازده پایین‌تری نسبت به دو گاز عامل قبلی دارد.

در نهایت می‌توان عنوان کرد که در حال حاضر در طراحی موتورهای استرلینگ دو جنبهٔ حداکثر بازده خروجی و حداکثر توان تولیدی در نظر گرفته می‌شود.

۳. سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت براساس موتورهای استرلینگ

موتورهای استرلینگ در گسترهٔ وسیعی از تولید توان از ۱ وات تا ۱ مگاوات طراحی و توسعه یافته‌اند (جدول ۱). براساس تحقیقات انجام‌شده، هر دو نوع سازوکار حرکتی در موتورهای استرلینگ (موتورهای استرلینگ با سازوکار حرکتی مکانیکی و موتورهای استرلینگ نوع پیستون آزاد) پتانسیل بالایی جهت کاربرد در سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت دارند. موتورهای استرلینگ با سازوکار حرکتی مکانیکی قادرند تا توان الکتریکی ۱/۱ تا ۵۰۰ کیلوات تولید کنند؛ حال آنکه موتورهای استرلینگ پیستون آزاد در محدودهٔ تولید توان الکتریکی ۱ تا ۲۵ کیلووات طراحی و ساخته شده‌اند [۱۵]. لذا با توجه به توان تولیدی، موتورهای استرلینگ پیستون آزاد جهت استفاده در مقیاس‌های کوچک و مصارف خانگی جذاب‌ترند. در ادامه برخی از سیستم‌های تولید برق و حرارت به‌صورت همزمان بر پایهٔ موتور استرلینگ، که به مرحلهٔ ساخت و تجاری‌سازی رسیده‌اند و در حال حاضر به بازار عرضه شده‌اند، تشریح می‌شوند.

از شرکت‌های پیشرو در تجاری‌سازی این سیستم‌ها می‌توان به شرکت ویسپرتک نیوزیلند اشاره کرد. این شرکت موتور استرلینگ نوع آلفایی با نام ویسپرجن[۱۸] را برای تولید ۱/۲ کیلووات برق و ۷/۵ تا ۱۴/۵ کیلووات حرارت طراحی و ساخته است و در حال حاضر به‌صورت تجاری به بازار انرژی عرضه شده است. این سیستم از یکپارچه‌سازی چهار موتور آفا تشکیل شده است. بازده الکتریکی این موتور در حدود ۱۲ درصد و بازده کلی آن درحدود ۸۰ درصد اندازه‌گیری شده است.

شرکت تولیدی سان پاور[۱۹]، از ایالات متحدهٔ امریکا، محصولی را جهت برآوردن نیاز خانه‌های بزرگتر با نام میکروجن ارائه کرده است. میکروجن یک واحد تولید همزمان برق و حرارت جهت استفاده در خانه‌های بزرگ و اداره‌های کوچک است که براساس موتور استرلینگ پیستون آزاد ساخته شده است. این موتور از گاز طبیعی به‌عنوان سوخت استفاده می‌کند و قادر به تولید ۱/۱ کیلووات برق و ۱۵ تا ۳۶ کیلووات حرارت می‌باشد. براساس نتایج به‌دست آمده، این موتور قادر است در بار کم تا ۵ کیلووات انرژی حرارتی تولید کند. با استفاده از این موتور تولید دی اکسید کربن تا ۲۵ درصد کاهش می‌یابد.

کلین انرژی شرکتی پیشرو در عرصهٔ طراحی و ساخت نیروگاه‌های تولید همزمان برق و حرارت بر پایهٔ موتورهای استرلینگ است. این شرکت دو نوع نیروگاه تولید همزمان

بر پایهٔ موتور استرلینگ طراحی و ساخته است. در این دو واحد تولید همزمان، از بیوگاز و انرژی خورشیدی به‌عنوان سوخت مورد نیاز استفاده می‌شود. موتور استرلینگ این شرکت، توانایی تولید ۹ کیلووات توان الکتریکی به‌همراه ۲۶ کیلووات توان حرارتی را دارد. موتورهای تولیدی این شرکت عمر عملیاتی و بازده بالایی دارند.

