

مدل سازی ترمودینامیکی چرخه هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد / توربین گازی دارای سیستم جذب اکسیژن غشای تبادل یونی با کاربرد در صنعت نفت

قاسم عرب^{۱*}، حسین قدمیان^۲

^۱ استادیار گروه مهندسی مکانیک، واحد یادگار امام خمینی (ره)، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

gh.arab@iausr.ac.ir

^۲ استادیار پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج

h.ghadamian@merc.ac.ir

چکیده: در این تحقیق، یک چرخه هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد/توربین گازی با فناوری غشای تبادل یونی، به منظور جذب دی اکسید کربن مورد بررسی و تحلیل های ترمودینامیکی قرار گرفته است. این چرخه با هدف تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز یک سکوی نفتی کشور طراحی شده و دی اکسید کربن تولیدی آن به مخزن نفتی تزریق می شود. بر این اساس، در ابتدا با معرفی چرخه پیشنهادی و ارائه روش مدل سازی، با استفاده از کدنویسی در محیط نرم افزار حل گر معادلات مهندسی (EES) مدل سازی ترمودینامیکی انجام شده و معادلات بالانس جرمی، انرژی و الکتروشیمی به صورت هم زمان حل شده اند. نتایج مدل سازی نشان می دهد این چرخه بدون سیستم جذب و متراکم سازی دی اکسید کربن دارای بازده الکتریکی ۷۹/۱۹٪ است که با اضافه شدن سیستم جذب و متراکم سازی دی اکسید کربن، بازده الکتریکی به ۷۵/۴٪ کاهش می یابد. سهم پیل سوختی اکسید جامد، توربین گازی و توربین بخار در تولید توان های این چرخه، به ترتیب برابر ۷۳/۵۵٪، ۱۸/۷۹٪ و ۷/۶۷٪ هستند. میزان تولید ویژه دی اکسید کربن این چرخه در قیاس با نیروگاه های مدرن گازسوز چرخه ترکیبی، میزان ۲۴/۱۲٪ کاهش را نشان می دهد. با تزریق دی اکسید کربن تولیدی این چرخه به مخزن نفتی، میزان ۹۹۵ بشکه نفت خام در سال، از این محل قابل استحصال است. تحلیل پارامتریک انجام شده نشان می دهد فشار کاری چرخه با لحاظ محدودیت عملکردی غشای تبادل یونی، بایستی تا حد ممکن پایین باشد. با توجه به وضعیت، ساختار مخازن و ضریب برداشت از منابع نفتی کشور، استفاده از این فناوری، به سبب مزایای ذکر شده در این تحقیق، در سکوهای نفتی کشور پیشنهاد شده است.

واژه های کلیدی: پیل سوختی اکسید جامد/توربین گازی، جذب دی اکسید کربن، غشای تبادل یونی، ازدیاد برداشت، مدل سازی ترمودینامیکی.

۱. مقدمه

و همکاران تحلیل عملکرد ترمودینامیکی یک چرخه هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گازی را در یک سیستم تولید هم‌زمان انجام داده و نتایج حاصل از این تحقیق، نشانگر افزایش بازده سیستم هیبریدی در اثر افزایش دما و فشار کاری پیل (تا حدود ۸۰ درصد) است [۹]. پیرکنندی و همکاران در تحقیقی دیگر، مقایسه عملکرد سیستم‌های هیبریدی مستقیم و غیرمستقیم توربین گازی و پیل سوختی اکسید جامد از دیدگاه ترمودینامیکی و انرژی را ارائه کرده و نتایج حاصل نشانگر بالا بودن کارایی سیستم هیبریدی مستقیم در مقایسه با نوع غیرمستقیم آن است. همچنین بازده بالا، بازگشت‌ناپذیری کمتر، توان تولیدی بیشتر، آلاینده‌گی پایین از مزایای سیستم هیبریدی مستقیم است [۱۰]. پورمیرزاآقا و همکاران، شبیه‌سازی و تحلیل ترمودینامیکی چرخه ترکیبی توربین گازی مجهز به پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای و بررسی میزان برگشت‌ناپذیری سیستم ترکیبی را انجام داده و در آن، همه اجزای سیستم به‌صورت جداگانه، به‌کمک روابط ترمودینامیکی مدل‌سازی شده و آثار پارامترهای مختلف بر بازده چرخه و آنتروپی تولیدی سیستم ترکیبی، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان داده است سیستم ترکیبی دارای بازده ۵۶/۹٪ در قیاس با سیستم بدون پیل سوختی با بازده ۳۱/۴٪ است که نشان از عملکرد فوق‌العاده سیستم ترکیبی دارد [۱۱]. مطالعات و مدل‌سازی این سیستم هیبریدی با اهداف مختلفی از قبیل انجام تحلیل‌های ساختاری و پارامتریک انجام شده و انجام مطالعات شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و تحلیل‌های پارامتریک در این حوزه همچنان ادامه دارد [۱۲-۱۷].

پیل سوختی هیدروژنی ذاتاً سیستمی کاملاً تمیز است، اما در مواقعی که از سوخت‌هایی نظیر گاز طبیعی یا متان استفاده می‌شود، در این چرخه نیز دی‌اکسیدکربن تولید می‌شود که با استفاده از فناوری‌های جذب دی‌اکسیدکربن می‌توان به چرخه‌ای با آلاینده‌گی بسیار کم رسید. فناوری‌های مختلفی با دسته‌بندی پیش‌احتراقی^۴، پس‌احتراقی^۵ و احتراق اکسیژنی^۶ برای جذب دی‌اکسیدکربن معرفی شده‌اند. در فناوری پس‌احتراقی، جذب دی‌اکسیدکربن در یک فرایند شیمیایی صورت گرفته و به مقدار زیادی انرژی حرارتی نیاز دارد. این فناوری در بسیاری از نیروگاه‌های گازی کنونی در حال استفاده است. در این میان، دسته‌بندی احتراق اکسیژنی در پیل‌های سوختی، اخیراً مورد توجه ویژه قرار گرفته است [۱۸]. فناوری احتراق اکسیژنی در قیاس با فناوری معمول پس‌احتراقی، بسیار ساده‌تر و کاراتر است [۱۹]. در این فناوری، سوخت رقیق‌شده خروجی از آن، با اکسیژن خالص در یک محفظه احتراق

فناوری پیل سوختی اکسید جامد^۱ به‌عنوان یک فناوری مطمئن برای تولید توان در بخش تولید پراکنده یا نیروگاهی بزرگ شناخته می‌شود [۱]. این فناوری با داشتن مزایایی از قبیل بازدهی الکتریکی بالا، دانسیته توان بالا، آلاینده‌گی پایین، وجود نداشتن قطعات متحرک، صدای کم و همچنین توانایی استفاده از گاز طبیعی به‌عنوان سوخت، یکی از گزینه‌های جذاب برای تولید توان است [۲]. با توجه به دمای کاری بالای این نوع پیل سوختی (۸۰۰-۱۰۰۰°C)، قابلیت تلفیق هم‌افزای آن با سایر فناوری‌های تولید توان نظیر توربین گاز^۲ وجود دارد و در این راستا، تلاش‌ها برای دستیابی به فناوری‌های تمیز و با بازده بالای تولید برق، منجر به معرفی و توسعه فناوری هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد/توربین گازی شده است [۳]. شرکت زیمنس-وستینگ‌هاوس^۳ این سیستم توسعه‌یافته را در ظرفیت تولیدی ۲۲۰ کیلووات ساخته و نتایج نشان‌دهنده بازده الکتریکی و قابلیت اطمینان بالای این سیستم است [۴]. همچنین با توجه به دمای بالای کارکردی این چرخه، امکان استفاده از فناوری تولید هم‌زمان گرما و توان در این چرخه هیبریدی وجود داشته و نتیجه آن چرخه‌ای با تولید هم‌زمان توان و حرارت، تمیز و با بازده بالا خواهد بود [۵]. کاظم‌پور و همکاران، مدل‌سازی پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای را برای سیستم‌های ترکیبی گرما و الکتریسته، با هدف ارزیابی عملکرد این پیل سوختی انجام داده‌اند. نتایج حاصل از این تحقیق، نشان‌دهنده تأثیر مصرف سوخت و نرخ هوای اضافی در عملکرد این پیل‌هاست [۶]. کاظم‌پور و همکاران در تحقیقی دیگر، عملکرد یک پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای را در ساختار تقویت‌شده آندی، با استفاده از یک مدل عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد که به‌ترتیب تلفات فعال‌سازی کاتد، آند و اهمی نقش‌های مهمی در کاهش ولتاژ مدار باز سلول دارند. توزیع کسر مولی اجزا نیز نشان می‌دهد که فرایند تبدیل داخلی سوخت به‌علت دمای پایین عملکرد سلول تا ۸۰٪ طول سلول ادامه می‌یابد و این فرایند نقش بسیار مهمی در توزیع دما در سلول دارد [۷]. صنایع و همکاران، بهینه‌سازی فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم هیبرید پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گاز را در بار کامل، به‌منظور تولید توزیع‌شده انرژی الکتریکی با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه کرده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که حساس‌ترین و مهم‌ترین پارامتر طراحی سیستم، چگالی جریان پیل سوختی است و انتخاب دقیق مقدار آن، سهم مهمی در توازن میان کارایی و هزینه سیستم دارد [۸]. پیرکنندی

