مقاله

سیستم‌های تولید توان و گرمای همزمان در مقیاس کوچک

مهدی ابطحی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان؛ کارشناس شرکت سوخت راکتورهای هسته‌ای ایران
mehdi6342000@yahoo.com

ابراهیم افشاری، استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان
e.afshari@eng.ui.ac.ir

چکیده

افزایش تقاضا، منابع محدود و آثار منفی محیطی ناشی از استخراج انرژی توسط انسان، بر نیاز به‌کارگیری منابع محدود تأکید دارد. تولید انرژی الکتریکی همراه با به‌کارگیری گرمای تولیدی روشی در حال توسعه است که موجب افزایش راندمان و کاهش کلی تلفات می‌شود. این موضوع عموماً تحت عنوان توان و گرمای ترکیبی یا سی. اچ. پی.[1] مطرح است. سیستم‌های سی. اچ. پی. اندازه‌های متنوعی دارند؛ از اندازهٔ بزرگ، که جهت تولید الکتریسته و گرم‌کردن یک شهر استفاده می‌شوند، تا واحدهای کوچک که می‌توانند یک خانه مسکونی را سرویس دهند و با عنوان میکرو سی. اچ. پی.[2] شناخته می‌شوند. عنوان میکرو عموماً به ژنراتورها با ظرفیت الکتریکی کمتر از ۱۵ کیلووات اطلاق می‌شود که در خانه‌های مسکونی کاربرد دارد. این ژنراتورها دارای تنوع زیادی هستند و شامل موتورهای احتراق داخلی، میکروتوربین‌ها، موتورهای استرلینگ و پیل‌های سوختی می‌باشند. هدف این مقاله معرفی انواع سیستم‌های میکرو سی. اچ. پی. و مشخص‌کردن ویژگی‌های هر نوع می‌باشد. در هر مدل سعی شده است ضمن توصیف نحوهٔ عملکرد، نحوهٔ استفاده از گرمای تشکیل‌شده در فرایند تولید توان الکتریکی بیان و ضمن معرفی سازندگان مطح هر فناوری، مدل‌های گوناگون با هم مقایسه شوند.

واژگان کلیدی: میکرو سی. اچ. پی.، موتور احتراق داخلی، میکروتوربین، موتور استرلینگ، پیل سوختی

مقدمه

سی. اچ. پی. به‌معنای استفاده همزمان از گرما و توان الکتریکی است که امکان استفاده از گرمای تولیدشده در ضمن فرایندی که هدف اصلی آن تأمین برق می‌باشد فراهم می‌شود. این مفهوم در صنایع به‌طور وسیعی جهت کاهش هزینه‌ها استفاده می‌شود. به‌تازگی استفاده از سی. اچ. پی. در کاربردهای خانگی جهت تولید برق و بهره‌گیری از گرمای تولیدی برای مقاصد گرمایش و سرمایش منازل در حال توسعه است. سیستم‌های سی. اچ. پی. که در منازل مسکونی جهت تأمین برق و تولید انرژی لازم جهت گرمایش و سرمایش استفاده می‌گردند، غالباً دارای ظرفیتی کمتر از ۱۵ کیلووات می‌باشند و تحت عنوان میکرو سی.