جدول ۱.توان و بازده خروجی نیروگاه‌های تولید همزمان برق و حرارت بر پایهٔ موتور استرلینگ

اینسپریت	سولو استرلینگ	میکروجن	ویسپرجن	مشخصات فنی
گاز	انرژی خورشیدی / زیست توده	گاز طبیعی	گاز طبیعی	سوخت
۱۲–۱۵ کیلووات	۸–۲۶ کیلووات	۱۵–۳۶ کیلووات	۷/۵ تا ۱۴/۵ کیلووات	حرارت تولیدی
۰/۵ تا ۳ کیلووات	۲ تا ۹/۵ کیلووات	۱/۱ کیلووات	۱ تا ۱/۲ کیلووات	الکتریسیتهٔ تولیدی
۱۶ درصد	۲۴ درصد	۱۳/۵ درصد	۱۲ درصد	بازده الکتریکی
۷۶ درصد	۷۲ درصد	–	۷۷ درصد	بازده حرارتی
۲۰ درصد	–	۲۵ درصد	۱۱ درصد	کاهش آلایندگی دی اکسید کربن

به‌تازگی کنسرسیومی از شرکت ایناتک هلند و رینایی[20] ژاپن تشکیل شده است که از ژنراتورهای ابداعی خود در موتورهای استرلینگ جهت تولید همزمان برق و حرارت استفاده می‌کند. ژنراتورهای ابداعی این شرکت در موتورهای استرلینگ پیستون آزاد استفاده می‌شوند. این ژنراتورها طوری ساخته شده‌اند که با حرکت رفت‌وبرگشتی پیستون در میدان القایی داخل موتور، الکتریسیته تولید می‌کنند. از مزایای دیگر این موتورها می‌توان به بی‌صدا بودن، مدت زمان کارکرد طولانی بدون احتیاج به تعمیرات، صرفهٔ اقتصادی و آلایندگی کم اشاره کرد. اخیراً این شرکت موتور استرلینگ پیستون آزادی را برمبنای یک متمرکزکنندهٔ خورشیدی جهت تأمین دمای مورد نیاز موتور طراحی و ساخته است. این متمرکزکننده با بالابردن دمای گاز عامل داخل موتور، باعث حرکت رفت‌وبرگشتی پیستون در فضای القایی طراحی شده داخل موتور می‌شود و در نهایت این حرکت رفت‌وبرگشتی سبب تولید الکتریسیته می‌شود.

شرکت اینسپریت[21] نیز برپایهٔ موتورهای استرلینگ با سازوکار حرکتی مکانیکی، واحد تولید همزمان برق و حرارتی را در مقیاس کوچک طراحی و ساخته است. موتور استرلینگ نوع بتای این شرکت از گاز هلیوم به‌عنوان سیال عامل داخل موتور استفاده می‌کند. موتور ساخته‌شده توانایی تولید ۳ کیلووات الکتریسیته و ۱۵ کیلووات حرارت را به‌طور همزمان دارد. بازده کل این دستگاه ۹۲ درصد است؛ به‌صورتی‌که سهم بازده الکتریکی ۱۶ درصد و سهم بازده حرارتی ۷۶ درصد می‌باشد.

بیوپاور[22] شرکتی در امریکای شمالی است که در حال حاضر انواع موتورهای استرلینگ را طراحی و تولید می‌کند. این شرکت واحد تولید توانی را براساس موتور استرلینگ جهت استفاده در شبکهٔ تولید برق مناطق مسکونی ارائه کرده است. این سیستم تولید توان به‌گونه‌ای ساخته شده است که بتواند از گاز طبیعی، گاز پروپان، الکل و انرژی‌های تجدیدپذیری چون بیوگاز و هوای گرم به‌عنوان منبع گرمایی استفاده کند. این واحد در حالت تولید همزمان برق و حرارت قادر است بازده الکتریکی ۸ تا ۲۷ درصد و بازده مجموع ۷۵ تا ۸۰ درصد را تأمین کند.

