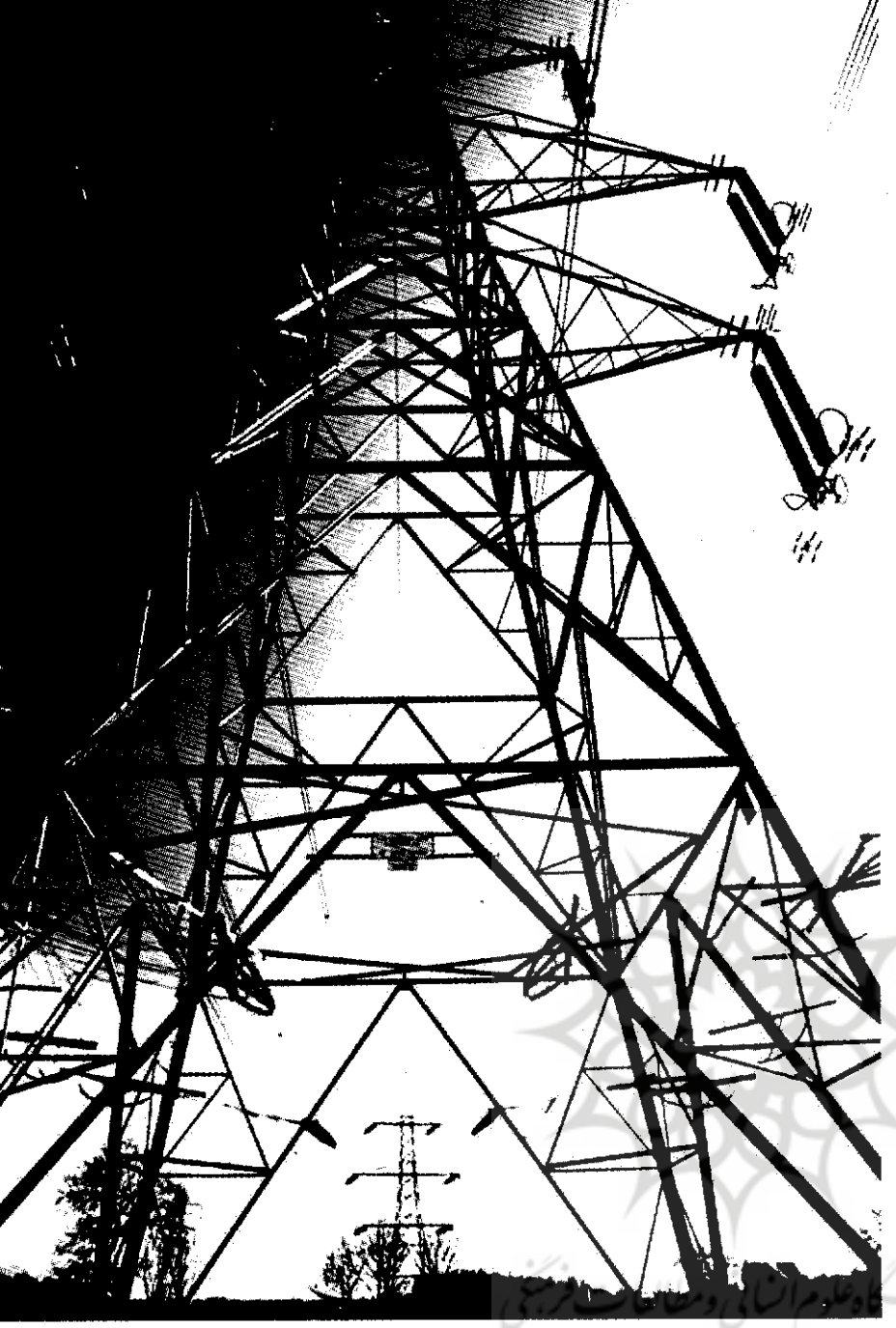


کاربرد پیل های سوختی در تولید انرژی

دکتر اصغر برادران رحیمی* دانشیار گروه مکانیک

پیل‌های سوختی با دمای بالا، استحصال راندمان‌های کلی بیشتر از ۶۰ درصد را نوید می‌دهند. به دلیل مسائلی چند در تکنولوژی مواد و عمدتا به دلیل مخارج اولیه بالا، طرح‌های نیروگاه‌ها در مقیاس بزرگ با چرخه مرکب بر مبنای پیل‌سوختی به تعویق افتاده و پیش بینی می‌شود که ارمغانی برای قرن بیست و یکم باشد. پیل‌سوختی هیدروژنی دارای راندمان‌های بالا در هر دو حالت عملکردی نیمه بار و کامل بار و عملکرد بدون نشر آلودگی هستند. پیل‌های سوختی را می‌توان به عنوان یک منبع ایده آل الکتریسیته در نظر گرفت. این منابع الکتریسته حداقل ۵۰ درصد در نیروگاه‌ها و راندمان کلی بیش از ۸۰ درصد در نیروگاه‌های با تولید هم زمان را دارند. با تکنولوژی پیل‌سوختی می‌توان، ۶۰-۴۰ درصد صرفه جویی انرژی می‌توان کسب کرد. نیروگاه‌های NOX بر مبنای پیل‌سوختی در مقایسه با نیروگاه‌های معمولی ۹۰-۵۰ درصد کمتر است. نشر CO_2 را به این ترتیب می‌توان تا ۵۰ درصد کاهش داد. پیل‌های سوختی غالبا به عنوان باتری‌ها یا موتورهای الکتروشیمیایی با عمل دائمی تشریح می‌شوند. با واکنش هیدروژن با آب، آنها قدرت الکتریکی تولید می‌کنند که بدون استفاده از ماشین‌های احتراقی یا گریز از مرکز است. برخلاف باتری‌ها، پیل‌های سوختی را می‌توان به صورت مدام با استفاده از گاز طبیعی، گاز زغال‌سنگ، یا گازهای دیگر سوختی برای تولید الکتریسیته به کار گرفت. پیل‌های سوختی به خاطر راندمان بالا، قابلیت انشعاب، عملکرد