مقاله

بررسی عملکرد سیستم‌های نوین تولید توان بر پایهٔ پیل‌های سوختی دمابالا

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

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۲/۰۹

چکیده

افزایش روزافزون جمعیت و روبه زوال رفتن سوخت‌های فسیلی از یکسو، و وسعت آلودگی برجای مانده از این منابع انرژی از سویی دیگر، بشر را بر آن داشته که به فکر منابع انرژی دیگری باشد. امروزه پیل‌های سوختی به‌عنوان یک فناوری جدید در تولید توان محسوب می‌شوند که در میان آنها پیل سوختی دمابالا به‌خاطر بازدهی بسیار بالا، عدم آلایندگی محیط زیست، تولید همزمان الکتریسیته و حرارت، قابلیت استفاده از سوخت‌های متنوع و توانایی ترکیب با سیستم‌های تولید توان دیگر مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. قابلیت این نوع از پیل‌های سوختی در ترکیب با سیستم‌های تولید همزمان سبب شده است که سیستم‌های هیبریدی حاصل به‌عنوان منابع تولید توان جدید مدنظر باشند. با توجه به بازدهی بالای این نوع از سیستم‌های هیبریدی و همچنین نظر به کاهش میزان آلایندگی، سیستم‌های مذکور تأثیر به‌سزایی در نحوهٔ تولید توان را در آینده‌ای نه‌چندان دور ایفا خواهند کرد. هدف از ارائهٔ این مقاله معرفی انواع سیستم‌های هیبریدی حاصل از ترکیب پیل‌های سوختی دمابالا با سیستم‌های تولید توان و بررسی عملکرد آنها در قالب یک سیستم تولید توان نوین است.

واژگان کلیدی: پیل سوختی، پیل سوختی دمابالا، سیستم تولید توان

۱. مقدمه

با توجه به روند روبه رشد مصرف انرژی در جهان، استفاده از روش‌ها و سیستم‌های جدید تولید انرژی با بازدهی بالا و آلایندگی پایین در اولویت قرار گرفته است. اتلاف انرژی در مسیرهای طولانی و همچنین انتقال انرژی و هزینهٔ بالای آن سبب شده است تا تحقیقات به‌سمت تأمین موضعی و مستقل انرژی برای مصرف‌کنندگان از طریق انرژی‌های نو با بازدهی بالاتر سوق پیدا کند. امروزه با گسترش سیستم‌های متنوع تولید انرژی، روش‌های گوناگونی چون

استفاده از انرژی خورشیدی، انرژی باد، پیل‌های سوختی، میکروتوربین‌ها و دیزل ژنراتورها مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ اما هر کدام از این روش‌ها دارای مزیت‌ها و معایب خاص خود می‌باشند. داشتن یک سیستم تولید انرژی قابل اعتماد، کم‌هزینه و در دسترس، استفاده از پیل‌های سوختی را به‌عنوان نامزدی مهم معرفی کرده است. فناوری پیل سوختی، که در آن هیدروژن طی یک سری واکنش‌های الکتروشیمیایی با اکسیژن تولید الکتریسیته و حرارت می‌کند، یکی از بهترین گزینه‌های تولید توان الکتریکی در آینده محسوب می‌گردد [۱]. از مزایای این فناوری می‌توان به تولید ناچیز آلاینده‌های زیست محیطی، بازده بالا، امکان استفادهٔ همزمان از انرژی الکتریکی و حرارتی تولیدشده توسط پیل، دامنهٔ گستردهٔ تولید، کاربرد در صنایع گوناگون، تنوع سوخت مصرفی، نداشتن قطعهٔ متحرک و کاهش نیاز به تعمیرات، آلودگی صوتی پایین و جز انی‌ها اشاره کرد. با توجه به این موارد، امروزه ترکیب پیل‌های سوختی با انواع سیستم‌های تولید توان مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. سیستم‌های هیبریدی حاصل دارای بازده بالایی بوده و پژوهشگران زیادی به‌همراه شرکت‌های سازنده متعدد درپی تجاری‌سازی این سیستم‌ها و افزایش توان و بازده آنها می‌باشند [۲]. پیل‌های سوختی اکسید جامد[۱] (با دمای ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد) و کربنات مذاب[۲] (با دمای ۶۰۰ تا ۷۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد) نمونه‌ای از پیل‌های سوختی با کارکرد دمایی بالا می‌باشند که در این نوع سیستم‌های هیبریدی می‌توانند به‌کار روند. با توجه به اهمیت موضوع، راین مقاله سیستم‌های هیبریدی متنوعی که از ترکیب پیل سوختی دمابالا با انواع سیستم‌های تولید توان ایجاد می‌شود، معرفی و سپس عملکرد آنها بررسی خواهد شد.

۲. معرفی سیستم‌های هیبریدی

سیستم‌های هیبریدی، سیستم‌های تولید توانی هستند که در آنها یک موتور گرمایی همچون توربین گاز، توربین بخار، موتور استرلینگ[۳] و جز این‌ها با یک موتور غیرگرمایی غیرگرمایی همچون پیل سوختی ترکیب می‌شود. گرمای حاصل از واکنش‌های الکتروشیمیایی یک پیل سوختی دمابالا را می‌توان در یک موتور حرارتی مناسب، جهت افزایش عملکرد کلی آن به‌کار برد. ترکیب پیل‌های سوختی دمابالا با سیستم‌های برودتی یا سیستم‌های فتوولتائیک[۴] نیز می‌تواند به‌عنوان سیستم‌های هیبریدی نوین مدنظر قرار گیرد.