شرکت سیگما الکتروتکنیک[23] نروژ نیز توسعهٔ یک موتور استرلینگ را جهت استفاده از آن در تولید همزمان برق و حرارت انجام داده است. این موتور می‌تواند ۱/۵ کیلووات برق و ۹ کیلووات حرار تولید کند. بازده کل این مجموعه

نیز ۹۵ درصد است. شرکت استرلینگ دانمارک نیز یک واحد تولید توان در مقیاس کوچک براساس موتور استرلینگ ساخته که هنوز وارد بازار نشده است. این واحد تولید توان براساس ترکیب‌بندی نوع بتا از موتورهای استرلینگ ساخته شده و در شرایط معمولی ۸/۱ کیلووات برق و ۲۴/۹ کیلووات حرارت تولید می‌کند. به نظر می‌رسد موتور طراحی‌شدهٔ این شرکت جهت کاربردهای مسکونی و تجاری، خصوصاً مکان‌هایی که آب گرم مصرفی و انرژی حرارتی بیشتری نیاز دارند، بسیار مناسب باشد (شکل ۱۰).

٤. مقایسه با سایر فناوری‌ها

موتورهای احتراق داخلی، موتورهای استرلینگ، سلول‌های سوختی و سیکل‌های رانکین فناوری‌هایی هستند که تاکنون جهت استفاده در سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت استفاده شده‌اند [۱۶]. از موتورهای احتراق داخلی در واحدهای تولید همزمان در مقیاس کوچک، زمانی استفاده می‌شود که هدف استفاده از حرارت مازاد گازهای خروجی از موتور است. موتورهای رفت‌وبرگشتی در مقیاس بزرگ، توسط شرکت‌های مختلف در سراسر جهان تولید و تجاری شده‌اند. یکی از سیستم‌های تولید همزمان که بر پایهٔ موتورهای احتراق داخلی ساخته و به تعداد زیادی فروخته شده است، واحد تولید توان شرکت سنترتک است. این واحد تولید همزمان توانایی تولید ۵/۵ کیلووات برق و ۱۴ کیلووات انرژی حرارتی را دارد. بازده الکتریکی این موتور ۲۵ درصد و بازده مجموع آن ۸۰ درصد است. از دیگر موتورهای احتراق داخلی تجاری‌شده می‌توان به موتور ساخته‌شده توسط شرکت هوندا اشاره کرد که می‌تواند ۱ کیلووات برق تولید کند [۱۸].

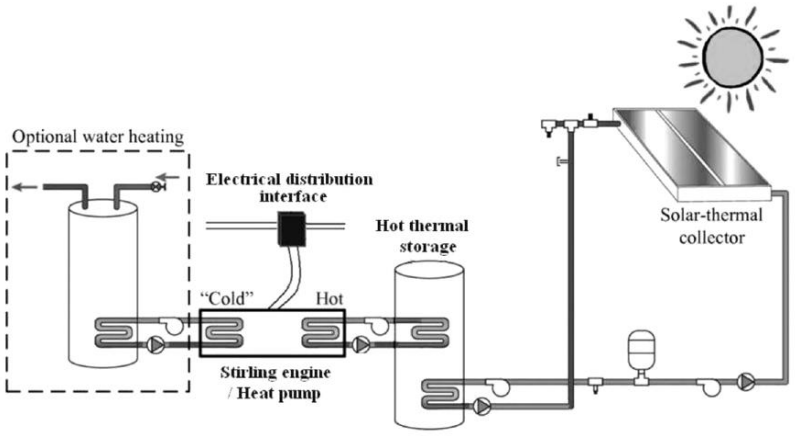
چندین شرکت بین‌المللی نیز روی تحقیق و توسعهٔ فناوری‌های مرتبط با سلول‌های سوختی و تبدیل انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی فعالیت می‌کنند. از نمونه‌های برجستهٔ تولید و تجاری‌شدهٔ سلول سوختی می‌توان به سلول‌های سوختی دماپایین با تولید ۴/۶ کیلووات الکتریسیته و ۷ کیلووات انرژی حرارتی، همچنین سلول سوختی دمابالا با خروجی ۱ کیلووات الکتریسیته اشاره کرد. از معایب این سیستم‌ها در تولید همزمان برق و حرارت می‌توان به عدم کنترل‌پذیری دما جهت خروج از نقاط تعریف‌شدهٔ سیستم، هزینهٔ سرمایه‌گذاری بالا و مسائل قابلیت اطمینان اشاره کرد. فناوری دیگری که هم‌اکنون فاز تحقیق و توسعهٔ خود را می‌گذراند، استفاده از سیکل‌های بخار جهت تولید همزمان برق و حرارت است. به‌تازگی توسعه زیادی در موتورهایی که از سیکل رانکین جهت تولید توان استفاده می‌کنند، صورت گرفته است. آشناترین موتوری که از سیکل رانکین جهت تولید توان استفاده می‌کند، ماشین بخار است. در موتور بخار، آب جوشیده و به‌صورت بخار بر توربین اعمال نیرو می‌کند و در نهایت کار تولیدی از این اعمال نیرو حاصل می‌شود. برخی از این سیستم‌ها در دما و فشار متعارف، برای اهداف گرمایش و تبرید استفاده می‌شوند. به‌عنوان مثال موتور ساخت شرکت باتل در امریکا، ۱ کیلووات الکتریسیته و ۱۰ کیلووات حرارت تولید می‌کند.