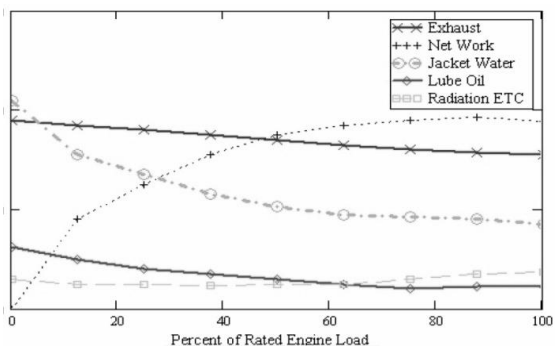
اچ. پی. شناخته می‌شوند. گرمای هدر رفته در فرایند تولید برق می‌تواند در دستگاه‌های میکرو سی. اچ. پی. جهت تأمین آب گرم مصرفی، تأمین انرژی مورد نیاز برای جذب‌کنندهٔ چیلرهای جذبی جهت سرمایش منازل و یا در سیستم گرمایش ساختمان‌ها مورد استفاده قرار گیرد. ضمناً گرمای بازیابی‌شدهٔ مورد اشاره در سیستم‌های خشک‌کن هوا در صنعت تهویه قابل استفاده می‌باشد. دستگاه‌های میکرو سی. اچ. پی. از فناوری‌های گوناگونی جهت تولید توان بهره می‌برند که می‌توان از موتورهای احتراق داخلی، میکروتوربین‌ها، موتورهای سیکل رانکین، موتور استرلینگ و یا انواع پیل سوختی به‌عنوان ژنراتور تولید برق نام برد. نیروگاه‌های سنتی حدود ۳۰ درصد از انرژی در دسترس سوخت را به توان الکتریکی تبدیل می‌کنند. نیروگاه‌های سیکل ترکیبی با راندمان بالا حدود ۵۰ درصد انرژی در دسترس را به توان الکتریکی تبدیل می‌کنند. واحدهای میکرو سی. اچ. پی. از گرمای اتلافی ژنراتور جهت مصارف گرمایش و سرمایش منازل استفاده می‌کنند و از این‌رو راندمان کلی سیستم افزایش یافته و حتی به ۹۰ درصد می‌رسد که به‌عنوان مزیتی بسیار مهم محسوب می‌شود. همچنین، تولید برق در یک پایگاه مرکزی و انتقال آن به کاربران در نقاط دور از پایگاه مرکزی سبب تلفات انرژی در انتقال و توزیع برق به کاربر نهایی می‌شود. مزیت دیگر استفاده از میکرو سی. اچ. پی. در ساختمان‌های مسکونی، حذف تلفات انتقال و توزیع برق است. نتیجهٔ به‌کار بردن میکرو سی. اچ. پی. در ساختمان‌های مسکونی، حذف یا حداقل‌نمودن خطوط انتقال برق، بالابردن امنیت انرژی و کاهش آسیب‌پذیری خطوط می‌باشد. اما، به‌دلیل اندازهٔ کوچک واحدهای میکرو سی. اچ. پی.، توجه به این نکته مهم است که این واحدها با بازده پایین‌تر از لحاظ الکتریکی در مقایسه با نیروگاه‌های بزرگ مرکزی کار می‌کنند. در هر حال، اگر گرمای تولیدی به‌نحو مؤثری استفاده شود، بازده کلی می‌تواند بسیار بالاتر از نیروگاه‌های مرکزی که فقط برای تولید الکتریسیته طراحی می‌شوند باشد. عیب دیگر واحدهای میکرو سی. اچ. پی. تکیه بر دسترس بودن سوخت پالایش شده است. نیروگاه‌های مرکزی بزرگ قادرند تا سوخت‌های پالایش‌نشدهٔ خام را به توان مفید تبدیل کنند؛ در حالی‌که ژنراتورهای کوچک نیاز به سوخت‌های خالص نظیر گاز طبیعی دارند تا تمیز کار کنند [۱]. در حال حاضر شرکت‌های بسیاری در حال ساخت و تست دستگاه‌های میکرو سی. اچ. پی. می‌باشند. در میان کشورهای غربی، انگلستان و آلمان و در بین کشورهای شرقی ژاپن و کرهٔ جنوبی پیشروند و دارای محصولات کاملاً تجاری در زمینه میکرو سی. اچ. پی. می‌باشند. البته ایالات متحدهٔ امریکا نیز در این زمینه محصولات گوناگونی تولید کرده است. به‌تازگی مرکز تحقیقات مهندسی اصفهان نیز یک دستگاه میکرو سی. اچ. پی. پیل سوختی با ظرفیت ۵ کیلووات را تست و راه‌اندازی نموده است.

در این مقاله ابتدا در هر بخش به‌صورت مجزا مشخصات عملکرد انواع سیستم‌های توان و گرمای همزمان توضیح داده و سپس شرکت‌های سازنده هر فناوری معرفی و ویژگی‌های محصول آن سازنده مشخص می‌شود. هدف این مقاله آشناکردن خواننده با فناوری‌های متنوع میکرو سی. اچ. پی.، نحوهٔ عملکرد، ویژگی‌های عملکردی و معرفی سازندگان معروف در زمینهٔ هر فناوری می‌باشد.

موتور احتراق داخلی

موتورهای احتراق داخلی رفت و برگشتی شایع‌ترین فناوری تولید قدرت‌اند. در این موتورها، همواره با انبساط گازهای دما و فشاربالا موجب ایجاد نیروی لازم جهت عضو متحرک موتور، نظیر پیستون یا پره‌های توربین، می‌شود. دو دستهٔ اصلی از موتورهای احتراق داخلی که کاربرد بیشتری در تولید توان در حالت ثابت دارند عبارت‌اند از: موتورهای اشتعال جرقه‌ای و موتورهای اشتعال تراکمی که عموماً از سوخت دیزل استفاده می‌کنند. علاوه بر ایجاد نیروی محرکه، موتورهای احتراق داخلی نامزدی ایده‌آل برای

کاربردهایی هستند که در آنها نیاز اساسی برای آب گرم یا بخار کم‌فشار وجود دارد. خروجی گرمایی می‌تواند در یک چیلر جذبی جهت سرمایش نیز استفاده شود. در یک موتور احتراق داخلی گرما از طریق سیال خنک‌کنندهٔ موتور، انتقال حرارت تشعشع سطحی و گازهای داغ اگزاست آزاد می‌شود. سیستم‌های میکرو سی. اچ. پی. از نوع موتور احتراق داخلی، گرما را از آب خنک‌کننده در جریان اطراف موتور، گرمای روغن موتور و خروجی‌های اگزاست بازیابی می‌کنند. گرمای آب خنک‌کن اطراف موتور قادر به تولید آب گرم با دمای تقریبی ۹۳ درجهٔ سانتی‌گراد می‌باشد که حدوداً معادل ۳۰ درصد ارزش حرارتی سوخت مصرف شده است. موتورهای در حال کار با فشار بیشتر قادر به کارکرد در دمای آب خنک‌کن تا ۱۲۹ درجهٔ سانتی‌گراد می‌باشند. دمای گازهای اگزاست عموماً بین ۴۵۵ تا ۶۴۹ درجهٔ سانتی‌گراد می‌باشد و چون دمای گازهای اگزاست باید بالاتر از حد چگالش باشد، تنها بخشی از گرما می‌تواند بازیابی گردد. عموماً بخار فشارپایین و آب گرم با دمای ۱۱۰ درجهٔ سانتی‌گراد از گرمای اگزاست موتور استخراج می‌شود. شکل ۱ بالانس حرارتی یک موتور رفت و برگشتی نمونه جهت بهره‌برداری از انرژی‌های در دسترس را نشان می‌دهد.



