

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی / تکنولوژی انرژی

تحلیل انرژی و انرژی سیستم‌های تولید همزمان سرمایش، گرمایش و توان با محرک پیل سوختی اسید فسفریک همراه سیکل ارگانیکی رانکین

نگارنده

مهرداد اینانلو

اساتید راهنما

دکتر محمود چهارطاقی

دکتر سید مجید هاشمیان

شهریور ۱۳۹۹

شماره: ۳۲، ۲۹۹، ۱۲۴
تاریخ: ۹۹، ۸، ۲۱

باسمه تعالی



فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای مهرداد اینانلو با شماره دانشجویی ۹۷۰۳۳۲۴ رشته سیستم انرژی گرایش تکنولوژی انرژی تحت عنوان تحلیل انرژی و انرژی های تولید همزمان سرمایه، گرمایش و توان با محرک پیل سوختی اسید فسفریک همراه سیکل ارگانیک رانکین که در تاریخ ۱۳۹۹/۶/۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹ ☒ (ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۷ ☐
ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹ ☐ (د) درجه متوسط: نمره ۱۵-۱۴ ☐
ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐
نوع تحقیق: نظری ☒ عملی ☐

اعضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	دانشیار	دکتر محمود چهارطاقی	۱- استاد راهنمای اول
	استادیار	دکتر سید مجید هاشمیان	۲- استاد راهنمای دوم
			۳- استاد مشاور
	استادیار	دکتر مسلم صبوری	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر احمد نظری	۵- استاد ممتحن اول
	استادیار	دکتر محمد حسین احمدی	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تقدیم به

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پر بار
وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش
نمایم.

والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم؛ چرا که این دو وجود
مقدس پس از پروردگار مایه‌ی هستی‌ام بوده‌اند، دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی پر فراز و نشیب
به من آموختند.

حال این برگ سبز یست تحفه درویش تقدیم آنان

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار و از خودگذشتی

به پاس محبت‌های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند

و به پاس قلب‌های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌-

گراید

این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می‌کنم.

سپاس و قدردانی

در اینجا لازم می‌دانم از همه کسانی که اینجانب را در امر انجام این پایان‌نامه یاری نموده‌اند، به‌خصوص جناب آقای دکتر محمود چهارطاقی و دکتر سید مجید هاشمیان که با حسن خلق و فروتنی، در کمال آرامش به همراه سعه صدر، همواره مرا از راهنمایی و مشاوره‌های سودمند و هدف‌مند خود، بهره‌مند ساخته، تشکر و قدردانی نمایم.

تعهدنامه

اینجانب **مهرداد اینانلو** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش سیستم‌های انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه تحلیل انرژی و انرژی سیستم‌های تولید همزمان سرمایه‌گذاری، گرمایش و توان با محرک پیل سوختی اسید فسفریک همراه سیکل ارگانیکی رانکین تحت راهنمایی‌های آقایان **دکتر محمود چهارطاقی و دکتر سید مجید هاشمیان** متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط این‌جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است و مقالات مستخرج بانام "دانشگاه صنعتی شاهرود" و یا "**Shahrood University of Technology**" به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود. استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

در این پایان نامه یک سیستم تولید همزمان سه گانه جدید مبتنی بر پیل سوختی اسید فسفریک و سیکل ارگانیک رانکین ازدیدگاه انرژی و انرژی مدلسازی و مورد تحلیل قرار گرفته شده است، همچنین در این پایان نامه دو شماتیک از سیستم تولید همزمان برای بازیافت حرارت اتلافی از پیل سوختی پیشنهاد شده است. این سیستم شامل مخزن ذخیره هیدروژن، پیل سوختی اسید فسفریک، مشعل پس سوز، سیکل ارگانیک رانکین، مخزن ذخیره انرژی حرارتی، چیلر جذبی، ریفورمر بخار، مشعل و مبدل های حرارتی می باشد. سیستم پیشنهادی به منظور استفاده از حرارت اتلافی پیل سوختی از سه سیستم بازیافت حرارت (سیکل ارگانیک رانکین- چیلر جذبی- مبدل حرارتی) برای تامین نیاز سرمایش، گرمایش و توان یک ساختمان استفاده می کند. مدل های ریاضی پیل سوختی، سیکل ارگانیک رانکین و چیلر جذبی با نتایج مقالات دیگر اعتبار سنجی شده است. در این تحقیق به بررسی تاثیر پارامتر های مهم پیل سوختی (چگالی جریان، دما و فشار کاری)، بر روی عملکرد سیستم تولید همزمان سه گانه پیشنهادی از دیدگاه انرژی و انرژی پرداخته شده است. نتایج نشان می دهد که راندمان انرژی و انرژی پیل سوختی در شماتیک اول به ترتیب ۵۵.۵۲٪ و ۵۶.۴۲٪ و در شماتیک دوم به ترتیب ۵۱.۶۶٪ و ۴۹.۴۲٪ محاسبه شده است، در حالتی که از سه سیستم بازیافت حرارت، برای استفاده از حرارت اتلافی پیل سوختی استفاده شود، در شماتیک اول راندمان انرژی و انرژی به ترتیب به ۹۳.۲۳٪ و ۶۱.۲۵٪ و در شماتیک دوم به ترتیب به ۸۸.۱۶٪ و ۵۴.۸۵٪ می رسد. همچنین مطالعه نشان می دهد که با افزایش چگالی جریان، بازده انرژی و انرژی الکتریکی و تولید همزمان سه گانه، هر دو کاهش می یابند، در حالی که افزایش دما و فشار کاری منجر به افزایش بازده انرژی و انرژی در حالت های بیان شده می شود. بیشترین تخریب انرژی در شماتیک اول به ترتیب مربوط به پیل سوختی و مشعل پس سوز می باشد، در حالیکه در شماتیک دوم بیشترین تخریب انرژی به ترتیب مربوط به ریفورمر بخار، مشعل و پیل سوختی می باشد. بیشترین و کمترین بازده انرژی در هر دو شماتیک نیز به ترتیب مربوط به توربین و مبدل حرارتی آب گرم خانگی می باشد.

کلمات کلیدی : تولید همزمان سه گانه، انرژی، پیل سوختی اسید فسفریک، سیکل ارگانیک رانکین، ریفورمر بخار

فهرست مطالب

ز	فهرست شکل‌ها
ش	فهرست جدول‌ها
ص	فهرست علائم
۱	فصل اول مقدمه
۲.....	۱-۱- مقدمه
۳.....	۲-۱ فناوری تولید همزمان
۳.....	۳-۱ اصول و قواعد
۴.....	۴-۱ مزایا
۶.....	۵-۱ دسته‌بندی سیستم تولید همزمان
۶.....	۵-۱-۱ بر اساس محرک اولیه
۷.....	۵-۱-۲ بر اساس ترتیب انرژی
۸.....	۵-۱-۳ بر اساس اندازه نیروگاه
۸.....	۶-۱ پیل‌های سوختی
۹.....	۶-۱-۱ پیل سوختی اسید فسفریک
۱۰.....	۷-۱ فرایندهای بازیافت حرارت
۱۱.....	۷-۱-۱ مبدل‌های حرارتی
۱۱.....	۸-۱ سیستم‌ها تولید توان
۱۱.....	۸-۱-۱ سیکل ارگانیک رانکین
۱۲.....	۹-۱ سیستم‌های تولید سرمایش
۱۲.....	۹-۱-۱ چیلر جذبی
۱۵.....	فصل دوم مروری بر پژوهش‌های پیشین
۱۶.....	۱-۲- مقدمه

۱۶.....	۲-۲ مطالعات پیشین
۱۶.....	۲-۱-۲ محرک اصلی پیل سوختی
۱۶.....	۲-۱-۱-۱ پیل سوختی پلیمری
۲۰.....	۲-۱-۲ پیل سوختی قلیایی
۲۱.....	۲-۱-۲ پیل سوختی اسید فسفریک
۲۲.....	۲-۱-۲ پیل سوختی کربنات مذاب
۲۳.....	۲-۱-۲ پیل سوختی اکسید جامد
۲۹.....	۲-۲ معرفی پژوهش حاضر و نوآوری
۳۱.....	فصل سوم معادلات حاکم و مدل سازی
۳۲.....	۳-۱ مقدمه
۳۲.....	۳-۲ شماتیک سیکل
۳۳.....	۳-۲-۱ شماتیک اول
۳۵.....	۳-۲-۲ شماتیک دوم
۳۸.....	۳-۳ فرضیات و روابط حاکم بر مدل سازی سیستم تولید همزمان :
۴۴.....	۳-۴ مشعل پس سوز
۴۴.....	۳-۵ مدل سازی ریفورمر بخار
۴۷.....	۳-۶ مدل سازی سیکل ارگانیک رانکین
۴۸.....	۳-۷ انتخاب سیال کاری
۴۹.....	۳-۸ مخزن ذخیره انرژی حرارتی
۵۱.....	۳-۹ مدل سازی چیلر جذبی تک اثره لیتیوم بروماید
۵۲.....	۳-۱۰ بازگشت ناپذیری کل سیستم
۵۲.....	۳-۱۱ قانون اول و دوم ترمودینامیک برای کل سیستم
۶۱.....	۳-۱۲-۱ راندمان
۶۱.....	۳-۱۲-۱-۱ راندمان انرژی شماتیک اول سیستم تولید همزمان
۶۳.....	۳-۱۲-۲ راندمان انرژی شماتیک اول سیستم تولید همزمان
۶۴.....	۳-۱۲-۳ راندمان انرژی شماتیک دوم سیستم تولید همزمان

۴-۱۲-۳-راندمان اگزورژی شماتیک دوم سیستم تولید همزمان ۶۵

فصل چهارم نتایج و بحث ۶۷

۴-۱-مقدمه ۶۸

۴-۲-اعتبار سنجی نتایج ۶۸

۴-۲-۱-اعتبار سنجی مدل پیل سوختی اسید فسفریک ۶۹

۴-۲-۲-اعتبار سنجی سیکل ارگانیک رانکین ۷۰

۴-۲-۳-اعتبار سنجی چیلر جذبی تک اثره لیتیوم بروماید ۷۱

۴-۲-۴-نتایج شماتیک اول ۷۲

۴-۲-۴-۱-تأثیر چگالی جریان ۷۸

۴-۲-۴-۲-تأثیر دمای کاری ۸۳

۴-۲-۴-۳-تأثیر فشار کاری ۸۶

۴-۲-۵-تغییرات دمای لایه های مخزن ذخیره حرارت در طول ۱۰۰۰ ثانیه ۸۹

۴-۲-۶-نتایج شماتیک دوم ۹۲

۴-۲-۶-۱-تأثیر چگالی جریان ۹۶

۴-۲-۶-۲-تأثیر دمای کاری ۱۰۲

۴-۲-۶-۳-تأثیر فشار کاری ۱۰۵

فصل پنجم نتیجه گیری و ارائه پیشنهاداتی برای آینده ۱۱۱

۵-۱-نتیجه گیری ۱۱۲

۵-۱-۱-نتیجه گیری شماتیک اول ۱۱۲

۵-۱-۲-نتیجه گیری شماتیک دوم ۱۱۳

۵-۲-ارائه پیشنهاداتی برای آینده ۱۱۴

مراجع ۱۱۵

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱. مفهوم کلی سیستم تولید همزمان سه گانه [1]..... ۴
- شکل ۱-۲. مقایسه سیستم تولید همزمان سه گانه با سیستم سنتی تولید جداگانه [1]..... ۶
- شکل ۳-۱. شماتیک اول سیستم تولید همزمان پیشنهادی..... ۳۵
- شکل ۳-۲. شماتیک دوم سیستم تولید همزمان پیشنهادی..... ۳۷
- شکل ۳-۳. ساختار و کلیت پیل سوختی اسید فسفریک [56]..... ۴۱
- شکل ۴-۱. مقایسه توان خروجی پیل سوختی در چگالی جریان های مختلف با مرجع [4]..... ۶۹
- شکل ۴-۲. تاثیر چگالی جریان بر روی ولتاژ خروجی پیل سوختی و افت ولتاژ ها در شماتیک اول..... ۷۸
- شکل ۴-۳. تاثیر چگالی جریان بر روی توان و نرخ بار حرارتی سیستم تولید همزمان در شماتیک اول..... ۷۹
- شکل ۴-۴. تاثیر چگالی جریان بر روی بازده های انرژی در شماتیک اول..... ۸۰
- شکل ۴-۵. تاثیر چگالی جریان بر روی بازده های انرژی در شماتیک اول..... ۸۱
- شکل ۴-۶. تاثیر چگالی جریان بر روی بازگشت ناپذیری اجزاء سیستم تولید همزمان در شماتیک اول..... ۸۲
- شکل ۴-۷. تاثیر دمای کاری بر روی توان و نرخ بار حرارتی سیستم تولید همزمان در شماتیک اول..... ۸۳
- شکل ۴-۸. تاثیر دمای کاری بر روی بازده های انرژی در شماتیک اول..... ۸۴
- شکل ۴-۹. تاثیر دمای کاری بر روی بازده های انرژی در شماتیک اول..... ۸۵
- شکل ۴-۱۰. تاثیر فشار کاری بر روی توان و نرخ بار حرارتی سیستم تولید همزمان در شماتیک اول..... ۸۶
- شکل ۴-۱۱. تاثیر فشار کاری بر روی بازده های انرژی در شماتیک اول..... ۸۷
- شکل ۴-۱۲. تاثیر فشار کاری بر روی بازده انرژی در شماتیک اول..... ۸۸
- شکل ۴-۱۳. تاثیر چگالی جریان بر روی دمای لایه های مخزن ذخیره انرژی حرارتی..... ۸۹
- شکل ۴-۱۴. نرخ بازگشت ناپذیری اجزاء سیستم تولید همزمان در شماتیک اول..... ۹۰
- شکل ۴-۱۵. بازده انرژی و انرژی شماتیک اول در پنج حالت های مختلف کاری..... ۹۱
- شکل ۴-۱۶. تاثیر چگالی جریان بر روی ولتاژ خروجی پیل سوختی و افت ولتاژ ها در شماتیک دوم..... ۹۷
- شکل ۴-۱۷. تاثیر چگالی جریان بر روی توان و نرخ بار حرارتی سیستم تولید همزمان در شماتیک دوم..... ۹۸
- شکل ۴-۱۸. تاثیر چگالی جریان بر روی بازده های انرژی در شماتیک دوم..... ۹۹
- شکل ۴-۱۹. تاثیر چگالی جریان بر روی بازده های انرژی در شماتیک دوم..... ۱۰۰
- شکل ۴-۲۰. تاثیر چگالی جریان بر روی نرخ بازگشت ناپذیری منابع اصلی سیستم تولید همزمان در شماتیک دوم..... ۱۰۱
- شکل ۴-۲۱. تاثیر دمای کاری بر روی توان و نرخ بار حرارتی سیستم تولید همزمان در شماتیک دوم..... ۱۰۲
- شکل ۴-۲۲. تاثیر دمای کاری بر روی بازده های انرژی در شماتیک دوم..... ۱۰۳

- شکل ۲۳-۴.تاثیر دمای کاری بر روی بازده های انرژی در شماتیک دوم..... ۱۰۴
- شکل ۲۴-۴.تاثیر فشار کاری بر روی توان و نرخ بار حرارتی سیستم تولید همزمان در شماتیک دوم..... ۱۰۵
- شکل ۲۵-۴.تاثیر فشار کاری بر روی بازده ها انرژی در شماتیک دوم..... ۱۰۶
- شکل ۲۶-۴.تاثیر فشار کاری بر روی بازده های انرژی در شماتیک دوم..... ۱۰۷
- شکل ۲۷-۴.نرخ بازگشت ناپذیری اجزاء اصلی شماتیک دوم..... ۱۰۸
- شکل ۲۸-۴.بازده انرژی و انرژی شماتیک دوم در حالت های مختلف کاری..... ۱۰۹

فهرست جدول‌ها

جدول ۳-۱. پارامتر های ورودی سیستم تولید همزمان	۳۹
جدول ۳-۲. آگرژی های شیمیایی استاندارد مواد در حالت مرجع [56]	۵۳
جدول ۳-۳. روابط مربوط به موازنه جرم، انرژی و آگرژی برای زیر سیستم PAFC در شماتیک اول [44]	۵۴
جدول ۳-۴. روابط مربوط به موازنه جرم، انرژی و آگرژی تجهیزات ORC در شماتیک اول [55]	۵۵
جدول ۳-۵. روابط مربوط به موازنه جرم، انرژی و آگرژی تجهیزات ACH در شماتیک اول [55]	۵۶
جدول ۳-۶. روابط مربوط به موازنه جرم، انرژی و آگرژی برای زیر سیستم PAFC در شماتیک دوم [44]	۵۷
جدول ۳-۷. روابط مربوط به موازنه جرم، انرژی و آگرژی برای زیر سیستم ریفورمر بخار [57]	۵۸
جدول ۳-۸. روابط مربوط به موازنه جرم، انرژی و آگرژی تجهیزات ORC در شماتیک دوم [55]	۵۹
جدول ۳-۹. روابط مربوط به موازنه جرم، انرژی و آگرژی تجهیزات ACH در شماتیک دوم [55]	۶۰
جدول ۴-۱. پارامتر های استفاده شده در مدلسازی سیکل ارگانیک رانکین [41]	۷۰
جدول ۴-۲. مقایسه نتایج اعتبار سنجی سیکل ارگانیک رانکین با مرجع [41]	۷۱
جدول ۴-۳. پارامتر های ورودی برای اعتبار سنجی چیلر جذبی تک اثره لیتیوم بروماید [42]	۷۱
جدول ۴-۴. نتایج اعتبار سنجی چیلر جذبی تک اثره لیتیوم بروماید	۷۲
جدول ۴-۵. خواص ترمودینامیکی جریان برای شماتیک اول سیستم تولید همزمان	۷۳
جدول ۴-۶. نتایج خروجی پیل سوختی اسید فسفریک در شماتیک اول	۷۴
جدول ۴-۷. مقایسه سیال های کاری در نظر گرفته شده برای انتخاب مناسب ترین سیال کاری	۷۵
جدول ۴-۸. نتایج خروجی سیکل ارگانیک رانکین در شماتیک اول	۷۵
جدول ۴-۹. نتایج خروجی مخزن ذخیره انرژی حرارتی در طول ۱۰۰۰ ثانیه	۷۶
جدول ۴-۱۰. نتایج عملکرد چیلر جذبی در شماتیک اول	۷۶
جدول ۴-۱۱. نتایج عملکرد سیستم گرمایشی در شماتیک اول	۷۶
جدول ۴-۱۲. بازده آگرژی و تخریب آگرژی اجزاء سیستم تولید همزمان در شماتیک اول	۷۷
جدول ۴-۱۳. خواص ترمودینامیکی جریان برای شماتیک دوم سیستم تولید همزمان	۹۳
جدول ۴-۱۴. نتایج خروجی پیل سوختی اسید فسفریک در شماتیک دوم	۹۴
جدول ۴-۱۵. نتایج خروجی سیکل ارگانیک رانکین در شماتیک دوم	۹۴
جدول ۴-۱۶. نتایج عملکرد چیلر جذبی در شماتیک دوم	۹۵
جدول ۴-۱۷. نتایج سیستم گرمایشی در شماتیک دوم	۹۵
جدول ۴-۱۸. تخریب آگرژی و بازده آگرژی اجزاء سیستم تولید همزمان در شماتیک دوم	۹۶

فهرست علائم

علائم لاتین			
$A_{cell} (m^2)$	مساحت فعال سل	$ex (kJ kg^{-1})$	اگرزوی مخصوص
$A_{st} (m^2)$	مساحت مخزن ذخیره	$ex_{ch,0}^n (kJ kg^{-1})$	اگرزوی شیمیایی استاندارد جزء II ام
Abs	ابزوربر	$F (C mol^{-1})$	ثابت فارادی
$Anode$	آند	Gen	ژنراتور چیلر جذبی
$After B$	مشعل پس سوز	HX	مبدل حرارتی
ACH	چیلر جذبی	$h_{pp} (kJ kg^{-1})$	آنتالپی نقطه پینچ
$Burner$	مشعل	$h_f (kJ kg^{-1})$	آنتالپی سیال بالای نقطه پینچ
$C_p (J mol^{-1} K^{-1})$	ظرفیت گرمای ویژه در فشار ثابت	$h (kJ kg^{-1})$	آنتالپی مخصوص
COP	ضریب عملکرد	$\dot{H} (kW)$	نرخ آنتالپی
$Cathode$	کاتد	$I (A)$	جریان
$Cond 1$	کندانسور سیکل ارگانیک رانکین	$inverter$	اینورتر
$Cond 2$	کندانسور چیلر جذبی	$\dot{I} (kW)$	نرخ بازگشت ناپذیری
DHW	مبدل آب گرم خانگی	$j (A m^{-2})$	چگالی جریان کاری
$Desulfurizer$	سولفور زدایی	$j_0 (A m^{-2})$	چگالی جریان تبدیلی
$Eva 1$	اواپراتور سیکل ارگانیک رانکین	K_{ele}	رسانایی مخصوص الکترولیت
$Eva 2$	اواپراتور چیلر جذبی	$LHV (kJ kg^{-1})$	ارزش حرارتی پایین سوخت
$EGen$	ژنراتور الکتریکی	$MW (kg kmol^{-1})$	جرم مولکولی

$\dot{E}x_D (kW)$	نرخ تخریب انرژی	m	مقدار ثابت در رابطه (۳-۸)
$\dot{E}x_L (kW)$	نرخ اتلاف انرژی	$M_{st} (kg)$	جرم سیال مخزن ذخیره
$\dot{m} (kg s^{-1})$	دبی جرمی	$TV\ 2$	شیر انبساط مبرد
n	مقدار ثابت در رابطه (۳-۸)	t_{ele}	ضخامت الکترولیت
N_{st}	تعداد لایه های مخزن ذخیره	$T_{cell} (^{\circ}C)$	دما کاری سل
N_{cell}	تعداد سل	U_a	فاکتور مصرف هوا
$\dot{n} (mol s^{-1})$	دبی مولی	U_f	فاکتور مصرف سوخت
n_e	تعداد الکترون منتقل شده در واکنش الکتروشیمیایی	U_{st}	ضریب اتلاف حرارت کلی مخزن
$ORC\ Pump$	پمپ سیکل ارگانیک رانکین	$V_{act} (V)$	افت ولتاژ فعال سازی
$PAFC$	پیل سوختی اسید فسفریک	$V_{ohm} (V)$	افت ولتاژ اهمی
$Pump$	پمپ	$V_{conc} (V)$	افت ولتاژ غلظتی
$P_m (m:O_2,H_2,H_2O)$	فشار های جزئی	$V_{st} (m^3)$	حجم مخزن ذخیره
P_{cell}	فشار کاری سل	$V_{FC} (V)$	ولتاژ خروجی از پیل سوختی
$Q (kJ)$	حرارت	w_f	سیال کاری
$\dot{Q} (kW)$	نرخ انتقال حرارت	$\dot{W} (kW)$	نرخ توان تولیدی یا مصرفی
$\dot{Q}_{h,FC} (kW)$	حرارت تولیدی از استک پیل سوختی	X	غلظت محلول لیتیوم بروماید
$R (J mol^{-1} K^{-1})$	ثابت جهانی گازها	$x_n (n=O_2,H_2,...)$	کسر مولی گازها
$Reformer$	ریفرمر	$-\Delta\dot{H} (kW)$	ماکزیمم توان ناشی از واکنش الکتروشیمیایی
$s (kJ kg^{-1} K^{-1})$	آنترپی	$\Delta h (J mol^{-1})$	تغییر آنتالپی واکنش الکتروشیمیایی
SHX	مبدل حرارتی محلول	$\Delta h (kJ kg^{-1})$	تغییرات آنتالپی واکنش احتراق
TES	مخزن ذخیره انرژی حرارتی	$\Delta g^0 (J mol^{-1})$	تغییر انرژی آزاد گیبس
Tur	توربین	ΔU_C	اختلاف انرژی جمعی
$TV\ 1$	شیر انبساط محلول لیتیوم بروماید		

زیر نویس			
<i>AB</i>	مشعل پس سوز	<i>loss</i>	اتلاف
<i>B</i>	مشعل	<i>mixture</i>	مخلوط
<i>BP</i>	صفحه دو قطبی	<i>net</i>	خالص
<i>CHP</i>	تولید همزمان برق و حرارت	<i>ORC</i>	سیکل ارگانیک رانکین
<i>CCP</i>	تولید همزمان برق و سرمایش	<i>PAE</i>	الکترولیت اسید فسفریک
<i>CCHP</i>	تولید همزمان برق، حرارت و سرمایش	<i>react</i>	مصرفی، واکنش داده شده
<i>CL</i>	لایه کاتالیست	<i>ref</i>	ریفرمر
<i>CH₄</i>	گاز متان	<i>rec</i>	بازیافتی
<i>Cooling</i>	سرمایش	<i>rev</i>	بازگشت پذیر
<i>Combustion</i>	احتراق	<i>St</i>	مخزن ذخیره
<i>Cell</i>	سل	<i>SHIFT</i>	شیفت
<i>ch</i>	شیمیایی	<i>SR</i>	ریفرمر بخار
<i>ELE</i>	الکتریکی	<i>SP</i>	پمپ محلول
<i>ex</i>	اگزرژی	<i>th</i>	حرارتی
<i>form</i>	تشکیل	<i>t</i>	کل
<i>FC</i>	پیل سوختی	<i>ph</i>	فیزیکی
<i>h_f</i>	سیال داغ	<i>in</i>	ورودی
<i>h_{wf}</i>	سیال خنک کاری	<i>i = 1,2,3, ...</i>	نقاط مربوط به سیکل
<i>Heating</i>	گرمایش	<i>0</i>	حالت مرجع
<i>GDL</i>	لایه انتشار گاز	<i>k</i>	اجزاء سیستم تولید همزمان

بالانویس

حرارت	Q	نرخ	.
جزء n ام	n	کار	W
علائم یونانی			
کارایی	ε	بازده	η
ضریب انتقال بار الکتریکی	α	چگالی	$\rho \text{ (kg m}^{-3}\text{)}$

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

افزایش جمعیت جهان به اکتشاف منابع انرژی جدید و یا استفاده موثر از منابع انرژی منجر می‌شود. ترکیب اثر محدودیت منابع سوخت های فسیلی و آلودگی محیط زیست آنها منجر به نیاز به سیستم‌های تولید انرژی نوآورانه است که نه تنها بهره وری تبدیل انرژی را افزایش می‌دهد، بلکه انتشار آلاینده های مضر ناشی از فرایند های تبدیل انرژی را کاهش می‌دهد، بنابراین، مصرف انرژی باید از طریق بهبود کارایی سیستم‌های انرژی بهینه شود، علاوه بر تقویت طرح‌ها و وسایل ساختمان، صرفه‌جویی در انرژی و ترویج منابع انرژی پایدار یا تجدید پذیر ضروری است. بخش های ساختمانی: خانگی، عمومی و تجاری ۳۲٪ از کل انرژی مصرفی را به خود اختصاص دادند. این مصرف عمدتاً به مصرف لوازم برقی، گرمایش فضا، سرمایش فضا و مصرف آب گرم تقسیم می‌شود. به طور معمول این بار ها توسط شبکه ملی برق و یا با تولید حرارت جدا گانه در دیگ‌های بخار با سوزاندن گاز طبیعی و یا نفت تامین می شوند. در نیروگاه‌های حرارتی (موتور احتراق داخلی، توربین گاز یا بخار) بازده کلی سیستم کم می‌باشد، به طوری که میانگین بازده تولید برق کمتر از ۴۰٪ است [1]. حتی با محرک پیل سوختی بازده تولید برق در محدوده ۳۰ تا ۷۰٪ می‌باشد [2]. برای بارهای حرارتی، بازده بویلر های خانگی تقریباً ۷۰٪ می‌باشد. از این رو تولید جدا گانه برق و حرارت از نظر انرژی و محیط زیستی نا کارآمد خواهد بود. استفاده از حرارت اتلافی دما پایین در فرایند تولید توان برای گرمایش، سرمایش و یا تبرید یکی از راه حل های صرفه‌جویی در هدر رفت انرژی می‌باشد که تحت سیستم تولید همزمان دو گانه و سه گانه شناخته و بکار گرفته می‌شود [3]. کاربرد های پیل های سوختی می تواند راه حلی برای تامین نیاز های انرژی و کمک به بشر در برابر گرم شدن کره زمین باشد. پیل سوختی به طور همزمان برق و حرارت تولید می‌کند و محصولات مضر را به محیط زیست رها نمی‌کند، همچنین به علت بازده بالا و کم بودن تاثیرات محیط زیستی به عنوان یکی از جذاب ترین فناوری های، انرژی های تجدید پذیر می‌باشد [4].

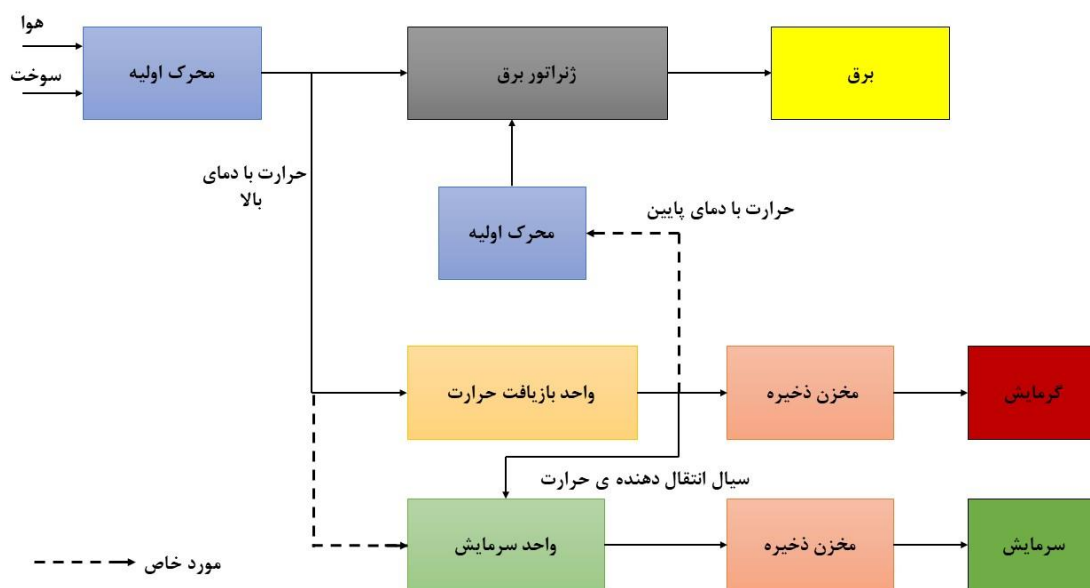
۱-۲ فناوری تولید همزمان

۱-۳ اصول و قواعد

تولید همزمان یا ترکیب تولید حرارت و توان با استفاده از موتور حرارتی و یا نیروگاه توان به منظور تولید همزمان برق و حرارت مفید می‌باشد. در این تولید متوالی انرژی، حرارت و توان مورد نیاز از یک منبع سوخت (انرژی) تامین می‌شود. حرارتی که در فرایند تولید برق اتلاف می‌شود (از طریق برج های خنک کننده، گازهای خروجی دودکش‌ها و یا وسایل دیگر به محیط زیست) از طریق سیستم های بازیافت حرارت برای تامین حرارت مورد نیاز سایر تجهیزات مورد استفاده قرار می‌گیرد، که در غیر این صورت باید از یک منبع سوخت دیگری تامین می‌شد، بنابراین موجب صرفه‌جویی قابل توجهی در سوخت و کاهش آلودگی می‌شود [5]. حرارت بازیافت شده می‌تواند برای تامین نیاز گرمایشی مانند آب داغ برای گرمایش و یا مصارف خانگی استفاده شود. تولید همزمان سه گانه یک گام جلوتر از سیستم تولید همزمان دو گانه می‌باشد در واقع از حرارت اتلافی سیستم تولید همزمان سه گانه علاوه بر تولید برق و حرارت، اثر گرمایشی نیز ایجاد می‌شود. سیستم‌های تولید همزمان سه گانه بازده بالاتری نسبت به نیروگاه‌های سنتی و یا تولید همزمان دو گانه دارند. خروجی‌های گرمایشی و گرمایشی می‌توانند به طور همزمان و یا متناوب بسته به نیازها و ساختار سیستم عمل کنند [6].

مفهوم کلی از سیستم تولید همزمان سه گانه در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. در ابتدا سوخت و هوا وارد سیستم می‌شود تا محرک اولیه برق مورد نیاز را تولید نماید، گازهای داغ خروجی از محرک اولیه توسط سیستم بازیافت حرارت بازیافت می‌شود، با استفاده از سیال انتقال حرارت، حرارت بازیافت شده قابل استفاده در سیستم گرمایشی و یا به عنوان منبع حرارتی برای محرک سیستم گرمایشی متناسب با نیاز سایت استفاده می‌شود. انرژی حرارتی بازیافت شده با درجه حرارت پایین را نیز می-

توان به کمک یک بویلر کمکی در یک محرک اصلی دیگر به منظور تولید توان اضافی استفاده نمود، این در مواقعی استفاده می‌شود که بار الکتریکی بیشتری نیاز است. در موارد خاص دیگر امکان دارد گازهای خروجی از محرک اولیه در واحد سرمایشی بازیافت شوند. مخزن ذخیره به منظور ذخیره انرژی استفاده می‌شود زیرا تقاضای برق و حرارت معمولاً با هم هماهنگ نیستند [1].