4. Pre-Combustion
5. Post Combustion
6. Oxy-Combustion

1. Solid Oxide Fuel Cell
2. Gas Turbine
3. Siemens - Westinghouse

فشار در غشا، یون‌های اکسیژن را جابجا نموده و در نتیجه، اکسیژن خالص تأمین می‌کند. این فناوری نیاز به فشار و دمای بالایی جهت کارکردن (فشار ۷-۳۵ بار و دمای ۸۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد [۲۷]) دارد. برای تأمین فشار و دمای کاری غشای تبادل یونی در چرخه‌های معمول نیاز به مصرف انرژی زیادی است و این عامل به‌عنوان مانعی برای توسعه این سیستم در چرخه‌های معمول نیروگاهی عمل می‌کند. این در حالی است که با توجه به دما و فشار کاری بالا در پیل‌های سوختی اکسید جامد تحت فشار، استفاده از این فناوری با کمترین تلفات انرژی امکان‌پذیر بوده و لذا یکی از فناوری‌های مورد توجه در این تحقیق، بررسی ترمودینامیکی فناوری غشای تبادل یونی است.



شکل (۱): فناوری غشای تبادل یونی

مطالعات مختلفی بر روی چرخه‌های هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد/ توربین گازی انجام شده است، اما بررسی چرخه‌های هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد/ توربین گازی دارای سیستم جذب دی‌اکسیدکربن در کاربردهای مختلف، کمتر مورد توجه واقع شده‌اند. علاوه بر این، ایران کشوری نفت‌خیز بوده و ازدیاد برداشت از مخازن نفتی، همواره یکی از دغدغه‌های اساسی کشور به‌شمار می‌آید. به‌کارگیری دی‌اکسیدکربن برای تزریق به میادین نفتی، با هدف افزایش ضریب برداشت، یکی از روش‌های مرسوم است که در این تحقیق، به آن پرداخته شده است تا از یک سو، با طراحی یک سیستم تولید توان هیبریدی با بازده بالا، نیاز الکتریسیته یک سکوی نفتی تأمین شده و از سوی دیگر، دی‌اکسید تولیدی در این چرخه، جذب شده و جهت افزایش ضریب برداشت، مجدداً به منبع نفتی تزریق گردد. حدود ۹۰ درصد از مخازن نفتی ایران از نوع شکاف‌دار هستند و استخراج ثانویه از این مخازن کمتر از ۳۰ درصد است. روش‌هایی همچون تزریق امتزاجی و غیرامتزاجی، روش‌های شیمیایی و حرارتی و تزریق دی‌اکسیدکربن به‌عنوان روش‌های ثالثیه^۴ ازدیاد برداشت شناخته شده‌اند و معمولاً تزریق آب و دی‌اکسید کربن به‌صورت توأم انجام می‌شود [۲۸]. در روش غیرامتزاجی، گازهای خروجی از تأسیسات بزرگ صنعتی که بخش اعظم آن را دی‌اکسیدکربن تشکیل می‌دهد، برای تزریق استفاده می‌شود.

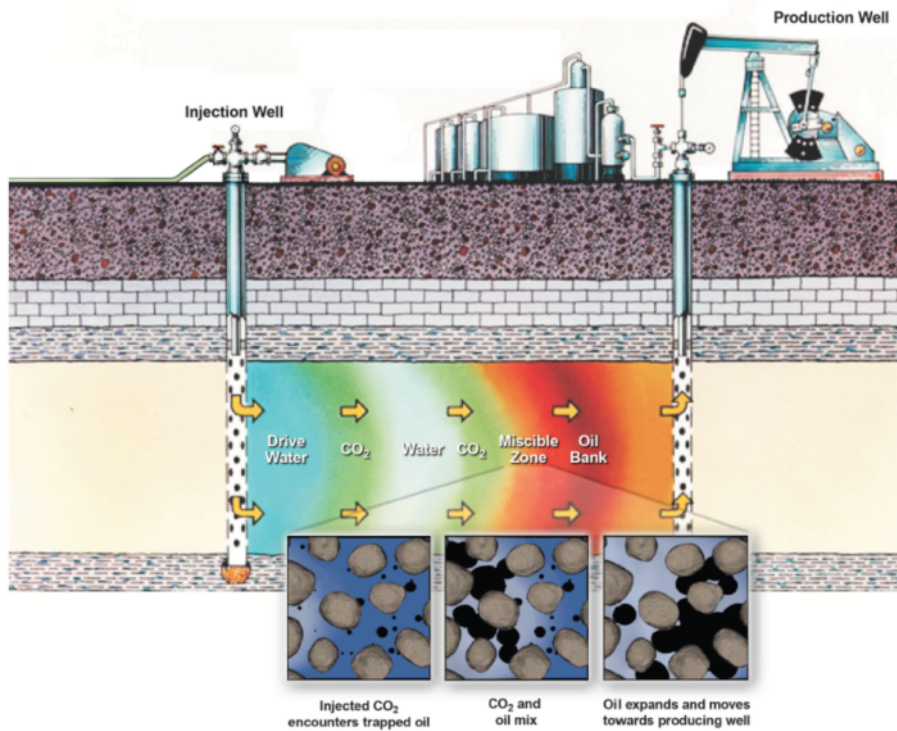
اکسیژنی سوخته و در نتیجه، محصولات احتراق تنها شامل آب و دی‌اکسیدکربن بوده و با تقطیر کردن آب، دی‌اکسیدکربن از جریان جدا می‌شود. فناوری‌های مختلفی براساس مفهوم احتراق اکسیژنی جهت جذب دی‌اکسیدکربن در سیستم‌های هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد/ توربین گازی معرفی شده‌اند [۲۰، ۲۱ و ۲۲]. دی‌اکسیدکربن با همکاری همکاران با بررسی دو چرخه مختلف پیل سوختی اکسید جامد/ توربین گازی، دارای فناوری راکتور غشایی جابجایی آب-گاز^۱ برای جذب دی‌اکسیدکربن، بازدهی الکتریکی ۶۰/۷٪ را گزارش کرده‌اند [۲۳]. مولر و همکاران، با مدل‌سازی یک چرخه هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد/ توربین گازی دارای فناوری جذب دی‌اکسیدکربن براساس روش پس‌احتراقی، بازدهی ۶۳٪ را گزارش کرده‌اند [۲۴]. کوامسدال و همکاران، ۹ ساختار از نیروگاه‌های چرخه گازی دارای فناوری جذب دی‌اکسیدکربن را بررسی و با توجه به بازده چرخه و میزان انتشار دی‌اکسیدکربن مقایسه کرده‌اند. در این مقایسه، فناوری هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد/ توربین گازی براساس روش احتراق اکسیژنی با بازده ۶۷٪ دارای بیشترین بازده در بین چرخه‌های مورد بررسی بوده است [۲۵]. فرانزونی و همکاران، تحلیل ترمودینامیکی تأثیرات جذب دی‌اکسیدکربن براساس روش‌های پیش‌احتراقی و احتراق اکسیژنی را در سه چرخه مختلف بررسی کرده و نتایج حاصل نشان‌دهنده بازده ۵۸/۲٪ روش احتراق اکسیژنی است [۲۶]. پارک و همکاران، یک چرخه هیبریدی تحت فشار پیل سوختی اکسید جامد/ توربین گازی دارای فناوری جذب دی‌اکسیدکربن را براساس روش احتراق اکسیژنی و با استفاده از فناوری غشای تبادل یونی^۲ بررسی کرده و نتایج این تحقیق، دستیابی به بازده ۶۷/۴٪ را نشان می‌دهد [۲۷].