شکل ۱. بالانس حرارتی موتور احتراق داخلی رفت و برگشتی

مزیت‌های استفاده از موتورهای احتراق داخلی به‌عنوان میکرو سی. اچ. پی. شامل موارد ذیل می‌باشد:

۱. محدودهٔ وسیع اندازه‌های در دسترس
۲. راه‌اندازی سریع و قدرت خروجی قابل تنظیم
۳. در دسترس بودن در حد ۹۵ درصد
۴. راندمان بالا در بارهای جزیی
۵. طول عمر بالا و سرویس قابل اطمینان با در نظر داشتن تعمیرات و نگه‌داری صحیح

ایرادها و اشکالات این موتورها نیز عبارت است از:

۱. عملکرد معمولاً پر سروصدا
۲. آلودگی نسبتاً بالا به اتمسفر [۳ – ۶]

در جدول‌های ۱ و ۲ به‌ترتیب مشخصات کلی دستگاه‌های توان و گرمای همزمان با به‌کارگیری فناوری موتور احتراق داخلی و مشخصات عملکردی سازندگان صاحب نام موتورهای احتراق داخلی با به‌کارگیری توان و گرمای همزمان مشاهده می‌شود.

میکروتوربین‌ها

میکروتوربین‌ها، توربین‌های گاز کوچکی هستند که برای تولید الکتریسیته استفاده می‌شوند. بیشتر میکروتوربین‌ها، دستگاه‌های تک‌مرحله‌ای و جریان شعاعی‌اند که با سرعت ۹۰ تا ۱۲۰ هزار دور بر دقیقه چرخش می‌کنند. فضایی بیش از یک کیوسک تلفن را اشغال نمی‌کنند و محدودهٔ توان خروجی آنها بین ۲۵ تا ۳۰۰ کیلووات است. بیشتر سازندگان از طراحی یک‌شفت بهره می‌گیرند، به‌طوری‌که کمپرسور، توربین و یک ژنراتور مغناطیسی روی همان شفت قرار می‌گیرند و توسط بالبرینگ‌های بدون نیاز به روغن‌کاری پشتیبانی می‌شوند. میکروتوربین‌ها می‌توانند توسط گاز طبیعی، دیزل، گازوییل یا الکل تغذیه شوند. اجزای اصلی میکروتوربین‌ها شامل موارد ذیل است:

۱. توربوشارژر (پرخوران) که شامل یک کمپرسور گریز از مرکز و یک توربین شعاعی هم‌محور با کمپرسور است که با سرعت ۹۰ تا ۱۲۰ هزار دور بر دقیقه می‌چرخد.
۲. ریکاپراتور که جهت دستیابی به راندمان قابل قبول با توجه به محدودیت نسبت تراکم ضروری است. مبدل حرارتی آن از صفحات متراکم تشکیل شده است و

دارای هندسهٔ مناسب جهت افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری است.

۳. محفظهٔ احتراق که معمولاً از فناوری احتراق پیش مخلوط جهت دستیابی به سطح پایین انتشار آلودگی استفاده می‌کند.

۴. سیستم بازیابی حرارت که شامل یک مبدل حرارتی است و انرژی گرمایی را از گازهای داغ اگزاست جدا می‌کند تا آب گرم یا بخار کم فشار تولید کند. گازهای گرم اگزاست میکروتوربین را در دمای بالاتر از ۲۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد ترک می‌کنند و می‌توانند در یک مبدل بازیابی حرارت جهت تولید گرمای مفید برای کاربردهای تولید همزمان بهره برداری شوند. ساده‌ترین مدل برای توربین‌های گازی سیکل استاندارد هوایی برایتون است [۳ – ۶].

جدول ۱. مشخصات کلی موتور احتراق داخلی به‌صورت توان و گرمای همزمان

توان[۳] برقی	راندمان[۴]		سوخت	سیکل ترمودینامیکی	
	الکتریکی	کل			
۵ الی ۲۰۰۰۰	۳۵–۴۵	۶۵–۹۰	گازطبیعی، بیوگاز، روغن‌های سبک و سنگین	سیکل دیزل	موتور دیزل
۳ الی ۶۰۰۰	۲۵–۴۳	۷۰–۹۲	گاز طبیعی، بیوگاز، نفتا	سیکل اتو	موتور احتراق جرقه‌ای
۲۵۰۰–۳۴۰۰ یورو به ازای هر کیلووات توان برق تولیدی					هزینهٔ[۵] سرمایه‌گذاری
۰/۰۱۵–۰/۰۰۷ یورو به ازای هر کیلووات توان برق تولیدی					هزینهٔ تعمیرات و نگه‌داری
ناکس: ۰/۰۳۷– ۰/۰۰۱۵	مونواکسیدکربن: ۰/۰۰۶–۰/۰۰۴		مصرف گاز طبیعی		انتشار آلودگی برحسب پوند بر کیلووات ساعت
ناکس: ۰/۰۲۵–۰/۰۲۲	مونواکسید کربن: ۰/۰۰۱–۰/۰۰۲		مصرف سوخت دیزل		

جدول ۲. مشخصات تولیدکنندگان دستگاه‌های توان و گرمای همزمان با به‌کارگیری موتور احتراق داخلی