به‌دلیل تولید پایین الکتریسیته، موتور ساخت شرکت باتل برای مصارف خانگی مناسب است و به‌جهت هزینه‌های تعمییرات پایین می‌تواند برای بسیاری از مناطق کوچک استفاده شود. در حال حاضر این سیستم هنوز مراحل آزمایشگاهی خود را برای ورود به عرصهٔ تجاری می‌گذراند [۱۹].

موتورهای توربین گاز نیز از دیگر فناوری‌های مورد استفاده در تولید همزمان برق و حرارت است. با توجه به اینکه این سیستم‌ها در مقیاس کوچک ۳۰ کیلووات برق تولید می‌کنند، نمی‌توانند در مصارف خانگی استفاده شوند. در جدول ۲ فناوری‌های گوناگون در تولید همزمان برق و حرارت براساس بازده الکتریکی و حرارتی، سطح توسعهٔ فناوری، هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای فناوری و توان خروجی مقایسه شده است. براساس اطلاعات مندرج در این جدول، موتورهای استرلینگ تنوع بیشتری در استفاده از

انواع سوخت‌های موجود، به‌خصوص بیوگاز و انرژی خورشیدی، دارند. موتورهای استرلینگ پتانسیل بالایی برای دستیابی به بازده مجموع بالا و بازده الکتریکی متوسط دارند. همچنین عملکرد بسیار خوبی در بارهای حرارتی متوسط و پایین دارند. در مقایسه با موتورهای استرلینگ، موتورهای رفت‌وبرگشتی فناوری بالاتری دارند که مزیت بزرگی برای نفوذ به بازار تجاری محسوب می‌شود.

موتورهای رفت‌وبرگشتی به لحاظ تولید توان الکتریکی مشابه موتورهای استرلینگ هستند، اما به تعمییرات و صرف هزینهٔ بیشتری نیاز دارند. علاوه بر این، موتورهای رفت‌وبرگشتی سروصدا و آلودگی زیست محیطی بیشتری دارند. سلول‌های سوختی و موتورهای رانکین در حال توسعهٔ فناوری هستند و در نیروگاه های کوچک مراحل آزمایشی خود را می‌گذرانند. پتانسیل بالای این فناوری‌ها در تولید الکتریسیتهٔ بالا بدون آلایندگی است. با این‌حال با توجه به اینکه هر دو فناوری نوظهورند، هزینه‌های سرمایه‌گذاری قابل توجهی در مقایسه با موتورهای استرلینگ و موتورهای رفت‌وبرگشتی دارند.