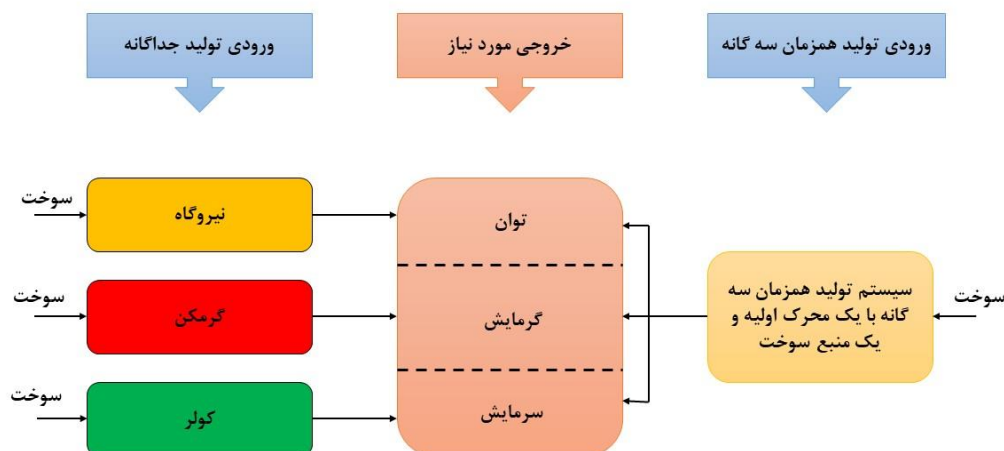


شکل ۱-۱. مفهوم کلی سیستم تولید همزمان سه گانه [1]

۴-۱ مزایا

تولید همزمان یک گزینه جذاب تلقی می‌شود به خصوص زمانی که برای یک ساختمان و یا تجهیزاتی که نیاز به منبع برق، گرمایش و سرمایش دائمی نیاز دارند. این موضوع به ویژه در کشورهایی که دارای دوره‌های خاموشی برق هستند، بسیار جالب توجه است. در شکل ۱-۲ به مقایسه سیستم تولید همزمان سه گانه با یک سیستم تولید جداگانه متعارف برق، حرارت و سرمایش پرداخته شده است. تحت شرایط یکسان بار سیستم تولید همزمان سه گانه مصرف سوخت پایین و بازده کلی بیشتری دارد که از مهمترین مزیت‌های این سیستم می‌باشد، سایر مزایای این سیستم که می‌تواند برای تسهیلات و جوامع استفاده شود عبارتند از [1]:

-
- کاهش هزینه سوخت (۰.۳-۰.۵ از کل هزینه های انرژی) و همچنین صرفه جویی چشمگیری در هزینه عملیاتی سالیانه که منجر به کاهش مدت زمان بازگشت سرمایه می شود.
- کسب در آمد از طریق فروش برق مازاد و تامین بخار قابل فروش و حرارت برای صنعت.
- افزایش رقابت ناشی از صرفه جویی در هزینه و سود بیشتر که می تواند برای اهداف توسعه، تامین سرمایه دیگر پروژه های سرمایه ای و استخدام کارگران مورد استفاده قرار گیرد.
- افزایش قابلیت اطمینان انرژی به دلیل توانایی کارکرد با سوخت های مختلف و تولید انرژی الکتریکی و حرارتی در محل، تامین توان پشتیبانی با کیفیت بالا در هر جایی که برق شبکه قطع می شود.
- گسترش ظرفیت انرژی آسان، قابل ارتقاء بودن بر اساس نیاز حرارتی و الکتریکی و نصب سریع تر، نسبت به شبکه ملی برق
- فواید صنعتی خاص مانند مدیریت و کاهش پسماند، استفاده پایدار تولیدی
- انعطاف پذیری بیشتر در برنامه ریزی انتقال و توزیع
- کاهش نیاز به سرمایه گذاری در زیرساخت ها
- رعایت استانداردهای انرژی از طریق کاهش انتشار آلاینده هایی که منجر به گرم شدن کره زمین می - شوند مانند کربن دی اکسید، اکسیدهای نیتروژن، دی اکسید گوگرد، ذرات و سایر گازهای گلخانه ای: در سال ۲۰۰۷ ، ۱۴.۷۶ میلیون تن کربن دی اکسید از طریق استفاده از سیستم تولید همزمان سه گانه ذخیره شد که برابر ۲.۷۱ میلیون تن به ازای تولید هر ۱۰۰۰ مگاوات ظرفیت نصب شده تولید توان می باشد.
- ادغام انرژی های تجدید پذیر مانند انرژی خورشیدی در سیستم های ترکیبی که نقش مکملی را ایفاء می کند.



شکل ۱-۲. مقایسه سیستم تولید همزمان سه گانه با سیستم سنتی تولید جداگانه [1]

۵-۱ دسته‌بندی سیستم تولید همزمان

سیستم‌های تولید همزمان سه گانه با توجه به چندین فاکتور قابل دسته‌بندی هستند، که عمدتاً بر اساس نوع محرک اولیه، ترتیب انرژی استفاده شده و اندازه نیروگاه می‌باشند [2].

۵-۱-۱ براساس محرک اولیه

قسمت اصلی سیستم تولید همزمان سه گانه محرک اولیه آن می‌باشد که نیرو محرکه مکانیکی، تولید توان الکتریکی و حرارت مورد نیاز تجهیزات بازیافت حرارت، که می‌تواند شامل واحد سرمایشی در یک سیستم تبرید باشد را فراهم می‌کند. محرک‌های اصلی سیستم تولید همزمان سه گانه عبارتند از [2]:

- توربین بخار
- توربین گاز
- میکروتوربین
- سیکل ترکیبی توربین گاز
- موتور احتراق داخلی رفت و برگشتی
- فناوری های جدید:
- سیکل ارگانیک رانکین
- موتور استرلینگ
- پیل های سوختی

۱-۵-۲ بر اساس ترتیب انرژی

سیستم‌های تولید همزمان بر اساس ترتیب انرژی استفاده شده و برنامه‌های کاری به کار گرفته شده قابل طبقه بندی می‌باشند. بر این اساس آنها را می‌توان به عنوان سیکل بالایی و یا پایینی سیستم‌ها دسته‌بندی کرد. در یک سیکل بالایی اولویت با تولید برق می‌باشد، یعنی سوخت تامین شده در ابتدا برای تولید توان استفاده می‌شود و سپس انرژی حرارتی که محصول جانبی سیکل می‌باشد برای تامین نیاز گرمایشی و حرارت مورد نیاز سایر اجزاء استفاده می‌شود. در یک سیکل پایینی اولویت با تولید گرماست یعنی انرژی حرارتی دما بالا محصول اصلی تولید شده از طریق احتراق سوخت و حرارت آزاد شده در فرایند تولید توان می‌باشد. در سیکل پایینی حرارت با دماهای خیلی بالا استفاده نمی‌شود، و مناسب برای فرایندهای ساخت می‌باشد که به حرارت با دمای بالا در کوره‌ها نیاز دارد. کاربردهایی

مانند صنایع سیمان، فولاد، سرامیک، گاز و پتروشیمی که کاربر کمتری نسبت به سیکل بالایی در سیستم تولید همزمان دارند [7].

۱-۵-۳ بر اساس اندازه نیروگاه

ظاهراً سیستم‌های تولید همزمان متناسب با توان مورد نیاز و کاربرد آنها اندازه‌های مختلفی دارند. بنابراین در مقیاس بزرگ (بالای 10 MW)، در مقیاس متوسط (10 MW - 1)، در مقیاس کوچک (20 kW - 1 MW) و همچنین سیستم‌های میکرو (کمتر از 20 kW) که به صورت پکیج آماده و یا سفارشی برای استفاده در محل سایت می‌باشند [2].

۱-۶ پیل‌های سوختی

پیل‌های سوختی یک رویکرد کاملاً متفاوت از تولید برق را نسبت به فن‌آوری‌های محرک اصلی سنتی نشان می‌دهند. پیل سوختی وسیله الکتروشیمیایی است که از منبع جریان مداوم سوخت و اکسید کننده (هوا) به آند و کاتد متخلخل برق تولید می‌کند. این دو جریان برای تولید برق بایکدیگر مخلوط نمی‌شوند و یا نمی‌سوزند، بلکه مانند باتری‌های معمولی از طریق واکنش الکتروشیمیایی عمل می‌کنند. جزئیات واکنش الکتروشیمیایی بستگی به نوع پیل سوختی دارد. اما در همه آنها یون، با بار الکتریکی از طریق الکترولیت که جدا کنند جریان سوخت و هوا می‌باشد، عبور می‌کند [8]. بنابراین پیل‌های سوختی به طور تمیز انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. پیل‌های سوختی به علت بازده بالا، پتانسیل استفاده از سوخت‌های متنوع (مانند: هیدروژن، متانول، گاز طبیعی، LPG)، قابلیت اطمینان بالا و انتشار آلاینده‌گی بسیار کم برای کنترل آلودگی جهانی ضروری است [8]. نوع پیل سوختی، بر اساس الکترولیت استفاده شده در آن می‌باشد [2]. انواع پیل‌های سوختی عبارتند از:

پلیمری^۱، قلیایی^۲، اسید فسفریک^۳، کربنات مذاب^۴ و اکسید جامد^۵.

۱-۶-۱ پیل سوختی اسید فسفریک

این پیل سوختی از اسید فسفریک مایع به عنوان الکترولیت استفاده می‌کند، که در محدوده دمای ۱۵۰-۲۲۰ درجه سانتیگراد کار می‌کند. الکترولیت در داخل ماتریس کاربید سیلکون پیوند شده به تفلن می‌باشد که اسید را در اثر عمل موینگی نگه می‌دارد. ممکن است، مقداری اسید به همراه هوا وارد شود و بعد از ساعت‌ها کارکرد افزودن اسید مورد نیاز باشد. از الکترود پلاتین کربن متخلخل، در آند و کاتد پیل سوختی استفاده می‌شود. آب به عنوان محصول در سمت کاتد از هر سل با جریان هوای خروجی (اکسید کننده) از پشت الکترود خارج می‌شود، روش برداشت آب نیاز به عملکرد سیستم با دمای ۱۹۰ درجه سانتیگراد دارد. در دماهای پایین‌تر از این، آب تولیدی در الکترولیت حل می‌شود و دیگر قابل برداشت نیست. در دمای ۲۱۰ درجه سانتیگراد اسید فسفریک شروع به تجزیه شدن می‌کند و کانال‌های خنک کننده در کنار صفحات کربنی برای از بین بردن حرارت آزاد شده در پیل سوختی می‌باشد که می‌توان از جریان آب و یا هوا استفاده شود [9]. ظرفیت تولید توان پیل سوختی اسید فسفریک بیشتر از ۵۰ KW و بازده آن در محدوده ۴۰-۵۰٪ و بازده تولید همزمان تقریباً ۸۵٪ می‌باشد [10]. پیل سوختی اسید فسفریک به علت نزدیکی زیاد به تجاری سازی شدن، پایداری بالا و هزینه کم الکترولیت یکی از شناخته شده ترین نوع از پیل های سوختی می‌باشد. یکی از دلایل محدود کننده تجاری شدن این نوع از پیل سوختی کم بودن چگالی توان نسبت به موتور احتراق داخلی است. یکی از راه کارهای بهبود ماکزیمم چگالی توان استفاده از سیستم‌های تولید همزمان برای بازیافت حرارت اتلافی پیل سوختی می‌باشد زیرا بخش زیادی از انرژی موجود در

¹Proton exchange membrane fuel cell

² Alkaline fuel cel

³ Phosphoric acid fuel cell

⁴Molten carbonate fuel cells

⁵ Solid oxide fuel cell

هیدروژن هنگام واکنش تلف می‌شود و همچنین در واکنش استفاده نمی‌شود [11]. ساختار ساده و نیاز به مواد مقاوم در برابر حرارت ندارد. (برخلاف پیل سوختی دما بالا مانند کربنات مذاب و اکسید جامد) به علت دمای کاری پایین، حرارت اتلافی پیل سوختی اسید فسفریک نمی‌تواند به عنوان منبع حرارتی برای موتور حرارتی و یا ژنراتور ترموایونیک استفاده شود. اگرچه دمای کاری پیل سوختی اسید فسفریک بیشتر از پیل سوختی پلیمری و قلیایی می‌باشد و حرارت قابل توجهی را دارد. بنابراین پیل سوختی اسید فسفریک، در سیستم تولید همزمان نسبت به پیل سوختی پلیمری و قلیایی موثرتر و کارآمدتر است [12]. اخیراً ۲۵۰-۵۰ واحد تولید توان پیل سوختی اسید فسفریک در ساختمان‌های اداری و هتل‌ها برای تولید توان در محل که در کشورهای امریکا، ژاپن و اروپا توسعه داده شده است [13].

۷-۱ فرایند های بازیافت حرارت

از تجهیزات بازیافت حرارت در سیستم تولید همزمان برای دریافت انرژی حرارتی آزاد شده از جریان‌های خروجی، مایع خنک کننده و یا منابع دیگر به منظور تبدیل به انرژی مفید استفاده می‌شوند. از این رو مصرف سوخت را کاهش می‌دهد و منجر به افزایش بازده انرژی کلی می‌شود، آنها عمدتاً از مبدل‌های حرارتی مختلفی تشکیل شده اند که متناسب با کاربرد مورد نیاز، استفاده می‌شوند. که قابل تمایز به دو نوع کلی می‌باشند؛ واحدهای بازیافت غیر اشتعال ساده که نقش تبادل حرارت بدون هرگونه تولید اضافی را دارند و واحدهای بازیافت اشتعالی، این دو سیستم را می‌توان به صورت جداگانه و دوتایی در سیستم‌های تولید همزمان سه گانه بسته به نوع طراحی، نصب و تجهیزات تولید توان به کار برد [1].

۱-۷-۱ مبدل‌های حرارتی

مبدل‌های حرارتی برای فرایند بازیاب حرارت استفاده می‌شود، که می‌توانند مبدل حرارتی پوسته و لوله، صفحه‌ای، پره دار و یا حتی مبدل‌های حرارتی میکرو کانال باشند [1].

۱-۸-۱ سیستم‌های تولید توان

این سیستم‌ها از حرارت اتلافی محرک‌های اولیه و یا سایر اتلافات حرارتی در سیستم تولید همزمان به منظور تولید برق اضافی استفاده می‌کنند، که شامل:

- سیکل ارگانیک رانکین^۱
- ژنراتور ترموالکتریک^۲
- سیکل الکترو-شیمیایی بازیافت حرارت^۳
- سیکل کالینا^۴
- سیکل سه جانبه^۵

۱-۸-۱ سیکل ارگانیک رانکین

اجزاء اصلی سیکل ارگانیک رانکین شامل، اواپراتور، توربین، کندانسور، سیال کاری و منبع حرارت اتلافی می‌باشد. اگر دمای خروجی توربین بالا باشد، می‌توان بازده توربین را از طریق اضافه کردن مبدل‌های حرارتی داخلی بین خروجی توربین و ورودی کندانسور تقویت کنیم، که منجر به پیش گرم

¹ Organic Rankine Cycle

² Thermoelectric generator

³ Thermally regenerated electro-chemical cycle

⁴ Kalina

⁵ Trilateral cycle

کردن سیال کاری قبل از ورود به اواپراتور می‌شود که به آن سیکل ارگانیک با بازیاب می‌گویند. سایر پیکربندی‌های این سیکل عبارتند از: سیکل ارگانیک با بازیاب تک مرحله ای، سیکل ارگانیک رانکین با بازیاب دو مرحله ای، سیکل ارگانیک رانکین ری هیت دار (باز گرمکن) سیکل ارگانیک رانکین با مبدل حرارتی داخلی و سیکل ارگانیک رانکین دو مرحله ای [14].

۹-۱ سیستم‌های تولید سرمایش

انرژی حرارتی تولید شده در محرک‌های اصلی قابل استفاده در چیلرها و رطوبت گیرها، برای تولید سرمایش و یا تولید حرارت و یا هر دو استفاده می‌شوند. حرارت اتلافی می‌تواند به شکل بخار، آب داغ، گاز خروجی و می‌تواند در محدوده دمای مختلف قرار بگیرد، که به عنوان شاخص مهمی برای استفاده از انرژی آبشاری در نظر گرفته می‌شود [15]. بنابراین یک سیستم تولید همزمان سه گانه زمانی کارآمد است که فناوری سرمایش محرک حرارتی تطابق خوبی با محرک اصلی داشته باشد [2].

۹-۱-۱ چیلر جذبی

سرمایش جذبی یک فناوری سرمایشی خوب و بالغ می‌باشد که از سال‌های گذشته تا به امروز در سیستم‌های تهویه مطبوع و سرمایشی مختلف استفاده شده است. یک سیکل ساده سرمایش جذبی شامل چهار جزء اصلی که شامل ابزوربر، ژنراتور، کندانسور و اواپراتور می‌باشد. در این سیکل از یک جاذب و یک مبرد به عنوان جفت کاری^۱ استفاده می‌شود، برخلاف سیستم‌های تراکم بخار متعارف، سیستم جذبی با استفاده از حرارت تامین شده در سطح ژنراتور برای فشرده سازی بخار مبرد به جای استفاده از کمپرسور و یا تجهیزات دوار استفاده می‌کند [16]. معمولاً در این چیلرها جفت کاری محلول لیتیوم بروماید-آب می‌باشد. چون آب به عنوان مبرد در دماهای زیر صفر درجه یخ می‌زند

¹ working pair

نمی‌توان از این محلول در کاربردهای زیر صفر درجه استفاده کرد، مناسب برای کاربردهای خانگی می‌باشد، چیلرهای جذبی دو اثره و سه اثره نیز وجود دارند که برای تامین سرمایش بیشتر و با ضریب عملکرد بهتر استفاده می‌شوند که نیاز به حرارت باکیفیت بالاتری دارند [1].

فصل دوم مروری بر پژوهش‌های پیشین

۲-۱- مقدمه

بررسی سیستم‌های تولید همزمان سه گانه بر مبنای محرک‌های اصلی، سیستم‌های سرمایشی، نوع کاربرد و یا نوع تحلیل آنها طبقه بندی می‌شود، از آنجایی که محرک اصلی مورد بررسی در این تحقیق پیل سوختی اسید فسفریک می‌باشد، بنابراین بررسی سیستم تولید همزمان سه گانه در این فصل متمرکز بر روی انواع مختلف پیل سوختی به عنوان محرک اصلی و تحلیل‌های انجام شده روی سیستم تولید همزمان می‌باشد.

۲-۲ مطالعات پیشین

۲-۱-۲ محرک اصلی پیل سوختی

۲-۱-۱-۱ پیل سوختی پلیمری

چن و همکارانش [17] یک سیستم تولید همزمان برق حرارت و سرمایش خانگی کوچک مبتنی بر پیل سوختی پلیمری، چیلر جذبی و وسایل جانبی آنها را پیشنهاد کردند. سیستم پیشنهادی قادر به تامین برق، آب گرم، گرمایش و سرمایش ساختمان را به طور همزمان می‌باشد. آنها تاثیر شرایط کاری پیل سوختی مانند دما و فشار گاز ورودی به پیل سوختی، چگالی جریان و دمای کاری پیل سوختی روی عملکرد کلی سیستم، و همچنین به رابطه بین چیلر جذبی و پیل سوختی و مقایسه عملکرد سیستم تولید همزمان در تابستان و زمستان را بررسی کرده اند. نتیجه آنالیز آنها نشان می‌دهد که ماکزیمم بازده سیستم تولید همزمان قابل دستیابی به ۷۰.۱٪ و ۸۰٪ به ترتیب در تابستان و زمستان می‌باشد. نجفی و همکارانش [18] اولین مطالعه دو بخشی را که عملکرد یک سیستم تولید همزمان سه گانه مبتنی بر پیل سوختی پلیمری به همراه چرخ دسیکنت بیان می‌کند، ارائه کردند، در سیستم پیشنهادی از دو اصلاحیه استفاده شده است، اصلاحیه اول اضافه کردن پیش گرم کن هوا می‌باشد که

منجر به افزایش راندمان الکتریکی سیستم از ۲۱.۴٪ به ۲۴.۲٪ شده است. و اصلاحیه دوم منجر به بهبود بازده تا ۲۷٪ شده است. آنها به تاثیر سطح تقسیم بندی سوخت بر روی توان حرارتی و توان الکتریکی خالص پرداختند، نتایج آنها نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی منجر به افزایش ۵.۵٪ در بازده الکتریکی می‌شود.

اینترنتی و همکارانش [19] بخش دوم کار اصلی [18] را با تمرکز بر روی سیستم‌های تولید همزمان سه گانه مبتنی بر پیل سوختی پلیمری دما پایین و چرخ دسیکنت انجام دادند. از آنجایی که حرارت تولیدی این پیل سوختی کم می‌باشد، بازده سیستم سرمایه‌ی پایین خواهد بود، و سیستم در شرایط بار کم کار نخواهد کرد. در مطالعه حاضر به تحلیل انرژی سیستم تولید همزمان سه گانه با درنظر گرفتن برنامه‌های کاربردی واقعی مانند رفتار بار جزئی پیل سوختی پلیمری، کارایی چرخه دسیکنت، اتلاف حرارت مخزن ذخیره انرژی حرارتی و احتراق الکتریکی واحد هندلینگ هوا، پرداخته شده است. آنها در این مطالعه به شبیه‌سازی انرژی روی عملکرد سالیانه با بارهای متغیر تهویه مطبوع ساختمان و شرایط آب و هوایی ساختمان به منظور اندازه بهینه سیستم تولید همزمان پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که صرفه‌جویی انرژی اولیه در زمستان مثبت خواهد بود در صورتی که نسبت ظرفیت حرارتی پیل سوختی به اوج بار حرارتی تهویه مطبوع نزدیک به ۰.۱۵ باشد. درحالی که سیستم پیشنهادی با این اجزا نمی‌تواند صرفه‌جویی انرژی سالیانه داشته باشد و در صورتی این امکان پذیر است که اجزاء کمکی به درستی بهبود یابند. بنی اسدی و همکارانش [20] عملکرد سیستم جدید تولید همزمان سه گانه کوچک مبتنی بر پیل سوختی پلیمری را از دیدگاه انرژی و انرژی-اقتصادی مورد بررسی قرار دادند. اجزا اصلی این سیستم شامل استک پیل سوختی پلیمری 10 KW ، مخزن ذخیره انرژی حرارت بر اساس مواد تغییر فاز دهنده، چیلر جذبی و ریفورمر بخار متان می‌باشد. هدف اصلی این مطالعه تحلیل انرژی-اقتصادی عملکرد سیستم پیل سوختی پلیمری یکپارچه با چیلر جذبی که برای تامین برق، حرارت و سرمایه‌ی یک کاربرد خانگی طراحی شده است. آنها به تاثیر

دما، فشار، چگالی جریان کاری و دمای منبع حرارتی ژنراتور بر روی عملکرد سیستم پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر فشار و دما، ولتاژ پیل سوختی نیز می‌تواند به طور قابل توجهی بر هزینه اگزرژی سیستم تاثیر بگذارد. با افزایش دمای منبع ژنراتور، هزینه اگزرژی آب خنک کاهش می‌یابد و ضریب عملکرد چیلر جذبی بیشتر از ۳۰٪ افزایش می‌یابد. تخریب اگزرژی اجزاء به ترتیب مربوط به پیل سوختی پلیمری، مخزن ذخیره حرارت و اواپراتور می‌باشد.

چهارطاقی و خارکشی [21] تحلیل ترمودینامیکی سیستم تولید همزمان سه گانه با محرک پیل سوختی پلیمری را ارائه کردند، این سیستم شامل پیل سوختی پلیمری، چیلر جذبی، پمپ، کمپرسور و یک مخزن ذخیره حرارت می‌باشد. سیستم تولید همزمان از دیدگاه انرژی، اگزرژی و نسبت صرفه‌جویی در مصرف مورد ارزیابی قرار گرفته است. آنها دریافتند که با افزایش اندازه پیل سوختی بازده انرژی و ضریب عملکرد چیلر افزایش پیدا می‌کند اما بازده اگزرژی کاهش می‌یابد. فاکتور ابتکاری y تعریف شده است و نشان می‌دهد که اگر تمام حرارت خروجی پیل سوختی صرف تامین سرمایش شود بازده انرژی پایین خواهد بود و اگر مقدار فاکتور y پایین باشد بازده انرژی افزایش می‌یابد. نتایج مطالعه آنها نشان می‌دهد که بازده انرژی و اگزرژی سیستم تولید همزمان به ترتیب ۸۱.۵۵٪ و ۵۴.۵٪ می‌باشد، و در مقایسه با سیستم‌های متعارف تامین انرژی، سیستم پیشنهادی ۴۵٪ صرفه‌جویی در مصرف سوخت داشته است، با توجه به تحلیل تخریب اگزرژی اجزاء سیستم، بیشترین تخریب اگزرژی مربوط به پیل سوختی پلیمری بوده است.

لورتی و همکارانش [22] تحلیل فنی و اقتصادی از یک نیروگاه تولید همزمان سه گانه مبتنی بر پیل سوختی پلیمری و چیلر جذبی نیمه اثره را ارائه دادند. پیل سوختی بر پایه نیروگاه تولید همزمان که از چیلر جذبی برای تبدیل حرارت اتلافی به انرژی سرمایشی استفاده می‌کند، یک فناوری امیدوار کننده برای تامین نیاز حرارت، توان و سرمایش در آب و هوای گرم است. رفتار نیروگاه تولید همزمان سه گانه ارائه شده در این تحقیق در سناریوهای مدیریت انرژی واقعی و با در نظر گرفتن نیاز انرژی مختلف، شرایط آب و هوایی، هزینه انرژی و شماتیک نیروگاه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

نتایج نشان می‌دهد استفاده از چیلر جذبی نیمه اثره باعث افزایش منافع زیست محیطی برای کلیه سناریوهای در نظر گرفته شده در این تحقیق می‌باشد. آنها دریافتند که استفاده از چیلر جذبی منجر به کاهش عدم تعادل بین سناریوهای مختلف شده است، اگر چه فایده اقتصادی و محیط زیستی مرتبط با تولید پراکنده به شدت تحت تاثیر محتوای انرژی است.

ابراهیمی و درخشان [23] یک سیستم تولید همزمان برق حرارت و سرمایش مبتنی بر پیل سوختی پلیمری معرفی کردند. در این سیستم، حرارت اتلافی از پیل سوختی توسط یک مبدل حرارتی صفحه ای بازیافت می‌شود و به عنوان منبع حرارتی برای چیلر جذب سطحی دو بستر و همچنین به منظور تامین بار گرمایشی می‌باشد. آب گرم تولیدی از پیل سوختی وارد یک مخزن آب گرم می‌شود و آب گرم مصرفی را تامین می‌کند. همچنین از یک سیستم ترموالکتریک برای تولید برق استفاده می‌شود، و به منظور تامین نیاز ترموالکتریک از دو مخزن میرای حرارت -سرما استفاده شده و مدلی برای طراحی آنها پیشنهاد شده است. آنها به آنالیز حساسیت بر روی چهار پارامتر طراحی شامل: چگالی جریان، دما و فشار کاری پیل سوختی پلیمری و تعداد ماژول‌های ترموالکتریک پرداختند. نتایج آنالیز آنها نشان می‌دهد که بازده کلی سیستم تولید همزمان نسبت به چگالی جریان پیل سوختی و تعداد ماژول‌های ترمو الکتریک حساس تر است، و برای شرایط کاری معمولی توان انرژی و انرژی سیستم تولید همزمان به ترتیب ۷۵٪ و ۵۳٪ بدست آمده است. همچنین سیستم پیشنهادی تولید همزمان در مقایسه با سیستم‌های متعارف، ۳۹٪ صرفه‌جویی در مصرف سوخت داشته است و ۱۶.۹ تن در سال کربن دی اکسید کمتری تولید می‌کند. علاوه بر این، برای قیمت هیدروژن کمتر از ۲ دلار ایالات متحده سیستم تولید همزمان سه گانه می تواند با سیستم‌های متعارف رقابت کند.

کشاورز زاده و همکارانش [24] یک سیستم تولید همزمان سه گانه مبتنی بر پیل سوختی پلیمری و کلکتور سهموری خطی پیشنهاد دادند، که شامل دو مخزن حرارت، سیکل ارگانیک رانکین و چیلر جذبی تک اثره لیتیوم بروماید می‌باشد. تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی سیستم پیشنهادی

انجام شده است و به منظور محاسبات مربوط به کلکتور سهموی خطی، میانگین تابش خورشید برای شهر تهران در طول یک روز زمستانی از طریق نرم افزار ترنسیس بدست آمده است، یک مدل دینامیکی از مخزن ذخیره حرارت برای سیستم تولید همزمان پیشنهادی تحت سه شرایط کاری مختلف (یعنی با ذخیره انرژی حرارتی، بدون ذخیره انرژی حرارتی و با ذخیره انرژی حرارتی همراه پیل سوختی پلیمری) انجام شده است. نتایج مطالعات آنها نشان می‌دهد که پیل سوختی پلیمری توانایی بهبود توان خروجی ۱۰٪ در طول شب و ۳٪ در ساعات روز دارد در حالی که با استفاده از مخزن ذخیره حرارت به تنهایی توان تولیدی کل شب ۸۶٪ توان تولیدی در طول ساعات روز می‌باشد. شرایط عملیاتی بهینه با استفاده از الگوریتم NSGA-II با توجه به نرخ کل هزینه و راندمان انرژی به عنوان تابع هدف تعیین می‌شود که در آن مقادیر مطلوب به ترتیب $0.058 \$ s^{-1}$ و ۸۰٪ می‌باشد.

۲-۱-۳ پیل سوختی قلیایی

ورهارت و همکارانش [25] یک سیستم میکرو تولید همزمان دو گانه برق و حرارت بر اساس پیل سوختی قلیایی را ارزیابی کردند. در این مطالعه به مقایسه عملکرد این سیستم با سایر سیستم تولید همزمان میکرو پرداختند. این تحلیل مبتنی بر مدل‌های تایید شده و یک استراتژی کنترلی برای بهینه سازی مدیریت آب و عملکرد انرژی سیستم پیل سوختی قلیایی است. آنها آنالیز حساسیت بر روی پیل سوختی قلیایی انجام دادند که نتایج آن برای طراحی سیستم‌های تولید همزمان با پیل سوختی مقرون به صرفه مناسب می‌باشد. آنها در این مطالعه در یافتند که اینورتر باید با کیفیت بالا، متناسب با هزینه و ساعت کارکرد سیستم انتخاب شود چون مستقیماً روی بازده سیستم تاثیر می‌گذارد، استفاده از پمپ‌ها و فن‌های معمولی و استاندارد برای سیستم کافی می‌باشد و منجر به کاهش هزینه سرمایه‌گذاری می‌شود و بازده مبدل‌های حرارتی تقریباً ۶۰٪ کافی است که نشان دهنده مبدل‌های حرارتی کوچک می‌باشد. نتایج آنها نشان می‌دهد که عملکرد سیستم تولید همزمان

با پیل سوختی قلیایی از لحاظ عملکرد حرارتی و بازده الکتریکی در مقایسه با سیستم تولید همزمان با پیل سوختی قلیایی بهتر می‌باشد.

۲-۱-۴ پیل سوختی اسید فسفریک

محمد درویش [9] بررسی سیستم تهویه مطبوع یک ساختمان بزرگ با مساحت 500 m^2 در کویت با محرک اصلی پیل سوختی تجاری شده اسید فسفریک ONSI P25 را انجام داد. در این سیستم، آب گرم خانگی از طریق یک مبدل حرارتی با دما پایین که در داخل پیل سوختی قرار دارد تامین می‌شود، سیستم با گاز طبیعی کار می‌کند و از یک سیکل پروپیلن گلیکول-آب برای خنک کاری پیل سوختی و دریافت حرارت آزاد شده از پیل سوختی اسید فسفریک استفاده شده است. ظرفیت اسمی تولید توان پیل سوختی 200 KW و قادر به تولید 105 KW انرژی حرارتی در دمای 120°C و 100 KW در دمای 60°C می‌باشد. پارامترهای عملکردی برای پیل سوختی پیشنهادی به خوبی مستند شده است. در این مطالعه پیل سوختی به صورت ترکیبی با چیلرهای جذبی و تراکمی به منظور استفاده از توان الکتریکی خروجی و حرارت اتلافی پیل سوختی، کار می‌کند. همچنین از مخزن ذخیره آب سرد کوچک برای تامین آب سرد در ساعاتی که خروجی پیل سوختی قادر به تامین کل بار نمی‌باشد، استفاده شده است. نتایج اقتصادی نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی زمانی از دید اقتصادی امیدوار کننده است که هزینه پیل سوختی $2000 \$ \text{KW}^{-1}$ و یا کمتر باشد.

ونگ و همکارانش [26] یک سیستم تولید همزمان سه گانه به کمک انرژی خورشیدی به منظور بهبود بازده انرژی و تقویت انرژی‌های تجدید پذیر معرفی کردند. در این مطالعه از پیل سوختی اسید فسفریک به عنوان محرک اصلی برای تولید همزمان سه گانه با ریفورمر متانول بخار خورشیدی استفاده کردند، سیستم تولید همزمان شامل: زیر سیستم جمع آوری گرمای خورشید، زیر سیستم ریفورمر بخار متانول و زیر سیستم بهره‌وری از بازیافت حرارت می‌باشد. آنها از طریق شبیه سازی و

تجزیه و تحلیل واکنش‌های ریفرمر بخار و متانول، فشار بهینه واکنش، دما و نسبت متانول به آب را برای بهبود نرخ جریان و مقدار هیدروژن تولیدی بررسی کردند. نتایج شبیه سازی های ترمودینامیکی سیستم تولید همزمان سه گانه نشان می‌دهد که راندمان انرژی سیستم در شرایط کاری تابستان و زمستان به ترتیب ۷۳.۷٪ و ۵۱.۷٪ و بازده انرژی آن به ترتیب ۱۸.۸٪ و ۲۶.۱٪ می‌باشد. و همچنین کاهش شدت تابش خورشید در زمستان منجر به کاهش بازده انرژی و انرژی سیستم تولید همزمان به ترتیب ۴.۷٪ و ۲.۲٪ می‌شود، که ناشی از کاهش بازده زیر سیستم جمع آوری گرمای خورشید می‌باشد.

۲-۱-۵ پیل سوختی کربنات مذاب

مهر پویا و همکارانش [26] تحلیل انرژی و انرژی یک سیستم ترکیبی تولید همزمان سه گانه شامل پیل سوختی کربنات مذاب، موتور استرلینگ و چیلر جذبی دو اثره لیتیوم بروماید را انجام دادند. در این تحقیق پیل سوختی کربنات مذاب منبع اصلی تولید توان می‌باشد و حرارت اتلافی آن نیز به عنوان منبع حرارتی موتور استرلینگ استفاده می‌شود. و حرارت اتلافی موتور استرلینگ نیز به عنوان منبع حرارتی در چیلر جذبی استفاده می‌شود. سیستم قادر به تولید 6482 KW برق 2173 KW بار گرمایشی و 1372 KW بار سرمایشی می‌باشد. آنها به بررسی فاکتور مصرف سوخت، نرخ جریان هوا ورودی به مشعل، دمای خروجی مشعل و نرخ اکسیدنت (هوا) بر روی عملکرد کلی سیستم تولید همزمان سه گانه پرداختند. نتایج ناشی از تحلیل انرژی نشان می‌دهد که بازده کلی و بازده الکتریکی سیستم به ترتیب ۷۱.۷۱٪ و ۴۲.۲۸٪ می‌باشد. و آنالیز تحلیل انرژی نشان می‌دهد که پیل سوختی کربنات مذاب، موتور استرلینگ و توربین گاز بازده قابل قبولی دارند. و همچنین بیشترین نرخ تخریب انرژی مربوط به های هیدروژن و متان می‌باشند زیرا بازگشت ناپذیری ذاتی احتراق می‌باشد.