فناوری‌های جذب دی‌اکسیدکربن بر مبنای احتراق اکسیژنی بسیار جذاب به‌نظر می‌رسند، اما بایستی اکسیژن مورد نیاز فرایند احتراق در این چرخه‌ها تأمین شود. تولید اکسیژن که در واحدهای معمول جداسازی هوا^۳ صورت می‌گیرد، بسیار پرهزینه و مستلزم مصرف انرژی بالایی است. فناوری بسیار جذابی که اخیراً معرفی شده، شامل یک غشای سرامیکی است که اکسیژن را از هوا جدا می‌کند. این فناوری غشای تبادل یونی نام دارد و برآورد می‌گردد که صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در هزینه سرمایه‌ای و افزایش بازدهی چرخه‌های نیروگاهی در صورت جایگزینی با واحدهای معمول جداسازی هوا ایجاد کند [۲۷]. طرح‌واره فناوری غشای تبادل یونی در شکل (۱) ارائه شده است که از یک هدایت‌کننده یونی و الکترونی تشکیل شده و به‌سبب اختلاف

1. Water Gas Shift Membrane Reactor (WGSMR)
2. Ion Transport Membrane (ITM)
3. Air Separation Unit (ASU)

گازی با توجه به شرایط کاری یکی از مخازن نفتی ایران، مورد بررسی قرار گرفته است. میزان توان خالص تولیدی چرخه با توجه به توربین‌های مورد استفاده در سکوها نفتی که از نوع راستون TB5000^۱ می‌باشند، برابر ۳/۵ مگاوات در نظر گرفته شده و طراحی سیستم بر این اساس انجام شده است [۳۰].

در این روش، گاز تزریقی در قسمت بالای مخزن متراکم می‌شود و فشار مخازن را افزایش می‌دهد و حرکت نفت را سهولت می‌بخشد؛ طرح‌واره‌ای از آن در شکل (۲) ارائه شده است [۲۹]. در این تحقیق، کاربرد جداسازی و ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن تولیدشده در چرخه تولید توان پیل سوختی اکسید جامد/ توربین



شکل (۲): ازدیاد برداشت از مخازن نفتی با استفاده از تزریق آب و دی‌اکسید کربن [۲۹]

یونی و همچنین استفاده از دی‌اکسید کربن جذب‌شده در مخازن نفتی برای افزایش ضریب برداشت، از نوآوری‌های این تحقیق است.

۲. معرفی چرخه

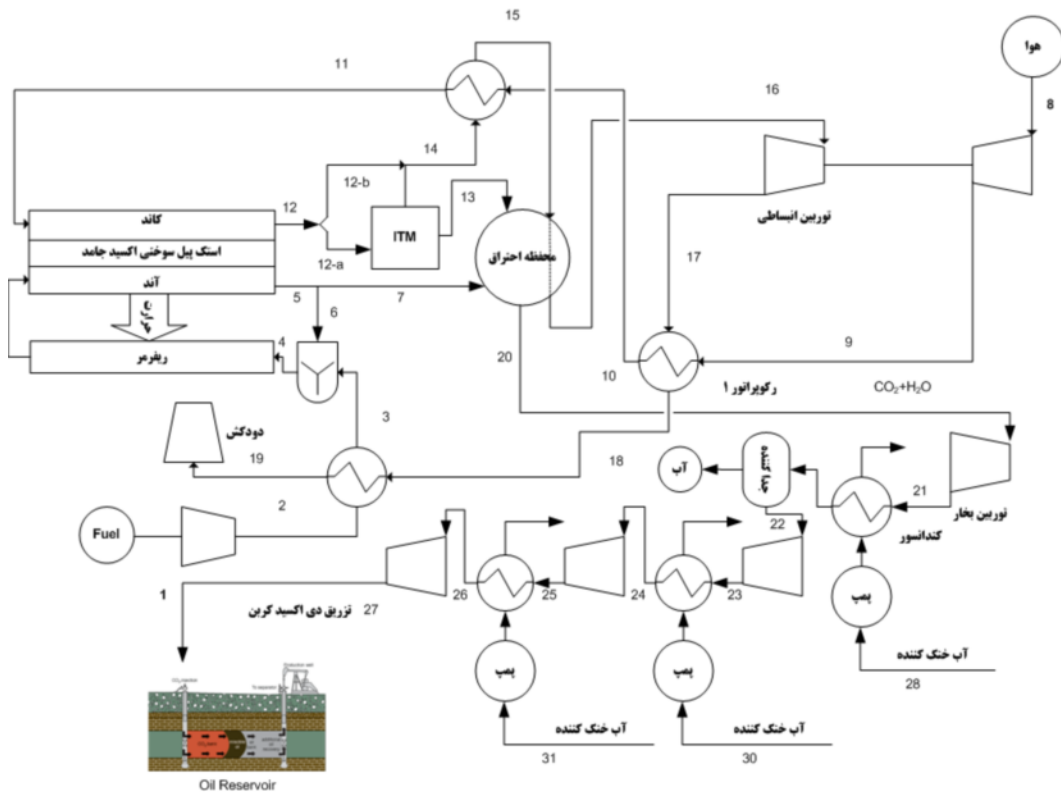
طرح‌واره چرخه مورد بررسی در شکل (۳) ارائه شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، سوخت از نقطه (۱) وارد چرخه شده و پس از متراکم شدن در کمپرسور، با سوخت برگشتی از آند مخلوط و وارد پیل سوختی تحت فشار با ریفرمر داخلی می‌گردد. جریان خروجی از آند پیل سوختی اکسید جامد دارای هیدروژن و منواکسید کربن است و با اکسیژن در یک محفظه احتراق محترق شده و در نتیجه در جریان مقطع (۲۰)، آب و دی‌اکسید کربن وجود خواهد داشت. این جریان با کیفیت بالا وارد توربین بخار شده و کار تولید می‌کند. در ادامه، آب موجود در جریان مقطع (۲۱) در چند مرحله سرمایش تقطیر شده و در نتیجه،

در این تحقیق، در ابتدا با معرفی چرخه هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد دارای فناوری جذب دی‌اکسید کربن از نوع غشای تبادل یونی، روش مدل‌سازی ترمودینامیکی چرخه و روابط مورد نیاز برای مدل‌سازی هریک از تجهیزات ارائه شده است. در ادامه و در قالب مدلی یکپارچه، مدل‌سازی ریاضی چرخه در نرم‌افزار EES^۱ براساس حل هم‌زمان معادلات تعادل جرمی، تعادل انرژی و الکتروشیمی و روش تکرار برای تمامی تجهیزات توسعه یافته است. در انتها، مشخصات چرخه در نقطه طراحی، ارائه شده و مهم‌ترین مشخصات آن از دیدگاه ترمودینامیکی، مورد تحلیل قرار گرفته است. با توجه به کاربرد در نظر گرفته شده، تحلیل پارامتریک انجام شده و نتایج ارائه شده‌اند.

مدل‌سازی و تحلیل پارامتریک چرخه هیبریدی با چیدمان ارائه‌شده مبتنی بر فناوری جذب دی‌اکسید کربن با استفاده از روش غشای تبادل

یونی جدا شده و جریان (۱۴) خروجی از کاتد پیل سوختی پس از گرمایش مجدد در محفظه احتراق، وارد توربین انبساطی گازی شده و کار تولید می‌کند. در این چرخه، پیل سوختی اکسید جامد، توربین بخار و توربین گازی توان خروجی تولید می‌کنند که بخشی از آن‌ها در کمپرسورهای هوا، سوخت و دی‌اکسید کربن و پمپ‌ها مصرف می‌شوند.

دی‌اکسید کربن از آن جدا شده و وارد بخش فشرده‌سازی و تزریق به مخزن نفتی می‌گردد. هوا نیز از نقطه (۸) وارد کمپرسور شده و پس از گرمایش، تا رسیدن به دمای نزدیک به دمای کاری پیل سوختی (نقطه ۱۱) وارد کاتد پیل سوختی می‌شود. بخشی از اکسیژن موجود در جریان (۱۲) جهت تکمیل فرایند احتراق در محفظه احتراق، در یک غشای تبادل



شکل (۳): چرخه هیبریدی با فناوری جذب دی‌اکسید کربن بر پایه غشای تبادل یونی

به‌دست آمده است. فرضیات توسعه مدل به‌صورت زیر خلاصه شده‌اند:

۱. تجهیزات در شرایط جریان پایدار کار می‌کنند؛
 ۲. مخلوط‌های گازی به‌عنوان گاز ایدئال در نظر گرفته می‌شوند؛
 ۳. واکنش‌های شیمیایی به تعادل می‌رسند؛
 ۴. تمامی تجهیزات به‌صورت آدیاباتیکی در نظر گرفته می‌شوند.
- تمامی روابط مورد نیاز برای مدل‌سازی سیستم در ادامه شرح داده شده است. معادلات بالانس جرم و انرژی در هر تجهیز، به‌ترتیب براساس روابط کلی (۱) و (۲) به‌دست می‌آیند.