شکل ۱۰. واحد تولید همزمان برق و حرارت بر پایهٔ موتور استرلینگ با استفاده از آب گرم [۱۷]

جدول ۲. مقایسهٔ فناوری‌های مختلف در حوزهٔ تولید همزمان برق و حرارت

نسبت توان به وزن	هزینه به یورو نسبت به کیلووات ساعت تولیدی	مرحلهٔ فناوری	منبع حرارتی	بازده حرارتی	بازده الکتریکی	نوع فناوری
۱۰–۱۸	۲۱۰۰–۴۵۰۰	به‌صورت تجاری موجود است	سوخت مایع گاز طبیعی	بیشتر از ۸۵ درصد	۲۰ تا ۳۰ درصد	موتور احتراق داخلی
۷/۳–۹	۲۸۰۰–۱۰۰۰۰	بعضی از مدل‌ها در حال حاضر به‌صورت تجاری موجود است	انواع سوخت انرژی خورشیدی	بیشتر از ۸۵ درصد	۱۱ تا ۳۵ درصد	موتور استرلینگ
–	بیشتر از ۳۰۰۰۰	در مرحلهٔ تحقیق و توسعه و انجام تست‌های آزمایشگاهی	هیدروژن	۸۰ تا ۸۵ درصد	۲۸ تا ۳۰ درصد	سلول سوختی
–	–	در مرحله تحقیق و توسعه	انواع سوخت	۷۰ تا ۸۵ درصد	۱۰ تا ۲۰ درصد	موتور رانکین

۵. ارزیابی اقتصادی سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت

چالش‌های فنی و اقتصادی سیستم‌های تولید همزمان برق حرارت در مقیاس کوچک بسیار بیشتر از این سیستم‌ها در مقیاس بزرگتر است. کارایی اقتصادی سیستم‌های تولید همزمان به ظرفیت تولید و نیاز بازار و در نتیجه برگشت سرمایه‌گذاری در طول عمر عملکردی واحد تولید توان بستگی دارد. در واقع هزینه‌های تولید برق برای هر واحد، به‌صورت نمایی با کاهش اندازهٔ واحد تولید همزمان، افزایش می‌یابد. لذا سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت با توجه به میزان سرمایه‌گذاری اولیه و ارزش برق تولیدی ساخته می‌شوند. در واقع ارزش این سیستم‌ها به بازگشت سرمایه در طول مدت کارکردشان است. به‌طور شفاف، نه‌تنها هزینهٔ سرمایه‌گذاری در این سیستم‌ها مهم است، که هزینهٔ تعمییرات، نصب و راه‌اندازی و طول عمر عملکردی سیستم نیز از اهمیت بسزایی برخوردار است. چون اصطکاک در موتورهای استرلینگ بسیار پایین است، فواصل تعمییر و نگهداری این موتورها بسیار طولانی است و در نتیجه، هزینه‌های عملیاتی این موتورها بسیار پایین‌تر از دیگر سیستم‌هاست.

تجزیه و تحلیل‌های اقتصادی سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت در مقیاس متوسط و کوچک می‌بایست با در نظر گرفتن مزایای اجتماعی و زیست محیطی کاربرد این سیستم‌ها انجام شود. طراحی و ساخت نیروگاه‌های تولید همزمان برق و حرارت می‌بایست با نیازهای واقعی در بخش انرژی نیز مطابقت داشته باشند. در حقیقت معرفی این سیستم‌ها در بخش ساختمان چالش‌های متعددی به‌منظور تعیین نیازهای واقعی انرژی الکتریکی و حرارتی به ارمغان آورده است. جهت طراحی، ساخت و استفاده از این سیستم‌های تولید همزمان ابتدا باید الگوی مصرف خانواده در مناطق مسکونی مشخص شود. هر خانواده‌ای بسته به متغییرهای گوناگون مانند ویژگی‌های آب‌وهوایی، ویژگی‌های ساختمان بناشده، تعداد و رفتار ساکنان، به مقدار مشخصی از انرژی نیاز دارد. جهت تعیین الگوی مصرف در بخش مسکونی برخی از پژوهشگران تحقیقاتی انجام داده‌اند. در بعضی از تحقیقات انجام‌شده رفتار کل ساختمان با استفاده از ابزارهای شبیه‌ساز مدلسازی شده است [۲۰]. در این پژوهش‌ها مدل فنی اقتصادی یک نیروگاه تولید همزمان برق و حرارت برای حداقل هزینهٔ سالانه با توجه به تقاضای برق و حرارت مورد نیاز و بهینه‌کردن اندازهٔ واحد تولید همزمان انجام شده است.