مراد پور و ابراهیمی [27] یک سیکل جدید از تولید سه گانه شامل پیل سوختی کربنات مذاب، موتور استرلینگ نوع آلفا و چرخه کالینا را معرفی کردند. در این سیستم، موتور استرلینگ و چرخه

کالینا از بازیافت حرارت اتلافی پیل سوختی کربنات مذاب استفاده می‌کنند و همچنین از کندانسور چرخه کالینا برای تامین بار گرمایشی استفاده می‌شود. در حالی که بار سرمایشی توسط چیلر جذبی تک اثره لیتیوم بروماید از حرارت اتلافی موتور استرلینگ تامین می‌شود. تحلیل پارامتریک و آنالیز حساسیت روی سیستم از دید ترمودینامیک و محیط زیستی انجام شده است. از هفت پارامتر مورد بررسی چهار تای آنها بیشترین تاثیر را داشتند که شامل: چگالی جریان، دما کاری پیل سوختی، نسبت هوا به سوخت در ورودی پیل سوختی و نسبت فشار موتور استرلینگ می‌باشند. آنها در این تحقیق دریافتند که سیستم پیشنهادی ۴۵٪ صرفه‌جویی در مصرف سوخت نسبت به سیستم‌های متعارف داشته است. بازده کلی و بازده الکتریکی سیستم قابل دستیابی به ترتیب به بیشتر از ۷۰٪ و ۵۰٪ خواهد بود. علاوه بر این سیستم در انتشار کربن مونو اکسید و کربن دی اکسید برای ۶۰۰ ساعت کاری به ترتیب ۱۵ تن و ۲۲۵ تن کاهش داشته است.

۲-۱-۶ پیل سوختی اکسید جامد

ژینک و همکارانش [28] یک سیستم جامع از پیل سوختی اکسید جامد و چیلر جذبی را برای کاربرد ساختمانی بررسی کردند. سیستم تلفیق شده قادر به تامین نیاز ها گرمایشی، سرمایشی و آب گرم مصرفی ساختمان با مصرف گاز طبیعی می‌باشد. در این تحقیق مدل سیستم توضیح داده شده و یک مطالعه موردی از سیستم که شامل سیستم پیل سوختی اکسید جامد قبل از تجاری شدن و یک چیلر جذبی لیتیوم بروماید دو اثره تجاری می‌باشد انجام شده است. تعادل جرم و انرژی و عملکرد سیستم از طریق محاسبات عددی بدست آمده است. علاوه بر این به طور خلاصه ارزیابی اقتصادی و محیط زیستی این سیستم انجام شده است. آنها تغییرات تقاضای انرژی الکتریکی، حرارتی و سرمایشی یک ساختمان اداری را برای یک روز تابستانی و زمستانی بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سیستم ترکیبی مزایای زیادی را در جنبه فنی و محیطی دارا می‌باشد. با استفاده از روند توسعه کنونی در پیل سوختی اکسید جامد و وضعیت تجاری سیستم‌های گرمایش و سرمایش جذبی، توسعه

چنین سیستم‌های ترکیبی در دهه‌های بعدی به طور فزاینده‌ای امکان پذیر باشد.

مالیکو و همکارانش [29] یک سیستم تولید همزمان سه گانه با استفاده از پیل سوختی اکسید جامد دما بالا و چیلر جذبی به منظور تامین نیاز انرژی برق، سرمایش، گرمایش و آب گرم یک بیمارستان معرفی کردند. مشخصات بار بیمارستان با در نظر گرفتن میزان مصرف انرژی ساعتی برای چهار روز معمولی مختلف در سال تعیین شده است. سیستم تولید همزمان با پیل سوختی قادر به تامین بار الکتریکی بیمارستان می‌باشد و از آنجایی که قادر به تولید بار حرارتی کافی برای بیمارستان نمی‌باشد از یک بویلر کمکی استفاده شده است. آنها به بررسی تغییرات ساعتی بارهای الکتریکی، سرمایشی، گرمایشی و آب گرم مصرفی در طول روز پرداختند. بازده سیستم تولید همزمان پیشنهادی ۶۸٪ می‌باشد. تحلیل سرمایه‌گذاری انجام شده است و به این نتیجه رسیده اند که در حال حاضر و در سه سناریوی دیگر، سیستم از نظر مالی امکان پذیر نیست.

السليمان و همکارانش [30] تحلیل انرژی سیستم تولید همزمان سه گانه با محرک اولیه پیل سوختی اکسید جامد و سیکل ارگانیک رانکین را به منظور بهره وری از حرارت اتلافی پیل سوختی، برای تولید همزمان برق، حرارت و سرمایش انجام دادند. در این سیستم از سیکل ارگانیک رانکین برای تولید توان، از یک مبدل حرارتی بعد توربین سیکل ارگانیک رانکین برای تامین بار گرمایشی و چیلر جذبی تک اثره برای تامین بار سرمایشی در نظر گرفته اند. آنها به بررسی تاثیر چگالی جریان و دمای جریان ورودی (سوخت و هوا) پیل سوختی اکسید جامد بر روی ولتاژ پیل سوختی، توان خروجی و بازده سیستم تولید همزمان پرداختند. آنها دریافتند که فشار ورودی توربین بیشترین تاثیر را نیز روی بازده سیکل ارگانیک می‌گذارد و با استفاده از سیستم تولید همزمان سه گانه بازده انرژی ۲۲٪ در مقایسه با سیستم تولید توان به تنهایی (پیل سوختی اکسید جامد و سیکل ارگانیک رانکین) افزایش پیدا کرده است، ماکزیمم توان سیستم تولید سه گانه ۷۴٪ می‌باشد. بازده تولید توان و حرارت ۷۱٪ بازده تولید توان و سرمایش ۵۷٪ و بازده خالص الکتریکی ۴۶٪ بدست آمد است.

یو و همکارانش [31] یک سیستم تولید همزمان سه گانه مبتنی بر پیل سوختی اکسید جامد و

چیلر جذبی دو اثره لیتیوم برماید ارائه کردند. سوخت سیستم از طریق فرایند گازی سازی تامین می‌شود، موازنه انرژی و جرم به روش ماتریسی بیان شده است، ارزیابی و شبیه سازی سیستم در نرم افزار متلب انجام شده است. مدل توسعه یافته شامل سه ماژل می‌باشد: پیل سوختی اکسید جامد، گازهای خروجی احتراق و بویلر بازیافت حرارت و چیلر جذبی. اعتبار سنجی مدل پیل سوختی اکسید جامد با پیل تک لوله ای شرکت زیمنس و ستینگهاوس انجام شده است. در این مطالعه نسبت مصرف سوخت، نسبت جریان سوخت و دمای ورودی هوا مورد بررسی قرار گرفته است و بازده کل سیستم ۸۴٪ می‌باشد. آنها دریافتند که توان خروجی برق، حرارت و سرمایش با افزایش دبی جریان سوخت افزایش می‌یابد،

و همچنین افزایش دمای هوای ورودی پیل منجر به افزایش بازده تولید الکتریسیته و افزایش بازده سیستم تولید همزمان می‌شود.

رنجبر و همکارانش [32] به ارزیابی انرژی و انرژی یک سیستم تولید همزمان جدید مبتنی بر پیل سوختی اکسید جامد، برای کارکرد حالت پایا و با استفاده از رویکرد صفر بعدی پرداختند. سیستم تولید همزمان سه گانه شامل ژنراتور- ایزوثرم مبدل حرارتی برای سرمایش و یک مبدل حرارتی برای فرایند گرمایشی در این تحقیق تاثیر دو پارامتر مهم پیل سوختی اکسید جامد (چگالی جریان و دمای ورودی جریان) روی چندین متغیر مورد بررسی قرار گرفته است. آنها دریافتند که با افزایش چگالی جریان پیل سوختی بازده انرژی و انرژی تمام حالت های تولید همزمان کاهش می‌یابد، و چگالی جریان بهینه هنگام ماکزیمم توان خالص تولیدی بدست آمده است. نتایج آنالیز آنها نشان می‌دهد که با افزایش دمای جریان ورودی پیل سوختی بازده انرژی و انرژی و همچنین توان خالص تولیدی تا نقطه ماکزیمم خودش افزایش می‌یابد و سپس کاهش می‌یابد. تخریب انرژی اصلی مربوط به مبدل حرارتی هوا، پیل سوختی و مشعل پس سوز می‌باشد. بازده انرژی سیستم تولید سه گانه در کمترین مقدار خود ۳۳٪ بیشتر از بازده پیل سوختی اکسید جامد به تنهایی می‌باشد. علاوه بر این ماکزیمم بازده انرژی قابل دستیابی به ۷۹٪ برای سیستم تولید سه گانه، ۶۹٪ برای تولید

دوگانه گرما و ۵۸٪ برای تولید دو گانه سرما می‌باشد، با این وجود بیشترین بازده انرژی سیستم کلی تقریباً ۴۷٪ تحت شرایط داده شده می‌باشد. چیتساز و همکارانش [33] تحقیق دیگری بر روی سیستم [32] از دیدگاه انرژی و محیط زیستی انجام دادند. نتایج آنالیز آنها نشان می‌دهد که سیستم تولید همزمان سه گانه مبتنی بر پیل سوختی منجر به بهبود ۴۶٪ در بازده انرژی، نسبت به بازده انرژی پیل سوختی اکسید جامد به تنهایی شده است. منبع اصلی بازگشت ناپذیری مربوط به مبدل حرارتی هوا و مشعل پس سوز می‌باشد. واحد انتشار کربن دی اکسید $kgMWh^{-1}$ برای زمانی که سیستم فقط برق تولید می‌کند بیشتر است. هنگام سیستم به طور تولید همزمان کار می‌کند این مقدار به نصف مقدار اولیه خود کاهش می‌یابد.

چیت ساز و همکارانش [34] تحلیل انرژی اقتصادی سیستم مورد بررسی [32] انجام دادند. آنها به بررسی تاثیر سه پارامتر مهم پیل سوختی روی چندین متغیر (هزینه واحد توان الکتریکی، هزینه واحد سرمایش، هزینه واحد گرمایش و هزینه واحد کل محصولات) پرداختند. آنها دریافتند که با افزایش چگالی جریان هزینه واحد تولید برق افزایش می‌یابد، و افزایش دمای ورودی به پیل سوختی اکسید جامد در ابتدا منجر به افزایش هزینه واحد محصولات و سپس منجر به کاهش آن می‌شود. همچنین برای شرایط مورد مطالعه، ماکزیمم کل هزینه واحد تولیدی $\$GJ^{-1}$ ۳۴.۲ در حالی که مینیموم آن $\$GJ^{-1}$ ۲۶.۵ می‌باشد. غلامیان و همکارانش [35] یک سیستم تولید همزمان سرمایش، حرارت و توان با سوخت زیست توده را پیشنهاد دادند. این سیستم شامل زیست توده گاز سوز (به عنوان منبع انرژی اولیه)، پیل سوختی اکسید جامد، چرخه تبرید جذبی دو اثره و یک سیستم تولید بخار می‌باشد. آنها با در نظر گرفتن ملاحظات زیست محیطی، تحلیل انرژی و انرژی را برای سیستم پیشنهادی و مقایسه عملکرد پیل سوختی با سیستم تولید توان متناظر و سیستم تولید همزمان انجام دادند. آنها از طریق یک مطالعه پارامتری، مشاهده کردند که چگالی جریان و ضریب مصرف سوخت، نقش‌های کلیدی را روی عملکرد سیستم ایفا می‌کنند. نتایج ناشی از آنالیز آنها نشان

می‌دهد که حداکثر راندمان اگزرژی سیستم تولید همزمان سه گانه ۳۷.۹۲٪ با انتشار $20.37 \text{ ton MWh}^{-1}$ دی اکسید می‌باشد، که نشان دهنده افزایش ۴۹.۸۸٪ در بازده اگزرژی و ۶۴.۰۲٪ در کاهش انتشار کربن دی اکسید، در مقایسه با سیستم پیل سوختی اکسید جامد به تنهایی می‌باشد.

موسوی و همکارانش [36] تحلیل چهار گانه بر پایه مدیریت بهینه یک سیستم تولید همزمان سه گانه مبتنی بر پیل سوختی اکسید جامد برای کاربرد ساختمانی انجام دادند. مدل‌سازی سیستم در سه مرحله به شرح زیر انجام شده است: شبیه سازی انرژی به منظور تعیین تقاضا ساختمان مسکونی، انتخاب پیل سوختی اکسید جامد به عنوان محرک اولیه و اطمینان حاصل کردن از تامین حداکثر تقاضا برق، حرارت و سرمایش سیستم تولید همزمان پیشنهادی تحت آنالیز انرژی، اگزرژی، اقتصادی و محیط زیستی و بهینه سازی چند هدفه قرار گرفته است. همچنین دو استراتژی متصل به شبکه و خارج از شبکه برای سیستم در نظر گرفته شده است. نتایج بهینه سازی نشان می‌دهد که سیستم تولید همزمان پیشنهادی از نظر انرژی و اقتصادی برای هر دو سناریو عملکرد خوبی داشته است. ماکزیمم بازده انرژی و اگزرژی سیستم تولید همزمان ۶۵.۲٪ و ۴۵.۷۷٪ و نرخ هزینه کمینه سیستم $22.2 \text{ Cents kWh}^{-1}$ تحت شرایط متصل به شبکه بدست آمده است.

ژائو و هو [37] یک سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرمایش شامل پیل سوختی اکسید جامد، توربین هوای مرطوب، ریفرمر متانول خورشیدی در نرم افزار اسپن پلاس طراحی کردند و عملکرد سیستم تولید همزمان سه گانه را مورد ارزیابی انرژی و اگزرژی قرار داده اند. این مدل ارتباط بین انرژی خورشیدی و انرژی شیمیایی را نشان می‌دهد. آنها به بررسی تاثیر نرخ سوخت ورودی و فاکتور مصرف سوخت روی توان الکتریکی، توان حرارتی و توان سرمایشی سیستم تولید همزمان سه گانه پرداختند. نتایج تحلیل اگزرژی آنها نشان می‌دهد که بیشترین تخریب اگزرژی به ترتیب مربوط به اجزاء انتقال دهنده حرارت، انرژی خورشیدی، توربین گاز، محفظه پس سوز و پیل سوختی اکسید جامد می‌باشد. همچنین بازده الکتریکی، بازده اگزرژی و بازده انرژی سیستم تولید همزمان سه گانه به

ترتیب ۵۷.۲٪، ۶۳٪ و ۸۷.۱٪ می‌باشد. آنها دریافتند که معرفی سیستم پیشنهادی منجر به افزایش توان تولید و کاهش نرخ مصرف زغال سنگ می‌شود.

مهرپویا و همکارانش [38] یک سیستم تولید همزمان، گرمایش، سرمایش و توان مبتنی بر پیل سوختی اکسید جامد برای تامین نیاز انرژی یک ساختمان با مساحت 900 m^2 در تهران در نرم افزار اسپن پلاس مورد تحلیل فنی قرار گرفته است. بار سرمایشی مورد نیاز را یک چیلر جذبی دو اثره لیتیوم بروماید تامین می‌کند و گاز خروجی از پیل سوخت اکسید جامد از طریق سیستم بازیافت حرارت، نیاز حرارتی ساختمان را تامین می‌کند. آنها در این تحقیق به تاثیر نرخ جریان سوخت و هوا ورودی به پیل سوختی اکسید جامد بر روی توان خروجی خالص و بازده الکتریکی پیل سوختی، سیستم تولید همزمان در حالت‌های مختلف کاری پرداختند. نتایج ناشی از آنالیز آنها نشان می‌دهد که پیل سوختی قادر به تولید 120 KW برق با بازده ۴۵٪ می‌باشد و همچنین بازده انرژی سیستم تولید همزمان در حالت برق-سرمایش ۵۸٪، در حالت برق-گرمایش ۶۰٪ و در حالت تولید سه گانه ۶۰٪ می‌باشد، علیرغم بالا بودن بازده سیستم تولید همزمان و کاهش قابل توجه آلاینده های اصلی، دوره بازگشت سرمایه ۸.۳ سال تخمین زده شده است.

لیو و همکاران [39] سیستم تولید همزمان جدید مبتنی بر پیل سوختی اکسید جامد را برای تحلیل انرژی و اگزرژی پیشنهاد دادند، این سیستم شامل پیل سوختی اکسید جامد، توربین گاز، چرخه کربن دی اکسید و سیکل ارگانیک رانکین با بهره وری انرژی سرمایش گاز طبیعی مایع برای استفاده از انرژی اولیه و مهار کربن دی اکسید تولیدی سیستم می‌باشد، آنها به بررسی ضریب مصرف سوخت، نسبت هوا به سوخت، غلظت اکسیژن در کاتد پیل سوختی بر روی عملکرد سیستم تولید همزمان پرداختند. نتایج آنالیز آنها نشان می‌دهد که بازده انرژی سیستم تولید همزمان، برق خالص تولیدی و بازده کل اگزرژی سیستم تولید همزمان قابل دستیابی به ۷۹.۴۸٪، ۷۹.۸۱٪ و ۶۲.۲۹٪ به ترتیب می‌باشد. درحالی که بازده تولیدی توان پیل سوختی اکسید جامد ۵۰.۹۶٪ و نرخ انهدام کربن دی اکسید سیستم تولید همزمان پیشنهادی 79.2 kg h^{-1} می‌باشد.

۲-۲ معرفی پژوهش حاضر و نوآوری

مرور کار های پیشین نشان می‌دهد که تحلیل انرژی سیستم پیل سوختی اسید فسفریک همراه سیکل ارگانیک رانکین انجام داده نشده است. و همچنین تاثیر پارامتر های مهم پیل سوختی اسید فسفریک روی عملکرد سیستم تولید همزمان سه گانه برق حرارت و سرمایش بررسی نشده است. بر اساس مطالعات پیشین، هدف ما در این پایان نامه معرفی و ارزیابی انرژی و انرژی یک سیستم تولید همزمان سه گانه جدید با محرک اصلی پیل سوختی اسید فسفریک همراه سیکل ارگانیک رانکین می‌باشد. نوآوری و نکات اصلی این مطالعه را می‌توان به شکل زیر خلاصه کرد:

- ۱- تحلیل انرژی و انرژی با جزئیات کامل برای تمام اجزاء استفاده شده در سیستم تولید همزمان پیشنهادی.
- ۲- به کار گیری سه سیستم بازیافت حرارت (سیکل ارگانیک رانکین- چیلر جذبی- مبدل حرارتی) به منظور بازیافت حرارت اتلافی از پیل سوختی.
- ۳- مدل‌سازی مخزن ذخیره انرژی حرارتی با در نظر گرفتن اثر لایه‌ای و تاثیر چگالی جریان پیل سوختی روی دمای لایه‌های آن.
- ۴- عملکرد سیستم‌های پیشنهادی از طریق آنالیز حساسیت پارامترهای طراحی پیل سوختی (مانند چگالی جریان و دما و فشار کاری) مورد ارزیابی قرار گرفته است.
- ۵- از روش آنالیز انرژی برای پیدا کردن تخریب انرژی و بازده انرژی اجزاء سیکل استفاده شده است.

در این سیستم پیل سوختی اسید فسفریک به عنوان منبع اصلی تولید توان استفاده می‌شود. سیکل ارگانیک رانکین برای بهبود بازده الکتریکی و تولید توان اضافی از بخشی از حرارت اتلافی پیل سوختی اسید فسفریک به کار می‌رود. همچنین برای دستیابی به هدف سیستم تولید همزمان سه

گانه در شماتیک اول از یک مخزن ذخیره انرژی حرارتی برای تامین انرژی حرارتی چیلر جذبی و تامین نیاز گرمایشی ساختمان استفاده می‌شود. در حالی که حرارت ناشی از سوزاندن گازهای خروجی پیل سوختی اسید فسفریک در مشعل پس سوز از طریق مبدل حرارتی برای تامین بار آب گرم خانگی^۱ استفاده می‌شود. و در شماتیک دوم بجای استفاده از مخزن ذخیره انرژی حرارتی از یک مبدل حرارتی برای تامین بار گرمایشی و از چیلر جذبی بعد از سوزاندن گازهای خروجی از پیل سوختی در مشعل پی سوز برای تامین نیاز سرمایشی و در نهایت از مبدل حرارتی برای تامین بار آب گرم خانگی استفاده شده است و همچنین از زیر سیستم ریفرمر بخار بهره برده شده است. پنج حالت کارکردی برای سیستم در نظر گرفته شده است: کارکرد پیل سوختی به تنهایی به منظور تامین برق، تولید برق ترکیبی، تولید همزمان برق و حرارت، تولید همزمان برق و سرمایش، تولید همزمان سه گانه.

¹ Domestic Hot Water

فصل سوم

معادلات حاکم و مدل سازی

۳-۱ مقدمه

در این فصل مدل سازی سیستم تولید همزمان سه گانه برق، حرارت و سرمایش مبتنی بر پیل سوختی اسید فسفریک همراه سیکل ارگانیکی رانکین مورد مطالعه در این پایان نامه که شامل استک پیل سوختی اسید فسفریک، سیکل ارگانیکی رانکین، مخزن ذخیره انرژی حرارتی، چیلر جذبی تک اثره لیتیوم برماید، مبدل های حرارتی، مشعل، ریفورمر بخار و مشعل پس سوز و سایر تجهیزات مرتبط با آنها که در دو شماتیک مختلف در کنار هم ترکیب شده اند تا از حرارت اتلافی پیل سوختی اسید فسفریک برای بهبود عملکرد سیستم تولید همزمان استفاده شوند. در این فصل به معرفی سیستم پیشنهادی، فرضیات مدل سازی و معادلات حاکم بر اجزاء این سیکل از دیدگاه انرژی و اگزرژی پرداخته خواهد شد.

۳-۲ شماتیک سیکل

سیستم های تولید همزمان با توجه با نیاز کاربران، محرک های اولیه و تحلیل های انجام شده روی آنها دارای شماتیک های مختلفی هستند، از این رو در این تحقیق به منظور ارائه یک سیستم تولید همزمان سه گانه با محرک پیل سوختی اسید فسفریک همراه سیکل ارگانیکی رانکین از دو آرایش مختلف برای بازیافت حرارت اتلافی پیل سوختی استفاده شده است.

۳-۲-۱ شماتیک اول

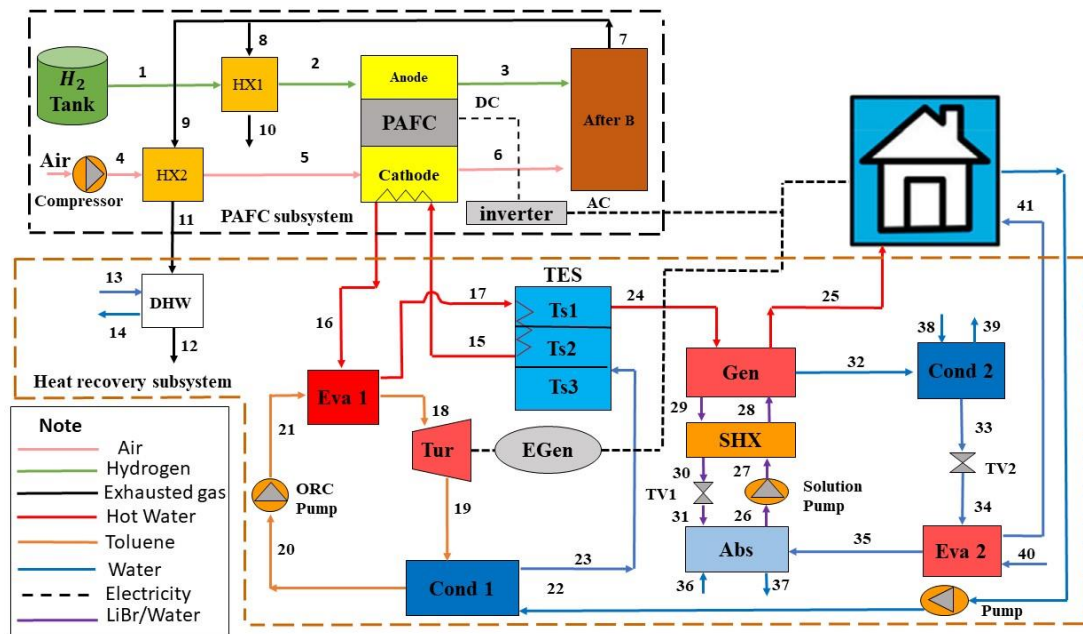
شماتیک اول سیستم تولید همزمان سه گانه در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. هیدروژن داخل مخزن بعد از عبور از شیر فشار شکن در فشار ۱۰۱.۳ کیلو پاسکال و دمای ۳۰ درجه سانتیگراد در نقطه ۱ وارد (HX1) شده و بعد از افزایش دما تا دمای کاری پیل سوختی، از آن خارج شده و در نقطه ۲ وارد آند می شود. هوای محیط در نقطه ۴ وارد (HX2) می شود. و بعد از افزایش دما تا دمای کاری پیل سوختی، از آن خارج شده و در نقطه ۵ وارد کاتد می شود. هیدروژن و هوا به طور کامل در پیل سوختی مصرف نمی شوند، از این رو باقی مانده هیدروژن و هوا در دمای کاری پیل سوختی به ترتیب در نقاط ۳ و ۶ از پیل سوختی خارج می شوند، و سپس این دو جریان وارد مشعل پس سوز^۱ شده و پس از احتراق هیدروژن با اکسیژن، گاز داغ تولید شده در نقطه ۷ از مشعل پس سوز خارج می شود، این جریان گاز داغ به دو انشعاب جدا می شود، به طوری که در نقطه ۸ وارد (HX1) می شود، و در نقطه ۹ وارد (HX2) می شود بعد از تبادل حرارت با هوا، دمای گاز کاهش یافته و از مبدل خارج می شود و در نقطه ۱۱ وارد (DHW) شده و بعد از تبادل حرارت با آب در نقطه ۱۲ از آن خارج شده و در نهایت وارد محیط می شود. به منظور تامین آب گرم خانگی، آب با دمای محیط در نقطه ۱۳ وارد (DHW) شده، و بعد از دریافت حرارت از گاز داغ در دمای ۶۰ °C از آن خارج می شود. به منظور خنک کاری پیل سوختی و جذب حرارت اصلی تولید شده ناشی از واکنش الکتروشیمیایی در پیل سوختی از یک سیکل بسته جریان آب که بین پیل سوختی، اواپراتور^۲ و مخزن ذخیره انرژی حرارتی^۳ تبادل حرارت می کند، استفاده می شود. آب داغ در دمای کاری پیل سوختی که ۱۸۰ °C می باشد از آن خارج شده و در نقطه ۱۶ وارد (Eva 1) می شود، و مقداری از حرارت خود را به سیال کاری سیکل ارگانیک رانکین داده و در دمای ۱۳۰ °C از (Eva 1) خارج شده و در نقطه ۱۷ وارد مخزن ذخیره

¹¹ After Burner

² Eva 1

³ Thermal Energy Storage

انرژی حرارتی می‌شود، پس از تبادل حرارت با سیال داخل مخزن ذخیره انرژی حرارتی از آن خارج شده و در نقطه ۱۵ وارد پیل سوختی می‌شود، سیال کاری سیکل ارگانیک رانکین نیز در نقطه ۲۱ وارد (Eva 1) شده و پس از تبادل حرارت با آب داغ خروجی از پیل سوختی در نقطه ۱۸ در حالت بخار اشباع وارد (Tur) شده و پس از انبساط از آن خارج می‌شود، و در نقطه ۱۹ وارد (Cond 1) شده و در حالت مایع اشباع از آن خارج می‌شود، سپس در نقطه ۲۰ وارد پمپ شده، فشار آن افزایش می‌یابد و این سیکل تکرار پیدا می‌کند. در ادامه یک خط جریان آب برگشتی از ساختمان در نقطه ۲۲ وارد (Cond 1) می‌شود، بعد از خنک کاری کندانسور با دمای 60°C از آن خارج می‌شود و در نقطه ۲۳ وارد (TES) می‌شود، آب داغ خروجی از مخزن در نقطه ۲۴ وارد (Gen) می‌شود، مقداری از حرارت خود را در ژنراتور از دست می‌دهد، و در نهایت با دمای 80°C به منظور تامین نیاز گرمایشی در نقطه ۲۵ وارد ساختمان می‌شود. محلول رقیق لیتیوم برماید-آب در نقطه ۲۶ وارد پمپ محلول شده، و بعد از عبور از (SHX) دمایش افزایش یافته و سپس در نقطه ۲۸ وارد (Gen) می‌شود، دمای محلول باز هم افزایش می‌یابد تا جاییکه مایع مبرد موجود در محلول تبخیر شده و از محلول جدا گردد، بخار آب تولید شده در ژنراتور چیلر جذبی در نقطه ۳۲ وارد (Cond 2) می‌شود، با جدا شدن مقدار زیادی از مایع مبرد محلول غلیظ شده، و سپس به جذب کننده بر می‌گردد. بخار مبرد بعد از تقطیر شدن در کندانسور در نقطه ۳۳ وارد (TV 2) شده فشار مایع مبرد کاهش می‌یابد و سپس در نقطه ۳۴ وارد (Eva 2) شده و حرارت نهان تبخیرش را از آب ورودی به اواپراتور گرفته و آن را خنک می‌کند، آب خنک تولید شده به منظور تامین نیاز سرمایشی در نقطه ۴۱ وارد ساختمان می‌شود، بخار مبرد در نقطه (۱۰) وارد (Abs) شده و توسط لیتیوم بروماید جذب شده و پروسه فوق تکرار می‌شود. از آنجایی که توان خروجی از پیل سوختی جریان مستقیم می‌باشد، از یک اینورتر (inverter) برای تبدیل به جریان متناوب استفاده شده است.

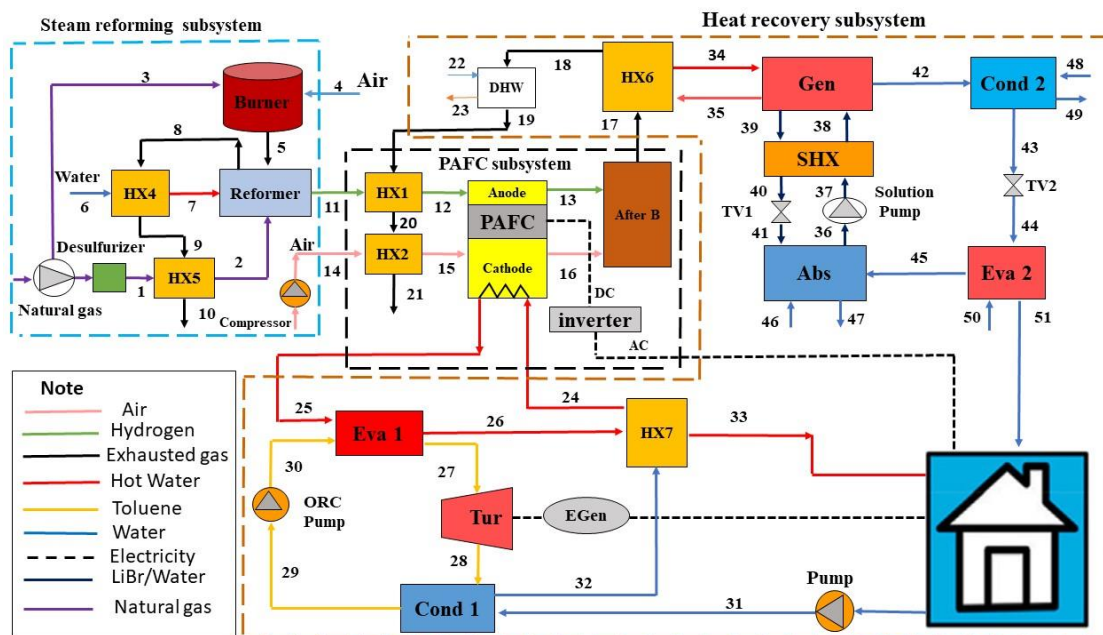


شکل ۳-۱. شماتیک اول سیستم تولید همزمان پیشنهادی

۳-۲-۲ شماتیک دوم

شماتیک دوم سیستم تولید همزمان سه گانه در شکل ۳-۲ نشان داده شده است. در این سیستم، سوخت ورودی به سیستم، گاز طبیعی می باشد و در این پایان نامه کاملاً متان در نظر گرفته شده. به منظور تولید هیدروژن مورد نیاز پیل سوختی از یک ریفرمر بخار استفاده شده است، و همچنین برای تامین حرارت مورد نیاز واکنش بین بخار آب و گاز متان که در داخل ریفرمر بخار انجام می شود، از یک مشعل گاز سوز استفاده شده است. آب با دمای محیط در نقطه ۶ وارد (HX4) شده و تا دمایش افزایش یابد و سپس در نقطه ۷ وارد ریفرمر بخار می شود. گاز طبیعی در ابتدا سولفور زادی شده و بعد از عبور از (HX5) دمایش افزایش یافته و سپس در نقطه ۲ وارد ریفرمر بخار می شود. هیدروژن در دمای کاری ریفرمر بخار که حدود 750°C می باشد از آن خارج شده و در نقطه ۱۱ وارد (HX1) می شود دمایش تا دمای کاری پیل سوختی کاهش می یابد و در نقطه ۱۲ وارد آند شده تا هیدروژن مورد نیاز واکنش الکتروشیمیایی را تامین کند. از آنجایی که مقدار هیدروژن ورودی به آند به طور

کامل مصرف نمی‌شود، باقی مانده هیدروژن در نقطه ۱۳ از آن خارج شده و وارد مشعل پی سوز می‌شود. از آنجایی که پیل سوختی در فشار محیط کار می‌کند، هوا با شرایط محیطی وارد (HX2) شده و بعد از افزایش دما در نقطه ۱۵ وارد کاتد شده، تنها مقداری از اکسیژن هوا در کاتد مصرف شده و باقی مانده هوا در نقطه ۱۶ در دمای کاری پیل سوختی از آن خارج شده و مانند هیدروژن وارد مشعل پس سوز می‌شود. بعد از احتراق هیدروژن با اکسیژن، گاز خروجی از مشعل پس سوز در نقطه ۱۷ از آن خارج شده و وارد (HX6) می‌شود، تا مقداری از حرارت خود را به جریان آب خروجی از ژنراتور چیلر جذبی (Gen) بدهد تا حرارت مورد نیاز چیلر جذبی تامین شود. (از آنجایی که توضیحات مربوط به چیلر جذبی در شماتیک اول ارائه شده است، در این بخش بیان نمی‌شود.) گاز خروجی از (HX6) دما بالایی داشته و قابلیت تامین آب گرم خانگی با دمای 60°C را دارد، بنابراین در نقطه ۱۸ وارد (DHW) شده تا باقی مانده حرارت خود را به آب ورودی به (DHW) بدهد، در نهایت این گاز خروجی بعد از تبادل حرارت در مبدل از آن خارج شده و در (HX1) منجر به کاهش دمای هیدروژن خروجی از ریفورمر قبل از ورود به استک پیل سوختی شده است، هنگام خروج از مبدل دمای گاز خروجی افزایش یافته و در نقطه ۲۰ وارد (HX2) می‌شود که باعث پیش گرم کردن هوا ورودی به کاتد می‌شود. به منظور خنک کاری پیل سوختی و استفاده از حرارت تولید شده یک خط جریان آب وارد استک پیل سوختی می‌شود، آب گرم خروجی از پیل سوختی حرارت مورد نیاز اواپراتور سیکل ارگانیک رانکین را تامین می‌کند، و بعد از تبادل گرمایی در نقطه ۲۶ از اواپراتور خارج شده و وارد (HX7) می‌شود تا آب گرم با دمای 80°C را برای مصارف گرمایشی ساختمان تامین کند. و سپس در نقطه ۲۴ وارد پیل سوختی می‌شود و این سیکل ادامه پیدا می‌کند.