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (1)$$

$$\sum \dot{Q}_{in} + \sum \dot{W}_{in} + \sum \dot{n}_{in} h_{in} = \sum \dot{Q}_{out} + \sum \dot{W}_{out} + \sum \dot{n}_{out} h_{out} \quad (2)$$

در مدل‌سازی پیل سوختی اکسید جامد، توسعه و حل هم‌زمان معادلات بقای جرم، انرژی و الکتروشیمی بایستی صورت پذیرد. پیل

۳. روش انجام مدل‌سازی ترمودینامیکی

در پیل سوختی انرژی شیمیایی سوخت به‌واسطه واکنش‌های الکتروشیمیایی، مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. یک مدل ترمودینامیکی جریان پایدار با استفاده از معادلات بقای جرم، انرژی و الکتروشیمی به‌منظور مدل‌سازی سیستم توسعه داده شده است. مدل محاسباتی توسعه داده شده مقادیر دبی مولی و جزء مولی تمامی جریان‌ها به‌همراه خصوصیات فیزیکی آن‌ها از قبیل آنتالپی، دما و فشار را می‌دهد. شرایط خروجی از یک تجهیز در یک سیستم پیوسته، به‌عنوان شرایط ورودی به تجهیز بعدی در نظر گرفته می‌شود. پس از توسعه روابط و انجام مدل‌سازی، پارامترهای ورودی مدل‌سازی در مدل قرار داده شده و با استفاده از الگوریتم تکرار، مشخصات سایر نقاط طراحی براساس حل هم‌زمان معادلات بالانس جرم، انرژی و الکتروشیمی

$$\varepsilon_{rec1} = \frac{T_{10}-T_9}{T_{17}-T_9} \quad (11)$$

با توجه به فشار کاری پیل سوختی اکسید جامد، هوای ورودی قبل از ورود، در کمپرسور فشرده می‌شود. کمپرسورها با استفاده از معادلات روابط نسبت فشار و بازده ایزنتروپیک^۶ کمپرسور مدل‌سازی می‌شوند. روابط (۱۲) و (۱۳) برای کمپرسور هوا ارائه شده و برای کمپرسورهای سوخت نیز قابل تعمیم است. مدل‌سازی توربین نیز براساس روابط نسبت فشار و بازده ایزنتروپیک^۷ توربین صورت می‌گیرد. با توجه به بازده سیستم کوپلینگ^۸ مکانیکی و بازده ژنراتور، توان خروجی از توربین گازی براساس رابطه (۱۵) و توان خروجی از توربین بخار براساس رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود.

$$P_9 = P_8 R_p \quad (12)$$

$$\eta_{is,ca} = \frac{h_{9,is}-h_8}{h_9-h_8} \quad (13)$$

$$\eta_{is,t} = \frac{h_{16}-h_{17}}{h_{16}-h_{17,is}} \quad (14)$$

$$\dot{W}_{GT} = (\dot{W}_T - \dot{W}_{ca}) \eta_m \eta_g \quad (15)$$

$$\dot{W}_{ST} = (H_{20} - H_{21}) \eta_m \eta_g \quad (16)$$

تزریق گاز دی‌اکسیدکربن براساس فشار امتزاجی مناسب مخزن نفتی صورت گیرد. لذا دی‌اکسیدکربن جذب‌شده در جریان شماره ۲۲، پس از چند مرحله تراکم دارای خنک‌کن میانی تا فشار مناسب مخزن (جریان ۲۷) متراکم می‌شود.

توان خالص خروجی این چرخه برابر اختلاف مجموع توان تولیدی در پیل سوختی اکسید جامد، توربین گازی و توربین بخار است و مجموع توان مصرفی در کمپرسور سوخت، کمپرسور هوا، پمپ‌های تغذیه و کمپرسورهای دی‌اکسیدکربن است. میزان انرژی مورد نیاز جهت متراکم کردن دی‌اکسیدکربن بر مشخصه‌های فنی و اقتصادی چرخه بسیار تأثیرگذار است؛ لذا توان خالص خروجی و بازدهی الکتریکی این چرخه با توجه به وجود یا عدم وجود سیستم جذب و متراکم‌سازی دی‌اکسیدکربن ارائه می‌شود تا مقایسه بهتری از میزان مصرف انرژی (جریمه انرژی) آن صورت گیرد. مقدار کار خالص خروجی و بازده الکتریکی چرخه در صورت نداشتن سیستم جذب و متراکم‌سازی دی‌اکسیدکربن و با داشتن این سیستم، به ترتیب با استفاده از روابط (۱۷)، (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) به دست می‌آیند.

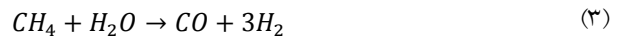
$$\dot{W}_{net,out,W/OCCS} = \dot{W}_{SOFC} + \dot{W}_{GT} + \dot{W}_{ST} - \dot{W}_{ca} - \dot{W}_{cf} - \dot{W}_{pu} \quad (17)$$

$$\eta_{ele,W/OCCS} = \frac{\dot{W}_{net,out,W/OCCS}}{\dot{n}_{CH_4} LHV} \quad (18)$$

$$\dot{W}_{net,out,WCCS} = \dot{W}_{net,out,W/OCCS} - \dot{W}_{CCS} \quad (19)$$

$$\eta_{ele,WCCS} = \frac{\dot{W}_{net,out,WCCS}}{\dot{n}_{CH_4} LHV} \quad (20)$$

سوختی اکسید جامد مورد استفاده از نوع لوله‌ای و دارای ریفرمر^۱ داخلی است. در ریفرمر دو فرایند به‌سازی متان^۲ و دگرگونی آب-گاز^۳ ارائه شده در روابط (۳) و (۴) به‌صورت هم‌زمان انجام می‌شود. مقدار متان به‌سازی شده و منوکسیدکربن دگرگون‌شده، با استفاده از روابط ثابت تعادل به دست می‌آیند. گرمای مورد نیاز انجام واکنش‌ها از طریق استک^۴ پیل سوختی اکسید جامد تأمین می‌شود.



مقدار سوخت برگشت داده شده با استفاده از رابطه نسبت بخار به کربن و براساس رابطه (۵) به دست می‌آید. برای عملکرد صحیح ریفرمر، این مقدار بایستی بین ۲ تا ۳ باشد [۱۵].

$$SCR = \frac{\dot{n}_{3,H_2O}}{\dot{n}_{3,CH_4}} \quad (5)$$

در پیل سوختی اکسید جامد، علاوه بر انجام واکنش‌های به‌سازی و دگرگونی مطابق معادلات روابط (۳) و (۴)، فرایند الکتروشیمی نیز طبق رابطه (۶) صورت گرفته و برق DC تولید می‌کند.



مقدار هیدروژن واکنش داده شده توسط رابطه (۷) و براساس ضریب کاربرد سوخت به دست می‌آید.

$$U_f = \frac{\dot{z}}{4\dot{n}_{4,CH_4}} \quad (7)$$

مقدار ولتاژ سلول پیل سوختی با استفاده از رابطه (۸) و براساس در نظر گرفتن تأثیرات فشار و دمای کاری پیل سوختی و ولتاژ مرجع به دست می‌آید که در آن، ولتاژ مرجع (V_{ref}) براساس آخرین مقالات منتشرشده، برابر ۰/۷ در نظر گرفته شده است [۲۷].

$$V = V_{ref} + \frac{R_u T}{4F} \ln \left(\frac{p_{SOFC}}{p_0} \right) \quad (8)$$

بر این اساس، مقدار توان AC خروجی پیل سوختی اکسید جامد با استفاده از رابطه (۱۰) به دست می‌آید.

$$\dot{W}_{SOFC} = \frac{\eta_{inv} \eta_g N_{cell} V_{iAct}}{1000} \quad (10)$$

برای مدل‌سازی رکوپراتورها^۵ از میانگین ضریب تأثیر رکوپراتور استفاده می‌شود. رابطه (۱۱) برای رکوپراتور شماره ۱ ارائه شده و برای سایر رکوپراتورها نیز از روشی مشابه استفاده شده است. با توجه به این رابطه و مشخص بودن مقدار ضریب تأثیر رکوپراتور، دمای خروجی جریان سرد در رکوپراتور به دست آمده و دمای خروجی جریان گرم با استفاده از بالانس انرژی در رکوپراتور به دست می‌آید.