برق و حرارت حاصل از سیستم‌های تولید همزمان در مقیاس کوچک، احتراق اضافی را به کل سیستم تأمین توان تحمیل نمی‌کند، لذا مجموع تولید آلایندگی در تولید برق و حرارت کاهش می‌یابد. براساس نتایج به‌دست آمده، آلایندگی مشعل یک موتور استرلینگ ۱۰ برابر کمتر از آلایندگی یک موتور احتراق داخلی سیکل اتو با مبدل مجهز به کاتالیست است. کاهش واقعی آلودگی به ساعت کارکرد موتور نیز بستگی دارد. علاوه بر منافع اقتصادی، استفاده از این سیستم‌ها می‌تواند وابستگی به سوخت را کاهش دهد که برای بسیاری از کشورها این موضوع امری استراتژیک است.

بسیاری از محققان بر این باورند که استفاده از سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت در بخش مسکونی به یک ارزیابی چندمعیاره نیاز دارد و در آن می‌بایست پارامترهای مختلف مصرف‌کنندگان در نظر گرفته شود. به‌طور معمول می‌توان گفت واحد تولید همزمان در مقیاس کوچک می‌بایست به لحاظ هندسی کوچک و ظاهری زیبا داشته باشد و سطح سروصدای پایینی تولید کند.

کوتاه سخن اینکه می‌توان محبوبیت استفاده از سیستم‌های تولید همزمان را بر سیستم‌های متعارف در چند نکته خلاصه کرد:

۱. سیستم‌های تولید همزمان، برق و حرارت مورد نیاز را براساس میزان مصرف خانگی حرارت و برق، در هر زمان مشخص، تولید می‌کنند.

۲. به‌دلیل تولید الکتریسیته در محل مصرف، افت‌های انتقال برق و حرارت از شبکه توزیع حذف می‌شود.
۳. استفاده از پسماند حرارتی برای تولید انرژی، به کاهش آلایندگی‌های محیطی و استفاده از منابع تجدیدپذیر کمک قابل توجهی می‌کند.
۴. شاید بتوان گفت بیشترین اهمیت سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت در رابطه با فناوری‌های دیگر است. یک نمونه از این تئیر، یکپارچه‌سازی سیستم‌های تولید همزمان با شبکهٔ توزیع برق سراسری است. در زمانی‌که تقاضای برق در ساعات مشخصی به بالاترین میزان خود می‌رسد، استفاده از این سیستم‌ها باعث کاهش بار وارده به شبکهٔ توزیع برق می‌شود.
۵. به‌کمک این سیستم‌ها تقاضا در ساعات بحرانی و درپی آن هزینه‌های توزیع و افزایش شبکه کاهش پیدا می‌کند.

٦. جمع‌بندی

در این مقاله بررسی جامعی درخصوص فناوری موجود در واحدهای تولید همزمان برق و حرارت انجام شد. در این رهگذر، دربارهٔ موتورهای استرلینگ، ویژگی‌های عملکردی، بازده الکتریکی و حرارتی و سوخت‌های مورد استفاده در سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت بر پایهٔ موتور استرلینگ نیز بررسی جامعی انجام شد. مقایسه درخصوص موتورهای استرلینگ و سایر فناوری‌های موجود مورد استفاده در سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت نیز در این مقاله انجام شده است. بررسی انجام‌شده به‌منظور درک بهتر برای انتخاب بهترین فناوری جهت استفاده در بخش ساختمان است. براساس مطالعات انجام‌شده، بازده حرارتی در موتورهای استرلینگ و موتورهای رفت‌وبرگشتی در مقایسه با سیستم‌های مبتنی بر سلول‌های سوختی بیشتر است. همچنین موتورهای استرلینگ زیادی با سازوکار حرکتی مکانیکی و یا پیستون آزاد، جهت استفاده در سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت ساخته شده‌اند. موتورهای استرلینگ با توجه به استفاده از منابع تجدیدپذیر و به‌دلیل صرفه‌جویی در مصرف انرژی، بازده بالا، سطح تولید صدای پایین، تولید آلایندگی کم و انعطاف‌پذیری در استفاده از سوخت‌های متفاوت، به‌عنوان یک فناوری امیدبخش در جهان معرفی شده‌اند. با این‌حال سیستم‌های تولید همزمان برمبنای موتور استرلینگ معایبی نیز دارند. یکی از معایب آنها هزینهٔ نسبتاً بالا در ساخت و استقرار این نیروگاه‌های کوچک است.