ابعاد[۶]		سطح صدا[۷]	راندمان		توان حرارتی	توان الکتریکی	سازنده
			الکتریکی	کل			
۵۹/۱	ارتفاع	۵۳	۲۸	۸۴	۱۰	۵	YANMAR
۱۹/۷	عمق						
۴۳/۳	پهنا						
۴۳	ارتفاع	۵۵	۲۵	۹۳	۳/۸–۱۱/۴	۲–۴/۷	ECOPOWER
۵۴	عمق						
۳۰	پهنا						
۴۴	ارتفاع	–	۲۶	۹۲/۷	۱۸	۷	TEDOM
۵۱/۲	عمق						
۲۷/۵	پهنا						
–		–	۲۶/۳	۹۲	۲/۵	۱	VAILLANT

در جدول‌های ۳ و ۴ به‌ترتیب مشخصات کلی دستگاه‌های توان و گرمای همزمان با به‌کارگیری فناوری میکروتوربین و مشخصات عملکردی سازندگان صاحب نام میکروتوربین‌ها با به‌کارگیری توان و گرمای همزمان مشاهده می‌شود.

موتورهای سیکل رانکین

اصولاً موتورهای سیکل رانکین به‌دلیل راندمان تبدیل الکتریکی نسبتاً پایین به‌عنوان یک فناوری کاربردی پذیرفته نیستند. در هر حال، اگر راندمان الکتریکی از اهمیت کمتری برخوردار باشد، موتورهای سیکل رانکین به‌دلیل سادگی نسبی و مشخصات عملکردی و دوام خوب پذیرفته شده هستند. سیکل رانکین از یک سیال استفاده می‌کند که در اثر گرم‌شدن تبخیر می‌شود و جهت تولید کار انبساط می‌یابد. بخار خروجی چگالیده می‌شود و مایع به بویلر جهت تکرار سیکل پمپ می‌شود. سیال عامل عموماً آب است، اما سایر سیالات نیز می‌تواند استفاده شود. موتور رانکین خودش می‌تواند یک موتور پیستونی یا توربین باشد. سیکل رانکین شامل یک منبع تغذیه گرما به‌نام بویلر و همچنین پمپ جهت چرخش سیال در سیکل و توربین تولید توان می‌باشد. بخشی از گرمای تغذیه‌شده به سیکل جهت تکمیل سیکل در کندانسور دفع می‌شود.

جدول ۳. مشخصات کلی میکروتوربین‌ها به‌صورت توان و گرمای همزمان

	نسبت توان به گرما	سوخت مورد استفاده	راندمان‌ها		تولید توان الکتریکی برحسب کیلووات
			کل	الکتریکی	
میکروتوربین	۰/۲–۰/۸	گازطبیعی، دیزل، پروپان،کروزن، بیوگاز، گاز فلز	۶۵–۹۰	۱۵–۳۰	۱۵–۳۰۰
هزینهٔ سرمایه‌گذاری	۹۰۰–۲۵۰۰ یورو به ازای هر کیلووات توان برق تولیدی				
هزینهٔ تعمیرات	۰/۰۰۶–۰/۰۲۱ یورو به ازای هر کیلووات توان برق تولیدی				
انتشار آلودگی برحسب ppm	ناکس: ۵۰–۳، مونواکسید کربن: ۵۰–۳				

جدول ٤. مشخصات تولیدکنندگان دستگاه‌های توان و گرمای همزمان با به‌کارگیری میکروتوربین‌ها

سازنده	توان الکتریکی	توان حرارتی	راندمان		سطح صدا	ابعاد	
			کل	الکتریکی			
CAPSTONE	۱۵	–	–	۲۳	۶۵	ارتفاع	۷۰
						عمق	۶۰
						پهنا	۳۰
GREENVIRONMENT	۵۰	۱۱۰	–	۲۶	۶۰	ارتفاع	۸۳
						عمق	۳۰
						پهنا	۷۷
ELLIOT	۱۰۰	۱۷۲	۷۵	۲۹	۶۲	ارتفاع	۸۸/۷
						عمق	۱۲۸/۱
						پهنا	۳۳/۵
TURBEC	۱۰۰	۱۵۵	۷۷	۳۰	۷۰	ارتفاع	۷۱/۲۵
						عمق	۱۰۹
						پهنا	۳۵/۴

در مقایسه با سایر فناوری‌ها، موتورهای سیکل رانکین دارای یکی از پایین‌ترین راندمان‌های تبدیل الکتریکی است. راندمان حرارتی سایر فناوری‌های در رقابت نیز بالاتر از موتورهای سیکل رانکین است. مزیت سیکل رانکین برای نیروگاه‌ها این است که سیال کاری مایع است، بیشتر اوقات این مایع آب است که یک منبع ارزان و آماده است. چون سیکل رانکین یک حلقهٔ بسته است و شامل کندانسور می‌باشد، بازیابی حرارت می‌تواند به‌سادگی در کندانسور حاصل شود. متأسفانه اطلاعات کمی درخصوص هزینه‌ها و همچنین سایر جزییات استفاده از سیکل رانکین در سیستم‌های میکرو سی. اچ. پی. موجود است [۳ – ۶]. با توجه به راندمان الکتریکی پایین دستگاه‌های میکرو سی. اچ. پی. با به‌کارگیری فناوری سیکل رانکین، این فناوری دارای جذابیت پایین‌تری نسبت به سایر فناوری‌ها جهت تولیدکنندگان می‌باشد و فقط اطلاعات جدول ۵ حاوی مشخصات دو سازنده مختلف این فناوری ارائه می‌شود.