شکل ۲-۳. شماتیک دوم سیستم تولید همزمان پیشنهادی

۳-۳- فرضیات و روابط حاکم بر مدل سازی سیستم تولید

همزمان :

به منظور مدل سازی سیستم تولید همزمان فرضیات ساده کننده زیر در نظر گرفته می شود: [40] و

[41] و [42].

- کلیه ی اجزای سیستم در شرایط پایا کار می کنند.
- ترکیب هوا به صورت ۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن می باشد.
- فرض شده است که PAFC به گونه ای عایق بندی شده است که اتلاف حرارت با محیط اطراف ندارد و آب خنک کننده ی عبوری از داخل PAFC تمام حرارت تولید شده در PAFC را دریافت می کند و در دمای کاری PAFC از آن خارج می شود.
- مشخصات دمایی در تمام نقاط PAFC یکنواخت می باشد.
- کلیه ی گازهای به صورت ایده آل فرض می شود.
- گاز هیدروژن در فشار ۱ اتمسفر وارد PAFC می شود.
- خروجی کندانسورها به صورت مایع اشباع می باشد.
- ورودی Tur به صورت بخار اشباع می باشد.
- افت فشار ناشی از اصطحکاک در مبدل های حرارتی و در لوله های اتصال ناچیز در نظر گرفته شده است.
- از کار پمپ چیلر جذبی صرف نظر شده است.
- خروجی اواپراتورها به صورت بخار اشباع فرض شده است.
- شیرهای انبساط به صورت آنتالپی ثابت فرض شده است.
- تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل ناچیز است.
- دما و فشار حالت مرده به ترتیب 25°C و 101.3 kPa می باشد.
- از بازده ایزنتروپیک برای مدل سازی توربین و پمپ ها استفاده می شود.

جدول ۱-۳. پارامترهای ورودی سیستم تولید همزمان

PAFC				C_p	۴.۲	$kJ\ kg^{-1}K^{-1}$	[43]
پارامتر	مقدار	واحد	مرجع	$\eta_{After\ B}$	۹۹٪	-	[44]
A_{cell}	۰.۱	m^2	[4]	$\eta_{inverter}$	۹۵٪	-	[30]
N_{cell}	۶۰۰	-	-	LHV_{H_2}	۱۱۹۹۴۶	$kJ\ kg^{-1}$	[43]
T_{cell}	۱۸۰	$^{\circ}C$	[4]	LHV_{CH_4}	۵۰۰۲۳	$kJ\ kg^{-1}$	[32]
P_{Cell}	۱۰۱.۳	kPa	[4]	MW_{H_2}	۲۰.۱۶	$kg\ k\ mol^{-1}$	-
P_{H_2}	۱۰۱.۳	kPa	[4]	MW_{Air}	۲۸.۹۷	$kg\ k\ mol^{-1}$	-
P_{H_2O}	۱۰۱.۳	kPa	[4]	MW_{O_2}	۳۲	$kg\ k\ mol^{-1}$	-
P_{O_2}	۲۱.۲۷	kPa	[4]	MW_{N_2}	۲۸.۱	$kg\ k\ mol^{-1}$	-
n_e	۲	-	[4]	MW_{CO_2}	۴۴.۰۱	$kg\ k\ mol^{-1}$	-
P_0	۱۰۱.۳	kPa	[13]	ORC			
T_0	۲۵	$^{\circ}C$	[13]	پارامتر	مقدار	واحد	مرجع
U_a	۰.۱۷	-	[43]	η_{EGen}	۹۵٪	-	[30]
U_f	۰.۸۵	-	[43]	$\eta_{ORC\ Pump}$	۸۰٪	-	[30]
F	۹۶۴۸۵	$C\ mol^{-1}$	[4]	η_{Tur}	۸۰٪	-	[30]
R	۸.۳۱۴	$J\ mol^{-1}\ K^{-1}$	[4]	ACH			
α	۰.۷	Ohm	[4]	پارامتر	مقدار	واحد	مرجع
t_{ele}	0.000055	m	[4]	T_{Gen}	۸۷.۸	$^{\circ}C$	[42]
J	۱۰۱۷۰	Am^{-2}	-	T_{Abs}	۳۷.۸	$^{\circ}C$	[42]
m	۰.۰۰۰۰۳	-	[4]	$T_{Eva\ 2}$	۷.۲	$^{\circ}C$	[42]
n	۰.۰۰۰۰۵	-	[4]	ε_{SHX}	۰.۷	-	[42]
$j_0\ (at\ 150^{\circ}C)$	۰.۰۱	Am^{-2}	[4]	TES			
$j_0\ (at\ 180^{\circ}C)$	۰.۰۶	Am^{-2}	[4]	پارامتر	مقدار	واحد	مرجع
$j_0\ (at\ 200^{\circ}C)$	۰.۱	Am^{-2}	[4]	V_{St}	۱	m^3	-
$k_{ele}\ (at\ 150^{\circ}C)$	49.1	$mho\ m^{-1}$	[4]	U_T	۰.۵	$kWm^{-2}K^{-1}$	[45]
$k_{ele}\ (at\ 180^{\circ}C)$	60	$mho\ m^{-1}$	[4]	N_{St}	۳	-	-
$k_{ele}\ (at\ 200^{\circ}C)$	67.5	$mho\ m^{-1}$	[4]	Steam Reforming Subsystem			
$\Delta G^0\ (at\ 150^{\circ}C)$	-۲۲۲۷۵۰	$J\ mol^{-1}$	[4]	پارامتر	مقدار	واحد	مرجع
$\Delta G^0\ (at\ 180^{\circ}C)$	-۲۲۸۶۱۰	$J\ mol^{-1}$	[4]	$T_{Reformer}$	۷۵۰	$^{\circ}C$	[46]
$\Delta G^0\ (at\ 200^{\circ}C)$	-۲۲۸۶۱۰	$J\ mol^{-1}$	[4]	T_{Burner}	۵۰۰	$^{\circ}C$	[46]
$\Delta h\ (at\ 150^{\circ}C)$	-۲۴۳۳۰۰	$J\ mol^{-1}$	[4]	S/C	۲.۵	-	[46]
$\Delta h\ (at\ 180^{\circ}C)$	-۲۴۳۳۴۲	$J\ mol^{-1}$	[4]				
$\Delta h\ (at\ 200^{\circ}C)$	-۲۴۳۵۵۰	$J\ mol^{-1}$	[4]				

ساختار و کلیت پیل سوختی اسید فسفریک در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. پیل سوختی اسید فسفریک از یک لایه الکتrolیت اسید فسفریک (PAE) استفاده می کند و شامل دو الکتrod به نام آند و کاتد می باشد، الکتrod ها شامل صفحه دو قطبی (BP)، لایه انتشار گاز (GDL) و لایه کاتالیست (CL) می باشند [47]. هوا به سمت کاتد و هیدروژن به سمت آند به منظور انجام واکنش الکتروشیمیایی فرستاده می شود، واکنش های انجام شده در آند، کاتد و واکنش کلی پیل سوختی به ترتیب در روابط (۳-۱) تا (۳-۳) بیان شده است.

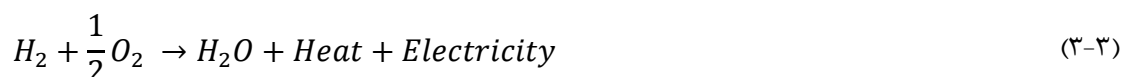
واکنش در کاتد:



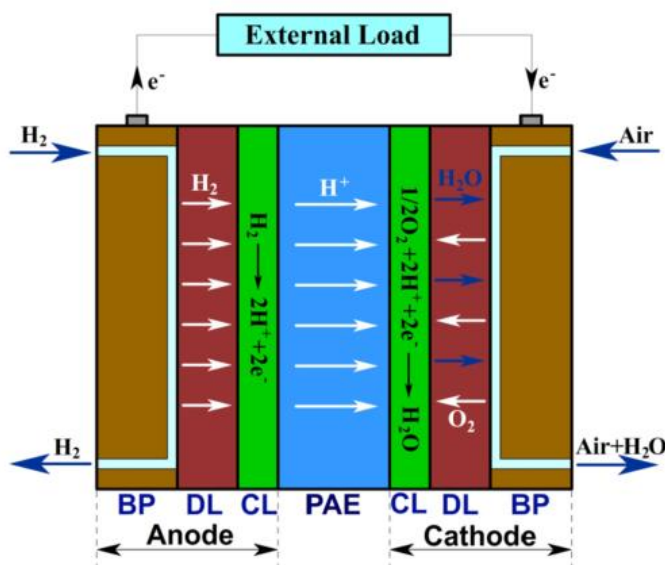
واکنش در آند:



واکنش کلی به صورت زیر است:



با انجام واکنش کلی که در رابطه (۳-۳) بیان شد، انرژی شیمیایی هیدروژن و اکسیژن به انرژی الکتریکی و حرارتی تبدیل می شود [47].



شکل ۳-۳. ساختار و کلیت پیل سوختی اسید فسفریک [47].

ماکزیمم پتانسیل تئوری و یا رابطه نرنست^۱ از طریق رابطه (۳-۴) بیان می‌شود [13]:

$$V_{rev} = -\frac{\Delta g^0}{n_e F} + \frac{RT_{Cell}}{n_e F} \ln \left[\frac{P_{H_2} (P_{O_2})^{0.5}}{P_{H_2O}} \right] \quad (3-4)$$

در معادله ی (۳-۴) Δg^0 تغییرات انرژی آزاد گیبس n_e تعداد الکترون منتقل شده، R ثابت جهانی گازها، T_{Cell} دمای کاری PAFC در مقیاس کلون، F ثابت فارادی، P_{H_2} ، P_{O_2} ، P_{H_2O} به ترتیب فشار های جزئی هیدروژن، اکسیژن و آب هستند [40]. تلفات بازگشت ناپذیری در پیل سوختی ناشی از واکنش الکتروشیمیایی است که شامل تلفات فعال سازی V_{act} ، تلفات اهمی V_{ohm} و تلفات غلظتی V_{conc} می‌باشد [11]. عمده ترین تلفات بازگشت ناپذیری مربوط به تلفات فعال سازی می‌باشد که در رابطه (۳-۵) بیان شده است [13].

$$V_{act} = \frac{R T_{Cell}}{\alpha n_e F} \ln \left(\frac{j}{j_0} \right) \quad (3-5)$$

در رابطه (۳-۵) α ضریب انتقال بار الکتريکی، j چگالی جریان کاری و j_0 چگالی جریان تبدالی می‌باشند.

¹ Nernst

جریان خروجی از هر سل و تلفات اهمی را می توان از رابطه (۳-۶) و (۳-۷) بدست آورد [40].

$$I_{cell} = jA_{cell} \quad (3-6)$$

$$V_{ohm} = j \frac{t_{ele}}{K_{ele}} \quad (3-7)$$

در روابط (۳-۶) A_{cell} مساحت فعال سل می باشد، و در رابطه (۳-۷) t_{ele} ضخامت الکترولیت و K_{ele} رسانایی مخصوص الکترولیت می باشد. تلفات غلظتی که عمدتاً ناشی از کم شدن غلظت مواد در سطح کاتالیست می باشد را می توان از رابطه (۳-۸) بدست آورد [40]:

$$V_{conc} = me^{(nj)} \quad (3-8)$$

n و m ثابت هستند، که از طریق تست تجربی بدست آمده اند. ولتاژ کلی PAFC را می توان با کم کردن سه افت ولتاژ از ولتاژ استاندارد طبق رابطه (۳-۹) بدست آورد [47].

$$V_{cell} = (V_{rev} - V_{act} - V_{conc} - V_{ohm}) \quad (3-9)$$

توان خروجی از پیل سوختی از رابطه (۳-۱۰) بدست می آید [30].

$$\dot{W}_{FC} = \left(\frac{N_{cell} V_{cell} I_{cell}}{1000} \right) \cdot \eta_{inverter} \quad (3-10)$$

N_{cell} تعداد سل های پیل سوختی می باشد. ماکزیمم توان از طریق واکنش الکتروشیمیایی در پیل سوختی طبق رابطه (۳-۱۱) بدست می آید [13].

$$-\dot{\Delta H} = \left(-\frac{j A_{cell} \Delta h}{n_e F} \right) / 1000 \quad (3-11)$$

حرارت تولید شده در پیل سوختی را می توان با کم کردن توان خروجی از ماکزیمم توان تولیدی (زمانی که هیچ تلفاتی نداشته باشیم) طبق رابطه (۳-۱۲) بدست آورد [47].

$$\dot{Q}_{FC} = -\dot{\Delta H} - \dot{W}_{FC} \quad (3-12)$$

از این رو دبی جرمی آب ورودی جهت خنک سازی پیل سوختی قابل بیان از رابطه (۳-۱۳) می باشد [48].

$$\dot{m}_{h,FC} = \frac{\dot{Q}_{FC}}{C_p \cdot (T_{Cell} - T_{in,FC})} \quad (3-13)$$

معادلات مربوط به دبی جرمی سوخت و هوا در پیل سوختی اسید فسفریک با استفاده از قانون فاراده از روابطه (۳-۱۴) تا (۳-۲۱) بدست می آید [40].

$$\dot{m}_{H_2,in} = N_{cell} \frac{I_{cell}}{n_e F} MW_{H_2} \times 10^{-3} \quad (3-14)$$

$$\dot{m}_{H_2,react} = U_f \dot{m}_{H_2,in} \quad (3-15)$$

$$\dot{m}_{H_2,out} = \dot{m}_{H_2,in} - \dot{m}_{H_2,react} \quad (3-16)$$

$$\dot{m}_{O_2,in} = \frac{1}{2} N_{cell} \frac{I_{cell}}{n_e F} MW_{O_2} \times 10^{-3} \quad (3-17)$$

$$\dot{m}_{O_2,react} = U_a \dot{m}_{O_2,in} \quad (3-18)$$

$$\dot{m}_{O_2,out} = \dot{m}_{O_2,in} - \dot{m}_{O_2,react} \quad (3-19)$$

$$\dot{m}_{Air,in} = N_{cell} \frac{I_{cell}}{n_e F} \frac{M_{Air}}{x_{O_2}} MW_{Air} \times 10^{-3} \quad (3-20)$$

$$\dot{m}_{Air,out} = \dot{m}_{Air,in} - \dot{m}_{O_2,react} \quad (3-21)$$

در روابط (۳-۱۴) تا (۳-۲۱) زیر نویس های in، react و out به ترتیب به معنی ورودی، واکنش داده شده (مصرفی) و خروجی می باشند، MW_n جرم مولکولی جزء n ام و x_{O_2} کسر مولی اکسیژن در هوا می باشد.

۳-۴ مشعل پس سوز^۱

مشعل احتراق پس سوز به منظور سوزاندن گازهای خروجی از PAFC استفاده می شود. افت فشار در مشعل پس سوز ناچیز می باشد. اختلاف آنتالپی تشکیل حرارت از رابطه (۳-۲۲) بدست می آید [49].

$$\Delta h_{form} = \frac{(\dot{m}_{H_2,out} + \dot{m}_{O_2,out})h_0 + \dot{m}_{H_2,out} \cdot LHV_{H_2}}{\dot{m}_{H_2,out}} \quad (3-22)$$

در این رابطه LHV_{H_2} ارزش حرارتی پایین هیدروژن می باشد، و h_0 آنتالپی هیدروژن در شرایط مرجع می باشد. آنتالپی مخلوط گاز خروجی از مشعل پس سوز از رابطه (۳-۲۳) بدست می آید [49].

$$h_{mixture} = \frac{\dot{m}_{Air,out} h_{Air,out} + \dot{m}_{H_2,out} \Delta h_{form}}{\dot{m}_{Air,out} + \dot{m}_{H_2,out}} \quad (3-23)$$

۳-۵ مدل سازی ریفورمر بخار

ریفورمر بخار متان، یکی از رایج ترین و مهم ترین فرایندهای تولید هیدروژن در دمای ۷۰۰-۹۰۰ درجه سانتیگراد در صنایع مختلف می باشد. واکنش ریفورمر بخار متان شامل سه واکنش برگشت پذیر می باشد، که دوتای آن گرماگیر و یکی گرماده می باشد [46]. در روابط (۳-۲۴) تا (۳-۲۷) واکنش های انجام شده در ریفورمر برای تامین هیدروژن مورد نیاز پیل سوختی نشان داده شده است. گاز متان با بخار آب طبق رابطه زیر که گرماگیر می باشد واکنش می دهند [20].



کربن مونواکسید تولیدی با بخار آب از طریق واکنش شیفت طبق رابطه (۳-۲۵) واکنش می دهد. در واکنش شیفت که گرماده ی باشد، کمی گرما تولید می شود [20].

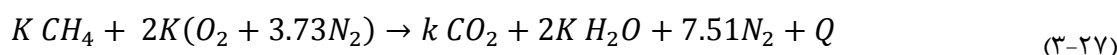
¹ After burner



واکنش کلی که در ریفرمر انجام می شود در رابطه (۳-۲۶) آورده شده است [20].



حرارت مورد نیاز برای انجام واکنش شیمیایی در ریفرمر بخار، از طریق احتراق متان در مشعل طبق رابطه (۳-۲۷) بیان می شود [20].



در رابطه (۳-۲۷) K میزان اضافی دبی جرمی گاز متان است که باید وارد مشعل شود که از رابطه (۳-۲۸) قابل محاسبه است [20].

$$K = \frac{\Delta H_{SR} + \Delta H_{SHIFT}}{\Delta H_{Combustion}} \quad (3-28)$$

با فرض نسبت مولی بخار به کربن (S/C) آب مورد نیاز ریفرمر تعیین می شود. این نسبت معمولاً ۲.۵ در نظر گرفته می شود [46].

بر اساس روابط (۳-۲۹) و (۳-۳۰) دبی جرمی و نرخ آنتالپی بخار ریفرمر قابل محاسبه می باشد [46].

$$\dot{m}_{H_2O,ref,in} = S/C \dot{n}_{CH_4,ref,in} M_{H_2O} \quad (3-29)$$

$$\dot{H}_{H_2O,ref} = \dot{m}_{H_2O,ref} C_{p,H_2O} (T_{ref,in} - T_0) \quad (3-30)$$

انرژی ورودی به ریفرمر ناشی از احتراق متان از رابطه (۳-۳۱) محاسبه می شود [46].

$$\dot{H}_{CH_4,ref} = \dot{m}_{CH_4} [LHV_{CH_4} + C_{p,CH_4} (T_{ref,in} - T_0)] \quad (3-31)$$

دبی جرمی گاز کربن دی اکسید، هیدروژن و بخار باقی مانده در واکنش ریفرمینگ و شیفت از روابط (۳-۳۲) تا (۳-۳۴) محاسبه می شود [46]:

$$\dot{m}_{H_2O,ref,out} = (S/C - 2) \dot{n}_{CH_4} M_{H_2O} \quad (3-32)$$

$$\dot{m}_{H_2,ref,out} = 4 \dot{n}_{CH_4} M_{H_2} \quad (3-33)$$

$$\dot{m}_{CO_2,ref,out} = \dot{n}_{CH_4} M_{CO_2} \quad (3-34)$$

آنتالپی جریان‌های خروجی از ریفرمر از طریق روابط (3-35) تا (3-37) زیر محاسبه می‌شود [46]:

$$\dot{H}_{H_2O,ref,out} = \dot{m}_{H_2O,ref,out} C_{p,H_2O} (T_{ref,out} - T_0) \quad (3-35)$$

$$\dot{m}_{CO_2,ref,out} = \dot{n}_{CH_4} M_{CO_2} \quad (3-36)$$

$$\dot{H}_{H_2,ref,out} = \dot{m}_{H_2,ref,out} [LHV_{H_2} + C_{p,CH_4} (T_{ref,out} - T_0)] \quad (3-37)$$

بازده ریفرمر از رابطه (3-38) محاسبه می‌شود [46].

$$\eta_{ref} = \frac{4}{K+1} \frac{\dot{m}_{H_2,ref,out} \cdot LHV_{H_2}}{\dot{m}_{CH_4,ref,in} \cdot LHV_{CH_4}} \quad (3-38)$$

۳-۶ مدل سازی سیکل ارگانیک رانکین

ORC مشابه سیکل رانکین بخار می باشد که شامل اجزاء اصلی سیکل رانکین بخار مانند؛ اواپراتور، وسایل انبساطی، کندانسور و پمپ می باشد با این تفاوت که به جای آب از ترکیب ارگانیک (یعنی هیدوکربن ها، مبرد ها، اترها و سیلوکسان^۱) به عنوان سیال کاری استفاده شده است [50].

بالانس انرژی مربوط به اواپراتور ORC از رابطه (۳-۳۹) بدست می آید.

$$\dot{m}_{hf}(h_{24} - h_{25}) = \dot{m}_{wf}(h_{21} - h_{20}) \quad (3-39)$$

بالانس نقطه پینچ در اواپراتور ORC نیز طبق رابطه (۳-۴۰) بدست می آید.

$$\dot{m}_{hf}(h_f - h_{24}) = \dot{m}_{wf}(h_{pp} - h_{20}) \quad (3-40)$$

با حل همزمان معادلات (۳-۳۹) و (۳-۴۰) آنتالپی آب داغ خروجی از اواپراتور و دبی جرمی سیال ORC بدست می آید. نرخ کار خالص تولیدی در ORC از رابطه (۳-۴۱) بدست می آید [41].

$$\dot{W}_{net,ORC} = (\dot{W}_{Tur} \cdot \eta_{EGen}) - \left(\frac{\dot{W}_{ORC Pump}}{\eta_{EGen}} \right) \quad (3-41)$$

نرخ تخریب انرژی، نرخ اتلاف انرژی حرارتی و نرخ بازگشت ناپذیری ORC از روابط (۳-۴۲) تا (۳-۴۴) بدست می آید [41].

$$\dot{Ex}_{D,ORC} = \sum_{all\ components} \dot{Ex}_k \quad (3-42)$$

$$\dot{Ex}_{L,ORC} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{Cond\ 1}} \right) \dot{Q}_{Cond\ 1} \quad (3-43)$$

$$\dot{I}_{ORC} = \dot{Ex}_{D,ORC} + \dot{Ex}_{L,ORC} \quad (3-44)$$

¹ siloxanes

اگر انرژی ورودی به ORC از رابطه (۳-۴۵) محاسبه می شود [41].

$$\dot{E}x_{in} = \dot{m}_{hf} [(h_{hf,in} - h_0) - T_0(s_{hf,in} - s_0)] \quad (3-45)$$

در رابطه بالا دما در مقیاس کلوین می باشد. بازده انرژی و بازده انرژی سیکل ارگانیک رانکین از

روابط (۳-۴۶) و (۳-۴۷) محاسبه می شود [41].

$$\eta_{ORC} = \frac{\dot{W}_{net,ORC}}{\dot{Q}_{in,ORC}} \quad (3-46)$$

$$\eta_{ex,ORC} = \frac{\dot{W}_{net,ORC}}{\dot{E}x_{in,ORC}} \quad (3-47)$$

۳-۷- انتخاب سیال کاری

انتخاب سیال کاری عامل مهمی در ORC می باشد، خواص ترمودینامیکی سیال های کاری، تاثیر زیادی بر روی بازده سیکل، عملکرد اقتصادی، اندازه تجهیزات سیکل، ثبات سیستم، عملکرد منبسط کننده ها، ایمنی و مسائل محیط زیستی می گذارد. سیالات ارگانیک اغلب ترکیبات سنگین با وزن مولکولی بالا و نقطه جوش و فشار پائین می باشند [51]. به منظور انتخاب سیال کاری برای ORC راندها، انرژی، انرژی و تخریب انرژی ORC با سیالات ارگانیک مختلف در جدول (۴-۸) بررسی شده و سیال تولوئن به عنوان سیالی با راندها انرژی بالاتر معرفی شده است. تولوئن مایعی صاف و نامحلول در آب و از هیدروکربن های آروماتیک است. جرم مولکولی آن 92.13 g mol^{-1} می باشد و چگالی آن 0.867 g L^{-1} می باشد. نقطه ذوب آن 187 K و دمای جوش آن نیز 383 K است.

۳-۸- مخزن ذخیره انرژی حرارتی

سیستم ذخیره انرژی حرارتی برای تامین ظرفیت گرمایش و سرمایشی معمولاً در کاربردهایی استفاده می شوند که تقاضا انرژی با منبع تامین انرژی تطابق ندارند و سیستم از لحاظ اقتصادی به صرفه نیست، ذخیره حرارت یک عنصر ضروری در برنامه های تبدیل انرژی در صنعت، ساختمان های تجاری و استفاده از انرژی خورشیدی می باشد [52]. مدل ناحیه اختلاط^۱ برای تخمین دمای های مخزن ذخیره انرژی حرارتی می باشد. علاوه بر این اتلاف حرارتی از مخزن به محیط اطراف به منظور انجام یک مدل سازی واقعی در نظر گرفته شده است. مخزن ذخیره انرژی حرارتی به سه ناحیه اختلاط جدا شده و از موازنه انرژی برای هر معادله در مدل سازی استفاده شده است. روابط (۳-۴۸) تا (۳-۵۰) - های موازنه انرژی در سه ناحیه از مخزن می باشند و باید در یک سیستم معادله برای هر لحظه زمانی حل شوند [45].

$$\frac{M_{St}}{3} C_P \frac{dT_{St,1}}{dt} = \dot{m}_h C_P (T_h - T_{St,1}) + \dot{m}_l C_P (T_{St,2} - T_{St,1}) - U_T A_{St} \left(\frac{T_{St,1} - T_0}{3} \right) \quad (3-48)$$

$$\frac{M_{St}}{3} C_P \frac{dT_{St,2}}{dt} = \dot{m}_h C_P (T_{St,1} - T_{St,2}) + \dot{m}_l C_P (T_{St,3} - T_{St,2}) - U_T A_{St} \left(\frac{T_{St,2} - T_0}{3} \right) \quad (3-49)$$

$$\frac{M_S}{3} C_P \frac{dT_{St,3}}{dt} = \dot{m}_h C_P (T_{St,2} - T_{St,3}) + \dot{m}_l C_P (T_l - T_{St,3}) - U_T A_{St} \left(\frac{T_{St,3} - T_0}{3} \right) \quad (3-50)$$

دمای مخلوط هر بخش (T_{Si}) از مخزن ذخیره با استفاده از انتگرال گیری بر حسب مشتقات زمانی از معادلات فوق بدست می آید. همچنین در روابط فوق T_h و T_l به ترتیب دمای سیال ورودی به مخزن از منبع حرارتی و دمای سیال ورودی به مخزن از بار یا مصرف کننده حرارت می باشد. A_{St} مساحت سطح مخزن و U_T ضریب اتلاف حرارت کلی از مخزن که شامل کل اتلاف حرارتی از طریق تابشی، جابجایی و رسانش می باشد. در رابطه (۳-۴۸) تا (۳-۵۰) C_P ظرفیت حرارتی سیال داخل مخزن و

¹ Mixing zone

M_{st} جرم سیال ذخیره شده در مخزن می باشد که از رابطه (۳-۵۱) بدست می آید [45].

$$M_{st} = \rho V_{st} \quad (3-51)$$

در رابطه (۳-۵۱) ρ چگالی سیال ذخیره شده در مخزن و V_{st} حجم مخزن ذخیره انرژی حرارتی می باشد. حرارت ذخیره شده در مخزن حرارتی طبق رابطه (۳-۵۲) از موازنه انرژی در مخزن حرارتی بدست می آید [53].

$$\sum Q_{in} - \left(\sum Q_{rec} + \sum Q_{loss} \right) = \sum \Delta U_c \quad (3-52)$$

بازده انرژی مخزن ذخیره انرژی حرارتی از رابطه (۳-۵۳) قابل محاسبه است [53].

$$\eta_{TES} = \frac{\sum Q_{rec}}{\sum Q_{in}} \quad (3-53)$$

به طور مشابه موازنه انرژی برای TES به صورت رابطه (۳-۵۴) بیان می شود [53].

$$\sum \dot{E}x_{in,TES} - \left(\sum \dot{E}x_{rec} + \sum \dot{E}x_{loss} \right) - \sum \dot{E}x_{D,TES} = \sum \dot{E}x_c \quad (3-54)$$

و بازده انرژی TES از رابطه (۳-۵۵) قابل محاسبه است [53].

$$\eta_{ex,TES} = \frac{\sum \dot{E}x_{rec}}{\sum \dot{E}x_{in}} \quad (3-55)$$

۳-۹- مدل سازی چیلر جذبی تک اثره لیتیوم بروماید

موازنه غلظت محلول در هر بخش قابل بیان با رابطه زیر است [42]:

$$\sum_{in} m_{ix} = \sum_{out} m_{ix} \quad (3-56)$$

در رابطه بالا x غلظت لیتیوم بروماید و زیرنویس های in و out به ترتیب ورودی و خروجی هستند ضریب عملکرد چیلر جذبی به صورت نرخ سرمایش اواپراتور به نرخ حرارت ورودی (حرارتی که از سیال کاری داغ به ژنراتور انتقال می یابد) و قابل محاسبه از طریق رابطه زیر است [42]:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{Eva\ 2}}{\dot{Q}_{Gen}} \quad (3-57)$$

نرخ تخریب انرژی اجزاء، نرخ اتلاف انرژی و نرخ بازگشت ناپذیری در چیلر جذبی از رابطه (۳-۵۸) تا (۳-۶۰) بدست می آید [54].

$$\dot{E}x_{D,chiller} = \sum_{all\ components} \dot{E}x_k \quad (3-58)$$

$$\dot{E}x_{l,chiller} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{Cond\ 2}}\right) Q_{Cond\ 2} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{Abs}}\right) Q_{Abs} \quad (3-59)$$

$$\dot{I}_{chiller} = \dot{E}x_{D,chiller} + \dot{E}x_{l,chiller} \quad (3-60)$$

بازده قانون دوم چیلر جذبی از رابطه (۳-۶۱) زیر بدست می آید [54].

$$\eta_{ex,chiller} = \frac{\left|1 - \frac{T_0}{T_{Eva\ 2}}\right| \dot{Q}_{Eva\ 2}}{\left(1 - \frac{T_0}{T_{h,f}}\right) \dot{Q}_{Gen}} \quad (3-61)$$

در رابطه بالا دما در مقیاس کلوین می باشد.

۳-۱۰- بازگشت ناپذیری کل سیستم

بازگشت ناپذیری کل سیستم شامل همه‌ی اجزاء استفاده شده در شماتیک‌های اول و دوم از طریق رابطه (۳-۶۲) محاسبه می‌شود.

$$\dot{I}_t = \sum \dot{I}_k \quad (3-62)$$

۳-۱۱- قانون اول و دوم ترمودینامیک برای کل سیستم

موازنه جرم، انرژی و اگزرژی برای حجم کنترل در شرایط حالت پایدار با فرض ناچیز بودن تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل، در روابط (۳-۶۳) تا (۳-۶۵) بیان شده است [55]:

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (3-63)$$

$$\sum_{in} \dot{m}h + \sum_{in} \dot{Q} + \sum_{in} \dot{W} = \sum_{out} \dot{m}h + \sum_{out} \dot{Q} + \sum_{out} \dot{W} \quad (3-64)$$

$$\sum_{in} \dot{E}X + \sum_{in} (1 - \frac{T_0}{T})\dot{Q} + \sum_{in} \dot{W} + \dot{I}_t = \sum_{out} \dot{E}X + \sum_{out} (1 - \frac{T_0}{T})\dot{Q} + \sum_{out} \dot{W} \quad (3-65)$$

در رابطه بالا $\dot{m}$ دبی جرمی، $\dot{Q}$ و $\dot{W}$ نرخ انتقال حرارت و توان می‌باشند، و همچنین h آنتالپی مخصوص برای سیال کاری است. در رابطه (۳-۶۵) $\sum \dot{E}X$ نرخ اگزرژی جریانی است، $\sum (1 - \frac{T_0}{T})\dot{Q}$ نرخ اگزرژی ناشی از انتقال حرارت، $\sum \dot{W}$ اگزرژی که توسط کار تبدیل می‌شود و برابر با کار می‌باشد و $\dot{I}_t$ بازگشت ناپذیری است، ترم $\dot{E}X$ با رابطه (۳-۶۶) تعریف می‌شود که حاصل جمع اگزرژی فیزیکی، شیمیایی می‌باشد [56].

$$\dot{E}X_i = \dot{m}_i(ex_{ph,i} + ex_{ch,i}) \quad (3-66)$$

عبارت کلی برای اگزرژی فیزیکی در رابطه (۳-۶۷) آمده است که در این رابطه دمای مرجع 25 °C و فشار مرجع ۱۰۱.۳ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است.

$$ex_{ph,i} = (h_i - h_0) - ((T_0 + 273.15)(S_i - S_0)) \quad (3-67)$$

که در رابطه (۳-۶۷) S برآنتروپی دلالت دارد و زیر نویس صفر به معنای شرایط محیطی است. برای محاسبه اگزرژی شیمیایی از رابطه (۳-۶۸) استفاده می شود [56].

$$ex_{ch,i} = \sum x_n ex_{ch,0}^n + (RT_0 \sum x_n \ln x_n) / MW_n \quad (3-68)$$

که x_n کسر جرمی جز n ام است و $ex_{ch,0}^n$ اگزرژی شیمیایی استاندارد جز n ام است که در حالت مرده اندازه گرفته شده است. مقادیر اگزرژی شیمیایی استاندارد مواد در جدول ۳-۲ آمده است.