سیستم‌های هیبریدی اشاره‌شده شامل پیل سوختی به‌عنوان جزء بالایی[۵] و سیکل دوم به‌عنوان بخش زیرین[۶] می‌باشند. این دو سیکل می‌توانند به‌صورت مستقیم[۷] و غیرمستقیم[۸] با هم ترکیب شوند. زمانی که سیال عامل عبوری از پیل سوختی و سیکل زیرین یکسان باشد، سیستم مورد نظر یک سیستم هیبریدی با تماس حرارتی مستقیم نامیده می‌شود [۳]. سیستم هیبریدی با تماس حرارتی غیرمستقیم نیز زمانی شکل می‌گیرد که سیال عامل عبوری از پیل سوختی و سیکل زیرین متفاوت بوده و این دو سیکل به‌طور غیرمستقیم و از طریق یک مبدل حرارتی با هم تبادل گرمایی انجام دهند. در ادامه انواع سیستم‌های هیبریدی نوین معرفی و کاربرد هر یک از آنها بیان خواهد شد.

۳. ترکیب توربین گاز و پیل سوختی

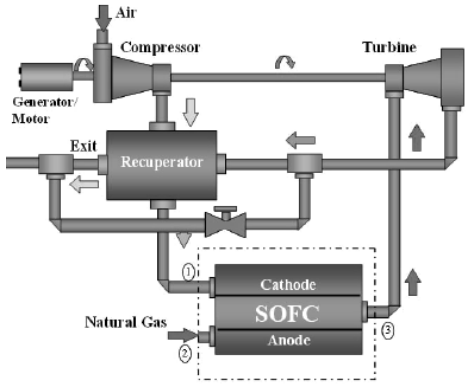
ترکیب توربین گاز و پیل سوختی از جمله سیستم‌های هیبریدی نوینی است که طی سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. سیکل توربین گاز می‌تواند به دو صورت مستقیم تحت فشار[۹] و اتمسفریک[۱۰] و همچنین به‌صورت غیرمستقیم با پیل سوختی ترکیب گردد [۴]. جایگزینی محفظهٔ احتراق سیکل توربین گاز با یک پیل سوختی دمابالا (یا یک مجموعه پیل سوختی و پس‌سوز) یا قرار گرفتن یک پیل سوختی در پایین‌دست یا بالادست محفظهٔ احتراق از انواع ترکیبات تحت فشار سیستم هیبریدی مستقیم و قرار گرفتن پیل سوختی در پایین‌دست

توربین گاز از انواع ترکیبات اتمسفریک آن می‌باشد. در سیستم‌های هیبریدی مستقیم تحت فشار، همان‌طور که در شکل ۱ نیز نشان داده شده است، پیل سوختی به‌کار رفته اغلب تحت فشار معینی قرار می‌گیرد. تحت فشار قرار گرفتن پیل توان خروجی آن را افزایش می‌دهد؛ اما به تناسب چالش‌های بیشتری در طراحی و کنترل سیستم هیبریدی ایجاد می‌کند. به‌دلیل فشار بالای ایجادشده در پیل، بدنهٔ آن نیاز به درزگیری‌های قابل اعتمادی دارد. در این سیستم سوخت و اکسنده‌ای که در پیل واکنش نداده‌اند، در دمای بالایی از پیل خارج شده و در یک پس‌سوز یا محفظهٔ احتراق ثانویه می‌سوزد و انرژی گرمایی لازم برای سیکل زیرین فراهم می‌آورند. همان طور که در شکل ۱ نمایش داده شده است، در این سیستم هوای خروجی کمپرسور وارد یک بازیاب حرارتی می‌گردد که جریان گرم آن از خروجی توربین تأمین می‌شود. این هوا پس از گرم‌شدن به‌همراه سوخت مناسب وارد یک پیل سوختی دمابالا می‌شود. طی یک سری واکنش الکتروشیمیایی بین هوا و سوخت توان معینی در پیل تولید می‌گردد. چون واکنش الکتروشیمیایی انجام‌شده در پیل گرمازا می‌باشند؛ لذا دمای هوا و سوخت در داخل پیل سوختی زیاد می‌گردد. در ادامه گازهای داغ خروجی از پیل سوختی وارد محفظهٔ احتراق (پس‌سوز) شده و یا در گونه‌ای دیگر مستقیماً وارد توربین می‌گردند. در شکل ۲ نمایی شماتیک از این نوع سیستم‌های هیبریدی نمایش داده شده است. در این سیستم از دو محفظهٔ احتراق در بالادست و پایین‌دست پیل استفاده شده است. حداکثر بازده این نوع از سیستم‌های هیبریدی اغلب بین ۶۰ تا ۷۰ درصد است.