1. Reformer
2. Steam reforming
3. Gas shifting
4. Stack
5. Recuperator

۴. نتایج و بحث

۱.۴. نتایج مدل سازی

اعتبار سنجی مدل پایه پیل سوختی اکسید جامد/توربین گازی در تحقیقات قبلی [۳۱] ارائه شده است و در اینجا، محدوده عملکردی این سیکل در قیاس با سایر سیکل های منتشر شده در مقالات ارائه می شود. مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی چرخه هیبریدی مورد بررسی با نتایج منتشر شده در مقالات که در جدول (۳) ارائه شده اند، نشان می دهد نتایج حاصل با دقت مناسبی در محدوده عملیاتی سایر تحقیقات قرار دارد.

جدول (۲): نتایج حاصل از مدل سازی چرخه هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد/ توربین گازی دارای غشای تبادل یونی

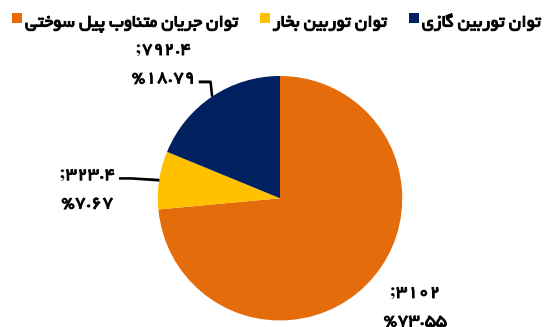
شماره جریان	دما (K)	فشار (bar)	دبی جرمی (g.s ⁻¹)	جزء مولی (%)						
				CH ₄	CO	CO ₂	H ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂
۱	۱۵/۲۹۸	۱/۰۱۳	۱۰۵	۱۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۴۸۵/۸۹	۸/۱۰۴	۱۰۵	۱۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۵۷۴/۲۷	۷/۹۴۲	۱۰۵	۱۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۴	۱۰۲۷/۵	۷/۷۸۳	۷۹۷/۷	۱۸/۱۸	۶/۱۳	۲۱/۱۵	۱۰/۲۴	۴۴/۳۱	۰	۰
۵	۱۱۷۳/۱۵	۷/۵۴۵	۱۱۵۵	۰	۷/۴۹	۲۵/۸۵	۱۲/۵۱	۵۴/۱۵	۰	۰
۶	۱۱۷۳/۱۵	۷/۵۴۵	۶۹۲/۷	۰	۷/۴۹	۲۵/۸۵	۱۲/۵۱	۵۴/۱۵	۰	۰
۷	۱۱۷۳/۱۵	۷/۵۴۵	۴۶۱/۸	۰	۷/۴۹	۲۵/۸۵	۱۲/۵۱	۵۴/۱۵	۰	۰
۸	۲۹۸/۱۵	۱/۰۱۳	۳۴۰/۳	۰	۰	۰	۰	۰	۷۹	۲۱
۹	۵۷۶/۳۸	۸/۱۰۴	۳۴۰/۳	۰	۰	۰	۰	۰	۷۹	۲۱
۱۰	۸۷۵/۹۴	۷/۹۴۲	۳۴۰/۳	۰	۰	۰	۰	۰	۷۹	۲۱
۱۱	۹۸۵/۲۶	۷/۵۴۵	۳۴۰/۳	۰	۰	۰	۰	۰	۷۹	۲۱
۱۲	۱۱۷۳/۱۵	۷/۵۴۵	۳۰۴۷	۰	۰	۰	۰	۸۷/۲۴	۱۲/۸۶	۰
۱۳	۱۱۷۳/۱۵	۷/۳۹۴	۶۲/۹۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰۰
۱۴	۱۱۷۳/۱۵	۷/۳۹۴	۲۹۸۴	۰	۰	۰	۰	۸۸/۸۸	۱۱/۱۲	۰
۱۵	۱۰۵۳	۷/۲۴۶	۲۹۸۴	۰	۰	۰	۰	۸۸/۸۸	۱۱/۱۲	۰
۱۶	۱۴۱۷/۴۶	۷/۱۰۱	۲۹۸۴	۰	۰	۰	۰	۸۸/۸۸	۱۱/۱۲	۰
۱۷	۹۱۶/۷۹	۱/۰۹	۲۹۸۴	۰	۰	۰	۰	۸۸/۸۸	۱۱/۱۲	۰
۱۸	۵۷۸/۹۲	۱/۰۶۸	۲۹۸۴	۰	۰	۰	۰	۸۸/۸۸	۱۱/۱۲	۰
۱۹	۵۷۰/۰۵	۱/۰۴۶	۲۹۸۴	۰	۰	۰	۰	۸۸/۸۸	۱۱/۱۲	۰
۲۰	۸۷۳	۷/۳۹۴	۵۲۴/۸	۰	۰	۳۳/۳۳	۰	۶۶/۶۷	۰	۰
۲۱	۴۵۴/۵	۰/۲	۵۲۴/۸	۰	۰	۳۳/۳۳	۰	۶۶/۶۷	۰	۰
۲۲	۳۳۳/۱۵	۰/۱۹۶	۲۸۸/۶	۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۰
۲۳	۵۶۸/۴۶	۲/۱۸۳	۲۸۸/۶	۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۰
۲۴	۳۳۳/۱۵	۲/۱۳۹	۲۸۸/۶	۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۰
۲۵	۵۶۸/۴۶	۲۳/۸۲۹	۲۸۸/۶	۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۰
۲۶	۳۳۳/۱۵	۲۳/۳۵۳	۲۸۸/۶	۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۰
۲۷	۵۶۸/۴۶	۲۶۰/۱۰۸	۲۸۸/۶	۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۰
۲۸	۲۹۳/۱۵	۱/۰۱۳	۴۰۹	۰	۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۰
۲۹	۳۰۳/۱۵	۱/۰۱۳	۴۰۹	۰	۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۰

میزان انتشار آلاینده دی اکسید کربن در این سیکل، برابر $g.kWh^{-1}$ $۲۶۱/۸$ در نقطه طراحی است که در قیاس با نیروگاه های مدرن سیکل ترکیبی گازسوز که $g.kWh^{-1}$ ۳۴۵ دی اکسید کربن [۳۲] تولید می کنند، میزان $۲۴/۱۲$ ٪ کاهش را نشان می دهد. دی اکسید کربن تولیدی در این چرخه، توسط فناوری جذب دی اکسید کربن، جذب و ذخیره سازی شده و به مخزن نفتی تزریق می شود. میزان ۹۱۰۱ تن دی اکسید کربن در سال توسط این سیستم تولید، جذب، فشرده سازی

پیل سوختی در نظر گرفته شده در این تحقیق، از نوع لوله ای و دارای ریفورمر داخلی براساس مرجع [۵]، پارامترهای ورودی مدل سازی در جدول (۱) و نتایج حاصل از مدل سازی در نقاط مختلف چرخه در جدول (۲) ارائه شده است. برای انجام اعتبارسنجی مدل، نتایج حاصل از این تحقیق با مقادیر سایر مقالات منتشر شده، مقایسه گردیده و در جدول (۳) ارائه شده است. همچنین سایر مشخصات کلیدی این چرخه در جدول (۴) ارائه شده است. سهم پیل سوختی اکسید جامد، توربین گازی و توربین بخار از توان تولیدی چرخه مورد بررسی در شکل (۴) ارائه شده است.