بدون صدا، اثرات زیست‌محیطی کم، ظرفیت کوچک و زمان سرب کوتاه، می‌توانند تکنولوژی ایده آل برای تولید قدرت توزیعی و محلی باشند. پیل‌های سوختی دما بالا به دلیل تولید قابل ملاحظه ای از گرمای اتلافی، کاملا برای استفاده در نیروگاه‌های با تولید هم زمان مناسب هستند.

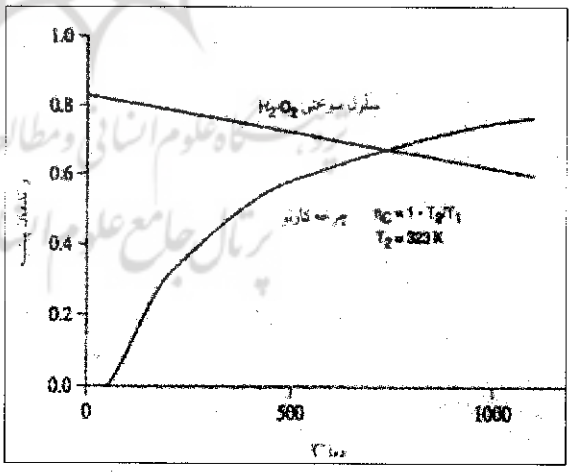
مبانی و پیشرفت در تکنولوژی‌های تولید قدرت با پیل‌سوختی در این مقاله مرور می‌شوند.

امتیازهای اصلی تکنولوژی پیل سوختی عبارت از بازده بالا، استقلال از محدودیت چرخه کار نو و اثرات زیست محیطی خیلی پایین هستند. یک تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی برای یک پیل سوختی H_2-O_2 با راندمان چرخه برگشت پذیر ۸۳ درصد ارائه می‌شود. چرخه‌های مرکب بر مبنای پیل‌های سوختی با دمای بالا $^{\circ}C$(۵۶۰) برای پیل‌های سوختی با الکترولیت کربنات ذوب شده MCFC و در حدود $^{\circ}C$۱۰۰۰ برای پیل‌های سوختی با الکترولیت اکسید جامد(SOFC) به دست آوردن راندمان کلی بیشتر از ۶۰ درصد را نوید می‌دهند. به دلیل مسائلی چند در تکنولوژی مواد و عمدتا به دلیل مخارج اولیه بالا، طرح‌های نیروگاه‌های در مقیاس بزرگ با چرخه مرکب بر مبنای پیل سوختی پیش بینی می‌شود که فقط در دهه اول قرن بیست و یکم تشخیص داده می‌شوند. تأسیسات اخیر پیل سوختی شامل چند مدل صنعتی در محدوده قدرت خروجی ۲-۱۱ MW است. باید تأکیدکرد که مسائل بحرانی چندی در زمینه تکنولوژی وجود دارد که از تشخیص سریع نیروگاه‌های در مقیاس بزرگ با چرخه مرکب جلوگیری می‌کند. مسأله بحرانی، دمای بالای گرم کن هوا است.