جدول ۵. مشخصات تولیدکنندگان دستگاه‌های توان و گرمای همزمان با به‌کارگیری سیکل رانکین

ابعاد		سطح صدا	راندمان		توان حرارتی	توان الکتریکی	سازنده
			الکتریکی	کل			
۴۹/۶	ارتفاع	۵۴	–	۹۴	۱۸	۲	POWERBLOCK
۳۲/۶	عمق						
۲۴/۴	پهنا						
۳۴/۲	ارتفاع	–	۱۷	۹۰	۱۱	۲/۵	COGEN
۱۵/۷	عمق						
۲۳/۶	پهنا						

موتورهای استرلینگ

موتور استرلینگ یک نوع از موتورهای احتراق خارجی پیستونی است که از اختلاف دما جهت تولید حرکت به فرم کار شفت استفاده می‌کند. سیکل استرلینگ از یک منبع حرارت خارجی استفاده می‌کند که می‌تواند هر یک از محصولات پایهٔ نفتی یا حتی انرژی خورشیدی باشد و هیچ احتراقی در سیلندرهای موتور اتفاق نمی‌افتد. عملکرد یک موتور استرلینگ براساس رفتار مقدار ثابتی هوا یا گازی نظیر هلیوم یا هیدروژن است که در سیلندرهای موتور محبوس است. دو مشخصهٔ گاز، عملکرد موتور استرلینگ را مجاز می‌کند:

۱. برای میزان ثابتی از گاز در حجم مشخص با افزایش دما، فشار بالا می‌رود.
۲. وقتی میزان مشخصی ازگاز فشرده می‌شود، دمای آن بالا می‌رود.

موتورهای استرلینگ از یک پیستون جابه‌جا شونده جهت جابه‌جا کردن گاز محبوس بین محفظه‌های سرد و گرم به‌سمت عقب و جلو استفاده می‌کنند. گاز در محفظهٔ گرم منبسط می‌شود و یک پیستون قدرت را جابه‌جا می‌کند و کار تولید می‌نماید؛ در حالی‌که در همین زمان پیستون در حال اجبار گاز جهت حرکت به‌سمت محفظهٔ سرد می‌باشد. در محفظهٔ سرد گاز منقبض می‌شود، پیستون را مجدداً دریافت می‌کند و سیکل تکمیل می‌شود. موتورهای استرلینگ دارای اشکال متفاوتی از جمله موتور آلفا، بتا و گاما می‌باشند. موتور آلفا دارای دو پیستون جداگانه در سمت سرد و گرم می‌باشد. موتور بتا از یک پیستون قدرت واحد استفاده می نماید که به‌صورت هم‌محور روی یک شفت به‌عنوان پیستون جابه‌جا شونده عمل می‌کند. موتور گاما همان موتور بتا است، اما پیستون قدرت هم‌محور با پیستون جابه‌جا شونده نیست.

بخش عمده‌ای از هدر رفت گرمای موتور استرلینگ به سیال خنک‌کن و بخش کمتر به گازهای اگزاست منتقل می‌شود که این موضوع موتور استرلینگ را برای تولید گرما و توان همزمان مناسب می‌سازد. دماهای معمول عملکرد از ۶۵۰ تا ۸۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد می‌باشد. این دماهای عملکرد بالا می‌تواند به مقدار هدر رفت بالای حرارت تبدیل شود. گرمای هدر رفت می‌تواند از طریق لوله‌کشی سیال خنک‌کن توسط یک مبدل حرارتی و توسط کانال‌کشی گازهای اگزاست از طریق یک مبدل حرارتی جهت تولید آب گرم استفاده شود.

بعضی از مزایای موتورهای استرلینگ عبارت‌اند از:

۱. احتراق مخلوط سوخت و هوا به‌دلیل منبع حرارت خارجی دقیق‌تر کنترل می‌شود.
۲. انتشار سوخت مشتعل‌نشده به‌دلیل فرایند احتراق پیوسته حذف می‌شود.
۳. روغنکاری کمتری مورد نیاز است که منجر به بازه‌های طولانی‌تر بین دوره‌های تعمیرات می‌شود.
۴. نیاز به طراحی ساده‌تر دارد، سوپاپ نیاز نیست و سیستم‌های سوخت و دریافت خیلی ساده‌اند.
۵. عملکرد آنها کم سروصدا و با ارتعاش اندک است.
۶. سرویس نگه‌داری آنها کم و دارای طول عمر بالاست.

اما معایب آنها عبارت است از:

۱. هزینه‌های بالا
۲. راندمان پایین
۳. نیاز به مبدل‌های حرارتی ورودی و خروجی با قابلیت تحمل فشار سیال کاری و اثرات خوردگی
۴. اندازهٔ بزرگ موتور نسبت به توان تولیدی و قدرت خروجی ثابت [۳ – ۶]

در جدول‌های ۶ و ۷ به‌ترتیب مشخصات کلی دستگاه‌های میکرو سی. اچ. پی. با به‌کارگیری فناوری موتور استرلینگ و مشخصات عملکردی چند سازندهٔ معروف فناوری موتور استرلینگ در سیستم‌های میکرو سی. اچ. پی. قابل مشاهده است.