جدول (۱): پارامترهای ورودی مدل سازی [۵، ۱۵، ۱۷ و ۲۷]

مقدار	پارامتر
۸۰۲/۳	ارزش حرارتی پایین سوخت ($kJ.mol^{-1}$)
۲	افت فشار پیل سوختی (%)
۲	افت فشار رکوپراتور (%)
۸۵	بازده ایزوترمیک کمپرسورها و توربین (%)
۹۶	بازده مکانیکی و ژنراتور (%)
۹۴	بازدهی مدل AC/DC (%)
۱۶۱۲۸	تعداد سلول ها
۳۲۰۰	چگالی شدت جریان ($A.m^{-2}$)
۱۱۷۳	دمای پیل سوختی (K)
۲۹۸/۱۵	دمای مرجع (K)
۱۴۱۷/۴۶	دمای ورودی به توربین گاز (K)
۸۸	ضریب تأثیر رکوپراتور (%)
۸۵	ضریب کاربرد سوخت (%)
۴۵	ضریب کاربرد هوا (%)
۲۶۰	فشار امتزاجی مخزن نفتی (bar)
۱/۰۱۳	فشار مرجع (bar)
۰/۰۸۳۴	مساحت مؤثر هر سلول (m^2)
۳	نسبت بخار به کربن (SCR)
۸	نسبت فشار کمپرسور
۰/۷	ولتاژ مرجع (V)

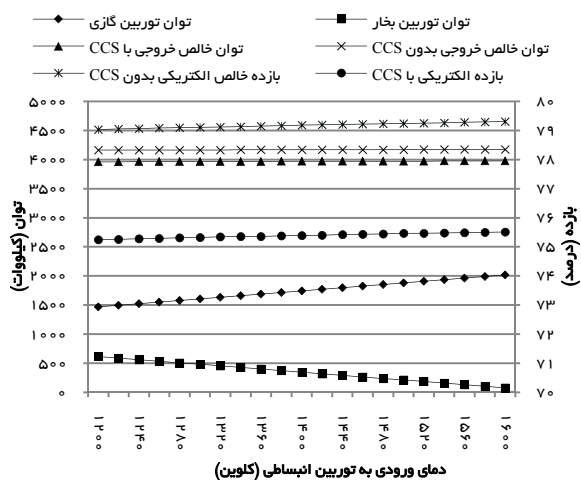


شکل (۴): سهم پیل سوختی اکسید جامد، توربین گازی و توربین بخار از توان تولیدی چرخه مورد بررسی

۲.۴. انجام تحلیل پارامتریک

در این بخش، با بهره‌گیری از خصوصیات چرخه ارائه شده، اثرات تغییر در پارامترهای مهم ورودی بر تغییرات مشخصه‌های عملکردی چرخه بررسی شده و تحلیل می‌گردند. در بررسی تأثیر هر پارامتر در شرایط عملکردی، فرض می‌شود سایر پارامترهای چرخه ثابت می‌مانند. اثرات تغییر سه شاخص مهم دمای ورودی به توربین بخار، نسبت فشار چرخه (فشار کاری چرخه) و فشار امتزاجی مخزن نفت بر تغییرات توان‌ها و بازدهی‌های چرخه بررسی شده است.

نمودار تغییرات توان‌ها و بازدهی سیستم نسبت به تغییر در پارامتر دمای ورودی توربین بخار در شکل (۵) ارائه شده است. با افزایش دمای ورودی به توربین انبساطی، توان تولیدی آن افزایش می‌یابد و بنابراین با توجه به ثابت بودن کار مصرفی در کمپرسور هوا، توان توربین گاز افزایش می‌یابد. با افزایش دمای ورودی به توربین انبساطی، دمای ورودی به توربین بخار کاهش می‌یابد و بنابراین، توان تولیدی در توربین بخار کاهش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل (۵) نشان داده شده است، میزان افزایش در توان توربین گازی، تقریباً با میزان کاهش توان توربین بخار برابر بوده و لذا تغییرات قابل توجهی در توان‌های خالص خروجی چرخه و همچنین بازدهی‌های آن ایجاد نمی‌شود.



شکل (۵): بررسی تغییرات در توان‌ها و بازدهی‌های چرخه نسبت به تغییر در دمای گازهای ورودی به توربین انبساطی

نمودار تغییرات توان‌های خروجی و بازدهی‌های چرخه نسبت به تغییر در پارامتر نسبت فشار (فشار کاری چرخه) در شکل (۶) ارائه شده است. با افزایش فشار کاری چرخه، توان تولیدی در پیل سوختی به سبب افزایش ولتاژ سلول، افزایش کمی می‌یابد. در توربین گازی از یک سو، توان خروجی توربین انبساطی افزایش و از سوی دیگر، توان مصرفی کمپرسور هوا نیز افزایش می‌یابد که در مجموع افزایش توان خروجی توربین گازی را به دنبال دارد. با افزایش فشار کاری، دمای ورودی به

شده و به مخزن نفتی در فشار ۲۶۰ بار تزریق می‌گردد. با فرض اینکه به ازای تزریق هر ۲۱۲ مترمکعب گاز دی‌اکسیدکربن، میزان یک بشکه نفت خام استخراج شود [۲۸]، نتایج محاسبات نشان می‌دهد با تزریق گاز دی‌اکسیدکربن تولیدی این چرخه به مخزن نفتی، میزان ۹۹۵ بشکه نفت خام در سال از این محل قابل استحصال است.

جدول (۳): مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج ارائه شده در سایر مقالات

عنوان	این تحقیق	[۵]	[۲۷]	[۲۶]	[۱۵]
ضریب کاربرد هوا (%)	۴۵	۱۸/۸	۴۵	۳۶/۳۲	۲۲
ضریب کاربرد سوخت (%)	۸۵	۶۲/۷	۷۰	۸۵	۸۵
دبی جرمی سوخت ($g.s^{-1}$)	۱۰۵	۷/۵	۳۰/۸	۵۲	۲۶۱
دبی جرمی هوا ($g.s^{-1}$)	۳۴۰۳	۵۸۲/۹	۱۰۰۰	۲۰۹۲	۱۷۸۰۰
نسبت بخار به کربن	۲/۵	۲/۵	۳	۲	۲/۵
چگالی شدت جریان ($A.m^{-2}$)	۳۲۰۰	۳۲۰۰	N.A	N.A	۳۰۰۰
تعداد سلول استک	۱۶۱۲۸	۱۱۵۲	N.A	N.A	۴۲۶۲۴
مساحت موثر هر سلول (m^2)	۰.۰۸۳۴	۰.۰۸۳۴	N.A	N.A	۰.۰۸۳۴
نسبت فشار	۸	۲/۹	۸/۵	۴/۵	۹/۹
ولتاژ سلول	۰.۷۵۰۷	۰/۶۰۹	۰/۷۵۲	N.A	۰/۶۸۵
فشار کاری پیل سوختی (bar)	۷.۵۴	۲/۸۸	۷/۹	۴/۱۲	۹/۹
دمای کاری پیل سوختی (K)	۱۱۷۳.۱۵	۱۲۷۳/۱۵	۱۱۷۳/۱۵	۱۲۶۳/۳	۱۲۸۵/۳
دمای خروجی از دودکش (K)	۵۷۰.۰۵	۴۴۷/۳۵	۵۹۴/۱۵	۵۸۵/۶۵	۴۱۶/۱۵
کار خالص خروجی (kW)	۳۹۶۸	۲۲۰/۹	۱۰۳۹	۱۵۰۰	۱۱۶۴۱
توان پیل سوختی اکسید جامد (kW)	۳۱۰۲	۱۷۶/۲	۹۰۱/۳	N.A	۷۳۰۰
توان خروجی توربین گازی (kW)	۷۹۲.۴	۴۶/۸۶	۱۶۶/۸	N.A	۵۵۱۰
بازده الکتریکی (%)	۷۵.۴	۵۸/۷	۶۷/۴	۶۱/۷	۵۸/۸۷

جدول (۴): نتایج مدل‌سازی خواص عملکردی سیستم

عنوان	مقدار
توان خالص خروجی با سیستم متراکم‌سازی دی‌اکسیدکربن (kW)	۳۹۶۸/۴
توان جریان متناوب پیل سوختی (kW)	۳۱۰۲
توان توربین بخار (kW)	۳۲۳/۴
توان توربین گازی (kW)	۷۹۲/۴
توان توربین انبساطی (kW)	۱۷۶۷
توان کمپرسور هوا (kW)	-۹۷۴/۶
توان کمپرسور سوخت (kW)	-۵۰/۲۳
توان کمپرسورهای دی‌اکسیدکربن (kW)	-۱۹۹/۲
توان خالص خروجی بدون سیستم متراکم‌سازی دی‌اکسیدکربن (kW)	۴۱۶۸/۶
بازده الکتریکی با سیستم متراکم‌سازی دی‌اکسیدکربن (%)	۷۵/۴
بازده الکتریکی بدون سیستم متراکم‌سازی دی‌اکسیدکربن (%)	۷۹/۱۹
تولید سالیانه برق (TWh)	۳۴/۷۶
تولید ویژه دی‌اکسیدکربن ($g.kWh^{-1}$)	۲۶۱.۸
جریمه بازده انرژی سیستم متراکم‌سازی دی‌اکسیدکربن (%)	۳/۷۹
جریمه مصرف انرژی سالیانه سیستم متراکم‌سازی دی‌اکسیدکربن (TWh)	۱/۷۵
میزان دی‌اکسیدکربن تزریق شده در سال (Ton)	۹۱۰۱

با افزایش فشار امتزاجی میزان توان مورد نیاز کمپرسور دی‌اکسیدکربن افزایش یافته و از ۱۹۰ کیلووات در ۲۰۰ بار، به ۲۲۲ کیلووات در ۵۰۰ بار می‌رسد. با توجه به اینکه سهم کمپرسور دی‌اکسیدکربن نسبت به توان تولیدی چرخه در حدود ۵٪ است، تأثیر زیادی در کاهش توان تولیدی بازدهی چرخه ندارد. بازده الکتریکی با CCS با این تغییرات فشار، از ۷۵/۵۷٪ به ۷۴/۹۷٪ کاهش می‌یابد. لذا تغییرات در فشار امتزاجی مخزن نفت تأثیرات قابل توجهی در توان‌های خالص خروجی چرخه و همچنین بازدهی‌های آن ایجاد نمی‌کند و می‌تواند به صورت گسترده‌ای در مخازن مختلف با فشارهای امتزاجی متفاوت، به صورت مناسبی کار کند.