◆ پیل سوختی در مقابل چرخه کار نو

یک پیل سوختی یک موتور گرمایی نیست و بنابراین راندمان آن محدود به راندمان چرخه کارنو که برابر با $nc=1-Tc/Th$ است، نمی باشد. در این رابطه Tc دمای چاه سرد است که به آن گرما پس داده می‌شود و Th دمای منبع گرم است که از آن گرما به چرخه کارنو وارد می‌شود. در شکل (۱) راندمان بیشینه چند واکنش پیل سوختی در مقایسه با راندمان چرخه کارنو نشان داده می‌شود.

شکل (۱) راندمان بیشینه یک پیل سوختی در مقایسه با راندمان چرخه کارنو



◆ نیروگاه‌های بر مبنای پیل سوختی

پیل‌های سوختی هیدروژنی امتیازات ذیل را دارا هستند:

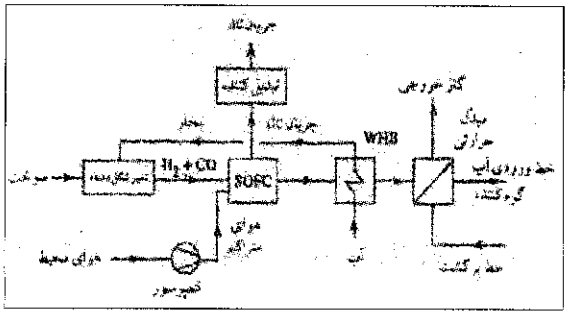
۱- راندمان بالا (بالای ۵۰ درصد) در هر دو حالت عملکرد نیمه بارکامل

۲- عملا بدون نشر آلودگی است، زیرا حاصل واکنش آب است.

این امتیازها با محدودیت‌های به خصوصی از قبیل مخارج بالا و عمر کوتاه سرویس دهی موازنه می‌شود. پیل‌های سوختی ر ا می‌توان به عنوان یک منبع ایده آل الکتریسیته در نظر گرفت. آنها راندمان الکتریسته حداقل ۵۰ درصد در نیروگاه‌ها و راندمان کلی بیش از ۸۰ درصد در نیروگاه‌های با تولید هم زمان را دارند. با تکنولوژی پیل سوختی، ۶۰-۴۰ درصد صرفه جویی انرژی می‌توان کسب کرد. نشر NOx نیروگاه‌های بر مبنای پیل سوختی در مقایسه با نیروگاه‌های معمولی ۹۰-۵۰ درصد کمتر است. نشر CO_2 را به این ترتیب می‌توان تا ۵۰ درصد کاهش داد. با واکنش هیدروژن با آب، آنها قدرت الکتریکی تولید می‌کنند که بدون استفاده از ماشین‌های احتراقی یا گریز از مرکز است. برخلاف باتری‌ها، پیل‌های سوختی را می‌توان به صورت مداوم با استفاده از گازطبیعی، گاز زغال سنگ، یا گازهای دیگر سوختی برای تولید الکتریسته به کار گرفت. ظرفیت کلی نیروگاه‌های پیل سوختی دنیا در سال ۱۹۹۴ فقط ۵۰ MW بود. نیروگاه‌های پیل سوختی با قدرت خروجی در محدوده MW ، اکنون در چند طرح نمایشی در حال مطالعه و تحقیقی قرار دارد. چندین نیروگاه با پیل سوختی مگاواتی برای ساخت در ژاپن و ایالات متحده برنامه ریزی شده است. یک نیروگاه با الکترولیت اسیدفسفریک با ظرفیت ۱۱MW برای مدت پنج سال در ژاپن کار کرده است و طرح‌های اخیر ژاپن شامل نیروگاه‌های ۵MW از این نوع است. در محدوده ظرفیت ۲۰۰KW مخارج کلی ویژه واحد صنعتی پیل سوختی ۳۱۷۰/Kwe دلار آمریکا با گاز طبیعی به عنوان سوخت، در حال حاضر تقریبا سه برابر بالاتر از آن چیزی است که باید حصول شود تا از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد. این مخارج کلی ویژه باید تقریبا ۹۰۰/Kwe دلار آمریکا کاهش یابد و عمر سرویس دهی پیل سوختی باید از ۱۵ هزار ساعت فعلی به حدود ۴۰ هزار ساعت افزایش یابد.