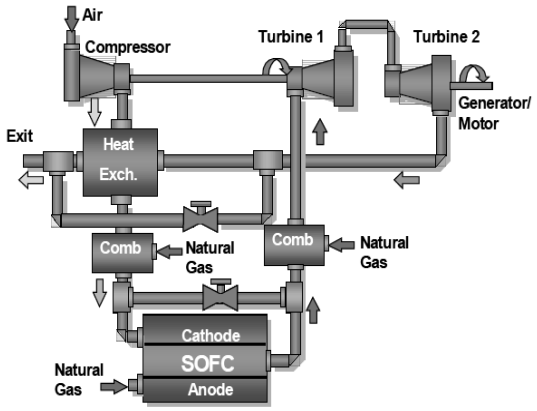
نمونه‌ای دیگر از این نوع سیستم‌های هیبریدی در شکل ۳ نمایش داده شده است. این سیستم هیبریدی شامل ترکیب مستقیم یک پیل سوختی اتمسفری با سیکل توربین گاز می‌باشد. در این سیستم هوای ورودی به پیل سوختی از گازهای خروجی از توربین گازی گرفته می‌شود. با توجه به فشار کم گازهای خروجی از توربین، در این نوع از سیستم‌های هیبریدی پیل‌های سوختی اکسید جامد با دمای متوسط یا پیل‌های سوختی کربنات مذاب مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ادامه، گازهای خروجی از پیل به یک محفظهٔ احتراق وارد و پس از انجام واکنش جهت گرم‌کردن گازهای خروجی از کمپرسور وارد یک مبدل حرارتی می‌شوند. در شکل‌های ۴ و ۵ طرح‌های دیگری از این نوع سیستم هیبریدی نمایش داده شده است. در این نوع از سیستم‌های هیبریدی اکثراً سوخت به‌کار رفته از نوع گاز طبیعی است و هیچ‌گونه سوخت اضافی در محفظهٔ احتراق مصرف نمی‌شود. برتری قابل توجه این سیستم آلودگی بسیار کم آن نسبت به توان تولیدی و بازده بالای آن است. در این نوع از سیستم‌های هیبریدی اغلب توان خروجی از توربین گاز حدود یک‌سوم توان کل سیستم هیبریدی است.

ترکیب غیرمستقیم سیکل توربین گاز با پیل سوختی نوع دیگری از سیستم‌های هیبریدی است. در این سیستم هیبریدی، همان‌طور که در شکل ۶ نمایش داده شده است، پیل سوختی و سیکل توربین گاز از سیستم‌های جداگانه‌ای برای تأمین هوای مورد نیاز خود استفاده کرده‌اند. گازهای داغ خروجی از پیل سوختی پس از عبور از محفظهٔ احتراق، جهت گرم‌کردن هوای خروجی از کمپرسور به‌سمت یک بازیاب هدایت می‌شوند. هوای ورودی به پیل نیز در یک بازیاب حرارتی توسط گازهای خروجی از توربین گرم می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این حالت اغلب پیل سوختی تحت فشار اتمسفری عمل می‌کند. اگرچه در این مورد ملزومات عایق‌کاری پیل سوختی کمتر می‌شود؛ اما مسئلهٔ عمده در این سیستم‌ها طراحی مناسب مبدل حرارتی است. به‌دلیل تفاوت زیاد دما و فشار، بخش‌های سرد و گرم مبدل حرارتی باید از فلزات ویژه باشند، که این مسئلهٔ احتمالاً هزینهٔ بالایی خواهد داشت. انتظار می‌رود که ترکیب غیرمستقیم به‌علت انتقال حرارت و افت فشارهای درون مبدل حرارتی، بازده پایین‌تری در مقایسه با ترکیب مستقیم داشته باشد. طبق تحقیقات انجام‌شده حداکثر بازده

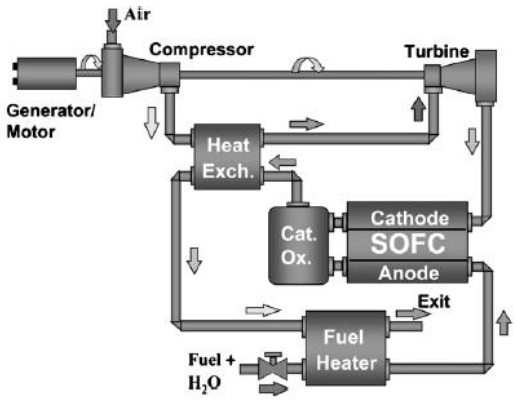
این نوع از سیستم‌های هیبریدی در حدود ۴۵ درصد به‌دست آمده که ۱۰ درصد از سیستم‌های هیبریدی مستقیم با پیل سوختی اتمسفری کمتر می‌باشد [۴].



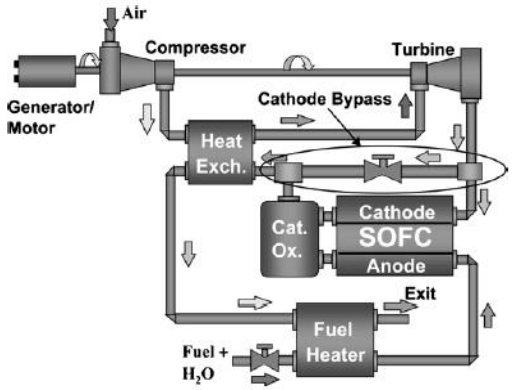
شکل ۱. نمایی شماتیک از ترکیب مستقیم پیل سوختی اکسید جامد تحت فشار با سیکل توربین گاز [۵]



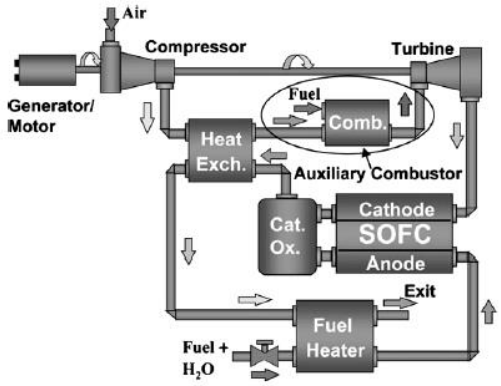
شکل ۲. نمایی شماتیک از ترکیب مستقیم پیل سوختی اکسید جامد تحت فشار با سیکل توربین گاز ساده [۵]



شکل ۳. نمایی شماتیک از ترکیب مستقیم پیل سوختی اکسید جامد اتمسفری با سیکل توربین گاز [۵]