پیل سوختی

پیل سوختی یک مبدل انرژی الکتروشیمیایی است که از سه جز اصلی آند، کاتد و الکترولیت تشکیل شده است. پیل‌های سوختی شبیه به باتری هستند، به‌طوری‌که از طریق واکنش الکتروشیمیایی و بدون احتراق مستقیم سوخت برق DC تولید می‌کنند. عموماً یک پیل سوختی، هیدروژن و اکسیژن را به‌صورت الکتروشیمیایی واکنش می‌دهد و محصول واکنش آب و الکتریسیته و گرما می‌باشد. این فرایند شامل عبور سوخت دارای پایهٔ هیدروژن روی آند می‌باشد به‌طوری‌که یک واکنش کاتالیستی اتفاق می‌افتد و سوخت را به دو جز یون‌ها و الکترون‌ها تبدیل می‌کند. در سمت آند گاز هیدروژن یونیزه می‌شود و طی واکنش گرمازا الکترون و یون H^+ تولید می‌کند.

$$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^- \qquad (۱)$$

یون‌ها از آند و از طریق الکترولیت به‌سمت کاتد غنی از اکسیژن می‌روند. در سمت کاتد اکسیژن با الکترون‌های گرفته‌شده از الکترود و یون‌های H^+ منتقل شده توسط الکترولیت مطابق رابطه ذیل واکنش داده و آب تولید می‌کند.

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O \qquad (۲)$$

برای اینکه واکنش‌ها به‌صورت همزمان اتفاق بیافتد، الکترون‌های تولیدشده در سمت آند باید از یک مدار الکتریکی به‌سمت کاتد حرکت کنند در حالی‌که یون‌های هیدروژن از الکترولیت عبور می‌کنند. عملکرد یک پیل سوختی می‌تواند توسط تابع گیبس تحلیل شود. انرژی آزاد گیبس یک واکنش، مشخص‌کنندهٔ ماکزیمم کاری است که از ترکیب دو ماده در یک واکنش شیمیایی می‌توان به‌دست آورد. ماکزیمم کار تئوری اختلاف انرژی آزاد گیبس واکنش‌دهنده‌ها و محصولات واکنش شیمیایی است.

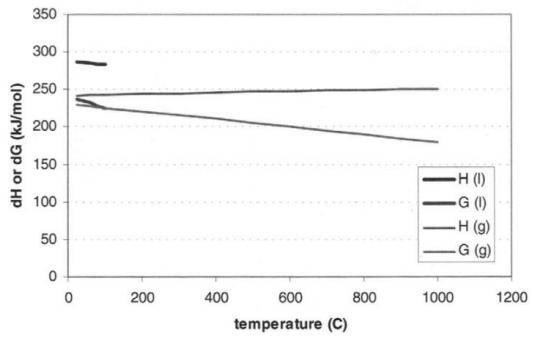
$$W_{\max} = G_{react} - G_{prod} \qquad (۳)$$

راندمان وسائل تبدیل انرژی به‌صورت نسبت انرژی مفید خروجی به انرژی ورودی تعریف می‌شود. در مورد پیل سوختی، انرژی مفید خروجی، انرژی الکتریکی و گرمایی

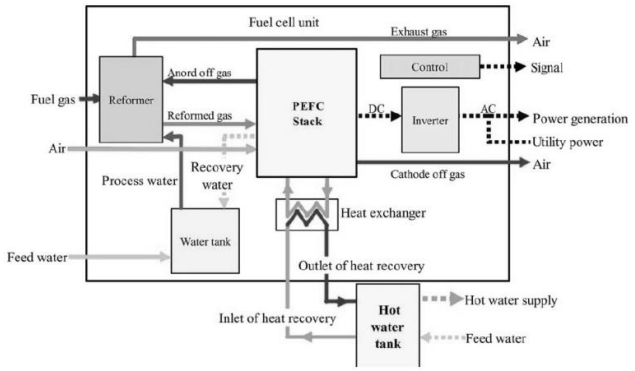
است و انرژی ورودی آنتالپی هیدروژن است. با فرض اینکه کل انرژی آزاد گیبس به انرژی الکتریکی تبدیل شود، ماکزیمم راندمان تئوری ممکن پیل سوختی با رابطهٔ ۴ به‌دست می‌آید:

$$\eta_{FC} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \qquad (۴)$$

تغییرات انرژی آزاد گیبس و آنتالپی واکنش‌دهنده‌ها و محصولات در یک پیل سوختی هیدروژن - اکسیژن از شکل ۲ محاسبه می‌شود. شکل ۳ نیز جزئیات به‌کارگیری پیل سوختی در سیستم‌های میکرو سی. اچ. پی. را نمایش می‌دهد که از گرمای پیل سوختی، توسط یک مبدل حرارتی جهت تأمین آب گرم بهره می‌گیرد.



شکل ۲. تغییرات آنتالپی و انرژی گیبس پیل سوختی برحسب دما



شکل ۳. به‌کارگیری پیل سوختی در سیستم توان و گرمای همزمان

جدول ۶. مشخصات کلی موتورهای استرلینگ به‌صورت توان و گرمای همزمان

توان الکتریکی	راندمان‌ها		سوخت مورد استفاده	
	الکتریکی	کل		
۳–۱۵۰۰	۲۵	۶۵–۹۵	گاز طبیعی، گازوییل، الکل، بوتان	موتور استرلینگ
۲۵۰۰–۴۵۰۰ یورو به ازای هر کیلووات توان برق تولیدی				هزینهٔ سرمایه‌گذاری
در دسترس نیست				هزینه تعمیرات و نگه‌داری
حدود ۱۰ برابر کمتر از سیکل اتو آلودگی تولید می‌کند				انتشار آلودگی

جدول ۷. مشخصات تولیدکنندگان دستگاه‌های توان و گرمای همزمان با به‌کارگیری موتور استرلینگ