جدول ۳-۲. اگزرژی های شیمیایی استاندارد مواد در حالت مرجع [56]

ماده	اگزرژی شیمیایی KJ/kg
اکسیژن	۱۲۴
نیتروژن	۲۵.۷۱۴
آب	۵۰.۵۵
هیدروژن	۱۱۸۰۵۰
متان	۵۲۲۸۱
کربن دی اکسید	۴۵۷.۷۲

بازده انرژی برای هر یک از اجزاء سیستم از رابطه (۳-۶۹) بدست می آید [44].

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_{out,k}}{\dot{E}x_{in,k}} \quad (3-69)$$

نرخ تخریب انرژی، نرخ اتلاف انرژی و نرخ بازگشت ناپذیری در سیستم به ترتیب از روابط (۳-۷۰) تا (۳-۷۲) بدست می آید [32].

$$\dot{E}x_{D,i} = \sum \dot{E}x_{in,i} - \sum \dot{E}x_{out,i} \quad (3-70)$$

$$\dot{E}x_{L,i} = \dot{E}x_i^Q \quad (3-71)$$

$$\dot{I}_i = \dot{E}x_{D,i} + \dot{E}x_{L,i} \quad (3-72)$$

جدول ۳-۳. روابط مربوط به موازنه جرم، انرژی و انرژی برای زیر سیستم PAFC در شماتیک اول [44]

اجزاء	موازنه جرم	موازنه انرژی	موازنه انرژی	بازده انرژی
HX1	$\dot{m}_2 = \dot{m}_8$ $\dot{m}_{10} = \dot{m}_8$	$\dot{Q}_{HX1} = \dot{m}_2(h_2 - h_1)$ $= \dot{m}_{10}(h_8 - h_{10})$	$\dot{E}x_{D,HX1} = (\dot{E}x_8 - \dot{E}x_{10})$ $-(\dot{E}x_2 - \dot{E}x_1)$	$\eta_{ex,HX1} = \frac{\dot{E}x_2 - \dot{E}x_1}{\dot{E}x_8 - \dot{E}x_{10}}$
HX2	$\dot{m}_5 = \dot{m}_4$ $\dot{m}_{11} = \dot{m}_9$	$\dot{Q}_{HX2} = \dot{m}_4(h_5 - h_4)$ $= \dot{m}_{10}(h_9 - h_{11})$	$\dot{E}x_{D,HX2} = (\dot{E}x_9 - \dot{E}x_{11})$ $-(\dot{E}x_5 - \dot{E}x_4)$	$\eta_{ex,HX2} = \frac{\dot{E}x_5 - \dot{E}x_4}{\dot{E}x_9 - \dot{E}x_{11}}$
HX3	$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{11}$ $\dot{m}_{14} = \dot{m}_{13}$	$\dot{Q}_{HX3} = \dot{m}_{12}(h_{11} - h_{12})$ $= \dot{m}_{14}(h_{14} - h_{13})$	$\dot{E}x_{D,HX3} = (\dot{E}x_{11} - \dot{E}x_{12})$ $-(\dot{E}x_{14} - \dot{E}x_{13})$	$\eta_{ex,HX3} = \frac{\dot{E}x_{14} - \dot{E}x_{13}}{\dot{E}x_{11} - \dot{E}x_{12}}$
PAFC	$\dot{m}_2 + \dot{m}_5$ $= \dot{m}_3 + \dot{m}_6$	$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_5 h_5 = \dot{m}_3 h_3$ $+ \dot{m}_6 h_6 + \dot{Q}_{h,FC} + \dot{W}_{FC}$	$\dot{E}x_{D,FC} = (\dot{E}x_2 + \dot{E}x_5)$ $-(\dot{E}x_3 + \dot{E}x_6 + \dot{E}x_{FC}^W)$	$\eta_{ex,FC} = \frac{\dot{W}_{FC}}{\dot{m}_{H_2,in} \dot{E}x_{ch,0}^{H_2}}$
Afetr B	$\dot{m}_7$ $= \dot{m}_3 + \dot{m}_6$	$\dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_6 h_6$ $= \dot{m}_7 h_7 + \dot{Q}_{loss,AB}$ $\dot{Q}_{loss,AB} = (\dot{m}_{H_2,3} \cdot LHV_{H_2}) \cdot (1 - \eta_{AB})$	$\dot{E}x_{D,AB} = (\dot{E}x_3 + \dot{E}x_6) - \dot{E}x_7$	$\eta_{exAB} = \frac{\dot{E}x_7}{\dot{E}x_3 + \dot{E}x_6}$

جدول ۳-۴. روابط مربوط به موازنه جرم، انرژی و اگزرژی تجهیزات ORC در شماتیک اول [55]

اجزاء	موازنه جرم	موازنه انرژی	موازنه اگزرژی	بازده اگزرژی
ORC Pump	$\dot{m}_{20} = \dot{m}_{21}$	$\dot{W}_{Pump} = \dot{m}_{wf}(h_{21} - h_{20})$	$\dot{E}_{x_{D,pump}} = \dot{E}x_{20} - \dot{E}x_{21} + \dot{W}_{pump}$	$\eta_{ex,Pump} = \frac{\dot{W}_{pump} - \dot{E}x_{D,pump}}{\dot{W}_{pump}}$
Eva 1	$\dot{m}_{18} = \dot{m}_{21}$ $\dot{m}_{17} = \dot{m}_{16}$	$\dot{Q}_{Eva\ 1} = \dot{m}_{16}(h_{16} - h_{17})$ $= \dot{m}_{18}(h_{18} - h_{21})$	$\dot{E}_{x_{D,Eva\ 1}} = \dot{E}x_{16} + \dot{E}x_{21}$ $- \dot{E}x_{17} - \dot{E}x_{18}$	$\eta_{ex,Eva\ 1} = \frac{\dot{E}x_{18} - \dot{E}x_{21}}{\dot{E}x_{16} - \dot{E}x_{17}}$
Tur	$\dot{m}_{19} = \dot{m}_{18}$	$\dot{W}_{Tur} = \dot{m}_{19}(h_{18} - h_{19s}).\eta_T$ $= \dot{m}_{19}(h_{18} - h_{19})$	$\dot{E}_{x_{D,Tur}} = \dot{E}x_{18} - \dot{E}x_{19} - \dot{W}_{Tur}$	$\eta_{ex,Tur} = \frac{\dot{W}_{Tur}}{\dot{W}_{Tur} + \dot{E}x_{D,Tur}}$
Cond 1	$\dot{m}_{20} = \dot{m}_{19}$ $\dot{m}_{23} = \dot{m}_{22}$	$\dot{Q}_{Cond\ 1} = \dot{m}_{20}(h_{19} - h_{20})$ $= \dot{m}_{23}(h_{23} - h_{22})$	$\dot{E}_{x_{D,Cond\ 1}} = \dot{E}x_{22} + \dot{E}x_{19}$ $- \dot{E}x_{23} - \dot{E}x_{20}$	$\eta_{ex,Cond\ 1} = \frac{\dot{E}x_{23} - \dot{E}x_{22}}{\dot{E}x_{19} - \dot{E}x_{20}}$

جدول ۵-۳. روابط مربوط به موازنه جرم، انرژی و انگرژی تجهیزات ACH در شماتیک اول [55]

اجزاء	موازنه جرم	موازنه انرژی	موازنه انگرژی	بازده انگرژی
Gen	$\dot{m}_{28} = \dot{m}_{29} + \dot{m}_{32}$ $\dot{m}_{25} = \dot{m}_{24}$	$\dot{Q}_{Gen} = \dot{m}_{29}h_{29} + \dot{m}_{32}h_{32}$ $-\dot{m}_{28}h_{28}$ $= \dot{m}_{24}(h_{24} - h_{25})$	$\dot{E}x_{D,Gen} = \dot{E}x_{28} - \dot{E}x_{29}$ $-\dot{E}x_{32} + \dot{E}x_{24} - \dot{E}x_{25}$	$\eta_{ex,Gen} = \frac{\dot{E}x_{32} + \dot{E}x_{29} - \dot{E}x_{28}}{\dot{E}x_{24} - \dot{E}x_{25}}$
Cond 2	$\dot{m}_{33} = \dot{m}_{32}$ $\dot{m}_{38} = \dot{m}_{37}$	$\dot{Q}_{Cond\ 2} = \dot{m}_{32}(h_{32} - h_{33})$ $= \dot{m}_{38}(h_{37} - h_{38})$	$\dot{E}x_{D,Cond\ 2} = \dot{E}x_{32} - \dot{E}x_{33}$ $+(\dot{E}x_{38} - \dot{E}x_{37})$	$\eta_{ex,Cond\ 2} = \frac{\dot{E}x_{37} - \dot{E}x_{38}}{\dot{E}x_{32} - \dot{E}x_{33}}$
Eva 2	$\dot{m}_{35} = \dot{m}_{34}$ $\dot{m}_{41} = \dot{m}_{40}$	$\dot{Q}_{Eva\ 2} = \dot{m}_{34}(h_{35} - h_{34})$ $= \dot{m}_{40}(h_{40} - h_{41})$	$\dot{E}x_{D,Eva\ 2} = \dot{E}x_{34} - \dot{E}x_{35}$ $+(\dot{E}x_{40} - \dot{E}x_{41})$	$\eta_{ex,Eva\ 2} = \frac{\dot{E}x_{40} - \dot{E}x_{41}}{\dot{E}x_{34} - \dot{E}x_{35}}$
Abs	$\dot{m}_{31} + \dot{m}_{35} = \dot{m}_{26}$ $\dot{m}_{36} = \dot{m}_{37}$	$\dot{Q}_{Abs} = \dot{m}_{26}h_{26} - \dot{m}_{35}h_{35}$ $-\dot{m}_{31}h_{31}$ $= \dot{m}_{37}(h_{37} - h_{36})$	$\dot{E}x_{D,Abs} = \dot{E}x_{31} + \dot{E}x_{35}$ $-\dot{E}x_{26} + (\dot{E}x_{36} - \dot{E}x_{37})$	$\eta_{ex,Abs} = \frac{\dot{E}x_{36} - \dot{E}x_{37}}{\dot{E}x_{26} - \dot{E}x_{31} - \dot{E}x_{35}}$
SHX	$\dot{m}_{27} + \dot{m}_{29}$ $= \dot{m}_{28} + \dot{m}_{30}$	$\dot{Q}_{SHX} = \dot{m}_{26}(h_{28} - h_{27})$ $= \dot{m}_{29}(h_{29} - h_{30})$	$\dot{E}x_{D,SHX} = (\dot{E}x_{29} - \dot{E}x_{30})$ $+(\dot{E}x_{28} - \dot{E}x_{27})$	$\eta_{ex,SHX} = \frac{\dot{E}x_{28} - \dot{E}x_{27}}{\dot{E}x_{29} - \dot{E}x_{330}}$
Solution Pump	$\dot{m}_{27} = \dot{m}_{26}$	$\dot{W}_{SP} = \dot{m}_{26}(h_{27} - h_{26})$	$\dot{E}x_{D,Sp} = \dot{E}x_{26} - \dot{E}x_{27}$ $+ \dot{W}_{SP}$	$\eta_{ex,SP} = \frac{\dot{W}_{sp} - \dot{E}x_{D,sp}}{\dot{W}_{sp}}$
TV 1	$\dot{m}_{31} = \dot{m}_{30}$	$\dot{m}_{31}h_{31} = \dot{m}_{30}h_{30}$	$\dot{E}x_{D,Stv} = \dot{E}x_{30} - \dot{E}x_{31}$	$\eta_{ex,TV1} = \frac{\dot{E}x_{31}}{\dot{E}x_{30}}$
TV 2	$\dot{m}_{34} = \dot{m}_{33}$	$\dot{m}_{34}h_{34} = \dot{m}_{33}h_{33}$	$\dot{E}x_{D,ref tv} = \dot{E}x_{33} - \dot{E}x_{34}$	$\eta_{ex,TV2} = \frac{\dot{E}x_{34}}{\dot{E}x_{33}}$

جدول ۶-۳. روابط مربوط به موازنه جرم، انرژی و اگزرژی برای زیر سیستم PAFC در شماتیک دوم [44]

اجزا	موازنه جرم	موازنه انرژی	موازنه اگزرژی	بازده اگزرژی
HX1	$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{11}$ $\dot{m}_{20} = \dot{m}_{19}$	$\dot{Q}_{HX1} = \dot{m}_{11}(h_{11} - h_{12})$ $= \dot{m}_{19}(h_{20} - h_{19})$	$\dot{E}_{D,HX1} = (\dot{E}_{x11} - \dot{E}_{x12})$ $-(\dot{E}_{x20} - \dot{E}_{x19})$	$\eta_{ex,HX1} = \frac{\dot{E}_{x20} - \dot{E}_{x19}}{\dot{E}_{x11} - \dot{E}_{x12}}$
HX2	$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{14}$ $\dot{m}_{21} = \dot{m}_{20}$	$\dot{Q}_{HX2} = \dot{m}_{14}(h_{15} - h_{14})$ $= \dot{m}_{20}(h_{20} - h_{26})$	$\dot{E}_{D,HX2} = (\dot{E}_{x20} - \dot{E}_{x21})$ $-(\dot{E}_{x15} - \dot{E}_{x14})$	$\eta_{ex,HX2} = \frac{\dot{E}_{x15} - \dot{E}_{x14}}{\dot{E}_{x20} - \dot{E}_{x21}}$
HX3	$\dot{m}_{19} = \dot{m}_{18}$ $\dot{m}_{23} = \dot{m}_{22}$	$\dot{Q}_{HX3} = \dot{m}_{19}(h_{18} - h_{19})$ $= \dot{m}_{22}(h_{23} - h_{20})$	$\dot{E}_{D,HX3} = (\dot{E}_{x18} - \dot{E}_{x19})$ $-(\dot{E}_{x23} - \dot{E}_{x22})$	$\eta_{ex,HX3} = \frac{\dot{E}_{x23} - \dot{E}_{x22}}{\dot{E}_{x18} - \dot{E}_{x19}}$
HX6	$\dot{m}_{18} = \dot{m}_{17}$ $\dot{m}_{35} = \dot{m}_{34}$	$\dot{Q}_{HX6} = \dot{m}_{17}(h_{17} - h_{18})$ $= \dot{m}_{35}(h_{34} - h_{35})$	$\dot{E}_{D,HX6} = (\dot{E}_{x17} - \dot{E}_{x18})$ $-(\dot{E}_{x34} - \dot{E}_{x35})$	$\eta_{ex,HX6} = \frac{\dot{E}_{x35} - \dot{E}_{x34}}{\dot{E}_{x17} - \dot{E}_{x18}}$
HX7	$\dot{m}_{26} = \dot{m}_{24}$ $\dot{m}_{33} = \dot{m}_{32}$	$\dot{Q}_{HX7} = \dot{m}_{33}(h_{33} - h_{32})$ $= \dot{m}_{26}(h_{24} - h_{26})$	$\dot{E}_{D,HX7} = (\dot{E}_{x26} - \dot{E}_{x24})$ $-(\dot{E}_{x33} - \dot{E}_{x32})$	$\eta_{ex,HX7} = \frac{\dot{E}_{x33} - \dot{E}_{x32}}{\dot{E}_{x26} - \dot{E}_{x24}}$
PAF C	$\dot{m}_{12} + \dot{m}_{15} = \dot{m}_{13} + \dot{m}_{16}$	$\dot{m}_{12}h_{12} + \dot{m}_{15}h_{15} = \dot{m}_{13}h_{13} + \dot{m}_{16}h_{16}$ $+ \dot{Q}_{h,FC} + \dot{W}_{FC}$	$\dot{E}_{D,FC} = (\dot{E}_{x12} + \dot{E}_{x15})$ $-(\dot{E}_{x13} + \dot{E}_{x16}) + \dot{E}_{x_{FC}}^W$	$\eta_{ex,FC} = \frac{\dot{W}_{FC}}{\dot{m}_{CH_4,in} ex_{ch,0}^{CH_4}}$
After B	$\dot{m}_{17} = \dot{m}_{13} + \dot{m}_{16}$	$\dot{m}_{13}h_{13} + \dot{m}_{16}h_{16} = \dot{m}_{17}h_{17} + \dot{Q}_{loss,AB}$ $\dot{Q}_{loss,AB} = (\dot{m}_{H_2,13} \cdot LHV_{H_2}) \cdot (1 - \eta_{AB})$	$\dot{E}_{D,AB} = (\dot{E}_{x13} + \dot{E}_{x16}) - \dot{E}_{x17}$	$\eta_{ex,AB} = \frac{\dot{E}_{x17}}{\dot{E}_{x13} + \dot{E}_{x16}}$

جدول ۳-۷. روابط مربوط به موازنه جرم، انرژی و اگزرژی برای زیر سیستم ریفرمر بخار [57]

اجزاء	موازنه جرم	موازنه انرژی	موازنه اگزرژی	بازده اگزرژی
HX4	$\dot{m}_7 = \dot{m}_6$ $\dot{m}_8 = \dot{m}_9$	$\dot{Q}_{HX4} = \dot{m}_7(h_7 - h_6)$ $= \dot{m}_8(h_8 - h_9)$	$\dot{E}_{D,HX4} = (\dot{E}x_8 - \dot{E}x_9)$ $-(\dot{E}x_7 - \dot{E}x_6)$	$\eta_{ex,HX4} = \frac{\dot{E}x_7 - \dot{E}x_6}{\dot{E}x_8 - \dot{E}x_9}$
HX5	$\dot{m}_2 = \dot{m}_1$ $\dot{m}_{10} = \dot{m}_9$	$\dot{Q}_{HX5} = \dot{m}_1(h_2 - h_1)$ $= \dot{m}_9(h_9 - h_{10})$	$\dot{E}_{D,HX5} = (\dot{E}x_9 - \dot{E}x_{10})$ $-(\dot{E}x_2 - \dot{E}x_1)$	$\eta_{ex,HX5} = \frac{\dot{E}x_2 - \dot{E}x_1}{\dot{E}x_9 - \dot{E}x_{10}}$
Steam Reformer	$\dot{m}_2 + \dot{m}_7$ $= \dot{m}_8 + \dot{m}_{11}$	$\dot{Q}_{SR} = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_7 h_7$ $= \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_{11} h_{11}$	$\dot{E}_{D,SR} = (\dot{E}x_7 + \dot{E}x_2)$ $-(\dot{E}x_{11} + \dot{E}x_8)$	$\eta_{ex,SR} = \frac{\dot{E}x_{11} + \dot{E}x_8}{\dot{E}x_7 + \dot{E}x_2}$
Burner	$\dot{m}_5 =$ $\dot{m}_3 + \dot{m}_4$	$\dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_4 h_4$ $= \dot{m}_5 h_5 + \dot{Q}_B$	$\dot{E}_{D,B} = (\dot{E}x_3 + \dot{E}x_4)$ $-\dot{E}x_5$	$\eta_{ex,B} = \frac{\dot{E}x_5}{\dot{E}x_3 + \dot{E}x_4}$

جدول ۸-۳. روابط مربوط به موازنه جرم، انرژی و انگرژی تجهیزات ORC در شماتیک دوم [55]

اجزاء	موازنه جرم	موازنه انرژی	موازنه انگرژی	بازده انگرژی
ORC Pump	$\dot{m}_{29} = \dot{m}_{30}$	$\dot{W}_{OP} = \dot{m}_{30}(h_{30} - h_{29})$	$\dot{E}_{D,OP} = \dot{E}_{x_{29}} - \dot{E}_{x_{30}} + \dot{W}_{OP}$	$\eta_{ex,OP} = \frac{\dot{W}_{OP} - \dot{E}_{x_{D,pp}}}{\dot{W}_{OP}}$
Eva 1	$\dot{m}_{27} = \dot{m}_{30}$ $\dot{m}_{25} = \dot{m}_{24}$	$\dot{Q}_{Eva\ 1} = \dot{m}_{25}(\dot{h}_{25} - \dot{h}_{26})$ $= \dot{m}_{27}(h_{27} - h_{30})$	$\dot{E}_{D,Eva\ 1} = \dot{E}_{x_{25}} + \dot{E}_{x_{30}}$ $- \dot{E}_{x_{26}} - \dot{E}_{x_{27}}$	$\eta_{ex,Eva\ 1} = \frac{\dot{E}_{x_{27}} - \dot{E}_{x_{30}}}{\dot{E}_{x_{25}} - \dot{E}_{x_{26}}}$
Tur	$\dot{m}_{27} = \dot{m}_{28}$	$\dot{W}_{Tur} = \dot{m}_{27}(h_{27} - h_{28s}) \cdot \eta_T$ $= \dot{m}_{27}(h_{27} - h_{28})$	$\dot{E}_{D,Tur} = \dot{E}_{x_{27}} - \dot{E}_{x_{28}} - \dot{W}_T$	$\eta_{ex,Tur} = \frac{\dot{W}_T}{\dot{W}_T + \dot{E}_{x_{D,T}}}$
Cond 1	$\dot{m}_{29} = \dot{m}_{28}$ $\dot{m}_{32} = \dot{m}_{31}$	$\dot{Q}_{Cond\ 1} = \dot{m}_{28}(h_{28} - h_{29})$ $= \dot{m}_{32}(h_{32} - h_{31})$	$\dot{E}_{D,Cond\ 1} = \dot{E}_{x_{28}} + \dot{E}_{x_{31}}$ $- \dot{E}_{x_{29}} - \dot{E}_{x_{32}}$	$\eta_{ex,Cond\ 1} = \frac{\dot{E}_{x_{32}} - \dot{E}_{x_{31}}}{\dot{E}_{x_{28}} - \dot{E}_{x_{29}}}$

جدول ۹-۳. روابط مربوط به موازنه جرم، انرژی و اگزرژی تجهیزات ACH در شماتیک دوم [55]

اجزاء	موازنه جرم	موازنه انرژی	موازنه اگزرژی	بازده اگزرژی
Gen	$\dot{m}_{38} = \dot{m}_{39} + \dot{m}_{42}$ $\dot{m}_{35} = \dot{m}_{34}$	$\dot{Q}_{Gen} = \dot{m}_{39}h_{39} + \dot{m}_{42}h_{42}$ $-\dot{m}_{38}h_{38}$ $=\dot{m}_{34}(h_{34} - h_{35})$	$\dot{E}x_{D,Gen} = \dot{E}x_{38} - \dot{E}x_{39}$ $-\dot{E}x_{42} + (\dot{E}x_{34} - \dot{E}x_{35})$	$\eta_{ex,Gen} = \frac{\dot{E}x_{42} + \dot{E}x_{39} - \dot{E}x_{38}}{\dot{E}x_{34} - \dot{E}x_{35}}$
Cond 2	$\dot{m}_{42} = \dot{m}_{43}$ $\dot{m}_{48} = \dot{m}_{49}$	$\dot{Q}_{Cond\ 2} = \dot{m}_{42}(h_{42} - h_{43})$ $=\dot{m}_{48}(h_{49} - h_{48})$	$\dot{E}x_{D,Cond\ 2} = \dot{E}x_{42} - \dot{E}x_{43}$ $+ (\dot{E}x_{48} - \dot{E}x_{49})$	$\eta_{ex,Cond\ 2} = \frac{\dot{E}x_{49} - \dot{E}x_{48}}{\dot{E}x_{42} - \dot{E}x_{43}}$
Eva 2	$\dot{m}_{45} = \dot{m}_{44}$ $\dot{m}_{51} = \dot{m}_{52}$	$\dot{Q}_{Eva\ 2} = \dot{m}_{44}(h_{45} - h_{44})$ $=\dot{m}_{51}(h_{51} - h_{52})$	$\dot{E}x_{D,Eva\ 2} = (\dot{E}x_{44} - \dot{E}x_{45})$ $+ (\dot{E}x_{51} - \dot{E}x_{52})$	$\eta_{ex,Eva} = \frac{\dot{E}x_{52} - \dot{E}x_{51}}{\dot{E}x_{44} - \dot{E}x_{45}}$
Abs	$\dot{m}_{41} + \dot{m}_{45} = \dot{m}_{36}$ $\dot{m}_{46} = \dot{m}_{47}$	$\dot{Q}_{Abs} = \dot{m}_{36}h_{36} - \dot{m}_{45}h_{45}$ $-\dot{m}_{41}h_{41}$ $=\dot{m}_{46}(h_{47} - h_{46})$	$\dot{E}x_{D,Abs} = \dot{E}x_{41} + \dot{E}x_{45}$ $-\dot{E}x_{36} + (\dot{E}x_{46} - \dot{E}x_{47})$	$\eta_{II,Abs} = \frac{\dot{E}x_{46} - \dot{E}x_{47}}{\dot{E}x_{36} - \dot{E}x_{41} - \dot{E}x_{45}}$
SHX	$\dot{m}_{37} + \dot{m}_{39}$ $= \dot{m}_{38} + \dot{m}_{40}$	$\dot{Q}_{SHX} = \dot{m}_{36}(h_{38} - h_{37})$ $=\dot{m}_{39}(h_{39} - h_{40})$	$\dot{E}x_{D,SHX} = (\dot{E}x_{39} - \dot{E}x_{40})$ $+ (\dot{E}x_{37} - \dot{E}x_{38})$	$\eta_{ex,SHX} = \frac{\dot{E}x_{38} - \dot{E}x_{37}}{\dot{E}x_{39} - \dot{E}x_{40}}$
SP	$\dot{m}_{37} = \dot{m}_{36}$	$\dot{W}_{SP} = \dot{m}_{36}(h_{37} - h_{36})$	$\dot{E}x_{D,Sp} = \dot{m}_{36}\psi_{36} - \dot{m}_{37}\psi_{37}$ $+ \dot{W}_{SP}$	$\eta_{ex,SP} = \frac{\dot{W}_{sp} - \dot{E}x_{D,sp}}{\dot{W}_{sp}}$
TV1	$\dot{m}_{41} = \dot{m}_{40}$	$\dot{m}_{40}h_{40} = \dot{m}_{41}h_{41}$	$\dot{E}x_{D,TV1} = \dot{E}x_{40} - \dot{E}x_{41}$	$\eta_{ex,TV\ 1} = \frac{\dot{E}x_{41}}{\dot{E}x_{40}}$
TV2	$\dot{m}_{44} = \dot{m}_{43}$	$\dot{m}_{44}h_{44} = \dot{m}_{43}h_{43}$	$\dot{E}x_{D,TV2} = \dot{E}x_{43} - \dot{E}x_{44}$	$\eta_{ex,TV\ 2} = \frac{\dot{E}x_{44}}{\dot{E}x_{43}}$

۳-۱۲-راندمان

۳-۱۲-۱-راندمان انرژی شماتیک اول سیستم تولید همزمان

راندمان انرژی قابل تعریف به صورت نسبت انرژی مفید خروجی به کل انرژی ورودی به سیستم تعریف می شود [58]. بنابراین بازده انرژی برای حالت پیل سوختی به تنهایی، تولید ترکیبی برق، حرارتی، تولید همزمان دوگانه برق-گرمایش، تولید همزمان برق-سرمايش و تولید همزمان سه گانه از طریق روابط (۳-۷۳) تا (۳-۸۱) بیان می شود.

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{H_2, in} \cdot LHV_{H_2} \quad (3-73)$$

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{FC} + \dot{W}_{net. ORC} \quad (3-74)$$

$$\dot{Q}_{th} = \dot{Q}_{Heating} + \dot{Q}_{DHW} + \dot{Q}_{Cooling} \quad (3-75)$$

$$\eta_{FC} = \frac{\dot{W}_{FC}}{\dot{Q}_{in}} \cdot 100 \quad (3-76)$$

$$\eta_{ELE} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} \cdot 100 \quad (3-77)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{th}}{\dot{Q}_{in}} \cdot 100 \quad (3-78)$$

$$\eta_{CHP} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{Heating} + \dot{Q}_{DHW}}{\dot{Q}_{in}} \cdot 100 \quad (3-79)$$

$$\eta_{CCP} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{Cooling}}{\dot{Q}_{in}} \cdot 100 \quad (3-80)$$

$$\eta_{CCHP} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{th}}{\dot{Q}_{in}} \cdot 100 \quad (3-81)$$

در رابطه (۳-۷۳) $\dot{Q}_{in}$ انرژی ورودی به سیستم و در رابطه (۳-۷۴) $\dot{W}_{net}$ نرخ کار خالص تولید توسط پیل سوختی اسید فسفریک و سیکل ارگانیک رانکین می باشد.

۳-۱۲-۲- راندمان اگزرژی شماتیک اول سیستم تولید همزمان

بازده اگزرژی قابل تعریف به صورت نسبت ماکزیمم توان خروجی به اگزرژی ورودی به سیستم می باشد [58]، که در این مطالعه برای حالت پیل سوختی به تنهایی، تولید برق، حرارتی، تولید همزمان دوگانه برق-گرمایش، تولید همزمان برق-سرمایش و تولید همزمان سه گانه از طریق روابط (۳-۸۲) تا (۳-۸۸) بیان می شود. در این روابط دما بر حسب کلین می باشد در رابطه (۳-۸۲) $\dot{E}x_{in}$ اگزرژی ورودی به سیستم می باشد.

$$\dot{E}x_{in} = \dot{m}_{H_2, in} \cdot ex_{Ch}^{H_2} \quad (3-82)$$

$$\eta_{ex, FC} = \frac{\dot{W}_{FC}}{\dot{E}x_{in}} \cdot 100 \quad (3-83)$$

$$\eta_{ex, ELE} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{E}x_{in}} \cdot 100 \quad (3-84)$$

$$\eta_{ex, th} = \frac{\left(1 - \frac{T_0}{T_{Heating}}\right) \dot{Q}_{Heating} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{DHW}}\right) \dot{Q}_{DHW} + \left|1 - \frac{T_0}{T_e}\right| \dot{Q}_{Cooling}}{\dot{E}x_{in}} \cdot 100 \quad (3-85)$$

$$\eta_{ex, CHP} = \frac{\dot{W}_{net} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{Heating}}\right) \dot{Q}_{Heating} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{DHW}}\right) \dot{Q}_{DHW}}{\dot{E}x_{in}} \cdot 100 \quad (3-86)$$

$$\eta_{ex, CCP} = \frac{\dot{W}_{net} + \left|1 - \frac{T_0}{T_{Eva 2}}\right| \dot{Q}_{Cooling}}{\dot{E}x_{in}} \cdot 100 \quad (3-87)$$

$$\eta_{ex, CCHP} = \frac{\dot{W}_{net} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{Heating}}\right) \dot{Q}_{Heating} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{DHW}}\right) \dot{Q}_{DHW} + \left|1 - \frac{T_0}{T_{Eva 2}}\right| \dot{Q}_{Cooling}}{\dot{E}x_{in}} \cdot 100 \quad (3-88)$$

۳-۱۲-۳- راندمان انرژی شماتیک دوم سیستم تولید همزمان

راندمان انرژی شماتیک دوم نیز همانند شماتیک اول تعریف می‌شود، تنها تفاوت آن در نوع سوخت ورودی به سیستم می‌باشد. از آنجایی که سوخت سیستم تولید همزمان در شماتیک دوم متان می‌باشد، دبی جرمی سوخت ورودی شامل دبی جرمی متان ورودی به ریفمر بخار و مشعل مربوط به آن می‌باشد که در رابطه (۳-۸۹) بیان شده است، بازده های حالت‌های مختلف کارکردی سیستم تولید همزمان در روابط (۳-۸۹) تا (۳-۹۵) بیان شده است.

$$\dot{m}_{CH_4,in} = \dot{m}_{CH_4,26} + \dot{m}_{CH_4,27} \quad (3-89)$$

$$\eta_{FC} = \frac{\dot{W}_{FC}}{\dot{m}_{CH_4,in} \cdot LHV_{CH_4}} \cdot 100 \quad (3-90)$$

$$\eta_{ELE} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_{CH_4,in} \cdot LHV_{CH_4}} \cdot 100 \quad (3-91)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{th}}{\dot{m}_{CH_4,in} \cdot LHV_{CH_4}} \cdot 100 \quad (3-92)$$

$$\eta_{CHP} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{Heating} + \dot{Q}_{DHW}}{\dot{m}_{CH_4,in} \cdot LHV_{CH_4}} \cdot 100 \quad (3-93)$$

$$\eta_{CCP} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{Cooling}}{\dot{m}_{CH_4,in} \cdot LHV_{CH_4}} \cdot 100 \quad (3-94)$$

$$\eta_{CCHP} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{th}}{\dot{m}_{CH_4,in} \cdot LHV_{CH_4}} \cdot 100 \quad (3-95)$$

۳-۱۲-۴- راندمان اگزرژی شماتیک دوم سیستم تولید همزمان

راندمان اگزرژی شماتیک دوم نیز مانند شماتیک اول تعریف می‌شود، که در این مطالعه برای پنج حالت به ترتیب پیل سوختی به تنهایی، تولید برق، حرارتی، تولید همزمان دوگانه برق-گرمایش، تولید همزمان برق-سرمایش و تولید همزمان سه گانه از طریق روابط (۳-۹۶) تا (۳-۱۰۲) بیان می‌شود. در روابط این دما بر حسب کلین می‌باشد. اگزرژی سوخت ورودی از رابطه (۳-۹۶) محاسبه می‌شود.

$$\dot{E}X_{Fuel} = \dot{m}_{CH_4, in} ex_{ch.0}^{CH_4} \quad (3-96)$$

$$\eta_{ex, FC} = \frac{\dot{W}_{FC}}{\dot{E}X_{Fuel}} \cdot 100 \quad (3-97)$$

$$\eta_{ex, ELE} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{E}X_{Fuel}} \cdot 100 \quad (3-98)$$

$$\eta_{ex, th} = \frac{\left(1 - \frac{T_0}{T_{Heating}}\right) \dot{Q}_{Heating} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{DHW}}\right) \dot{Q}_{DHW} + \left|1 - \frac{T_0}{T_{Eva 2}}\right| \dot{Q}_{Cooling}}{\dot{E}X_{Fuel}} \cdot 100 \quad (3-99)$$

$$\eta_{ex, CHP} = \frac{\dot{W}_{net} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{Heating}}\right) \dot{Q}_{Heating} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{DHW}}\right) \dot{Q}_{DHW}}{\dot{E}X_{Fuel}} \cdot 100 \quad (3-100)$$

$$\eta_{ex, CCP} = \frac{\dot{W}_{net} + \left|1 - \frac{T_0}{T_{Eva 2}}\right| \dot{Q}_{Cooling}}{\dot{E}X_{Fuel}} \cdot 100 \quad (3-101)$$

$$\eta_{ex, CCHP} = \frac{\dot{W}_{net} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{Heating}}\right) \dot{Q}_{Heating} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{DHW}}\right) \dot{Q}_{DHW} + \left|1 - \frac{T_0}{T_{Eva 2}}\right| \dot{Q}_{Cooling}}{\dot{E}X_{Fuel}} \cdot 100 \quad (3-102)$$

فصل چهارم نتایج و بحث

۴-۱ مقدمه

در فصل سوم اکثر روابط و فرمول‌های مهم استفاده شده و توضیحاتی در مورد فرمول‌ها و روابط گفته شد. و در این بخش نتایج حاصل از تحلیل انرژی و انرژی سیستم تولید همزمان پیشنهادی با کمک نرم افزار حلگر معادلات مهندسی^۱ که به اختصار (EES) هم نامیده می‌شود، ارائه شده است. نرم افزار EES برنامه ای برای حل معادلات مهندسی غیرخطی جبری و معادلات دیفرانسیل و انتگرالی می‌باشد، از کاربردهای این نرم افزار می‌توان به بهینه سازی نتایج، تحلیل عدم قطعیت، رگرسیون‌های خطی و غیرخطی، رسم نمودارهای مختلف و ... اشاره نمود. مزیت دیگر این نرم افزار که باعث معروف شدن آن به خصوص نزد مهندسان مکانیک شده است توابع ریاضی و ترمودینامیکی بسیار زیاد برای محاسبه خواص سیالات مختلف می‌باشد که کمک بسیار زیادی به حل معادلات سیالات و انتقال حرارت می‌نماید. در این پایان نامه از نسخه ۱۰ حرفه‌ای نرم افزار EES که مربوط به سال ۲۰۱۶ می‌باشد استفاده شده است که نیازی به نصب ندارد و از این رو می‌توان از آن در بسیاری از کامپیوترها و لپ تاپ‌ها که با محدودیت نصب همراه می‌باشد استفاده نمود. نتایج با کمک نرم افزار EES بدست آمده است که شامل خواص و انرژی نقاط مختلف سیکل به صورت یک جدول برای شماتیک های در نظر گرفته شده آورده شده است، تا دیدی کلی و جامع از شرایط ترمودینامیکی نقاط مختلف سیستم بدست آید. در قسمت نتایج با ثابت فرض نمودن تمام پارامترها به جز یک مورد، اثر تغییر آن پارامتر روی عملکرد سیستم از دیدگاه انرژی و انرژی بررسی شده است.