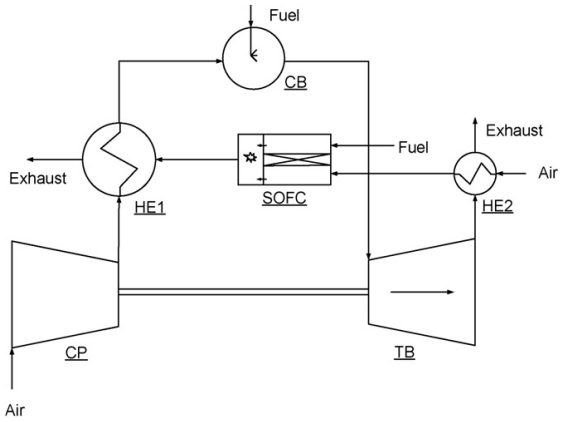


شکل ۴. نمایی شماتیک از ترکیب مستقیم پیل سوختی اکسید جامد اتمسفری با سیکل توربین گاز [۵]

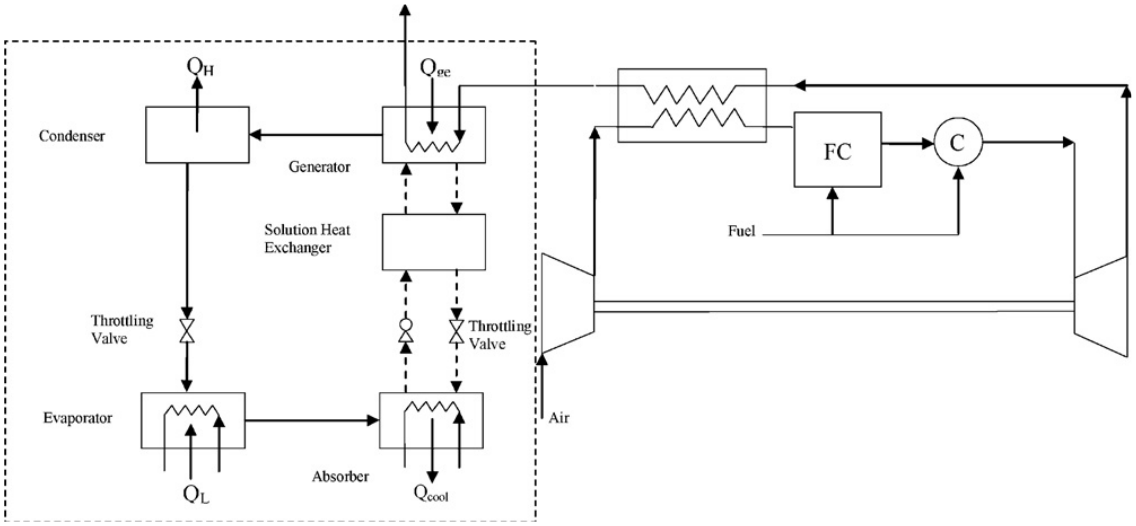


شکل ۵. نمایی شماتیک از ترکیب مستقیم پیل سوختی اکسید جامد اتمسفری با سیکل توربین گاز [۵]

سیستم‌های هیبریدی توربین گاز و پیل‌سوختی می‌توانند با یک سیستم تولید توان دیگر ترکیب سه‌گانه‌ای با بازده بالا تشکیل دهند. ترکیب سیستم هیبریدی توربین گاز و پیل سوختی مستقیم با سیکل‌های معکوس برایتون[11]، سیکل رانکین[12] و سیکل تبرید جذبی[13] نمونه‌ای از این نوع سیستم‌های هیبریدی سه‌گانه‌اند. در این سیستم‌های سه‌گانه اغلب پیل سوختی در بالادست توربین قرار گرفته و گازهای داغ خروجی از توربین در ادامه مسیر خود وارد سیستم تولید توان سوم می‌گردند. در شکل ۷ نمونه‌ای از ترکیب سیستم هیبریدی توربین گاز و پیل سوختی با سیستم تبرید جذبی نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، گازهای داغ خروجی از سیستم هیبریدی در ادامه مسیر خود جهت گرم‌کردن مبرد وارد ژنراتور یک سیستم تبرید جذبی می‌شوند [۴].



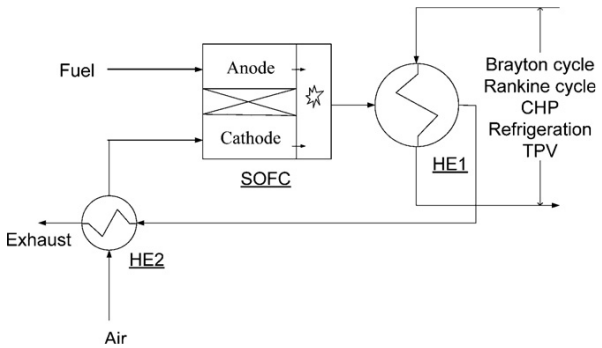
شکل ۶. شماتیک ترکیب غیر مستقیم پیل سوختی اکسید جامد با سیکل توربین گاز [۴]



شکل ۷. شماتیک ترکیب سیستم هیبریدی توربین گاز و پیل سوختی با سیکل تبرید جذبی [۶]

نوع دیگری از سیستم هیبریدی توربین گاز و پیل سوختی، سیستم هیبریدی با تماس حرارتی غیرمستقیم نامیده می‌شود. این سیستم زمانی شکل می‌گیرد که سیال عامل عبوری از پیل سوختی دمابالا و سیکل زیرین متفاوت بوده و این دو سیکل به‌طور غیرمستقیم و از طریق یک مبدل حرارتی با هم تبادل گرمایی انجام می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۸ نمایش داده شده است، این سیستم هیبریدی شامل دو سیکل بسته است. سیکل اول مربوط به پیل

سوختی اکسید جامدی است که از طریق هوای گرم‌شده در یک بازیاب تغذیه می‌شود و سیکل دوم ممکن است یک سیستم تولید توان مانند سیکل‌های توربین بخار، توربین گاز، موتور استرلینگ و یا ترموفتوولتائیک بوده و یا یک سیستم مصرف‌کنندهٔ توان از قبیل سیکل تبرید (سردسازی) باشد. ذکر این نکته ضروری است این دو سیکل می‌توانند در فشارهای کاری مختلف و با سیال عامل‌های متفاوتی کار کنند.