۷. مآخذ

[1] Onovwiona H. I., V. I. Ugursal. "Residential cogeneration systems: review of the current technology." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2006, 10(5): 389-431.

[2] Wu, D., R. Wang. "Combined cooling, heating and power: A review." *Progress in Energy and Combustion Science* 2006, 32(5-6): 459-495.

[3] Jackson J. "Ensuring emergency power for critical municipal services with natural gas-fired combined heat and power (CHP) systems: A cost-benefit analysis of preemptive stategy." *Energy Policy* 2007, 35, pp. 5931-5937.

[4] Huangfu, Y., J. Wu, R. Wang, X. Kong, B. Wei. "Evaluation and analysis of novel micro-scale combined cooling, heating and power (MCCHP) system." *Energy Conversion and Management* 2007, 48:1703-1709.

[5] Ptrescu, S., M. Costea, C. Harman, T. Florea. "Application of the direct method to irreversiblr Stirling cycles with finite speed." *International Journal of Energy Research* 2002, 26:589-609.

[6] Level, the authority on sustainable building, www.level.org.nz (accessed January 1, 2016).
[7] Alanne, K., A. Saari. "Sustainable small-scale CHP technologies for buildings: the basis for multi-level decision making." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2004; 8:401–431.
[8] WhisperGen CHP System from WhisperTech Company Web Site, http://www.whispergen.com (accessed January 1, 2016).
[9] Enatec Company, http://www.enatec.org (accessed January 1, 2016).
[10] Cleanenergy, http://www.cleanergy.com (accessed January 1, 2016).
[11] Baxi Group & De Dietrich Remeha Group, http://www.bdrthermea.com (accessed January 1, 2016).
[12] Timoumi, Y., I. Tlili, B. S. Nasrallah. "Performance optimization of Stirling engines." *Renewable Energy* 2008, 33(7): 2134-2144.
[13] Puech, P., V. Tishkova. "Thermodynamic analysis of a Stirling engine including regenerator dead volume." *Renewable Energy* 2011, 36(2): 872-878.
[14] Kongtragool, B., S. Wongwises. "Thermodynamic analysis of a Stirling engine including dead volumes of hot space, cold space and regenerator." *Renewable Energy* 2006, 31: 345-359.
[15] Formosa, F., G. Despesse. "Analytical model for Stirling cycle machine design." *Energy Conversion and Management* 2010, 51:1855-1863.
[16] Krawinkler, R., G. Trnka, G. R. Simader. "Micro CHP systems: State-of-the-art." *Austrian Energy Agency* 2006; 8:1-68.
[17] Minassians, A. D., S. R. Sanders. "Stirling Engines for Distributed Low-Cost Solar-Thermal-Electric Power Generation." *Journal of Solar Energy Engineering*, February 2011, Vol. 133: 15-30.
[18] Pehnt, M., M. Cames, C. Fisher, B. Praetorius, L. Schneider, K. Schumacher. "Micro Cogeneration Technology. In: Micro Cogeneration towards Decentralized Energy Systems." Berlin, Germany: Springer, 2006.
[19] Energetix Group, http://www.energetixgroup.com (accessed January 1, 2016).
[20] Hawkes. A., M. Leach. "Cost-effective operation strategy for residential micro- combined heat and power." *Energy* 2007; 32: 711-723.

پی‌نوشت

1. combine heat & power (CHP)
2. reciprocating engines
3. gas turbine engines
4. fuel cells
5. Stirling engines
6. WhisperTech ®
7. Enatec ®
8. cleanergy
9. SOLO
10. Baxi Group
11. MicroGen
12. Robert Stirling
13. power piston
14. displacer piston
15. cooler
16. heater
17. regenerator
18. WhisperGen
19. Sun Power
20. Rinnai
21. Inspirit
22. Bio Power
23. Sigma Elektroteknisk