پیل‌های سوختی به خاطر راندمان بالا، قابلیت انشعاب، عملکرد بدون صدا، اثرات زیست محیطی کم، ظرفیت کوچک و زمان سرب کوتاه، می‌توانند تکنولوژی ایده آل برای تولید قدرت توزیعی و محلی باشند. پیل‌های سوختی دما بالا به دلیل تولید قابل ملاحظه ای از گرمای اتلافی، کاملا برای استفاده در نیروگاه‌های با تولید هم زمان مناسب هستند. بستگی به اندازه سیستم و دمای عمل، گرمای اتلافی پیل‌های سوختی را می‌توان برای تولید بخار با آب گرم برای بارهای حرارتی یا برای تولید الکتریسیته اضافی در توربین‌های گازی و بخار به کار گرفت. مزایای تولید انرژی توزیعی را می‌توان تا بیش از ۱۰۰/KW دلار آمریکا تخمین زد.

شکل (۲) نمودار جریان یک نیروگاه با تولید همزمان



اگر قابلیت اعتماد پیل سوختی افزایش یابد، پیل‌های

سوختی می‌توانند هدف نیروگاه‌های بدون کارگر را برآورده کنند. شرکت‌های پیل سوختی برای آماده سازی تکنولوژی خویش به سختی کار می‌کنند. ده‌ها پیل سوختی KW۱۰۰ اکنون در ایالات متحده آمریکا در حال کار هستند. در زمینه جهانی، اخیرا حدود ۱۴ پیل سوختی در سرتاسر اروپا و بیش از ۸۰ واحد آن در ژاپن در حال تولید الکتریسیته هستند. چهار نوع پیل‌های سوختی برای تولید قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرند.

این پیل‌های سوختی عبارتند از:

۱-پیل سوختی قلیایی(AFC) Alkaline Fuel Cell

۲-پیل سوختی اسید فسفریک(PAFC) acid Fuel Cell Phosphoric

۳-پیل سوختی با کربنات مذاب(MCFC) Fuel Cell Molten Carbonate

۴-پیل سوختی اکسید جامد(SOFC) Oxide Fuel Cell Solid

شکل (۲) اصول عمل SOFC با دمای بالا، مناسب برای به کارگیری در نیروگاه‌های با چرخه مرکب، به خصوص در نیروگاه‌های پیل سوختی همراه با گازسازی(IntegratedGasificationFuelCell)رانشان می‌دهد.در جدول (۱) مشخصه‌های اصلی تمام چهار نوع پیل‌های سوختی (دمای عمل، هدایت کننده یونی، و راندمان بر مبنای ارزش گرمایی بالا) جمع آوری شده است. پیل‌های سوختی را می‌توان براساس دمای عمل آنها نیز به سه دسته تقسیم کرد:

۱-پیل‌های سوختی قلیایی و اسید فسفریک از نوع دما پایین (تا۲۰۰°)

۲-پیل‌های سوختی با کربنات مذاب از نوع دمای متوسط،(۶۵۰°-۷۰۰°)

۳-پیل‌های سوختی با اکسید جامد از نوع دما بالا (تا۱۰۰۰°)

سه نوع پیل‌سوختی PAFC,SOFC MCFC, برای تولید قدرت الکتریکی دنبال می‌شوند.نیروگاه‌های پیل سوختی، جریان مستقیم تولید کرده و احتیاج به یک تبدیل کننده برای تبدیل به جریان متغیر ولتاژ ثابت دارد.