۴-۲ اعتبار سنجی نتایج

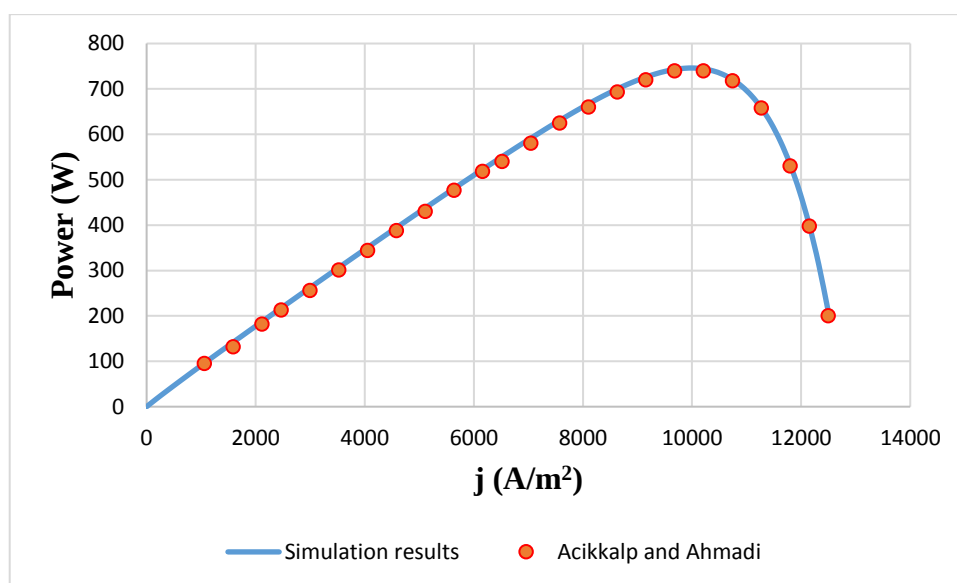
به منظور اطمینان پیدا کردن از نتایج مدل پیل سوختی اسید فسفیک، سیکل ارگانیک رانکین و چیلر

¹ Engineering Equation Solver

جذبی تک اثره لیتیوم بروماید بر اساس نتایج سایر مقالات اعتبار سنجی شده است. برای این کار ابتدا هر کدام از بخش‌های سیستم تولید همزمان به صورت جدا مدل سازی شده و بر اساس نتایج مقالات معتبر درستی مدل سازی هر کدام از این بخش‌ها نشان داده شده است.

۴-۲-۱ اعتبار سنجی مدل پیل سوختی اسید فسفریک

جهت اطمینان پیدا کردن از صحت مدل سازی پیل سوختی اسید فسفریک، نمودار توان خروجی در چگالی جریان‌های مختلف، برای یک سل از پیل سوختی در دمای ۱۸۰ درجه سانتیگراد و فشار کاری ۱ اتمسفر با نتایج عددی ارائه شده در مرجع [4] اعتبار سنجی شده است. که در نمودار شکل ۴-۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱. مقایسه توان خروجی پیل سوختی در چگالی جریان‌های مختلف با مرجع [4].

۴-۲-۲-۱- اعتبار سنجی سیکل ارگانیک رانکین

کارکرد سیکل ارگانیک رانکین توسط مرجع [41] اعتبار سنجی شده است. در این مورد بازده انرژی، بازده انرژی کل سیکل و تخریب انرژی اجزاء سیکل در جدول ۴-۲ نشان داده شده است که در آن خطا نسبی کمتر از ۵٪ می باشد.

فرضیات [41]:

- ۱- خروجی کندانسور مایع اشباع
- ۲- ورودی اواپراتور مایع متراکم
- ۳- خروجی اواپراتور بخار اشباع
- ۴- فشار ورودی اواپراتور ۱۰.۸ بار
- ۵- سیال کاری R245fa
- ۶- خروجی توربین بخار سوپر هیت در فشار کندانسور ۲.۱ بار
- ۷- افت فشار سیال کاری در اواپراتور و کندانسور ناچیز است.

جدول ۴-۱. پارامترهای استفاده شده در مدل سازی سیکل ارگانیک رانکین [41]

پارامترها	مقدار	پارامترها	مقدار
T_C (°C)	۳۴.۹	$\dot{m}_{cw}$ (kgs ⁻¹)	۱۰.۴
T_E (°C)	۹۲.۹	$T_{in,cw}$ (°C)	۳۲.۱
T_{PP} (°C)	۹۹.۷	$T_{out,cw}$ (°C)	۲۷
P_e (kPa)	۱۰.۸۰	$\dot{m}_{hw}$ (kgs ⁻¹)	۱۶.۲۱
P_c (kPa)	۲۱۰	$T_{in,hw}$ (°C)	۱۲۲.۴
ΔT_{PP} (K)	۶.۸		

جدول ۲-۴. مقایسه نتایج اعتبار سنجی سیکل ارگانیک رانکین با مرجع [41]

اجزاء	تخریب انرژی KW			بازده انرژی %			انتقال حرارت یا توان KW		
	مرجع	شبیه سازی	اختلاف نسبی %	مرجع	شبیه سازی	اختلاف نسبی %	مرجع	شبیه سازی	اختلاف نسبی %
اوپراتور	۱۲۳.۹	۱۲۶.۴	۲.۰۱	۷۶.۱	۷۵.۷۵	-۰.۴۶	۲۴۷۹	۲۴۸۲	۰.۱۲
توربین	۶۵.۵	۶۵.۵۴	۰.۰۶	۸۰	۸۰.۲۵	۰.۳۱	۲۶۲.۲	۲۶۶.۳	۱.۵۶
کندانسور	۴۱.۴	۴۰.۶	-۱.۹۳	۴۴.۷	۴۲.۶۶	-۴.۵۶	۲۲۱۷	۲۲۱۴	-۰.۱۳
پمپ	۲.۹۶	۲.۸۲	-۴.۷۳	۷۱.۵	۷۱.۲۱	-۰.۴	۱۰.۴	۱۰.۴۸	۰.۷۷
کندانسور	۳۳.۴	۳۲.۲۱	-۳.۵۶	-	-	-	بازده انرژی %		
سیکل	۲۶۷.۱	۲۶۵.۴۵	-۰.۰۶۱	۴۸.۵	۴۹.۱	۱.۲۳	۱۰.۲۱	۱۰.۳۱	۰.۹۸

۴-۲-۳ اعتبار سنجی چیلر جذبی تک اثره لیتیوم بروماید

کارکرد چیلر جذبی تک اثره، دو اثره و سه اثره توسط مرجع [42] اعتبار سنجی شده است. در این مورد بازده انرژی، بازده انرژی کل سیکل و تخریب انرژی اجزاء چیلر جذبی در جدول ۴-۴ نشان داده شده است که در آن خطا نسبی کمتر از ۵٪ می‌باشد.

جدول ۳-۴. پارامترهای ورودی برای اعتبار سنجی چیلر جذبی تک اثره لیتیوم بروماید [42]

پارامترهای ورودی سیکل جذبی	مقدار
دمای ژنراتور °C	۸۷.۸
دمای کندانسور °C	۳۷.۸
دمای اوپراتور °C	۷.۲
دمای ابزوربر °C	۳۷.۸
کارایی مبدل حرارتی	۰.۷
دبی جرمی مبرد $kg s^{-1}$	۱

جدول ۴-۴. نتایج اعتبار سنجی چیلر جذبی تک اثره لیتیوم بروماید

پارامترهای خروجی ACH	تغییرات انرژی			نرخ تخریب انرژی		
	مرجع	شبیه سازی	اختلاف نسبی %	مرجع	شبیه سازی	اختلاف نسبی %
نرخ انتقال حرارت در ژنراتور KW	۳۰۹۱.۷۲	۳۰۹۵	۰.۱۰	۵۵.۵۶۸	۵۵.۳	-۰.۴۸
نرخ انتقال حرارت کندانسور KW	۲۵۰۶.۴۶	۲۵۰۶	-۰.۰۱۸	۶.۶۰۶	۶.۶۰	-۰.۰۹
نرخ انتقال حرارت در اواپراتور KW	۲۳۵۵.۹۹	۲۳۵۵	-۰.۰۴	۸۶.۲۷۵	۸۶.۲۸	۰.۰۰۵
نرخ انتقال حرارت در ابزوربر KW	۲۹۴۱.۲۹	۲۹۴۶	۰.۱۶	۷۰.۴۷	۷۰.۳۲	-۰.۲۱
کار پمپ KW	۰.۰۳۴۰۹	۰.۰۳۲۹	-۳.۵	-	-	-
مبدل حرارتی محلول KW	-	-	-	۲۵.۰۸۱	۲۵.۴	۱.۲۷
شیر انبساط مبرد KW	-	-	-	۶.۳۲	۶.۵۳۶	۳.۴۱
کل نرخ تخریب انرژی سیستم KW	-	-	-	۲۵۰.۷۱	۲۵۰.۰۸	-۰.۲۵
ضریب عملکرد	۰.۷۶۲	۰.۷۶۱	-۰.۱۳	-	-	-

۴-۲-۴ نتایج شماتیک اول

نتایج این بخش شامل جدول خواص ترمودینامیکی برای نقاط مختلف سیستم تولید همزمان می باشد، که در جدول ۴-۵ به ترتیب نوع سیال، دما، فشار، دبی جرمی، غلظت محلول لیتیوم - آب، آنتالپی، آنترپی و انرژی آورده شده است. حالت مرجع برای سیال کاری نقاط مختلف در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و فشار ۱۰۱.۳ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است و پارامترهای خروجی از سیستم تولید همزمان در دمای ۱۸۰ درجه سانتیگراد، فشار ۱۰۱.۳ کیلو پاسکال، چگالی جریان $A m^{-2}$ و $U_f = 0.85$ نتایج خروجی مربوط به پیل سوختی، سیکل سیکل ارگانیک رانکین، سیستم گرمایشی و سرمایشی در جداول ۴-۶ تا ۴-۱۱ آورده شده است، در ادامه نمودارهای مربوط به تحلیل انرژی و انرژی برای شماتیک اول به منظور تحلیل حساسیت سیستم تولید همزمان پیشنهادی به پارامترهای مهم پیل سوختی از جمله چگالی جریان، دما و فشار کاری که در ادامه این بخش ملاحظه

خواهید کرد. بازده انرژی و تخریب انرژی اجزاء سیستم تولید همزمان پیشنهادی و نمودارهای بازده انرژی و انرژی، سیستم تولید همزمان در حالت‌های مختلف کارکردی آورده شده است.

جدول ۴-۵. خواص ترمودینامیکی جریان برای شماتیک اول سیستم تولید همزمان

State	Fluid	$T(K)$	$P(kPa)$	$\dot{m}(kg.s^{-1})$	$X(\%)$	$h(kj.kg^{-1})$	$s(kj.kg^{-1}.K^{-1})$	$\dot{E}x(kW)$
۱	Hydrogen	۳۰	۱۰۱.۳	۰.۰۰۶۳۳۴		۷۱.۷۵	۶۵	۷۴۷.۸
۲	Hydrogen	۱۸۰	۱۰۱.۳	۰.۰۰۶۳۳۴		۲۲۳۵	۷۰.۸	۷۵۰.۵
۳	Hydrogen	۱۸۰	۱۰۱.۳	۰.۰۰۰۹۵۰۱		۲۲۳۵	۷۰.۸	۹۶.۱۴
۴	Air	۲۵	۱۰۱.۳	۰.۴۳۳۴		۰	۶.۷۴۶	۱.۹۴۵
۵	Air	۱۸۰	۱۰۱.۳	۰.۴۳۳۴		۱۵۸.۱	۷.۱۷۳	۱۵.۳۳
۶	Air	۱۸۰	۱۰۱.۳	۰.۴۲۴۳		۱۵۸.۸	۷.۱۹	۱۳.۳۷
۷	Exhaust gas	۴۲۶.۶	۱۰۱.۳	۰.۴۲۵۳		۴۲۶.۴	۷.۷۳۸	۷۷.۸۷
۸	Exhaust gas	۴۲۶.۶	۱۰۱.۳	۰.۰۳۲۵۳		۴۲۶.۴	۷.۷۳۸	۵.۹۵۷
۹	Exhaust gas	۴۲۶.۶	۱۰۱.۳	۰.۳۹۲۷		۴۲۶.۴	۷.۷۳۸	۷۱.۹۲
۱۰	Exhaust gas	۳۰	۹۹.۳	۰.۰۳۲۵۳		۵۰۱.۸۹	۶.۸۵۹	۰.۷۸۰۶
۱۱	Exhaust gas	۲۶۵.۴	۹۹.۳	۰.۳۹۲۷		۲۵۱.۹	۷.۴۶	۳۵.۸۷
۱۲	Exhaust gas	۳۰	۹۷.۳	۰.۳۹۲۷		۵۰۱.۸۹	۶.۸۶۵	۸.۷۱۷
۱۳	Water	۲۵	۱۰۱.۳	۰.۶۶۱۹		۱۰۴.۸	۰.۳۶۶۹	۰
۱۴	Water	۶۰	۱۰۱.۳	۰.۶۶۱۹		۲۵۱.۲	۰.۸۳۱۱	۵.۲۷۷
۱۵	Water	۱۰۱.۲	۱۰۱.۳	۰.۹۶۲۴		۲۶۷۸	۷.۳۶۱	۴۶۹.۶
۱۶	Water	۱۸۰	۱۰۱.۳	۰.۹۶۲۴		۲۸۳۵	۷.۷۴۲	۵۱۱.۵
۱۷	Water	۱۳۰	۱۰۱.۳	۰.۹۶۲۴		۲۷۳۶	۷.۵۱۱	۴۸۲.۶
۱۸	Toluene	۶۰	۱۸.۶۳	۰.۱۹۷		-۹۶.۶۴	-۰.۲۶۹۵	۰.۶۴۸۹
۱۹	Toluene	۶۰.۰۶	۱۷۱.۳	۰.۱۹۷		-۹۶.۴۱	-۰.۲۶۹۳	۰.۶۸۶۱
۲۰	Toluene	۱۳۰	۱۷۱.۳	۰.۱۹۷		۳۸۷.۴	۰.۹۶۲۶	۲۳.۶۳
۲۱	Toluene	۸۵.۲۹	۱۸.۶۳	۰.۱۹۷		۳۲۹	۱.۰۰۴	۹.۷۰۱
۲۲	Water	۳۵	۵.۶۲۷	۰.۸۰۲		۱۴۶.۶	۰.۵۰۵	۰.۴۷۳۴
۲۳	Water	۶۰	۱۹.۹۳	۰.۸۰۲		۲۵۱.۲	۰.۸۳۱۲	۶.۳۲۹
۲۴	Water	۹۰	۱۰۱.۳	۰.۸۰۲		۳۷۷	۱.۱۹۳	۲۰.۸۳
۲۵	Water	۸۰	۱۰۱.۳	۰.۸۰۲		۳۳۵	۱.۰۷۵	۱۵.۱۹
۲۶	LiBr/Water	۳۷.۸	۱۰۱.۶	۰.۰۹۸۳۹	۰.۵۵۴۲	۹۱.۴۵	۰.۲۲۸۸	۰.۰۴۷۰۹
۲۷	LiBr/Water	۳۷.۸	۶.۵۵۸	۰.۰۹۸۳۹	۰.۵۵۴۲	۹۱.۴۵	۰.۲۲۸۸	۰.۰۴۷۱
۲۸	LiBr/Water	۶۶.۱۴	۶.۵۵۸	۰.۰۹۸۳۹	۰.۵۵۴۲	۱۴۹.۲	۰.۴۰۶۸	۰.۵۱۰۶
۲۹	LiBr/Water	۸۷.۸	۶.۵۵۸	۰.۰۸۷۵	۰.۶۲۳۲	۲۲۱.۲	۰.۴۷۹۱	۰.۸۹۵۴
۳۰	LiBr/Water	۵۲.۸	۶.۵۵۸	۰.۰۸۷۵	۰.۶۲۳۲	۱۵۶.۲	۰.۲۸۹۵	۰.۱۵۵
۳۱	LiBr/Water	۵۲.۸	۱۰۱.۶	۰.۰۸۷۵	۰.۶۲۳۲	۱۵۶.۲	۰.۲۸۹۵	۰.۱۵۵
۳۲	Water	۸۷	۶.۵۵۸	۰.۰۱۰۸۹	۰	۲۶۶۳	۸.۵۷۵	۱.۲۰۴
۳۳	Water	۳۷.۸	۶.۵۵۸	۰.۰۱۰۸۹	۰	۱۵۸.۳	۰.۵۴۲۸	۰.۰۱۱۱۴
۳۴	Water	۷.۲	۱۰۱.۶	۰.۰۱۰۸۹	۰	۱۵۸.۳	۰.۵۶۶۱	-۰.۰۶۴۴۲
۳۵	Water	۷.۲	۱۰۱.۶	۰.۰۱۰۸۹	۰	۲۵۱۴	۸.۹۶۸	-۱.۶۹۴

۳۶	Water	۲۹.۸	۱۰۱.۳	۱.۵۳۳	۱۲۴.۹	۰.۴۳۳۷	۰.۲۴۵۱
۳۷	Water	۳۴.۸	۱۰۱.۳	۱.۵۳۳	۱۴۵.۸	۰.۵۰۲۲	۱.۰۱
۳۸	Water	۳۰	۱۰۱.۳	۱.۳۰۴	۱۲۵.۸	۰.۴۳۶۵	۰.۲۲۶۲
۳۹	Water	۳۵	۱۰۱.۳	۱.۳۰۴	۱۴۶.۷	۰.۵۰۴۹	۰.۸۹۵۱
۴۰	Water	۱۵.۲	۱۰۱.۳	۱.۲۲۶	۶۳.۸۵	۰.۲۲۷۱	۰.۸۴۴۷
۴۱	Water	۱۰.۲	۱۰۱.۳	۱.۲۲۶	۴۲.۹۲	۰.۱۵۳۹	۱.۹۵

جدول ۴-۶. نتایج خروجی پیل سوختی اسید فسفریک در شماتیک اول

پارامتر	مقدار
مقدار ولتاژ خروجی هر سل V	۰.۷۸۷۸
افت ولتاژ فعال سازی V	۰.۳۳۵۶
افت ولتاژ غلظتی V	۰.۰۹۷۲۷
افت ولتاژ اهمی V	۰.۰۰۹۲۶۳
توان خروجی از استک پیل سوختی KW	۴۲۴.۶
بازده پیل سوختی %	۵۵.۵۲
بازده اگزرژی پیل سوختی %	۵۶.۴۲
حرارت خروجی از پیل سوختی KW	۳۱۷.۲
اگزرژی نابود شده کل KW	۳۱۷.۵

جدول ۷-۴. مقایسه سیال‌های کاری در نظر گرفته شده برای انتخاب مناسب‌ترین سیال کاری

سیال کاری ORC	$\eta_{ORC}(\%)$	$\eta_{ex,ORC}(\%)$	$\dot{E}x_{D,ORC}(KW)$
Toluene	۱۱.۴۱	۳۷.۷	۱۱.۵۵
Isopentane	۱۰.۰۱	۳۳.۰۷	۱۲.۸۱
R11	۱۰.۹۷	۳۶.۲۳	۱۱.۹۲
R113	۱۰.۵۳	۳۴.۷۸	۱۲.۳۴
R123	۱۰.۵۰	۳۴.۷۹	۱۲.۳۲
R1233zd(E)	۱۰.۱۱	۳۳.۳۹	۱۲.۷
R141b	۱۰.۷۹	۳۵.۶۲	۱۲.۱
SES36	۹.۶۷	۳۱.۹۶	۱۳.۱۲

جدول ۸-۴. نتایج خروجی سیکل ارگانیک رانکین در شماتیک اول

پارامتر	مقدار
سیال کاری	تولون
نرخ جریان سیال عامل سیکل رانکین $kg\ s^{-1}$	۰.۱۹۷
نرخ جریان سیال خنک کاری $kg\ s^{-1}$	۰.۸
توان خالص سیکل رانکین KW	۱۰.۸۸
راندمان انرژی سیکل رانکین %	۱۱.۴۱
راندمان انرژی سیکل رانکین %	۳۷.۷
بازگشت ناپذیری KW	۲۰.۳۶

جدول ۹-۴. نتایج خروجی مخزن ذخیره انرژی حرارتی در طول ۱۰۰۰ ثانیه

پارامتر	مقدار
حرارت اتلافی مخزن KW	۲۳
حرارت ذخیره شده در مخزن KW	۳۲۸.۱
بازده انرژی مخزن %	۹۲.۸۷
بازده انرژی مخزن %	۲۲.۸۸
بازگشت ناپذیری مخزن KW	۱۰.۰۲

جدول ۱۰-۴. نتایج عملکرد چیلر جذبی در شماتیک اول

پارامتر	مقدار
حرارت ورودی به ژنراتور KW	۳۳.۶۸
حرارت دریافتی از اواپراتور KW	۲۵.۶۶
حرارت خروجی از جذب کننده KW	۳۲.۰۵
حرارت خروجی از کندانسور KW	۲۷.۲۸
ضریب عملکرد چیلر جذبی	۰.۷۶۲
بازده انرژی چیلر جذبی %	۲۳.۱۲
بازگشت ناپذیری تولیدی KW	۸.۱۳

جدول ۱۱-۴. نتایج عملکرد سیستم گرمایشی در شماتیک اول

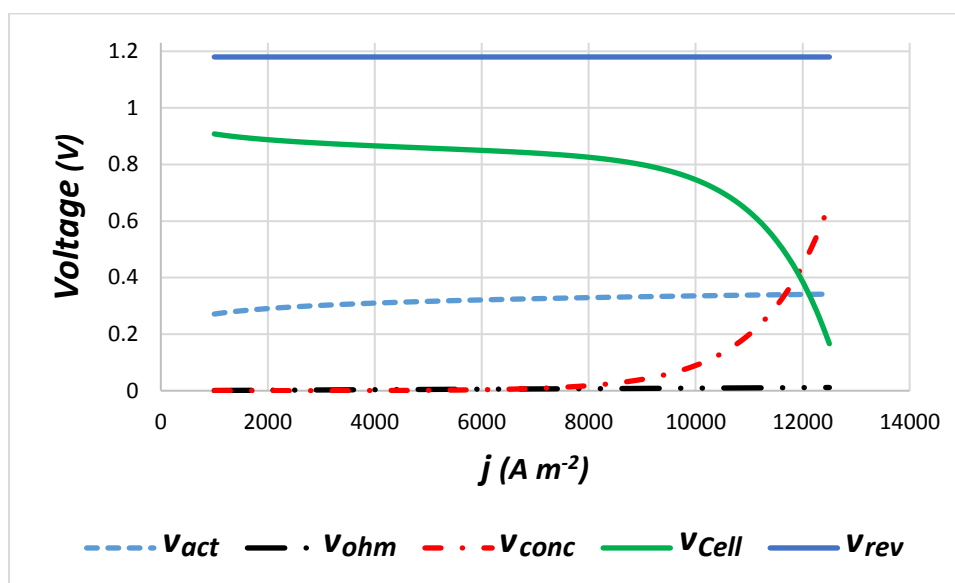
پارامتر	مقدار
نرخ بار گرمایشی KW	۱۵۱.۱
دبی جرمی آب گرم سیستم گرمایشی $kg s^{-1}$	۰.۸
دمای آب گرم سیستم گرمایشی $^{\circ}C$	۸۰
نرخ بار آب گرم خانگی KW	۹۵.۷۹
دبی جرمی آب گرم خانگی $kg s^{-1}$	۰.۶۶
دمای آب گرم خانگی $^{\circ}C$	۶۰

جدول ۱۲-۴. بازده اگزرژی و تخریب اگزرژی اجزاء سیستم تولید همزمان در شماتیک اول

اجزاء سیستم	نرخ تخریب اگزرژی KW	بازده اگزرژی %
Tur	۲.۲	۸۲.۵۷
ORC Pump	۰.۰۰۷	۸۲.۱
Cond 1	۲.۹	۶۴.۷
Eva 1	۵.۳۶	۷۹.۵۱
After B	۳۱.۲۸	۷۱.۱۱
Eva 2	۰.۴۷۵۸	۶۷.۸۲
SHX	۰.۲۵۱	۶۲.۶
Cond 2	۰.۴۷۵	۵۶.۰۷
HX1	۲.۳۹	۵۳.۲۴
Abs	۰.۲۱۴	۴۸.۲۶
PAFC	۲۰.۹	۵۶.۸۳
HX2	۲۲.۴	۳۷.۱۴
Gen	۳.۶۷	۲۸.۱۷
TES	۶.۶۶	۲۰.۸۸
DHW	۲۱.۶۳	۱۹.۴۳

۴-۲-۴-۱ تاثیر چگالی جریان

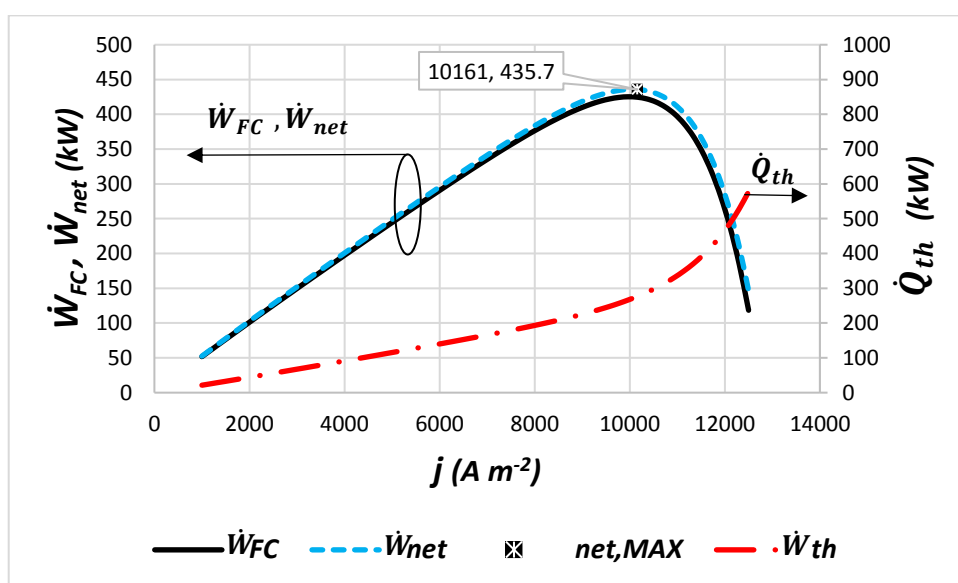
چگالی جریان یکی از پارامترهای مهم طراحی در پیل های سوختی می باشد، به طوری که تغییرات آن، تاثیر قابل توجهی بر توان خروجی و بازده پیل سوختی می گذارد، در این قسمت عملکرد ترمودینامیکی سیستم تولید همزمان سه گانه تحت تاثیر تغییرات چگالی جریان پیل سوختی اسید فسفریک بر روی ولتاژها، توان الکتریکی، نرخ بار حرارتی، بازده های انرژی و اگزرژی و نرخ بازگشت ناپذیری اجزاء سیستم تولید همزمان که در شکل های ۴-۲ تا ۴-۶ بررسی می شود. در این نمودار ها دمای کاری پیل سوختی 180°C ، فشار کار 101.3 kPa و فاکتور مصرف سوخت 0.85 فرض می شود. همچنین چگالی جریان از 1000 A m^{-2} تا 12500 A m^{-2} تغییر می کند.



شکل ۴-۲. تاثیر چگالی جریان بر روی ولتاژ خروجی پیل سوختی و افت ولتاژها در شماتیک اول

همانطور که در شکل ۴-۲ مشاهده می شود با افزایش چگالی جریان افت ولتاژها که شامل فعال-سازی، اهمی و غلظتی می باشد افزایش و ولتاژ خروجی سل کاهش می یابد. با توجه به شکل ۴-۲ با افزایش چگالی جریان در محدوده چگالی جریان پائین، افت ولتاژ عمدتاً ناشی از افت فعال سازی می باشد. افت اهمی به دلیل حرکت یون ها در الکترولیت و حرکت الکترون ها در مدارهای خارجی و قطعات رسانای پیل سوختی اتفاق می افتد و به صورت خطی با افزایش چگالی جریان افزایش می یابد.

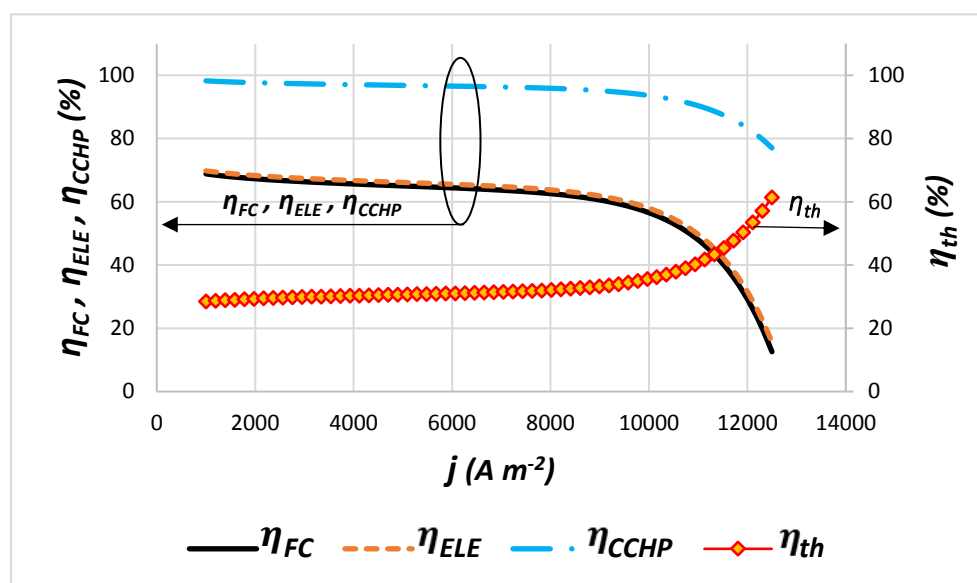
با افزایش چگالی جریان غلظت مواد در سطح کاتالیست کمتر می‌شود، هنگامی که چگالی جریان به جریان حدی می‌رسد، غلظت مواد در سطح کاتالیست به صفر می‌رسد و افت بسیار زیادی ناشی از افت غلظتی ایجاد می‌کند. در نهایت با افزایش چگالی جریان افت ولتاژها افزایش می‌یابند و منجر به کاهش ولتاژ خروجی از پیل سوختی می‌شود.