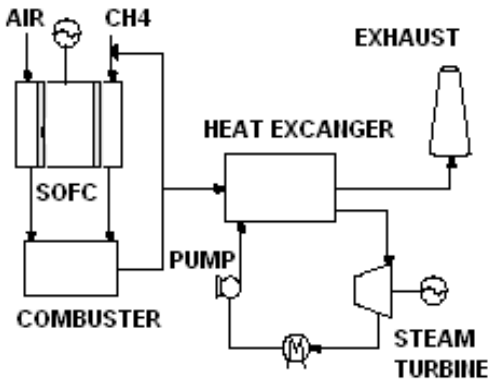


شکل ۸ شماتیک ترکیب غیرمستقیم پیل سوختی
با انواع سیستم‌های حرارتی [۴]

همان‌طور که در شکل ۸ نمایش داده شده است، سیکل توربین گاز می‌تواند به‌عنوان یک سیکل تولید توان از طریق یک مبدل حرارتی از گازهای داغ خروجی از پیل سوختی استفاده نماید. این مبدل حرارتی هم می‌تواند به‌عنوان پیش‌گرم‌کنندهٔ هوای ورودی به محفظهٔ احتراق استفاده شود و هم می‌تواند در گونه‌ای دیگر جایگزین محفظهٔ احتراق سیکل توربین گاز گردد.

۴. ترکیب سیکل توان بخار و پیل سوختی

ترکیب مجموعه توربین بخار با پیل سوختی یکی دیگر از سیستم‌های هیبریدی نوین است. در این نوع از سیستم‌های هیبریدی، همان‌طور که در شکل ۹ نمایش داده شده است، گازهای داغ خروجی از پیل سوختی در ادامه مسیر خود وارد یک مبدل حرارتی می‌شوند که جایگزین محفظهٔ احتراق در سیکل رانکین شده است. گازهای گرم خروجی از پیل در این مبدل سبب گرم‌شدن آب موجود در سیکل رانکین و تبدیل آن به بخار سوپرهیت می‌گردد [۷]. بخار تولیدشده در مبدل در ادامه مسیر خود جهت تولید برق، وارد توربین بخار شده و گازهای داغ خروجی از پیل نیز پس از تبادل حرارت از طریق یک دودکش از مبدل خارج می‌گردد. نکتهٔ مهمی که باید در این سیکل مورد توجه قرار گیرد، استفاده از پیل‌های سوختی دمابالا برای افزایش دمای بخار خارج‌شده از مبدل حرارتی است. با توجه به اینکه سوپرهیت‌بودن بخار ورودی به توربین سبب بهبود عملکرد سیکل توان بخار خواهد شد، استفاده از پیل‌های سوختی اکسید جامد دمابالا (با دمای ۱۰۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد) می‌تواند سبب بالارفتن راندمان و توان تولیدی در سیکل رانکین گردد.

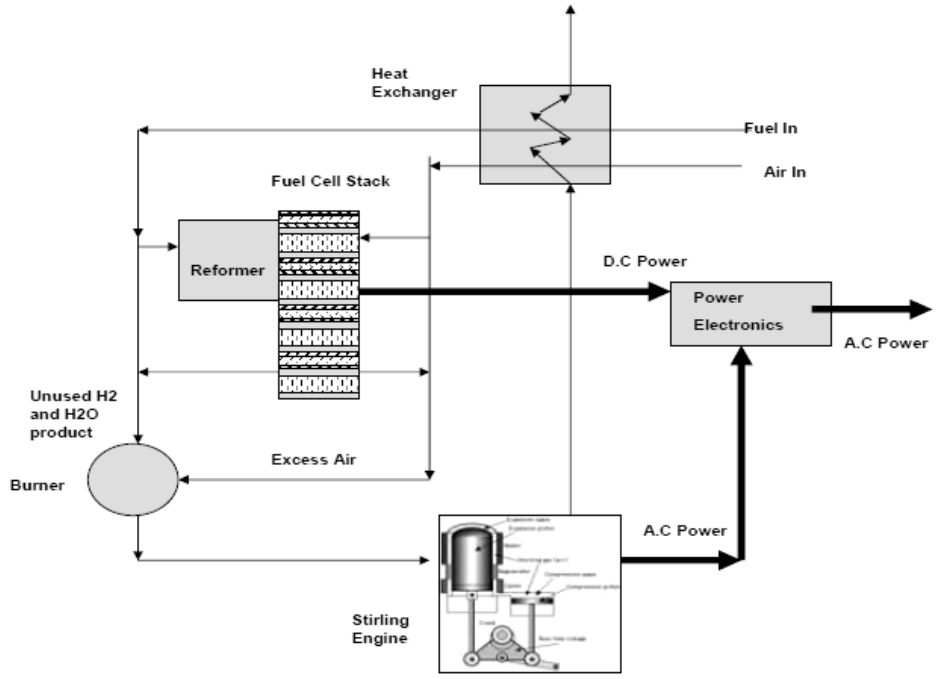


شکل ۹. شماتیک ترکیب پیل سوختی اکسید جامد
با سیکل توان بخار (رانکین) [۷]