جدول (۱) مقایسه انواع پیل سوختی

نوع سلول سوختی	دما(°C)	هدایت کننده یونی	راندمان (LHV)٪
سلول سوختی قلیایی (AFC)	۶۰-۹۰	H^+	۶۰
سلول سوختی اسید فسفریک (PAFC)	۱۶۰-۲۲۰	O^{--}	۳۷-۴۲
سلول سوختی کربنات مذاب (MCFC)	۶۰۰-۶۵۰	$(CO_3)^{--}$	۵۰-۶۰
سلول سوختی اکسید جامد (SOFC)	۸۰۰-۱۰۰۰	H^+	۵۰-۶۵

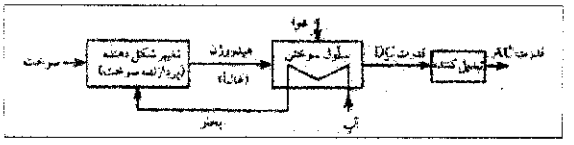
◆ نیروگاه‌های با تولید هم زمان بر مبنای پیل سوختی

نیروگاه بر مبنای پیل سوختی (شکل ۳) باید اجزای اصلی ذیل را داشته باشند:

فرآیند دهنده سوخت شامل یک سیستم گازی کردن، تغییر شکل دهنده و واحد تمیز کننده گاز برای تبدیل سوخت فسیلی از قبیل زغال سنگ، گاز طبیعی، نفت، یا نفت به گاز با هیدروژن غنی.

قسمت قدرت شامل: یک تولید کننده بسته پیل سوختی dc (جریان مستقیم)، تبدیل کننده برای متغیرdc به جریان متغیر (ac).

شکل (۳) نمودار جریانی یک نیروگاه پیل سوختی با پردازنده سوخت



پیل‌های سوختی دما بالا در حال حاضر، به خصوص در کاربرد در نیروگاه‌ها، در دست توسعه است. مشخصه آنها داشتن اثرات فوق العاده کم زیست محیطی و راندمان بالاست. در حالت تولید قدرت، راندمان‌های تا ۶۰ درصد را می‌توان کسب کرد. متأسفانه تولید الکتریسیته مستقیم در نیروگاه‌های پیل سوختی با دمای بالا تاکنون از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نبوده است. با استفاده از گرمای اتلافی و انرژی اتصال شیمیایی گاز دودکش، عملکرد نیروگاه‌های پیل سوختی را افزایش می‌دهد. اگر هیدروژن در گاز خروجی وجود داشته باشد، باید به صورت الکتروشیمیایی از گاز دودکش جدا شود و به پیل سوختی برگشت داده شود. گرمای اتلافی با دمای بالا را می‌توان فقط برای تولید قدرت، یا برای تولید هم زمان گرمای مفید و قدرت به کار برد.

پروژه نمایشی SantaClara در ایالات متحده، اولین نمایش جهانی از تکنولوژی پیل سوختی با کربنات مذاب با سوخت گاز طبیعی در یک اندازه منشعبی مناسب برای طراحی واحدهای صنعتی و تولید قدرت توزیعی است.هدف اصلی این پروژه، نمایش تکنولوژی پیل سوختی کربنات مذاب در مقیاس کامل است. همچنین باید امتیازات ویژه نیروگاه‌های استفاده کننده از تکنولوژی کربنات، شامل: برتری راندمان، نشر پایین، قابلیت اعتماد و کاردهی بالا، و قابلیت کار بدون دخالت بشر را نمایش دهد. این واحدصنعتی شامل:یک سیستم قدرتdc دارای شانزده بسته پیل سوختیKW۱۲ سیستم‌های فرآیندی برای انجام کارهای مربوط به سوخت، بخار، اکسید کننده و جریان گاز خروجی، سیستم‌های الکتریکی لازم برای تبدیل قدرتdc بهac و ارتباط با شبکه محلی است. در ذیل مشخصات طراحی پروژهSantaClara به طور خلاصه نشان داده می‌شود. مشخصات این پروژه عبارتند از: ظرفیت اسمی،MW۲- نرخ خالص واحد صنعتی۱/۸(ac)MW, نرخ گرما(LHV) در این قدرت،-KJ/KwhV۲۳۰۰ قابلیت کاردهی تخمینی، ۹۰درصد- زمان انتظار راه اندازی (از حالت سرد به حالت قدرت کامل)، ۴۰ ساعت - عمر بسته پیل سوختی (در دمای عمل بالاتر از (۵۴۰°، ۱۰ هزار، ساعت ماکزیمم نشر در قدرت کامل (۱۴g/Mwh٪ xso): . (۱۸g/Mwh٪) Nox ـ (۲۲۶۰g/Mwh) co۲ مثال دیگر نیروگاه با تولید هم زمان با پیل سوختیKwe۲۰۰ است که گرما و الکتریسیته را از ژوئن ۱۹۹۳ با راندمان کلی بالاتر از ۸۰ درصد درBuenaPark کالیفرنیا تهیه می‌کند. این پروژه به اندازهKwe۲۰۰ انرژی الکتریکی و همچنینMJ/h۸۰۰ انرژی حرارتی تولید می‌کند و قابلیت اعتماد بسیار بالایی دارد [۵]. این واحد صنعتی دارای نشر آلودگی قابل ملاحظه ای نبوده و آن را تمیزترین نیروگاه تولید الکتریسیته سوخت فسیلی می‌کند.