۵. نتیجه گیری

چرخه هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد/توربین گازی با فناوری جذب دی‌اکسیدکربن بر مبنای غشای تبادل یونی خصوصیات مناسبی را از بعد فنی و زیست‌محیطی نشان می‌دهد. چرخه هیبریدی معرفی شده با هدف تأمین نیاز الکتریکی در سکوها نفتی طراحی شده است که با استفاده از فناوری غشای تبادل یونی، دی‌اکسیدکربن تولیدی در چرخه، جمع‌آوری و متراکم شده و به مخزن نفتی تزریق می‌شود. نتایج حاصل از مدل‌سازی و تحلیل پارامتریک را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

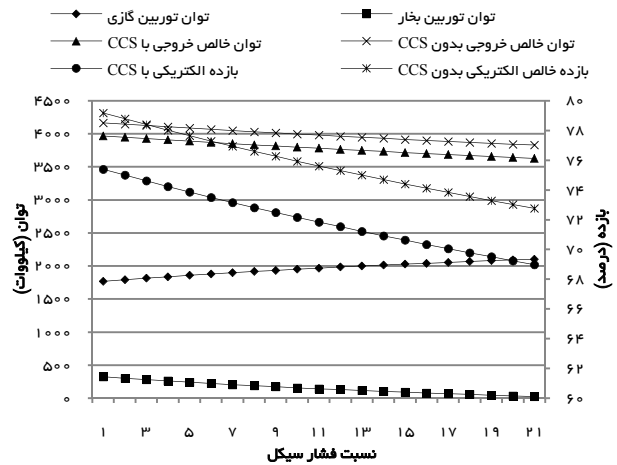
۱. چرخه بدون سیستم CCS دارای توان خالص خروجی ۴۱۶۸/۶ کیلووات و بازده الکتریکی ۷۹/۱۹٪ است که با اضافه شدن سیستم CCS، توان خالص خروجی به ۳۹۶۸/۴ کیلووات و بازده الکتریکی به ۷۵/۴٪ کاهش می‌یابد. سهم پیل سوختی اکسید جامد، توربین گازی و توربین بخار در تولید توان‌های این چرخه، به ترتیب برابر ۷۳/۵۵٪، ۱۸/۷۹٪ و ۷/۶۷٪ هستند.

۲. میزان تولید ویژه و ویژه دی‌اکسیدکربن این چرخه برابر $261/8 \text{ g.kWh}^{-1}$ است که در قیاس با نیروگاه‌های گازسوز چرخه ترکیبی مرسوم میزان ۲۴/۱۲٪ کاهش انتشار گاز دی‌اکسیدکربن را نشان می‌دهد. میزان دی‌اکسیدکربن تولیدی این چرخه برابر ۹۱۰۱ تن در سال است که با تزریق آن به مخزن نفتی، میزان ۹۹۵ بشکه نفت خام در سال، از این محل به دست می‌آید.

۳. افزایش دمای ورودی به توربین انبساطی از یک سو، توان خروجی در توربین انبساطی را افزایش و از سوی دیگر، توان تولیدی در توربین بخار را کاهش می‌دهد و بنابراین تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش توان تولیدی این چرخه ندارد.

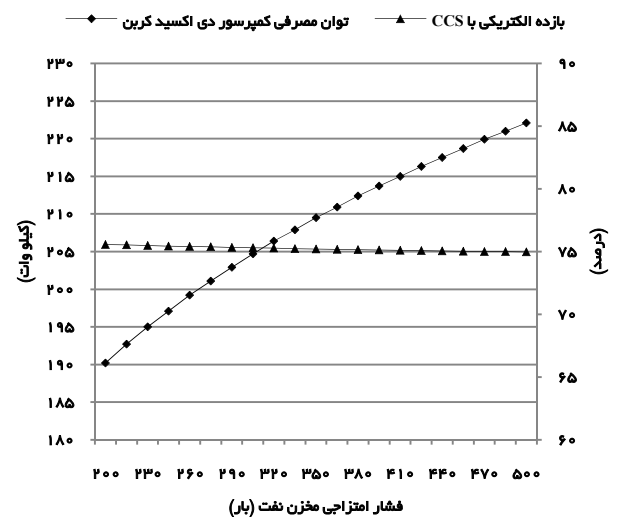
۴. افزایش فشار کاری چرخه باعث کاهش توان خروجی چرخه می‌شود. لذا فشار کاری چرخه با لحاظ محدودیت عملکردی غشای تبادل یونی (فشار ۷-۳۵ بار و دمای ۸۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد) بایستی تا حد ممکن پایین باشد.

توربین بخار کاهش می‌یابد و در نتیجه، توان خروجی از آن افت شدیدی می‌کند. توان مورد نیاز در کمپرسور سوخت نیز افزایش می‌یابد. تأثیرات یکپارچه این تغییرات سبب کاهش توان‌های خروجی و بازدهی‌های چرخه می‌شود. بنابراین، این چرخه بایستی در حداقل فشار ممکن برای تأمین نیاز سیستم غشای تبادل یونی کار کند.



شکل (۶): بررسی تغییرات در توان‌ها و بازدهی‌های چرخه نسبت به تغییر در نسبت فشار چرخه

فشار امتزاجی مخزن تأثیر مستقیمی بر میزان نفت قابل استخراج دارد. نمودار تغییرات توان‌ها و بازدهی‌های سیستم نسبت به تغییر در پارامتر فشار امتزاجی مخزن نفت، در شکل (۷) ارائه شده است.



شکل (۷): بررسی تغییرات در توان مصرفی کمپرسور دی‌اکسیدکربن و بازده الکتریکی چرخه با تغییر در فشار امتزاجی مخزن

A_{act}	مساحت موثر سلول (m^2)
\dot{Q}	نرخ انتقال حرارت (kW)
\dot{z}	نرخ مولی H_2 واکنش داده شده ($mol\ s^{-1}$)
SCR	نسبت بخار به کربن
R_p	نسبت فشار
V	ولتاژ (V)
V_{ref}	ولتاژ مرجع (V)
زیرنویس‌ها	
is	ایزوتروپیک
inv	اینوتر
WCCS	با سیستم جذب و متراکم‌سازی دی‌اکسیدکربن
W/OCCS	بدون سیستم جذب و متراکم‌سازی دی‌اکسیدکربن
pu	پمپ
t	توربین
ST	توربین بخار
GT	توربین گازی
Out	خروجی
rec	رکوپراتور
g	ژنراتور
CCS	سیستم جذب و متراکم‌سازی دی‌اکسیدکربن
0	شرایط مرجع
ele	الکتریکی
cf	کمپرسور سوخت
ca	کمپرسور هوا
m	مکانیکی
in	ورودی

۵. فشار امتزاجی مخزن باعث افزایش توان مورد نیاز جهت متراکم‌سازی دی‌اکسیدکربن می‌شود. با توجه به اینکه سهم متراکم‌سازی دی‌اکسیدکربن نسبت به توان تولیدی چرخه در حدود ۵٪ است، تأثیر زیادی در کاهش توان تولیدی و بازدهی چرخه ندارد. لذا تغییرات در فشار امتزاجی مخزن نفت تأثیرات قابل توجهی در توان‌های خالص خروجی چرخه و همچنین بازدهی‌های آن ایجاد نمی‌کند و می‌تواند به صورت گسترده‌ای در مخازن مختلف با فشارهای امتزاجی متفاوت، به صورت مناسبی کار کند.