۵. ترکیب موتور استرلینگ و پیل سوختی

موتور استرلینگ از جمله سیستم‌هایی است که در سال‌های اخیر علاقه‌مندان زیادی را به‌خود جلب کرده است. به‌لحاظ فیزیکی موتور استرلینگ یک موتور احتراق خارجی است و می‌تواند از هر نوع منبع حرارتی خارجی برای تولید انرژی مکانیکی استفاده کند. در سال‌های اخیر محققان در طراحی و استفاده از موتورهای استرلینگ به نتایج بسیار خوبی دست یافته‌اند. یکی دیگر از انواع سیستم‌های هیبریدی غیرمستقیم، ترکیب پیل سوختی اکسید جامد با موتور

استرلینگ است که در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۴]. در این سیستم هیبریدی، هدف استفاده از انرژی گازهای داغ خروجی از پیل سوختی در بخش گرمکن موتور استرلینگ می‌باشد. در شکل ۱۰ نمایی از کاربرد یک موتور استرلینگ در این نوع از سیستم‌های هیبریدی نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این سیستم هیبریدی هوا و سوخت پس از گرم‌شدن در بازیاب‌های حرارتی وارد پیل سوختی اکسید جامد می‌شوند. با انجام واکنش الکتروشیمیایی در پیل، هوا و سوخت باقیمانده در دمای بالاتر وارد محفظهٔ پس‌سوز یا محفظهٔ احتراق شده و پس از انجام واکنش‌های شیمیایی در ادامه مسیر وارد بخش گرمکن یک موتور استرلینگ می‌شوند. پس از گرم‌کردن گرمکن موتور و تولید توان الکتریکی در آن، گازهای داغ خروجی از آن جهت گرم‌کردن هوا و سوخت ورودی به پیل به‌سمت بازیاب‌های حرارتی هدایت می‌شوند. تولید همزمان توان الکتریکی در پیل و موتور استرلینگ سبب افزایش بازده و توان تولیدی سیستم هیبریدی خواهد شد.

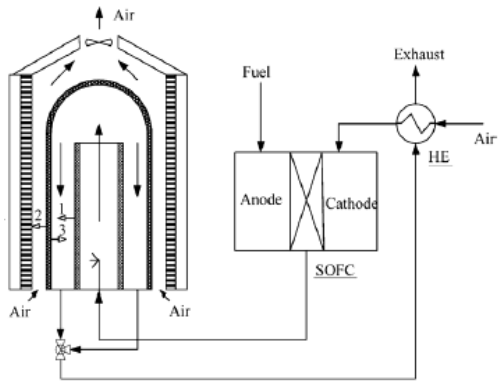


شکل ۱۰. شماتیک ترکیب پیل سوختی اکسید جامد با موتور استرلینگ [۴]

۶. ترکیب سیستم تولید توان ترموفتوولتائیک و پیل سوختی

استفاده از سیستم‌های تولید توان فتوولتائیک از ابتدای سال ۱۹۶۳ م آغاز شده است. ترکیب سیستم تولید توان ترموفتوولتائیک و پیل سوختی از دیگر سیستم‌های هیبریدی غیرمستقیم است. همان‌طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، خروجی پیل سوختی پس از ورود به محفظهٔ احتراق، گرمایی را تولید می‌کند که به‌صورت تشعشعی بر فتوسل‌ها تابیده و تولید توان می‌کند. دمای کاری صادرشده از این سیستم‌ها در محدودهٔ ۱۳۰۰ تا ۲۰۰۰ کلوین قرار داشته و بازده کاری آنها نیز به‌دلیل عدم استفاده کامل از انرژی تشعشعی کمتر از ۲۰ درصد می‌باشد. جهت جلوگیری از اتلاف حرارتی، انرژی تلف‌شده از این سیستم‌ها می‌تواند در سیستم‌های حرارتی دیگر به‌کار برده شود. اگرچه این فناوری به اندازهٔ استفاده از سیستم‌های هیبریدی با سیکل توربین گاز و سیکل توربین بخار موثر نیست؛ اما در

سال‌های اخیر در حال توسعه می‌باشد. از مزایای مهم این سیستم می‌توان به تنوع سوخت به‌کار رفته و زمان بارگذاری پایین آنها اشاره کرد [۴].