شکل ۳-۴. تاثیر چگالی جریان بر روی توان و نرخ بار حرارتی سیستم تولید همزمان در شماتیک اول

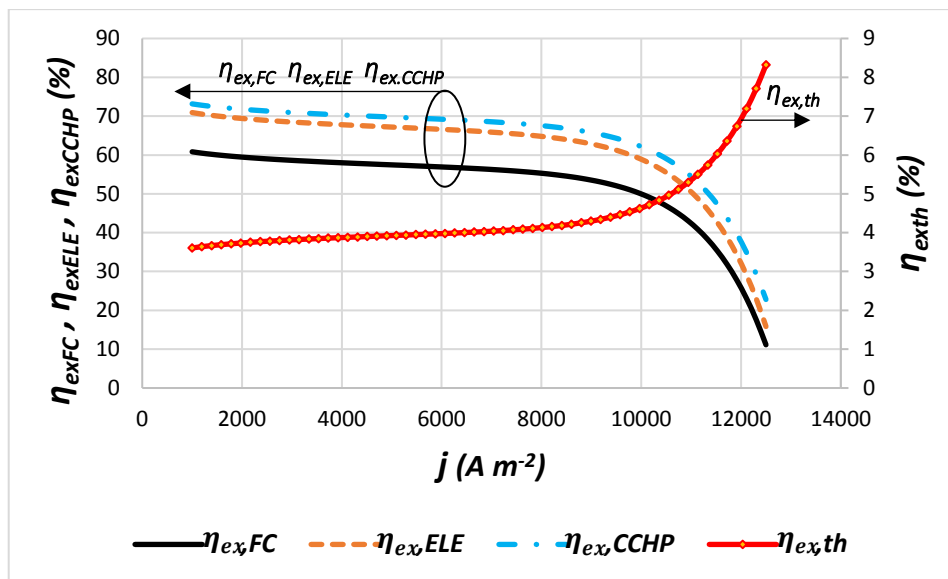
طبق شکل ۳-۴ با افزایش چگالی جریان، توان الکتریکی پیل سوختی و توان خالص الکتریکی سیستم تا مقدار مشخصی افزایش می‌یابد و سپس با افزایش چگالی جریان کاهش می‌یابد که علت آن افزایش افت ولتاژ پیل سوختی می‌باشد. ماکزیمم توان الکتریکی پیل سوختی 425.3 kW در چگالی جریان 9900 A m^{-2} باشد، در حالی که افزایش چگالی جریان منجر به افزایش حرارت تولید شده از پیل سوختی می‌شود، که منجر به بهبود عملکرد زیر سیستم بازیافت حرارت می‌شود. حرارت ورودی به اواپراتور سیکل ارگانیک رانکین متناسب با افزایش چگالی جریان افزایش می‌یابد و منجر به بهبود توان الکتریکی سیستم می‌شود، به طوری که ماکزیمم توان خالص الکتریکی سیستم 435.7 kW در چگالی جریان 10161 A m^{-2} می‌باشد. افزایش چگالی جریان منجر به افزایش هیدروژن و هوای ورودی به پیل سوختی می‌شود، از آنجایی که هیدروژن و اکسیژن به طور کامل در پیل سوختی

مصرف نمی‌شود، افزایش چگالی جریان به ترتیب منجر به افزایش هیدروژن و اکسیژن خروجی از آند و کاتد می‌شود، که باعث بهبود عملکرد مشعل پس سوز و افزایش دمای گازهای خروجی از مشعل می‌شود، با افزایش دمای گازهای خروجی از مشعل پس سوز، آب گرم خانگی تولید شده در مبدل حرارتی آبگرم خانگی بیشتر می‌شود. همانطور که در شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود با افزایش چگالی جریان نرخ بار حرارتی سیستم به طور پیوسته افزایش می‌یابد.



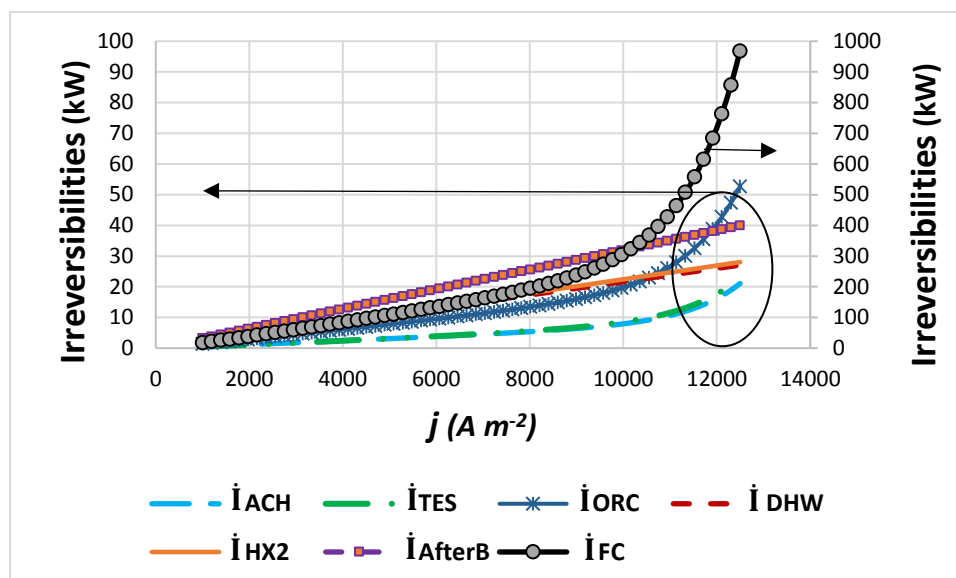
شکل ۴-۴. تاثیر چگالی جریان بر روی بازده های انرژی در شماتیک اول

با افزایش چگالی جریان دبی جرمی سوخت ورودی به پیل سوختی افزایش یافته و باعث افزایش 864 KW در انرژی ورودی به سیستم می‌شود، تاثیر افزایش سوخت مصرفی منجر به کاهش بازده سیستم در تمام حالت های کارکردی می‌شود. همانطور که در شکل ۳-۴ بیان شده افزایش چگالی جریان منجر به افزایش توان پیل سوختی و توان الکتریکی تا مقدار مشخصی می‌شود و سپس منجر به کاهش هر دو توان می‌شود که علت آن کاهش ولتاژ خروجی پیل سوختی می‌باشد، در نتیجه با کاهش ولتاژ، بازده پیل سوختی و بازده الکتریکی بیشتر کاهش می‌یابند، در حالی که با افزایش چگالی جریان بازده حرارتی سیستم 32.98% افزایش می‌یابد و منجر به بهبود بازده سیستم تولید همزمان سه گانه می‌شود.



شکل ۴-۵. تاثیر چگالی جریان بر روی بازده های انرژی در شماتیک اول

با افزایش چگالی جریان دبی جرمی سوخت ورودی به سیستم افزایش یافته و منجر به افزایش 851 KW در انرژی ورودی به سیستم شده است. همانطور که از شکل ۴-۵ ملاحظه می شود، با افزایش چگالی جریان بازده انرژی پیل سوختی، بازده انرژی الکتریکی و بازده انرژی سیستم تولید همزمان سه گانه به علت افزایش انرژی ورودی به سیستم کاهش می یابد، در حالی که بازده انرژی حرارتی به علت افزایش نرخ بار حرارتی سیستم افزایش می یابد، از آنجایی که بازده انرژی بیشتر به توان وابسته است، تاثیر کاهش ولتاژ با افزایش چگالی جریان منجر به کاهش بیشتر توان در صورت بازده انرژی پیل سوختی، بازده انرژی الکتریکی و سیستم تولید همزمان سه گانه شده است و تاثیر افزایش بازده انرژی حرارتی سیستم بر روی بازده انرژی سیستم تولید همزمان سه گانه کمتر می باشد. به طوری که با افزایش چگالی جریان بازده انرژی حرارتی سیستم تنها 4.71% افزایش می یابد.

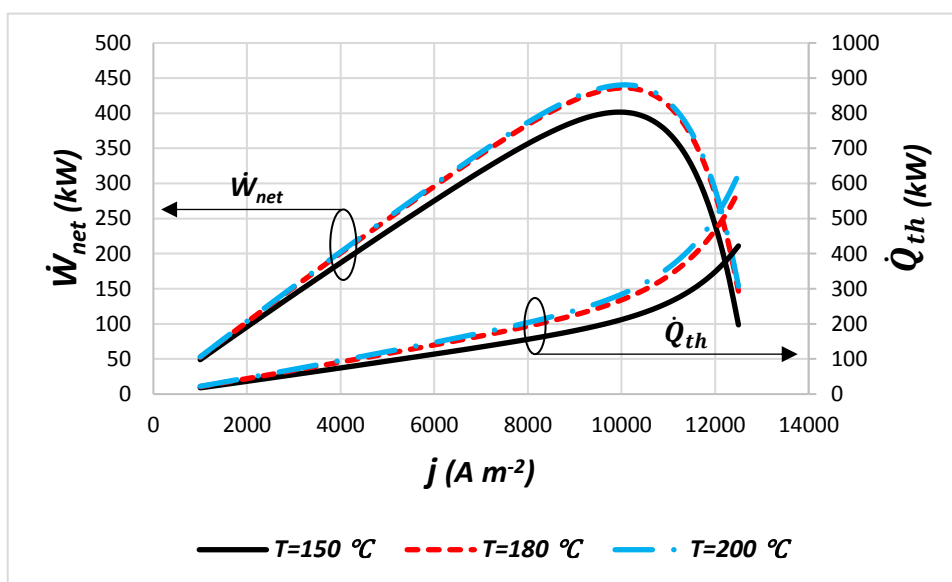


شکل ۴-۶. تاثیر چگالی جریان بر روی بازگشت ناپذیری اجزاء سیستم تولید همزمان در شماتیک اول

با توجه به شکل ۴-۶ با افزایش چگالی جریان نرخ بازگشت ناپذیری در اجزاء سیستم تولید همزمان افزایش می‌یابد. افزایش چگالی جریان تاثیر چشمگیری بر روی نرخ بازگشت ناپذیری پیل سوختی می‌گذارد. به طوری که با افزایش چگالی جریان نرخ بازگشت ناپذیری در پیل سوختی 950 KW افزایش می‌یابد، چون با افزایش چگالی جریان دبی جرمی هیدروژن ورودی به پیل سوختی افزایش یافته که منجر به افزایش اگزورژی ورودی به پیل سوختی می‌شود، و همچنین کاهش ولتاژ خروجی پیل سوختی با افزایش چگالی جریان، باعث کاهش توان خروجی و به دنبال آن کاهش اگزورژی خروجی می‌شود. افزایش اگزورژی ورودی و کاهش اگزورژی خروجی پیل سوختی و همچنین افزایش حرارت تولیدی باعث افزایش چشمگیری در نرخ بازگشت ناپذیری پیل سوختی می‌شود. افزایش حرارت تولید در پیل سوختی منجر به افزایش حرارت ورودی به سیکل بازیافت حرارت می‌شود که باعث افزایش نرخ بازگشت ناپذیری در سیکل ارگانیک رانکین، مخزن ذخیره انرژی حرارتی و چیلر جذبی شده است. و همچنین افزایش دبی جرمی گازهای خروجی از آند و کاتد پیل سوختی با افزایش چگالی جریان، باعث افزایش نرخ بازگشت ناپذیری در مشعل پس سوز و مبدل های حرارتی شده است.

۴-۲-۴-۲- تاثیر دمای کاری

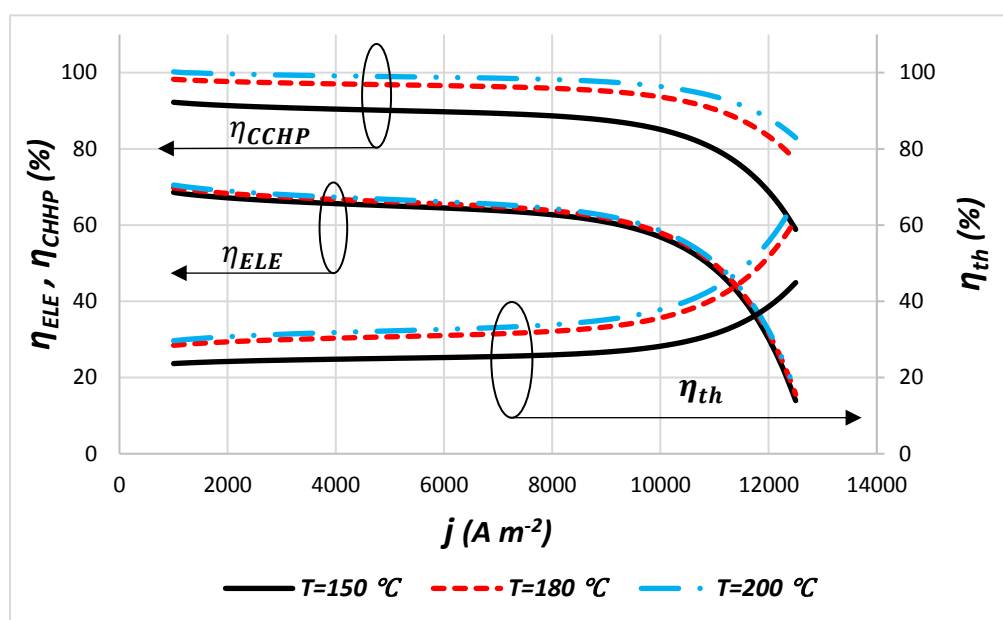
دمای کاری یکی از مهمترین پارامترها در سیستم پیل سوختی اسید فسفریک می‌باشد. با افزایش دماکاری، ولتاژ تئوری و افت ولتاژ فعال سازی افزایش می‌یابد، در حالی که با افزایش دما هدایت یونی در الکترولیت افزایش پیدا می‌کند و منجر به کاهش افت ولتاژ اهمی می‌شود. در نهایت تاثیر افزایش دمای کاری منجر به افزایش ولتاژ خروجی از پیل سوختی اسید فسفریک می‌شود. تاثیر تغییرات دما- کاری متفاوت از تاثیر چگالی جریان می‌باشد. که در شکل های ۴-۷ تا ۴-۹ نشان داده شده است. در این نمودار ها $J = 10105 \text{ A m}^{-2}$ ، $U_f = 0.85$ و $P_{Cell} = 101.3 \text{ kPa}$ فرض می‌شود.



شکل ۴-۷. تاثیر دمای کاری بر روی توان و نرخ بارحرارتی سیستم تولید همزمان در شماتیک اول

همانطور که بیان شد، با افزایش دماکاری، ولتاژ خروجی پیل سوختی افزایش می‌یابد که منجر به افزایش توان خروجی از پیل سوختی می‌شود، همچنین با افزایش دمای کاری پیل سوختی، دمای منبع حرارتی سیکل ارگانیک‌رانکین افزایش یافته و منجر به افزایش توان تولیدی در توربین می‌شود، و حرارت بیشتری در کندانسور سیکل ارگانیک‌رانکین به سیال خنک‌کننده انتقال می‌یابد، که باعث افزایش دبی جرمی ورودی به مخزن ذخیره انرژی حرارتی در نقطه ۲۳ می‌شود، در نهایت دبی جرمی

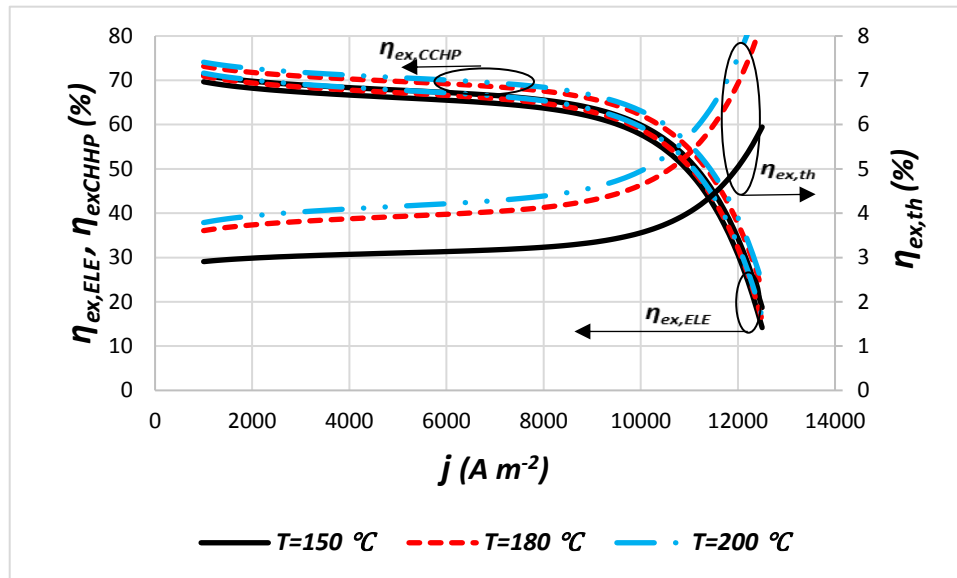
آب گرم ورودی به چیلر جذبی و ساختمان بیشتر می‌شود. همچنین افزایش دمای کاری پیل سوختی منجر به افزایش دمای گازهای خروجی از آند و کاتد می‌شود که موجب افزایش دمای گاز حاصل از احتراق در مشعل پس‌سوز می‌شود. اما چون به حرارت بیشتری برای افزایش دمای هیدروژن و هوا، تا دمای کاری پیل سوختی در مبدل های حرارتی (۱) و (۲) نیاز است، تبادل حرارت بین جریان گاز- خروجی از مبدل حرارتی (۲) و جریان آب در مبدل حرارتی آب گرم‌خانگی کاهش یافته و منجر به کاهش کمی در دبی جرمی آب گرم‌خانگی می‌شود. با توجه به شکل ۴-۷ با افزایش دمای کاری از 150°C تا 200°C توان الکتریکی و نرخ بارحرارتی سیستم افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۸. تاثیر دمای کاری بر روی بازده های انرژی در شماییک اول

همانطور که از شکل ۴-۸ ملاحظه می‌شود، با افزایش دمای کاری از 150°C تا 200°C ، بازده های انرژی سیستم افزایش می‌یابند. با افزایش دمای کاری، سوخت مصرفی در پیل سوختی تغییر نمی‌کند و انرژی ورودی به سیستم ثابت می‌ماند. همانطور که در شکل ۴-۷ بیان شد، با افزایش دمای کاری، توان الکتریکی سیستم افزایش می‌یابد و سیستم از انرژی ورودی خود استفاده بیشتری می‌کند و منجر به افزایش بازده الکتریکی با افزایش دمای کاری می‌شود. همچنین با افزایش دمای کاری از 150°C تا 200°C بازده حرارتی سیستم افزایش می‌یابد که منجر به بهبود بازده انرژی سیستم

تولید همزمان سه گانه با افزایش دمای کاری پیل سوختی شده است.

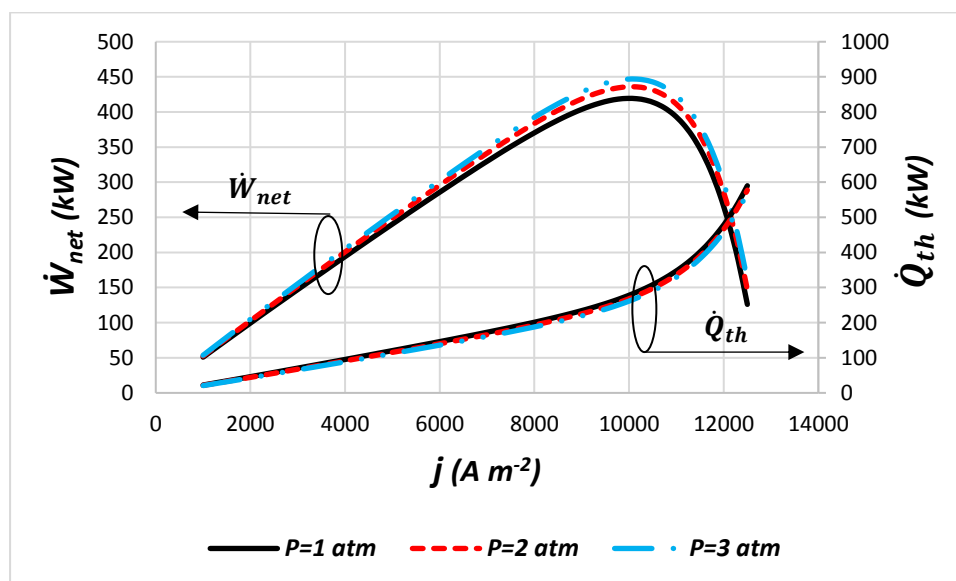


شکل ۹-۴. تاثیر دمای کاری بر روی بازده های انرژی در شمای اول

همانطور که از شکل ۹-۴ ملاحظه می‌شود، با افزایش دمای کاری از ۱۵۰ °C تا ۲۰۰ °C بازده های انرژی سیستم افزایش می‌یابند، چون با افزایش دمای کاری انرژی ورودی به سیستم تغییر نمی‌کند، و افزایش توان خالص الکتریکی در صورت کسر بازده انرژی منجر به افزایش بازده انرژی الکتریکی شده است، از آنجایی که تاثیر بار حرارتی بر روی بازده انرژی کمتر از توان الکتریکی می‌باشد، تاثیر افزایش بازده انرژی حرارتی با افزایش دمای کاری پیل سوختی بر روی بازده انرژی سیستم تولید همزمان سه گانه کمتر می‌باشد.

۳-۴-۲-۴- تاثیر فشارکاری

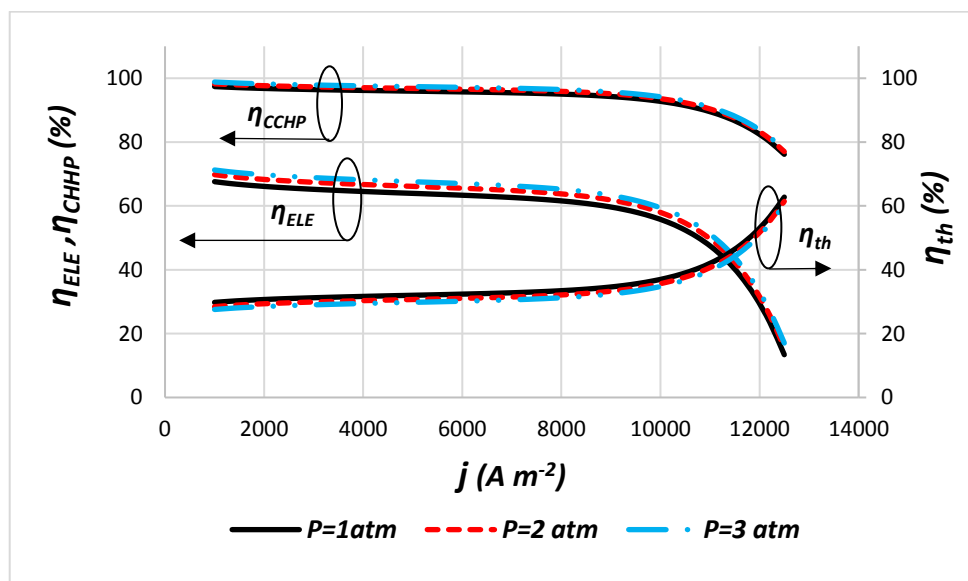
افزایش فشارکاری منجر به افزایش فشارهای جزئی واکنش دهنده‌ها و فراورده‌ها، در واکنش الکتروشیمیایی شده که باعث افزایش ولتاژ تئوری می‌شود. از این رو باعث بهبود ولتاژ خروجی پیل سوختی می‌شود.



شکل ۴-۱۰. تاثیر فشارکاری بر روی توان و نرخ بار حرارتی سیستم تولید همزمان در شماتیک اول

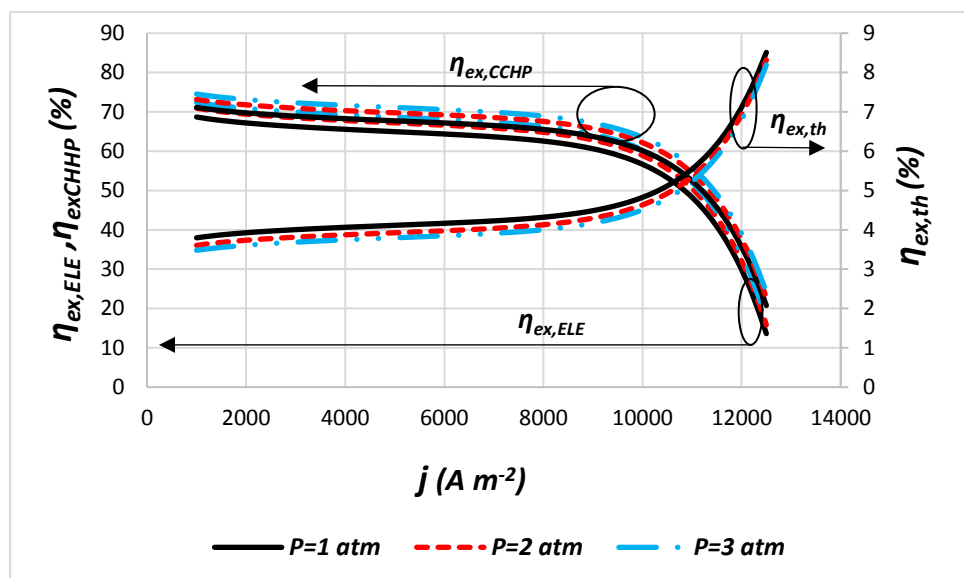
همانطور که از شکل ۴-۱۰ ملاحظه می‌شود، افزایش فشارکاری پیل سوختی از ۱ اتمسفر تا ۳ اتمسفر منجر به افزایش توان الکتریکی و کاهش بار حرارتی سیستم می‌شود. با افزایش فشارکاری، توان خروجی پیل سوختی افزایش می‌یابد، و طبق رابطه (۳-۲۱) حرارت تولیدی ناشی از واکنش الکتروشیمیایی در پیل سوختی کاهش می‌یابد و باعث کاهش حرارت ورودی به اواپراتور سیکل ارگانیک رانکین می‌شود که باعث کاهش توان خالص تولید سیکل ارگانیک رانکین با افزایش فشار-کاری پیل سوختی می‌شود، اما تاثیر افزایش توان پیل سوختی بیشتر از کاهش توان خالص سیکل ارگانیک رانکین بر روی توان الکتریکی بوده است و باعث افزایش توان الکتریکی با افزایش فشارکاری می‌شود، همانطور که از شکل ۴-۱۰ مشاهده می‌شود در چگالی جریان های بالا تاثیر کاهش توان خالص سیکل ارگانیک رانکین بیشتر شده و منجر به کاهش تاثیر فشارکاری بر روی توان الکتریکی

شده است. بار حرارتی سیستم با افزایش فشارکاری کاهش می‌یابد، چون حرارت تولید پیل سوختی با افزایش فشارکاری کاهش می‌یابد و منجر به کاهش نرخ بار گرمایشی و سرمایشی در زیر سیستم بازیافت حرارت می‌شود، از آنجایی که آنتالپی گازهای ایده‌آل به فشار بستگی ندارد، افزایش فشار گازهای خروجی از آند و کاتد تاثیری بر روی نرخ بار آب گرم خانگی نداشته است.



شکل ۴-۱۱. تاثیر فشار کاری بر روی بازده های انرژی در شماتیک اول

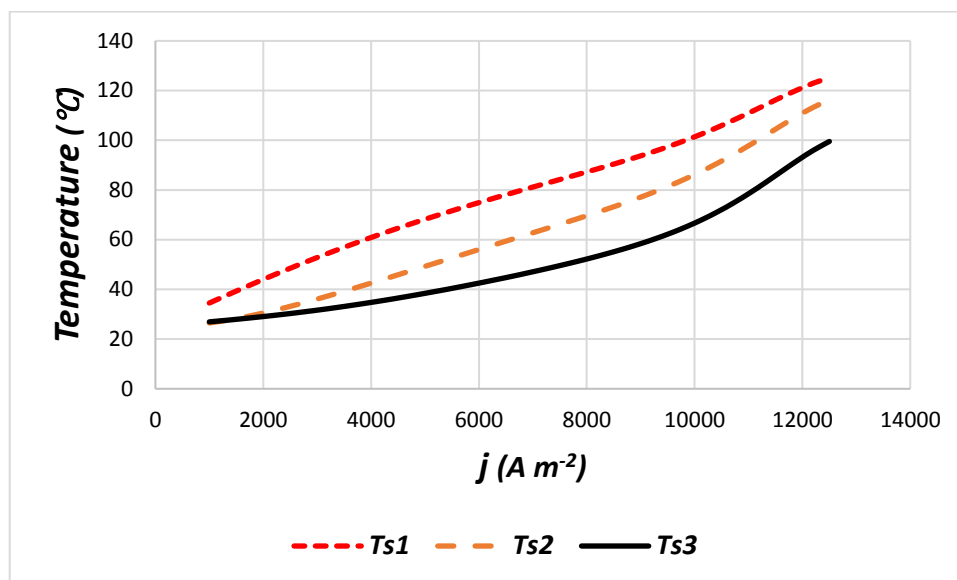
همانطور که از شکل ۴-۱۱ ملاحظه می‌شود، با افزایش فشار کاری از ۱ اتمسفر تا ۳ اتمسفر بازده الکتریکی افزایش می‌یابد، از آنجایی که با افزایش فشارکاری، سوخت مصرفی در سیستم پیل سوختی ثابت می‌ماند، انرژی ورودی به سیستم تغییری نکرده در حالی که افزایش فشارکاری منجر به افزایش توان خالص الکتریکی سیستم در صورت بازده الکتریکی شده است و سیستم از انرژی ورودی خود استفاده بیشتری می‌کند. با افزایش فشارکاری بازده حرارتی سیستم کاهش می‌یابد که منجر به کاهش تاثیر فشارکاری بر روی بازده سیستم تولید همزمان سه گانه بازده می‌شود.



شکل ۴-۱۲. تاثیر فشار کاری بر روی بازده اگزرژی در شماتیک اول

همانطور که از شکل ۴-۱۲ ملاحظه می‌شود، با افزایش فشار کاری پیل سوختی از ۱ اتمسفر تا ۳ اتمسفر، بازده اگزرژی الکتریکی افزایش می‌یابد، چون با افزایش فشار کاری اگزرژی ورودی به سیستم تغییر نمی‌کند، و افزایش توان خالص الکتریکی در صورت کسر بازده اگزرژی منجر به افزایش بازده اگزرژی الکتریکی شده است، از آنجایی که تاثیر بار حرارتی بر روی بازده اگزرژی کمتر از توان الکتریکی می‌باشد، تاثیر کاهش بازده اگزرژی حرارتی با افزایش فشار کاری پیل سوختی بر روی بازده اگزرژی سیستم تولید همزمان سه گانه کمتر می‌باشد.

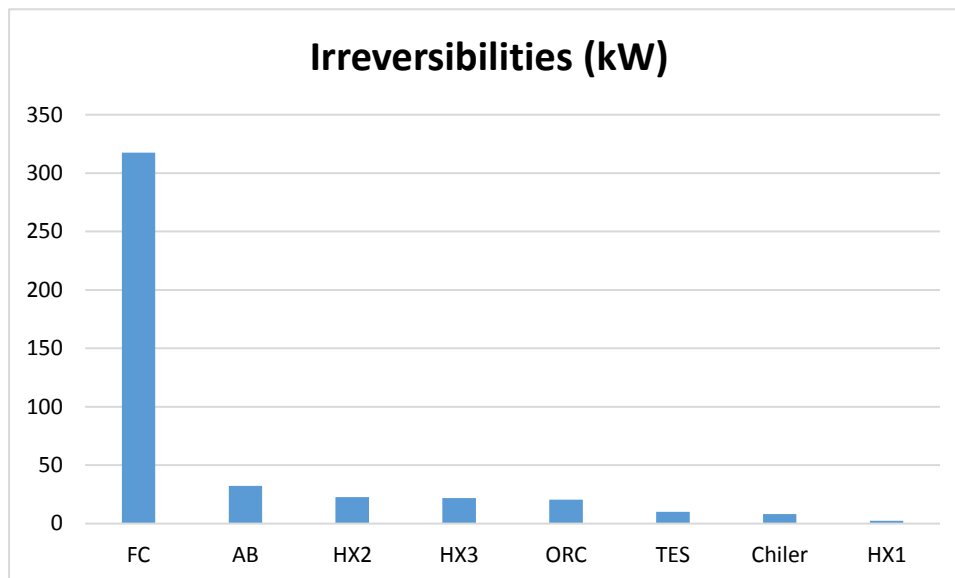
۴-۲-۵- تغییرات دمای لایه های مخزن ذخیره حرارت در طول ۱۰۰۰ ثانیه



شکل ۴-۱۳. تاثیر چگالی جریان بر روی دمای لایه های مخزن ذخیره انرژی حرارتی

همانطور که از شکل ۴-۱۴ ملاحظه می شود، با افزایش چگالی جریان دمای لایه های مخزن ذخیره انرژی حرارتی افزایش می یابد. با افزایش چگالی جریان ماکزیمم انرژی تولیدی و ولتاژ در پیل سوختی به ترتیب افزایش و کاهش می یابند، از این رو طبق رابطه (۳-۲۱) نرخ حرارت تولید شده در پیل سوختی افزایش می یابد و منجر به افزایش دبی جرمی زیر سیستم بازیافت حرارت می شود. با افزایش دبی جرمی آب داغ ورودی به مخزن انرژی حرارتی در نقطه ۱۷، انرژی ورودی به مخزن افزایش می یابد در نتیجه دمای مخزن بالا رفته و آب داغ بیشتری از مخزن ذخیره انرژی حرارتی خارج شده و در نقطه ۲۴ وارد ژنراتور چیلر جذبی می شود، که منجر به افزایش آب سرد تولیدی در اواپراتور چیلر جذبی می شود.

نرخ بازگشت ناپذیری اجزاء سیستم تولید همزمان و بازده های انرژی و انرژی با توجه به شرایط مربوط به جدول (۳-۱) در شکل ۴-۱۴ و ۴-۱۵ نشان داده شده است.