ابعاد	سطح صدا	راندمان		توان حرارتی	توان الکتریکی	سازنده
		الکتریکی	کل			
۳۹/۳۷ ارتفاع ۲۷/۵ عمق ۵۷/۱ پهنا	۶۷	۲۴	۹۵	۸–۲۵	۲–۹	CLEANGEN POWER- STIRLING
– –	–	۱۶	۹۲	۱۲–۱۵	۰/۵–۳	INSPIRIT MICRO CHP APPLIANCE
۳۵/۴ ارتفاع ۱۸/۹ عمق ۱۸/۹ پهنا	–	۱۵	۹۶	۶	۱	VIESSMANN

راندمان کل یک پیل سوختی در حالت ایده‌آل عموماً بین ۸۲ تا ۹۴ درصد است که البته به‌دلیل تلفات اهمی ناشی از قطبش غلظت و قطبش اکتیواسیون راندمان آن کمتر می‌شود. پیل‌های سوختی دارای انواع متفاوتی هستند که معمولاً پیل سوختی غشا پلیمری و پیل سوختی اکسید جامد دارای بیشترین کاربرد در سیستم‌های میکرو سی. اچ. پی. هستند. پیل سوختی غشا پلیمری از یک پلیمر هادی یون به‌عنوان الکترولیت استفاده می‌کند. الکترولیت به‌خوبی در دماهای پایین کار می‌کند، عموماً در دمای حدود ۸۰ تا ۱۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد که امکان راه‌اندازی سریع را فراهم می‌نماید. ساختار غشاء پلیمری وابسته به سازنده تغییر می‌کند؛ در هر حال یک نمونهٔ عملی نافیون است. پیل سوختی اکسید جامد از یک ماده سرامیکی هادی یون اکسیژن به‌عنوان الکترولیت استفاده می‌کند. آند یک پیل سوختی اکسید جامد معمولاً ترکیبی شامل نیکل، ایتریا و زیکونیوم پایدار شده است. کاتد دارای ساختار متخلخل است که عموماً از لانتانوم منگنیت ساخته می‌شود. کلیهٔ متریال مورد استفاده در ساخت پیل سوختی اکسید جامد به حالت جامد است. پیل‌های سوختی اکسید جامد در دمای بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد عمل می‌کنند که این دما آنها را برای کاربرد در توان و گرمای هم زمان مناسب می‌سازد [۲– ۷]. در جدول ۸ مشخصات کلی دستگاه‌های توان و گرمای همزمان با فناوری پیل سوختی و در جدول‌های ۹ و ۱۰ به‌ترتیب مشخصات عملکردی سازندگان گوناگون این دستگاه‌ها با فناوری پیل سوختی غشا پلیمری و اکسید جامد دیده می‌شود.

نتیجه‌گیری

مطابق با مباحث و جداول ارائه‌شده در خصوص شرح عملکرد و ویژگی‌های انواع سیستم‌های میکرو سی. اچ. پی. می‌توان فناوری‌های گوناگون را به‌صورت کلی به شرح ذیل مقایسه کرد. البته این مقایسه بسیار کلی است و ممکن است با توجه به تنوع سازندگان فناوری مورد نظر و شرایط بهره‌برداری تغییرات داشته باشد. مقایسه فناوری‌های گوناگون از جنبه‌های مختلف می‌تواند انجام شود. از لحاظ تولید آلایندگی، فناوری‌های به‌کار گیرنده پیل سوختی از سایر فناوری‌ها دارای تولید آلاینده کمتری است و در عوض فناوری استفاده کننده از موتور احتراق داخلی با توجه به ماهیت خود دارای بیشترین انتشار آلایندگی است. از لحاظ هزینهٔ تهیه و تعمیرات و نگهداری، به‌نظر می‌رسد فناوری موتور احتراق داخلی از بقیه ارزان‌تر و در دسترس‌تر است؛ اما فناوری موتور استرلینگ از بقیه گران‌تر است. ضمناً فناوری موتور احتراق داخلی و میکروتوربین نسبت به سایر فناوری‌ها از لحاظ تجاری بودن و سابقه به‌کارگیری در اماکن پیشرو می‌باشند. سایر فناوری‌ها نظیر پیل سوختی و موتور استرلینگ و سیکل رانکین در حال تحقیق و توسعه می‌باشند.

از لحاظ راندمان الکتریکی، فناوری پیل سوختی در مقایسه با سایر فناوری‌ها برنده است و فناوری سیکل رانکین کمترین راندمان الکتریکی را دارد. از لحاظ راندمان کل یعنی مجموع راندمان‌های الکتریکی و گرمایی به‌نظر می‌رسد کلیهٔ فناوری‌ها با اختلاف کمی با هم رقابت می‌کنند. در هر حال استفاده توام از گرمای تولیدشده در دستگاه‌های میکرو سی. اچ. پی. می‌تواند نقش بسیار مؤثری در صرفه‌جویی انرژی مصرفی ساختمان داشته باشد. لذا به‌نظر می‌رسد در ایران، با توجه به منابع غنی گاز طبیعی، استفاده از دستگاه‌های میکرو سی. اچ. پی. در کاربردهای مسکونی یا تجاری کوچک که امکان راه‌اندازی با گاز طبیعی را دارند جهت کاربری تأمین نیاز گرمایی ساختمان شامل آب گرم مصرفی و گرمایش ساختمان و همچنین استفاده از گرمای دستگاه‌های میکرو سی. اچ. پی. در ژنراتور چیلرهای جذبی جهت سرمایش ساختمان، باعث صرفه‌جویی بسیاری در مصرف انرژی با توجه به راندمان معمول ۹۰ درصد این تجهیزات می‌گردد. لازم به‌ذکر است هزینهٔ اولیه خرید و نصب دستگاه‌های میکرو سی. اچ. پی. با توجه به اعداد ارائه‌شده در جداول از سایر تجهیزات معمول گرمایش بیشتر است؛ اما با توجه به