تکنولوژی معروف به پیل سوختی مستقیم استفاده

کننده از کربنات مذاب، تغییر شکل داخلی سوخت‌های هیدروکربن در داخل پیل‌های سوختی را فراهم می‌آورد. بنابراین هر تغییر شکل دهنده خارجی را حذف می‌کند و وضعیت این واحد صنعتی را ساده می‌سازد. گرمای لازم برای تغییر شکل دادن، مستقیما از واکنش‌های گرمازائی پیل سوختی تهیه می‌شود. این کار ملزومات پس دادن گرما و مقدار گرمای اتلافی تولیدی را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد. چنین نیروگاه‌هایی بیشتر با سوخت‌های هیدروکربن کار می‌کنند و بنابراین افزایش قابلیت انعطاف در سوخت را فراهم می‌آورد.

نیروگاه‌های برمبنای پیل سوختی با یک تغییر شکل دهنده برای تولید هیدروژن، یک پیل سوختی اکسید جامد، یک دیگ حرارتی مواد زائد برای تولید بخار برای فرآیند تغییر شکل دادن و یک مبدل حرارتی برای مصرف گرمای خروجی، برای کار تجارتی و در آلمان در سال ۲۰۱۰ برنامه‌ریزی شده است. این طرح شامل اجزای ذیل است: گازی کننده با دمای بالا، تولید کننده بخار با استفاده از گرمای گاز خام، واحد تمیز کننده و آماده سازی گاز زغال‌سنگ، توربین گاز، بسته‌های پیل سوختی MCFC، مبدل حرارتی گرمای اتلافی برای به کارگیری گرمای پس داده شده توسط آند واحدهای پیش گرم کننده گاز سوختی و هوا یا اکسیژن که به ترتیب وارد آند و کاتد می‌شوند، مبدل حرارتی گرمای اتلافی برای تولید آب گرم. این نیروگاه با پیل سوختی در مقایسه با نیروگاه‌های معمولی امتیازات مهمی از قبیل: نشر خیلی پایین و تولید قدرت در بالاترین راندمان (تا ۶۵ درصد) را در بر دارد. به خاطر فرآیند پیچیده و مؤثر تمیز کردن و آماده سازی گاز زغال سنگ لازم برای عمل پیل سوختی، نشر به دست آمده بسیار پایین است.