۶. با توجه به وضعیت، ساختار مخازن و ضریب برداشت از منابع نفتی کشور، استفاده از این فناوری، به سبب مزایای ذکر شده در این تحقیق، در سک‌های نفتی کشور پیشنهاد می‌گردد.

فهرست علائم و زیرنویس‌ها

LHV	ارزش حرارتی ($kJ\ mol^{-1}$)
h	آنتالپی مخصوص مولی ($kJ\ mol^{-1}$)
η	بازدهی
N_{cell}	تعداد سلول‌های استک پیل سوختی
\dot{W}	توان (kW)
R_u	ثابت جهانی گازها ($kJ\ mol^{-1}\ K$)
F	ثابت فارادی ($96\ 485\ As\ mol^{-1}$)
i	چگالی شدت جریان ($A\ m^{-2}$)
\dot{m}	دبی جرمی ($g\ s^{-1}$)
\dot{n}_i	دبی مولی ($mol\ s^{-1}$)
T	دما (K)
ε	ضریب تأثیر رکوپراتور
U_f	ضریب کاربرد سوخت
y_i	ضریب مولی سیال i
p	فشار (bar)

مراجع

- [1] Fuel cell handbook, U.S. Department of Energy, 7th Ed., 2004.
- [2] Singhal, S.C., "Advances in solid oxide fuel cell technology", Solid State Ionics, Vol.135, pp. 305–313, 2000.
- [3] Palsson, J., Selimovic, A., Sjunnesson L., "Combined solid oxide fuel cell and gas turbine systems for efficient power and heat generation", Journal of Power Sources, Vol.86, pp. 442–448, 2000.
- [4] Lundberg, W.L., Veyo, S.E., Yokokawa H., Singhal S.C., Proc. 7th Intl. Symp. SOFC, Tsukuba, the Electrochem. Soc., Pennington, NJ, USA, June 3 – 8, pp. 78–87, 2001.
- [5] Akkaya, A.V., Sahin, B., Erdem H.H., "An analysis of SOFC/GT CHP system based on exergetic performance criteria", international journal of hydrogen energy, Vol.33, pp. 2566 – 2577, 2008.
- [۶] پژمان کاظم‌پور، فتح‌الله امی، مدل‌سازی پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای برای سیستم‌های ترکیبی گرما و الکتریسیته، نشریه علمی پژوهشی سوخت و احتراق، شماره ۱ (۱۳۸۸).

- [۷] پژمان کاظم‌پور، فتح‌الله امی، بررسی عملکرد پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای در ساختار تقویت‌شده آندی همراه با تبدیل داخلی سوخت، مجله مکانیک هوافضا (انتقال حرارت و پیشرانش)، جلد ۶، شماره ۲ (۱۳۸۹).
- [۸] سپهر صنایع، آرش کاتبی، بهینه‌سازی چند هدفه سیستم هیبرید میکروتوربین و پیل سوختی اکسید جامد با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، شماره ۱ (۱۳۹۰).
- [۹] جاماسب پیرکندی، مجید قاسمی، محمد حسین حامدی، تحلیل عملکرد ترمودینامیکی یک چرخه هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گازی در یک سیستم تولید هم‌زمان، نشریه علمی پژوهشی سوخت و احتراق، شماره ۲ (۱۳۹۰).
- [۱۰] جاماسب پیرکندی، مجید قاسمی، محمد حسین حامدی، مقایسه عملکرد سیستم‌های هیبریدی مستقیم و غیرمستقیم توربین گاز و پیل سوختی اکسید جامد از دیدگاه ترمودینامیکی و آگزرژی، مجله علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۲، شماره ۳ (۱۳۹۱).
- [۱۱] هامون پورمیرزا آقا، رضا ابراهیمی، شبیه‌سازی و آنالیز ترمودینامیکی سیکل ترکیبی توربین گازی مجهز به پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای و بررسی میزان برگشت‌ناپذیری سیستم ترکیبی، نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، شماره دوم (۱۳۹۱).
- [12] Calise, F., Dentice, M., Palombo, A., Vanoli, L., "Simulation and exergy analysis of a hybrid Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)–Gas Turbine System", Energy, Vol.31, pp. 3278–3299, 2006.
- [13] Chan, S.H., Low, C.F., Ding, O.L., "Energy and Exergy analysis of simple solid oxide fuel cell power systems", Journal of Power Sources, Vol.103, pp. 188-200, 2002.
- [14] Zhang, X., Chan, S.H., Li, G., Ho, H.K., Li, J., Feng, Z., "A review of integration strategies for solid oxide fuel cells", Journal of Power Sources, Vol.195, pp. 685–702, 2010.
- [15] Motahar, S., Alemrajabi, A.A., "Exergy based performance analysis of a solid oxide fuel cell and steam injected gas turbine hybrid power system", international journal of hydrogen energy, pp. 1–12, 2009.
- [16] Park, S.K., Ahn, J.H., Kim, T.S., "Performance evaluation of integrated gasification solid oxide fuel cell/gas turbine systems including carbon dioxide capture", Journal of Applied Energy, Vol.88, pp. 2976–2987, 2011.
- [17] Akkaya, A.V., Sahin, B., Erdem, H.H., "Exergetic performance coefficient analysis of a simple fuel cell system", International Journal of Hydrogen Energy, Vol.32, pp. 4600 – 4609, 2007.
- [18] Meyer, J., Mastin, J., Bjørnebole, T.K., Ryberg, T., Eldrup N., "Techno-economical study of the Zero Emission Gas power concept", Energy Procedia, Vol.4, pp. 1949–1956, 2011.
- [19] Kuramochi, T., Wu H., Ramirez, A., Faaij, A., Turkenburg, W., "Techno-economic prospects for CO₂ capture from a Solid Oxide Fuel Cell – Combined Heat and Power plant. Preliminary results", Journal of Energy Procedia, Vol.1, pp. 3843–3850, 2009.
- [20] Bredesen R., Jordal K., Bolland O., "High-temperature membranes in power generation with CO₂ capture", Chemical Engineering and Processing, Vol.43, pp. 1129–1158, 2004.
- [21] Romano, M.C., Spallina, V., Campanari, S., "Integrating IT-SOFC and gasification combined cycle with methanation reactor and hydrogen firing for near zero-emission power generation from coal", Journal of Energy Procedia 4, pp. 1168–1175, 2011.
- [22] Jansen, D., Dijkstra, J.W., "CO₂ capture in SOFC-GT systems", Second Annual Conference on Carbon Sequestration, USA, 2003.
- [23] Dijkstra, J.W., Jansen, D., "Novel Concepts for CO₂ capture with SOFC", GHGT-6. Japan, 2002.
- [24] Möller B.F., Arriagada J., Assadi M., Potts I., "Optimization of an SOFC/GT system with CO₂-capture", Journal of Power Sources, Vol.131, pp. 320–326, 2004.
- [25] Kvamsdal, H.M., Jordal, K., Bolland, O., "A quantitative comparison of gas turbine cycles with CO₂ capture", Journal of Energy, Vol.32, pp.10–24, 2007.
- [26] Franzoni, A., Magistri, L., Traverso, A., Massardo, A.F., "Thermoeconomic analysis of pressurized hybrid SOFC systems with CO₂ separation", Energy, Vol.33, pp. 311–320, 2008.
- [27] Park, S.K., Kim, T.S., Sohn, J.L., Lee, Y.D., "An integrated power generation system combining solid oxide fuel cell and oxy-fuel combustion for high performance and CO₂ capture", Applied Energy, Vol.88, pp. 1187–1196, 2011.
- [۲۸] امیر شاهران فرد، بابک مرادی، ارزیابی و مقایسه روش‌های مختلف ازدیاد برداشت در یکی از مخازن نفتی شکافدار ایران، ازدیاد برداشت از مخازن هیدروکربوری، مجله مهندسی شیمی ایران (شماره ویژه)، سال هشتم، شماره ۴۳ (۱۳۸۸).
- [29] "Carbon Dioxide Enhanced Oil Recovery, Untapped Domestic Energy Supply and Long Term Carbon Storage Solution", US Department of Energy (DOE), 2010. www.netl.doe.gov.
- [30] http://cfaspower.com/Gas_Turbine_CTG_1Mw_5Mw.html

[۳۱] قاسم عرب، بهینه‌سازی سیکل یکپارچه هیبرید SOFC/GT دارای فناوری جذب CO_2 و ملاحظات اگزوزاکنومیکی، رساله دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، (۱۳۹۲).

[32] <http://www.siemens.com/sustainability/en/environmental-portfolio/products-solutions/fossil-power-generation/combined-cycle-power-plants.htm>, 2013.