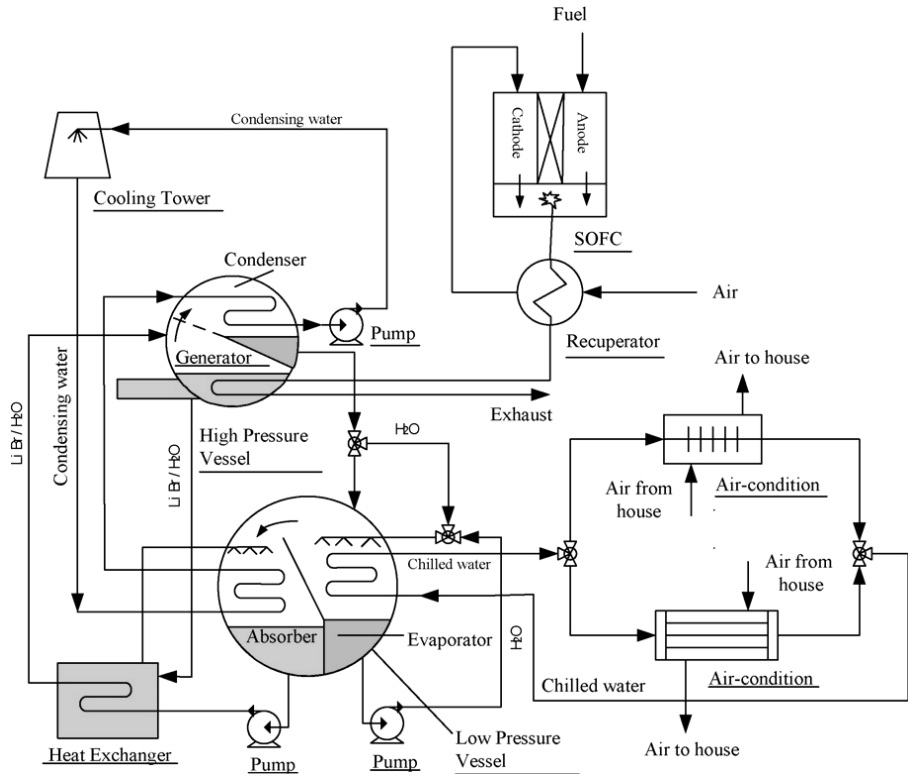
شکل ۱۱. شماتیک ترکیب پیل سوختی اکسید جامد با سیستم تولید توان ترموفتوولتائیک [۴]

۷. ترکیب سیکل تبرید جذبی و پیل سوختی

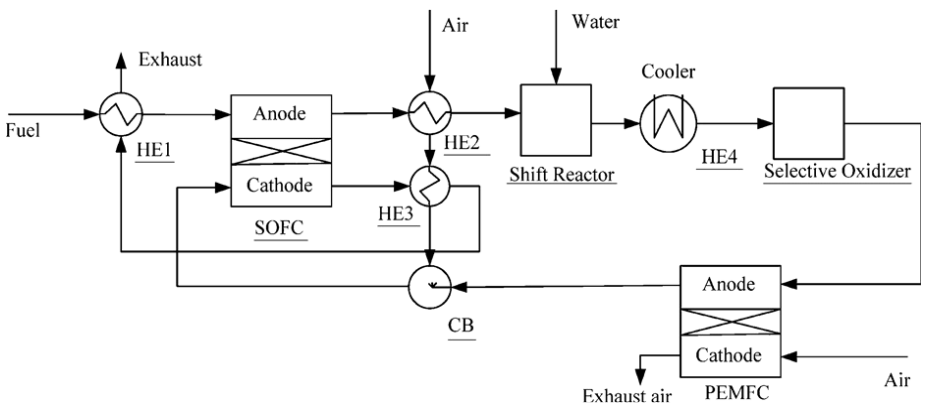
در صورتی‌که منبع انرژی ارزان قیمتی در محدودهٔ دمایی ۱۰۰ الی ۲۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد در دسترس باشد، استفاده از سیستم‌های تبرید جذبی - که بسیار اقتصادی می‌باشند - توصیه می‌شود. چیلرهای جذبی به‌عنوان یک منبع تولید برودت در سیستم‌های تهویه مطبوع، به‌طور گسترده در ساختمان‌های مسکونی و تجاری استفاده می‌شوند. در سیستم‌های جذبی باید حرارت از یک منبع گرمایی به ژنراتور چیلر منتقل شود. استفاده از سیستم پیل سوختی اکسید جامد سبب می‌شود تا گازهای داغ خروجی از آن بتوانند گرمای مورد نیاز ژنراتور چیلر را تأمین کنند. پیل سوختی به‌کار رفته در این نوع از سیستم‌های هیبریدی علاوه بر تأمین گرمای مورد نیاز ژنراتور چیلر، می‌تواند بخشی از توان الکتریکی ساختمان و بخشی از آب گرم بهداشتی مورد نیاز ساکنان را نیز تأمین کند. شکل ۱۲ نشان‌دهندهٔ یک سیستم هیبریدی غیرمستقیم برای پیل سوختی اکسید جامد و چیلر جذبی لیتیم بروماید می‌باشد که بازده آن در حدود ۸۷ درصد ارزیابی شده است [۴]. ذکر این نکته نیز ضروری است که همان‌طور که در شکل ۷ نیز نشان داده شد، برای تولید برودت علاوه بر روش فوق می‌توان از انرژی گازهای خروجی از سیستم هیبریدی توربین گاز و پیل سوختی نیز استفاده نمود.

۸. ترکیب دو پیل سوختی دماپایین و بالا

سیستم هیبریدی مستقیم دیگری که شامل ترکیب پیل سوختی اکسید جامد با یک پیل سوختی پلیمری[۱۴] می‌باشد، در تحقیقات زیادی گزارش شده است. در این سیستم پیل سوختی پلیمری از هیدروژنی که در این سیکل هیبریدی و در طی یک فرایند خاص تولید می‌شود، استفاده می‌کند. همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، ابتدا گاز طبیعی متان وارد پیل سوختی اکسید جامد می‌شود و در طی واکنش به‌سازی اصلاح می‌گردد. پس از این فرایند و در ادامه یک واکنش الکتروشیمیایی در داخل پیل سوختی اکسید جامد صورت گرفته و در طی این واکنش توان الکتریکی معینی در پیل سوختی تولید می‌گردد. گازهای خروجی از پیل سوختی اکسید جامد، که شامل هیدروژن و مونو اکسید کربن مصرف نشده می‌باشند، به‌سمت یک راکتور هدایت می‌شوند. در این راکتور گاز مونو اکسید کربن با آب واکنش می‌دهد و دی‌اکسید کربن و هیدروژن تولید می‌شود. آب تزریقی به راکتور در حدی است که گاز مونو اکسید کربن موجود در آن به دی اکسید کربن تبدیل می‌شود. در ادامه مسیر و در پایین‌دست راکتور نیز باقیمانده مونو اکسید کربن به‌وسیلهٔ یک کاتالیزر مناسب اکسید شده و در نهایت هیدروژن باقیمانده به‌سمت پیل سوختی پلیمری حرکت می‌کند. در این سیستم ضروری است که از آلودگی کاتالیست به‌کار رفته در استک (توده) پیل سوختی پلیمری جلوگیری شود. در ادامه هیدروژن واکنش‌نداده در پیل سوختی پلیمری با هوای گرم‌شده در اثر بازیابی مخلوط می‌شود و سپس مخلوط هوا به‌سمت پیل سوختی اکسید جامد جریان پیدا می‌کند. بازده سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد و پلیمری در حدود ۶۰ درصد پیش‌بینی شده است [۴].