مفاهیم توسعه نیروگاه بر مبنای تکنولوژی‌های پیل سوختی با دمای متوسط و بالا MCFC و SOFC در حال انجام است. کاربردهای تجارتی گسترده از این پیل‌های سوختی، اصولا به دلیل مخارج بالای آن در حال حاضر ممنوع است، ولی نیروگاه‌های بر مبنای MCFC و SOFC به خاطر راندمان بالا و نشر آلودگی پایین آنها از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه خواهند بود وقتی که مخارج آنها به حدود KW/۱۵۰۰ دلار آمریکا از ظرفیت نصب کاهش یابد. اگر ظرفیت کلی نیروگاه‌های با پیل سوختی MW۲۰۰-۳۰۰ به صورت سالیانه نصب شوند، این مخارج کسب خواهند شد. ژاپن برنامه‌ریزی کرده است تا نیروگاه‌های پیل سوختی با ظرفیت کلی Gwe۲ را تا سال ۲۰۰۰ برای کار تجاری عرضه کند. در آینده نیروگاه‌هایی با پیل سوختی انتخاب مناسبی به جای نیروگاه‌های اتمی حرارتی معمولی خواهند بود. در حال حاضر هیدروژن از گاز طبیعی، روغن معدنی (نفت)، یا زغال سنگ تولید می‌شود. به این وسیله یک محصول گازی با هیدروژن غنی توسط تغییر شکل دادن بخار گاز طبیعی یا نفتا (تقریبا در ۹۰۰°C) یا توسط گازی سازی زغال سنگ (اکسیداسیون جزیی با اکسیژن حدودا در ۱۴۰۰°C) از این سوخت‌ها تولید می‌شود. وقتی گاز طبیعی یا نفت به عنوان سوخت اولیه به کار می‌رود، گاز حاصله دارای ترکیبات هیدروژن، منواکسیدکربن، متان، دی اکسید کربن و نیتروژن است. در یک فرآیند تبدیل کاتالیزوری دو مرحله‌ای در ۵۰۰°C-۳۰۰°C (مرحله اول) و ۲۰۰°C (مرحله دوم)، منواکسید در گاز خام حاصله به دی اکسید کربن تبدیل می‌شود که در یک تمیز کننده در پایین دست برداشته می‌شود و به این ترتیب محصول گازی به‌دست آمده هیدروژن است. مخارج تولید هیدروژن بستگی به سوخت و فرآیند تولید به خدمت گرفته شده دارد.

◆ نیروگاه‌های با تولید هم زمان بر مبنای توربین گاز و موتور دیزلی

نیروگاه‌های با چرخه مرکب استفاده کننده از توربین گاز یا موتورهای دیزلی را می‌توان برای تولید هم زمان قدرت و گرما به کار گرفت. در حال حاضر نیروگاه‌های با چرخه مرکب بر مبنای توربین‌های احتراقی با آتش‌زائی گاز طبیعی و موتورهای دیزلی، پایین ترین مخارج و هم زمان بالاترین راندمان (تا ۵۸ درصد) را در بین انواع نیروگاه‌های با محدوده ظرفیت تا MW۵۰۰ را دارا هستند. این نیروگاه‌های چرخه مرکب را بدون هیچ تعدیل فنی لازم می‌توان به آتش زائی با هیدروژن تبدیل کرد. هزینه‌های سرمایه گذاری (ثابت) و عملکرد (جاری) تخمینی و راندمان‌های نیروگاه‌های با چرخه مرکب بر مبنای توربین گاز و دیزلی در جدول (۲) ارائه می‌شود. عمر سرویس دهی این نیروگاه‌ها با کار ۸ هزار ساعت در سال، ۳۰ سال تخمین زده می‌شود. زمان لازم برای توسعه بیشتر این تکنولوژی به سطح یک واحد صنعتی تجاری از ۱۰-۵ سال تخمین زده می‌شود.

جدول (۲) هزینه، تخمینی و راندمان کلی نیروگاه با چرخه مرکب

پارامتر	نیروگاه با چرخه مرکب GT	واحد تولید همزمان DE
قدرت خروجی، MW	۳۰۰	۳/۱
هزینه سرمایه گذاری نیروگاه، $/kW آمریکا	۵۷۰	۵۷۰
هزینه عملکردی سالیانه، $/kW آمریکا	۱۸	۳۵
راندمان کلی (LHV)، %	۵۲	الکتریکی ۲۵ ، حرارتی ۵۹ ، ۸۴

مراجع:

1- J.H. Hirschenhofer< D.B. Stauffer, Fuel Cells: A Handbook, rev. 3. Reading, Mass: Gilbert / Commonwealth Inc. 1994.

2- R. Swanekamp, Fuel Cells Inch Towards Mainstream Power Duties. Power. 139(6):82-90, 1995.

3- M.J. Mayfield, Update On U.S. Department Of Energy's Phosphoric Acid Fuel Cells Program. In Proceedings Of The Sixteenth Energy Technology Vonference, pp.184-196. Government Institutes, Inc. 1989.

4- T.p. O'shea and A.J. Leo. Santa Clara Demonstration Project: The First 2- Mw Carbonated Fuel Cell. Presented at the fuel cell seminar, San Diego, Calif., Nov. 1994.

5- F.L. Whitaker, and W.J. Lueckel. The Phosphoric Acid Pc25 Fuel Cell Power Plant and Beyond. In American Power Conference. 1994.