راندمان بالای این تجهیزات در دراز مدت امکان جبران هزینهٔ بالای اولیهٔ آن وجود دارد. ضمناً با توجه به تنوع سوخت مصرفی دستگاه‌های میکرو سی. اچ. پی. از این دستگاه‌ها می‌توان در مکان‌هایی که امکان اجرای شبکهٔ توزیع برق وجود ندارد، جهت تأمین برق و نیازمندی انرژی ساختمان به‌نحو مناسب بهره جست.

جدول ۸. مشخصات کلی پیل‌های سوختی به‌صورت توان و گرمای همزمان

	سوخت مورد استفاده	راندمان‌ها		توان الکتریکی
		کل	الکتریکی	
پیل سوختی	گاز طبیعی، هیدروژن	۸۰–۸۵	۴۰–۵۷	۱–۳۰۰۰
هزینهٔ سرمایه‌گذاری	۳۰۰۰– ۱۰۰۰ دلار به ازای هر کیلووات توان برق تولیدی			
هزینهٔ تعمیرات و نگه‌داری	۰/۰۱– ۰/۰۰۵ دلار به ازای هر کیلووات توان برق تولیدی			
انتشار آلودگی برحسب ppm	ناکس : ۰/۰۰۰۰۵ مونواکسید کربن : ۰/۰۰۰۰۲			

جدول ۹. مشخصات تولیدکنندگان دستگاه‌های توان و گرمای همزمان با به‌کارگیری پیل سوختی غشاء پلیمری

ابعاد		سطح صدا	راندمان		توان حرارتی	توان الکتریکی	سازنده
			الکتریکی	کل			
۵۵/۱	ارتفاع	–	۳۰	۷۵–۸۰	۶/۹–۷/۶	۴/۶	AVANTI
۲۲	عمق						
۴۷/۲	پهنا						
۷۰	ارتفاع	۶۰	–	۹۰	۵/۸۶	۵	CLEAREDGE/POWER
۲۷	عمق						
۳۶	پهنا						

جدول ۱۰. مشخصات تولیدکنندگان دستگاه‌های توان و گرمای همزمان با به کارگیری پیل سوختی اکسید جامد

ابعاد		سطح صدا	راندمان		توان حرارتی	توان الکتریکی	سازنده
			الکتریکی	کل			
۶۴/۵	ارتفاع	–	۳۰–۳۵	۹۵	۱/۸	۱	HEXIS
۲۲/۸	عمق						
۲۴/۴	پهنا						
۳۹/۷	ارتفاع	۴۷	۶۰	۸۵	۰/۳–۰/۵۴	۰/۵–۱/۵	BLUEGEN
۲۳/۶	عمق						
۲۶	پهنا						
۳۲/۱	ارتفاع	–	۵۷	۶۰–۸۵	۱	۲	GENNEX
۱۶/۹	عمق						
۱۵/۷	پهنا						

فهرست علائم و اختصارات

$W_{\max}$	میزان کار ماکزیمم (کیلووات)
G_{react}	میزان انرژی آزاد گیبس واکنش‌دهنده‌ها (کیلووات)
G_{prod}	میزان انرژی آزاد گیبس محصولات (کیلووات)
η_{FC}	راندمان پیل سوختی (درصد)
ΔG	اختلاف انرژی آزاد گیبس (کیلووات)
ΔH	اختلاف آنتالپی (کیلووات)
MCHP	به‌کارگیری همزمان گرما و توان الکتریکی در مقیاس کوچک
CHP	به‌کارگیری همزمان گرما و توان الکتریکی

مآخذ

[1] Bryan, A. 2006. Integration of combined heat and power generatores into small buildings. MS diss., Waterloo University.

[2] Barbir, Frono. 2005. Pem fuel cells theory and practice. Connecticut: University of Connecticut Storrs.

[3] Worth, James. 2005. Micro-cooling, heating, and power (m-chp) instructional module. Mississippi: University of Mississippi.

[4] Gunter R. Simader, Robert krawinkler, George Trnka. 2006. Micro chp systems state-of-the-art. Vienna: Austrian energy agency.

[5] Lemar, Paul. 2002. Integrated energy systems for buildings: a market assessment. Oak ridge, Tennessee: U.S. Department of energy.

[6] Nunez, Tomas. 2010. Polysmart. Fraunhofer: Fraunhofer institute for solar energy system ISE.

[7] Chiristian Olsen, A. 2009. Solid oxid fuel cell micro combined heat and power system-choosing the right reformer. Ms theiss, Aalborg University.

پی‌نوشت

1. CHP
2. MCHP

۳. کلیهٔ توان‌ها در جداول بر حسب واحد کیلووات می‌باشند.

۴. کلیهٔ راندمان‌ها در جداول برحسب درصد می‌باشند.

۵. کلیهٔ هزینه‌های اعلام‌شده در جداول نتیجهٔ بررسی در سال ۲۰۰۶ م است.

۶. کلیهٔ ابعاد درج شده در جداول بر حسب واحد اینچ می‌باشد.

۷. سطح صدا در کلیهٔ جداول بر حسب واحد دسیبل می‌باشد.