شکل ۱۲. شماتیک ترکیب پیل سوختی اکسید جامد با سیکل تبرید جذبی [۴]



شکل ۱۳. شماتیک ترکیب پیل سوختی اکسید جامد و پلیمری [۴]

۹. جمع‌بندی

امروزه با توجه به بحران انرژی، محدودیت سوخت‌های فسیلی و مشکلات ناشی از آلودگی‌های هوا، استفاده از منابع جدید انرژی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. در همین راستا دیدگاه جدیدی برای استفاده همزمان از پیل‌های سوختی و سیستم‌های تولید توان (یا برودت) ایجاد شده است. یکی از شیوه‌های نوین که فناوری آن در دهۀ اخیر به‌سرعت توسعه یافته است، استفاده مستقیم یا غیرمستقیم از پیل‌های سوختی دماباالا در ترکیب سیستم‌های تولید توان (یا برودت) می‌باشد. ترکیب پیل‌های سوختی دماباالا با توربین گاز، توربین بخار، موتور استرلینگ، چیلرهای جذبی، سیستم‌های تولید توان فتوولتائیک و همچنین سایر پیل‌های سوختی سیستم‌های

هیبریدی جدیدی می‌باشند که دارای بازده بالا و آلایندگی پایینی بوده و در سال‌های اخیر به‌شدت مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه یکی از سوخت‌های استفاده‌شده در پیل‌های سوختی دمابالا گاز طبیعی می‌باشد، ایران با دارابودن منابع غنی گاز طبیعی و شبکه توزیع آن، می‌تواند بهره برداری‌های مؤثری از سیستم‌های هیبریدی معرفی شده در زمینهٔ تولید توان و انرژی پاک نماید.

۱۰. مآخذ

[1] Williams, M. C., *Fuel Cell Handbook*, U.S. Department of Energy, Virginia, 2002.

[2] Brouwer, J., *Hybrid Gas Turbine Fuel Cell Systems*, National Fuel Cell Research Center, University of California, http://www.nfcrc.uci.edu (accessed June 14, 2014)

[۳] پیرکندی جاماسب، قاسمی، حامدی. "*معرفی سیستم‌های هیبریدی توربین گاز و پیل سوختی اکسید جامد جهت تامین انرژی*"، *مهندسی مکانیک*، س. ۱۹، ش. ۷۴، ۱۳۸۹.

[4] Zhang, X., Chan, S.H., Li, G., Ho, H.K., Li, J. and Feng, Z., *A review of integration strategies for solid oxide fuel cells*, Journal of Power Sources, Vol.195, pp.685-702, 2010.

[5] Singhal, S.C, *Advances in solid oxide fuel cells*, Journal of Solid State Ionic, Vol.135, pp.305-313, 2000.

[6] Sammes, N., Smirnova, A. and Vasylyev,O., *Fuel Cell Technologies: State and Perspectives*, Springer, 2005.

[7] Bove, R. and Ubertini, S., *Modeling Solid Oxide Fuel Cells, Methods*, Procedures and Techniques , Springer Netherlands Publisher, 2008. [8] George T. Lee. and Frederick A. Sudhoff., *Fuel cell/gas turbine system performance studies*, Fuel Cells '96 Review Meeting, Morgantown, West Virginia, August 20-21, DOE/METC/C-97/7278, 1996.

پی‌نوشت

1. Solid Oxide Fuel Cell
2. Molten Carbonate Fuel Cell
3. Stirling
4. Photovoltaic
5. Topping component
6. Bottoming cycle
7. Direct
8. Indirect
9. Pressurized SOFC + Gas turbine cycle
10. Non-pressurized SOFC + Gas turbine cycle
11. Brayton
12. Rankine
13. Absorption
14. Proton Exchange Membrane (PEM)

به اطلاع مخاطبان علاقمند و خوانندگان محترم مجلهٔ علمی ترویجی *مهندسی مکانیک* می‌رساند تمامی فرم‌های مورد نیاز جهت تعامل و همکاری با این مجله در وبگاه انجمن مهندسان مکانیک ایران بارگذاری شده است و در دسترس همگان قرار دارد. شایسته است نویسندگان محترم پیش از هر اقدام جهت ارسال مقاله به دبیرخانهٔ انجمن، این فرم‌ها را دانلود و مطالعه کنند تا از این رهگذر روند ارسال، داوری، پذیرش و چاپ مقاله‌ها و گزارش‌ها دقیق‌تر و در کمترین زمان ممکن انجام شود.

هیئت تحریریهٔ مجلهٔ *مهندسی مکانیک*