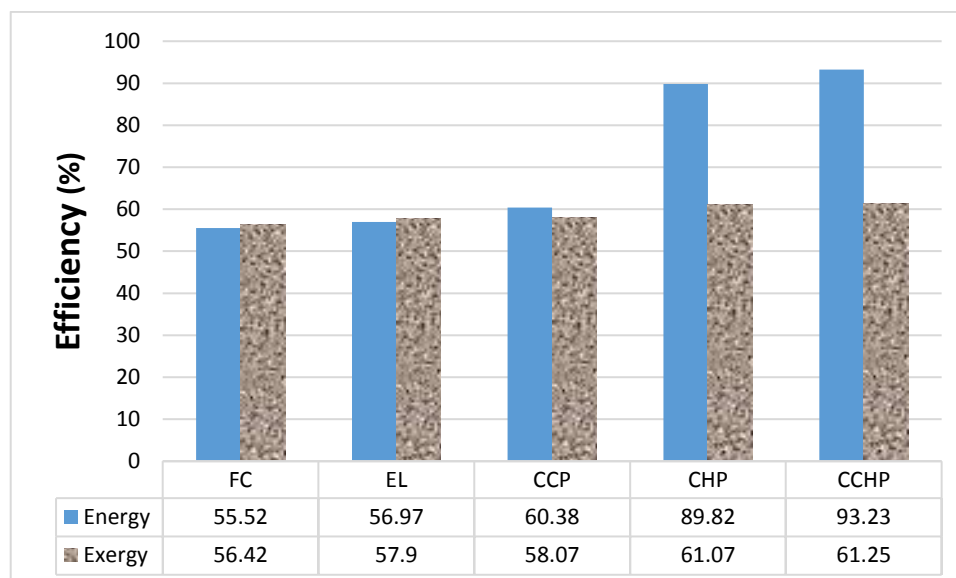
شکل ۴-۱۴. نرخ بازگشت ناپذیری اجزاء سیستم تولید همزمان در شماتیک اول

با توجه به شکل ۴-۱۵ بیشترین بازگشت ناپذیری در سیستم تولید همزمان پیشنهادی مربوط به پیل سوختی اسید فسفریک است، که علت آن حرارت تولیدی زیاد در استک پیل سوختی و بازگشت ناپذیری های ناشی از واکنش الکتروشیمیایی پیل سوختی می باشد. و سپس در مشعل پس سوز می باشد که علت آن نیز احتراق سوخت می باشد. بازده انرژی و انرژی سیستم در پنج حالت مختلف کارکردی مورد بررسی قرار گرفته است: حالت کارکرد پیل سوختی به تنهایی برای تامین توان الکتریکی، حالت هیبریدی همراه سیکل ارگانیک رانکین برای تامین توان الکتریکی، حالت تولید همزمان دوگانه برق-حرارت^۱، حالت تولید همزمان برق-سرمایش^۲ و در نهایت حالت کارکرد تولید همزمان سه گانه برق-حرارت و سرمایش^۳ که در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است.

^۱ Combined Heating and Power

^۲ Combined Cooling and Power

^۳ Combined Cooling Heating and Power



شکل ۱۵-۴. بازده انرژی و انرژی شماتیک اول در پنج حالت های مختلف کاری

همانطور که از شکل ۱۵-۴ ملاحظه می‌شود، استفاده از سیکل ارگانیک رانکین منجر به افزایش ۲.۶۱٪ و ۲.۶۲٪ به ترتیب در بازده انرژی و انرژی الکتریکی شده است، در حالی که اضافه کردن مخزن ذخیره انرژی حرارتی برای تامین منبع حرارتی چیلر جذبی منجر به افزایش ۵.۹۸٪ و ۰.۳٪ به ترتیب در بازده انرژی و انرژی تولید همزمان برق-سرمایش شده است، استفاده از مبدل آب گرم خانگی برای بازیافت گازهای خروجی از مشعل پس سوز و آب گرم خروجی از ژنراتور چیلر جذبی منجر به افزایش ۵۷.۶۶٪ و ۵.۴۷٪ به ترتیب در بازده انرژی و انرژی تولید همزمان برق-حرارت شده است، و در نهایت استفاده از تمامی اجزاء سیستم تولید همزمان برای تامین نیاز انرژی منجر به افزایش ۶۷.۹٪ و ۵.۵۶٪ به ترتیب در بازده انرژی تولید همزمان سه گانه نسبت به کارکرد پیل سوختی به تنهایی شده است. که نشان دهنده بهبود عملکرد پیل سوختی هنگام استفاده از سیستم تولید همزمان می‌باشد.

۴-۲-۶- نتایج شماتیک دوم

نتایج این بخش شامل جدول خواص ترمودینامیکی برای نقاط مختلف سیستم تولید همزمان می باشد، که در جدول ۴-۱۳ به ترتیب نوع سیال، دما، فشار، دبی جرمی، غلظت محلول آب-لیتیوم بروماید، آنتالپی، آنترپی و اگزرژی آورده شده است. پارامترهای خروجی از سیستم تولید همزمان در دمای 180°C ، فشار 101.3 کیلو پاسکال چگالی جریان 10161 A m^{-2} و فاکتور مصرف سوخت 0.85 می باشد. نتایج خروجی مربوط به پیل سوختی، سیکل ارگانیکی رانکین، سیستم گرمایشی و سرمایشی و تخریب اگزرژی اجزاء در جداول ۴-۱۴ تا ۴-۱۸ آورده شده است، در ادامه نمودارهای مربوط به تحلیل انرژی و اگزرژی برای شماتیک دوم به منظور تحلیل حساسیت سیستم تولید همزمان پیشنهادی به پارامترهای مهم پیل سوختی از جمله چگالی جریان، دما و فشار کاری که در ادامه این بخش ملاحظه خواهید کرد. نمودارهای بازده انرژی و اگزرژی، سیستم تولید همزمان در حالت های مختلف کارکردی آورده شده است.

جدول ۱۳-۴. خواص ترمودینامیکی جریان برای شماتیک دوم سیستم تولید همزمان

state	Fluid	$T(^{\circ}\text{C})$	$P(\text{kPa})$	$\dot{m}(\text{kg.s}^{-1})$	$X(\%)$	$h(\text{kJ.kg}^{-1})$	$s(\text{kJ.kg}^{-1}.K^{-1})$	$\dot{E}x(\text{kW})$
1	Natural gas	۱۵	۱۰.۱.۳	۰.۰۱۲۶		-۴۶۷۲	۱۱.۵۳	۶۵۸.۸
2	Natural gas	۷۵۰	۹۹.۳	۰.۰۱۲۶		-۲۱۳۸	۱۵.۵۹	۶۷۵.۵
3	Natural gas	۱۵	۱۰.۱.۳	۰.۰۰۳۸۴۵		-۴۶۷۲	۱۱.۵۳	۲۰.۱
4	Air	۲۵	۱۰.۱.۳	۰.۰۱۳۶۳		.	۶.۷۴۶	۰.۰۶۱۱۶
5	Exhaust gas	۵۰۰	۱۱۰	۰.۰۱۴۳۵		-۲۸۱۷	۸.۴۸۳	-۴۶.۶۵
6	Water	۲۵	۱۰.۱.۳	۰.۰۳۵۳۸		۱۰۴.۸	۰.۳۶۶۹	.
7	Water	۱۵۰	۱۰.۱.۳	۰.۰۳۵۳۸		۲۷۷۶	۷.۶۰۷	۱۸.۱۳
8	Exhaust gas	۱۵۲۱	۱۰۹.۳	۰.۰۵۶		-۹۵۹۵	۱۹.۵۶	-۷۴۵.۵
9	Exhaust gas	۱۳۵۷	۱۰۷.۳	۰.۰۵۶		-۱۰۱۶۵	۱۹.۲۳	-۷۷۲
10	Exhaust gas	۵۰۰	۱۱۰	۰.۰۱۴۳۵		-۲۸۱۷	۸.۴۸۳	-۴۶.۶۵
11	Hydrogen	۷۵۰	۱۰.۳.۳	۰.۰۰۶۳۳۴		۱۰۶۰۶	۸۲.۶۵	۷۸۱.۲
12	Hydrogen	۱۸۰	۱۰.۱.۳	۰.۰۰۶۳۳۴		۲۲۳۵	۷۰.۸	۷۵۰.۵
13	Hydrogen	۱۸۰	۱۰.۱.۳	۰.۰۰۰۹۵۰۱		۲۲۳۵	۷۰.۸	۱۱۲.۶
14	Air	۲۵	۱۰.۱.۳	۰.۴۳۳۴		.	۶.۷۴۶	۱.۹۴۵
15	Air	۱۴۵.۲	۱۰.۱.۳	۰.۴۳۳۴		۱۲۲.۳	۷.۰۹	۱۰.۴۴
16	Air	۱۸۰	۱۰.۱.۳	۰.۴۲۴۳		۱۵۸.۸	۷.۱۹	۱۳.۳۷
17	Exhaust gas	۴۲۶.۶	۱۰.۱.۳	۰.۴۲۵۳		۴۲۶.۴	۷.۷۳۸	۷۷.۸۷
18	Exhaust gas	۲۸۰	۱۰.۱.۳	۰.۴۲۵۳		۲۶۷.۵	۷.۴۸۳	۴۲.۶
19	Exhaust gas	۶۰	۱۰.۱.۳	۰.۴۲۵۳		۳۶.۳۳	۶.۹۵۱	۱۱.۷۸
20	Exhaust gas	۱۷۹.۵	۱۰.۱.۳	۰.۴۲۵۳		۱۶۱	۷.۲۷۱	۲۴.۲۶
21	Exhaust gas	۶۰	۱۰.۱.۳	۰.۴۲۵۳		۳۶.۳۳	۶.۹۵۱	۱۱.۷۸
22	Water	۲۵	۱۰.۱.۳	۰.۶۷۱۵		۱۰۴.۸	۰.۳۶۶۹	.
23	Water	۶۰	۱۰.۱.۳	۰.۶۷۱۵		۲۵۱.۲	۰.۸۳۱۱	۵.۳۵۴
24	Water	۱۸۰	۱۰.۱.۳	۰.۹۶۲۴		۲۸۳۵	۷.۷۴۲	۵۱۱.۵
25	Water	۱۲۴.۵	۱۰.۱.۳	۰.۹۶۲۴		۲۷۲۵	۷.۴۸۳	۴۷۹.۹
26	Water	۱۵	۱۰.۱.۳	۰.۰۰۳۸۴۵		-۴۶۷۲	۱۱.۵۳	۲۰.۱
27	Toluene	۱۳۰	۱۷۱.۳	۰.۲۱۹		۳۸۷.۴	۰.۹۶۲۶	۲۶.۲۷
28	Toluene	۸۵.۲۹	۱۸.۶۳	۰.۲۱۹		۳۲۹	۱.۰۰۴	۱۰.۷۸
29	Toluene	۶۰	۱۸.۶۳	۰.۲۱۹		-۹۶.۶۴	-۰.۲۶۹۵	۰.۷۲۱۴
30	Toluene	۶۰.۰۶	۱۷۱.۳	۰.۲۱۹		-۹۶.۴۱	-۰.۲۶۹۳	۰.۷۶۲۸
31	Water	۲۵	۱۰.۱.۳	۰.۷۳۵۲		۱۴۶.۷	۰.۵۰۴۹	۰.۵۰۴۵
32	Water	۶۵.۳۲	۱۰.۱.۳	۰.۷۳۵۲		۲۷۳.۵	۰.۸۹۷۴	۷.۶۹۷
33	Water	۸۰	۱۰.۱.۳	۰.۷۳۵۲		۳۳۵	۱.۰۷۵	۱۳.۹۲
34	Water	۹۰	۱۰.۱.۳	۲۰.۱۱		۳۷۷	۱.۱۹۳	۵۲.۲۳
35	Water	۸۲	۱۰.۱.۳	۲۰.۱۱		۳۴۳.۴	۱.۰۹۹	۴۰.۷۵
36	LiBr/Water	۳۷.۸	۱۰.۱۶	۰.۱۹۷۴	۰.۵۵۴۲	۹۱.۴۵	۰.۲۲۸۸	۰.۰۹۴۴۹
37	LiBr/Water	۳۷.۸	۶.۵۵۸	۰.۱۹۷۴	۰.۵۵۴۲	۹۱.۴۵	۰.۲۲۸۸	۰.۰۹۴۵۲
38	LiBr/Water	۶۶.۱۴	۶.۵۵۸	۰.۱۹۷۴	۰.۵۵۴۲	۱۴۹.۲	۰.۴۰۶۸	۱.۰۲۵
39	LiBr/Water	۸۷.۸	۶.۵۵۸	۰.۱۷۵۶	۰.۶۲۳۲	۲۲۱.۲	۰.۴۷۹۱	۱.۷۹۷
40	LiBr/Water	۵۲.۸	۶.۵۵۸	۰.۱۷۵۶	۰.۶۲۳۲	۱۵۶.۲	۰.۲۸۹۵	۰.۳۱۱
41	LiBr/Water	۵۲.۸	۱۰.۱۶	۰.۱۷۵۶	۰.۶۲۳۲	۱۵۶.۲	۰.۲۸۹۵	۰.۳۱۱
42	Water	۸۷	۶.۵۵۸	۰.۰۲۱۸۶	.	۲۶۶۳	۸.۵۷۵	۲.۴۱۶
43	Water	۳۷.۸	۶.۵۵۸	۰.۰۲۱۸۶	.	۱۵۸.۳	۰.۵۴۲۸	۰.۰۲۲۳۵
44	Water	۷.۲	۱۰.۱۶	۰.۰۲۱۸۶	.	۱۵۸.۳	۰.۵۶۶۱	-۰.۱۲۹۳
45	Water	۷.۲	۱۰.۱۶	۰.۰۲۱۸۶	.	۲۵۱۴	۸.۹۶۸	-۳.۳۹۹
46	Water	۲۹.۸	۱۰.۱.۳	۳.۰۷۵		۱۲۴.۹	۰.۴۳۳۷	۰.۴۹۱۸
47	Water	۳۴.۸	۱۰.۱.۳	۳.۰۷۵		۱۴۵.۸	۰.۵۰۲۲	۲.۰۲۸
48	Water	۳۰	۱۰.۱.۳	۲.۶۱۸		۱۲۵.۸	۰.۴۳۶۵	۰.۴۵۴

49	Water	۳۵	۱۰۱.۳	۲.۶۱۸	۱۴۶.۷	۰.۵۰۴۹	۱.۷۹۶
50	Water	۱۵.۲	۱۰۱.۳	۲.۴۶۱	۶۳.۸۵	۰.۲۲۷۱	۱.۶۹۵
51	Water	۱۰.۲	۱۰۱.۳	۲.۴۶۱	۴۲.۹۲	۰.۱۵۳۹	۳.۹۱۲

جدول ۱۴-۴. نتایج خروجی پیل سوختی اسید فسفریک در شماتیک دوم

پارامتر	مقدار
مقدار ولتاژ خروجی هر سل V	۰.۷۳۷۸
افت ولتاژ فعال سازی V	۰.۳۳۵۶
افت ولتاژ غلظتی V	۰.۰۹۷۲۷
افت ولتاژ اهمی V	۰.۰۰۹۲
توان AC خروجی از استک پیل سوختی KW	۴۲۵
بازده انرژی پیل سوختی %	۵۱.۶۶
بازده انرژی پیل سوختی %	۴۹.۴۲
حرارت خروجی از پیل سوختی KW	۳۱۷.۲
انرژی نابود شده کل KW	۲۹۶.۲

جدول ۱۵-۴. نتایج خروجی سیکل ارگانیک رانکین در شماتیک دوم

پارامتر	مقدار
سیال کاری	تولوئن
نرخ جریان سیال عامل سیکل رانکین $kg\ s^{-1}$	۰.۲۱۹
نرخ جریان سیال خنک کاری (آب گرم خانگی) $kg\ s^{-1}$	۰.۷۳۵
دمای خروجی سیال خنک کاری $^{\circ}C$	۶۵.۳۲
توان خالص سیکل رانکین KW	۱۲.۱
راندمان انرژی سیکل رانکین %	۱۱.۴۱
راندمان انرژی سیکل رانکین %	۳۸.۳
بازگشت ناپذیری کل KW	۳۳.۵۴

جدول ۱۶-۴. نتایج عملکرد چیلر جذبی در شماتیک دوم

پارامتر	مقدار
حرارت ورودی به ژنراتور kW	۶۷.۵۸
حرارت دریافتی از اواپراتور kW	۵۱.۴۹
حرارت خروجی از جذب کننده kW	۶۴.۳۲
حرارت خروجی از کندانسور kW	۵۴.۷۵
ضریب عملکرد چیلر جذبی	۰.۷۶۲
بازده اگزرژی چیلر جذبی %	۲۳.۱۲
بازگشت ناپذیری تولیدی kW	۱۹.۳۹

جدول ۱۷-۴. نتایج سیستم گرمایشی در شماتیک دوم

پارامتر	مقدار
نرخ بار گرمایشی KW	۱۳۸.۴
دبی جرمی آب گرم سیستم گرمایشی $kg s^{-1}$	۰.۷۳۵
دمای آب گرم سیستم گرمایشی $^{\circ}C$	۸۰
نرخ بار آب گرم خانگی KW	۹۸.۳
دبی جرمی آب گرم خانگی $kg s^{-1}$	۰.۶۷۱
دمای آب گرم خانگی $^{\circ}C$	۶۰

جدول ۴-۱۸. تخریب اگزرژی و بازده اگزرژی اجزاء سیستم تولید همزمان در شماتیک دوم

اجزاء سیستم	نرخ تخریب اگزرژی KW	بازده اگزرژی %
Tur	۲.۴۴	۸۲.۲
ORC Pump	۰.۰۱	۸۲
Eva 1	۵.۵	۸۰
Cond 1	۲.۶	۷۱
After Burner	۴۸	۶۱.۸۳
Eva 2	۱.۰۳	۶۷
HX5	۹.۷۴	۶۲.۸۸
HX4	4	68.12
SHX	۰.۵۴	۶۲.۶
HX7	۳.۶۷	۶۰.۶
Cond 2	۳.۹	۵۶
FC	۱۸۷.۷	۴۹.۴۲
SR	۳۴۰.۶	۵۰.۹
Abs	۰.۴۶۸	۴۸.۳
HX1	۱۷.۹۷	۴۰.۷
HX6	۲۳.۵	۳۲.۵۴
Gen	۸.۱۸	۲۷.۸
HX2	۵.۱۵	۲۷.۷
Burner	۲۴۵	۲۳
DHW	۲۵.۲۱	۱۷.۳۷

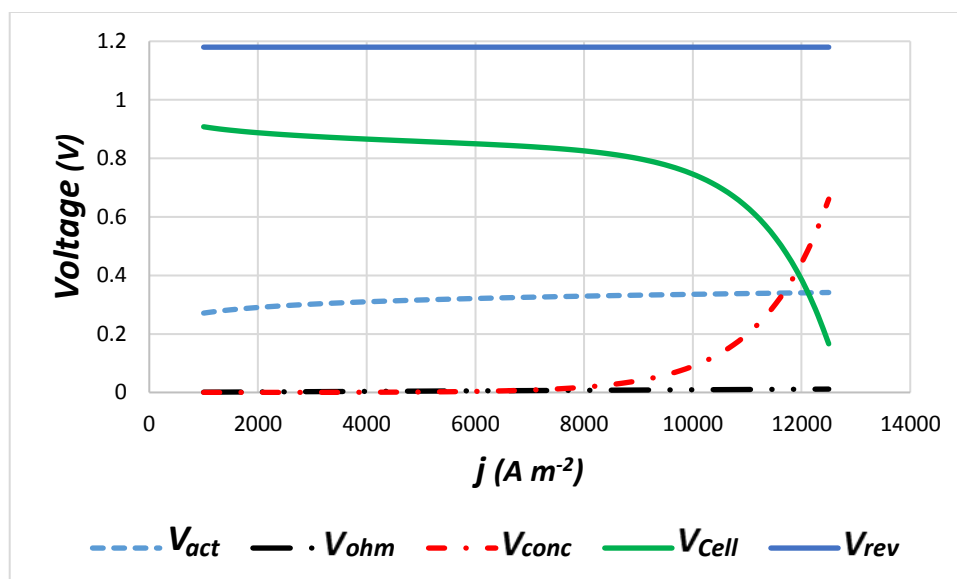
۴-۲-۶-۱-تاثیر چگالی جریان

تاثیر چگالی جریان بر روی عملکرد سیستم تولید همزمان پیشنهادی در شکل های ۴-۱۶ تا ۴-۲۰

نشان داده شده است، محدوده بررسی تاثیر چگالی جریان از 1000 A m^{-2} تا 12500 A m^{-2}

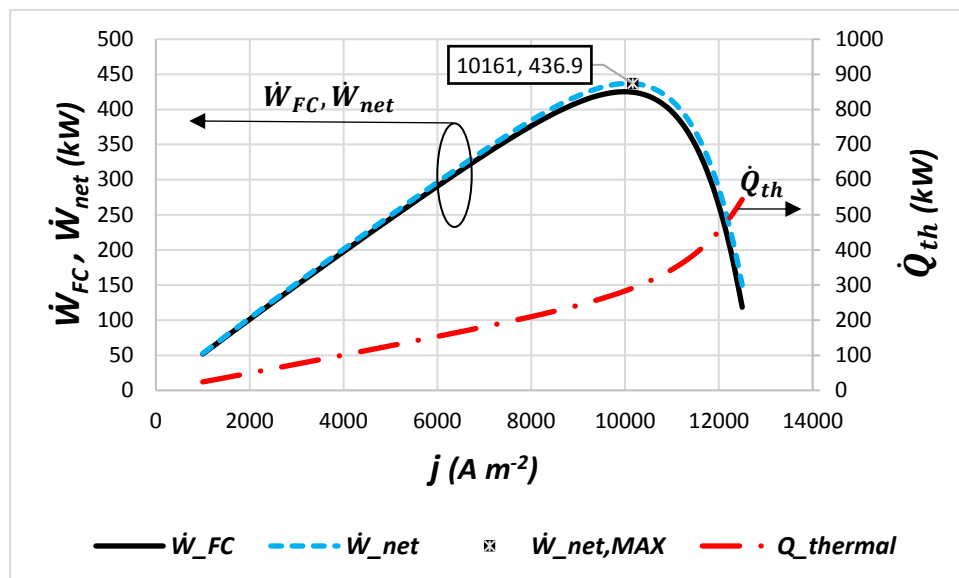
می باشد. دمای و فشار کاری پیل سوختی به ترتیب 180°C و 101.3 kPa و سایر پارامتر های

عملکردی سیکل طبق جداول ۳-۱ در نظر گرفته شده است. بالا بودن چگالی جریان به معنی افزایش سوخت ورودی به پیل سوختی و تبدیل بیشتر انرژی شیمیایی به الکتریسیته می باشد که جریان بیشتری توسط پیل سوختی تولید می شود.



شکل ۴-۱۶. تاثیر چگالی جریان بر روی ولتاژ خروجی پیل سوختی و افت ولتاژها در شماتیک دوم

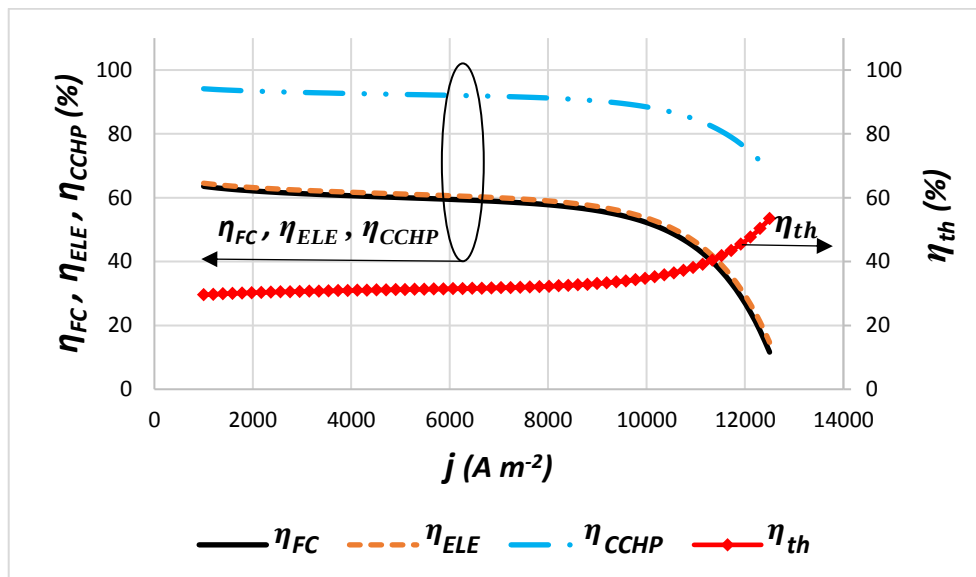
شکل ۴-۱۶ تاثیر چگالی جریان بر روی افت ولتاژها و ولتاژ خروجی پیل سوختی اسید فسفریک را نشان می دهد، با افزایش چگالی جریان افت ولتاژها که عمدتاً ناشی از افت ولتاژ فعالسازی و غلظتی می باشد، افزایش یافته و منجر به کاهش ولتاژ خروجی می شود



شکل ۴-۱۷. تاثیر چگالی جریان بر روی توان و نرخ بار حرارتی سیستم تولید همزمان در شماتیک دوم

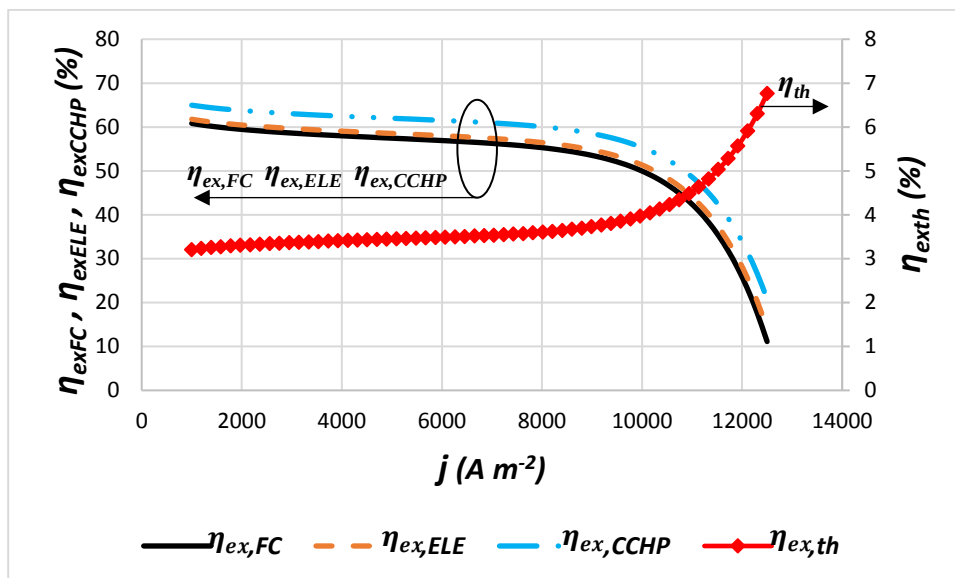
طبق شکل ۴-۱۷ با افزایش چگالی جریان، توان الکتریکی پیل سوختی و توان خالص الکتریکی سیستم تا مقدار مشخصی افزایش می‌یابد و سپس با افزایش چگالی جریان کاهش می‌یابد که علت آن افزایش افت ولتاژ پیل سوختی می‌باشد. ماکزیمم توان الکتریکی پیل سوختی 425.3 kW در چگالی جریان 9990 A m^{-2} باشد، در حالی که افزایش چگالی جریان منجر به افزایش حرارت تولید از پیل سوختی می‌شود، که منجر به بهبود عملکرد زیر سیستم بازیافت حرارت می‌شود. حرارت ورودی به اواپراتور سیکل ارگانیک رانکین متناسب با افزایش چگالی جریان افزایش می‌یابد و منجر به بهبود توان الکتریکی سیستم می‌شود، به طوری که ماکزیمم توان خالص الکتریکی سیستم 436.9 kW در چگالی جریان 10161 A m^{-2} می‌باشد. افزایش چگالی جریان منجر به افزایش هیدروژن تولیدی در ریفرمر بخار می‌شود، از آنجایی که هیدروژن ورودی به طور کامل در پیل سوختی مصرف نمی‌شود، افزایش هیدروژن ورودی به پیل سوختی منجر به افزایش هیدروژن باقی مانده از استک پیل سوختی می‌شود، که باعث بهبود عملکرد مشعل پس سوز و افزایش دمای خروجی از مشعل می‌شود، با افزایش دمای گازهای خروجی از مشعل پس سوز، عملکرد چیلر جذبی بهتر شده و آب سرد بیشتری تولید می‌شود. همچنین آب گرم خانگی تولید شده در مبدل حرارتی (۷) بیشتر می‌شود. همانطور که در شکل ۴-۱۷ مشاهده می‌شود با افزایش چگالی جریان نرخ بار حرارتی سیستم به طور پیوسته افزایش

می یابد.



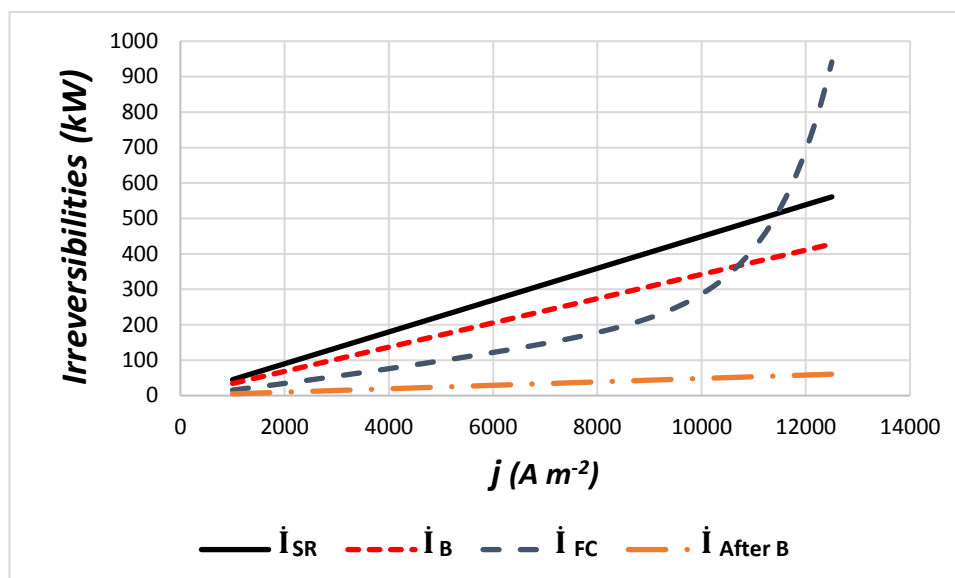
شکل ۱۸-۴. تاثیر چگالی جریان بر روی بازده های انرژی در شماتیک دوم

با افزایش چگالی جریان دبی سوخت مصرفی در ریفورمر بخار و مشعل افزایش یافته و باعث افزایش 936.58 KW در انرژی ورودی به سیستم می شود، تاثیر افزایش سوخت مصرفی منجر به کاهش بازده سیستم در تمام حالت های کارکردی می شود. همانطور که در شکل ها ۱۷-۴ بیان شده افزایش چگالی جریان منجر به افزایش توان پیل سوختی و توان الکتریکی تا مقدار مشخصی می شود و سپس منجر به کاهش هر دو توان می شود که علت آن کاهش ولتاژ پیل خروجی سوختی می باشد، در نتیجه با توجه به شکل ۱۸-۴ بازده پیل سوختی و بازده الکتریکی بیشتر کاهش می یابند، در حالی که با افزایش چگالی جریان بازده حرارتی سیستم 23.86% افزایش می یابد و منجر به بهبود بازده سیستم تولید همزمان سه گانه می شود.



شکل ۴-۱۹. تاثیر چگالی جریان بر روی بازده های اگزرژی در شماتیک دوم

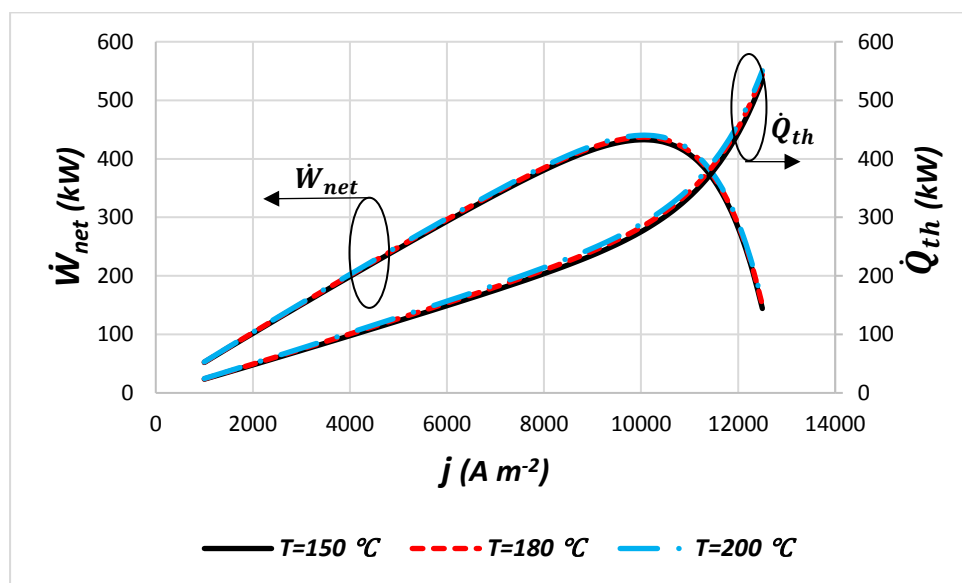
همانطور که از شکل ۴-۱۹ ملاحظه می شود، با افزایش چگالی جریان بازده اگزرژی پیل سوختی، بازده اگزرژی الکتریکی و بازده اگزرژی سیستم تولید همزمان سه گانه کاهش می یابد در حالی که بازده اگزرژی حرارتی سیستم افزایش می یابد، از آنجایی که بازده اگزرژی بیشتر به توان وابسته است، تاثیر کاهش ولتاژ منجر به کاهش بیشتر توان در صورت بازده اگزرژی پیل سوختی، بازده اگزرژی الکتریکی و سیستم تولید همزمان سه گانه شده است و تاثیر افزایش بازده اگزرژی حرارتی سیستم بر روی بازده اگزرژی سیستم تولید همزمان سه گانه کمتر می باشد.



شکل ۲۰-۴. تاثیر چگالی جریان بر روی نرخ بازگشت ناپذیری منابع اصلی سیستم تولید همزمان در شماتیک دوم همانطور که در شکل ۲۰-۴ ملاحظه می شود با افزایش چگالی جریان نرخ تخریب اگزورژی در تمام اجزاء اصلی سیستم تولید همزمان افزایش می یابد، چون با افزایش چگالی جریان، دبی جرمی سوخت ورودی به ریفورمر بخار و مشعل افزایش یافته و نرخ واکنش انجام شده بین سوخت و هوا در مشعل و گاز متان با بخار آب در ریفورمر بخار افزایش می یابد و به ترتیب باعث افزایش حرارت گازهای حاصل از احتراق و دبی جرمی گازهای خروجی از ریفورمر بخار می شود که عمل اصلی تخریب اگزورژی در این اجزاء می باشد، با افزایش سوخت مصرفی در ریفورمر دبی جرمی هیدروژن ورودی به پیل سوختی افزایش یافته که منجر به افزایش اگزورژی ورودی پیل سوختی می شود، و همچنین کاهش ولتاژ خروجی با افزایش چگالی جریان منجر به کاهش اگزورژی خروجی پیل سوختی می شود. افزایش اگزورژی ورودی و کاهش اگزورژی خروجی پیل سوختی باعث افزایش چشمگیری در تخریب اگزورژی آن می شود.

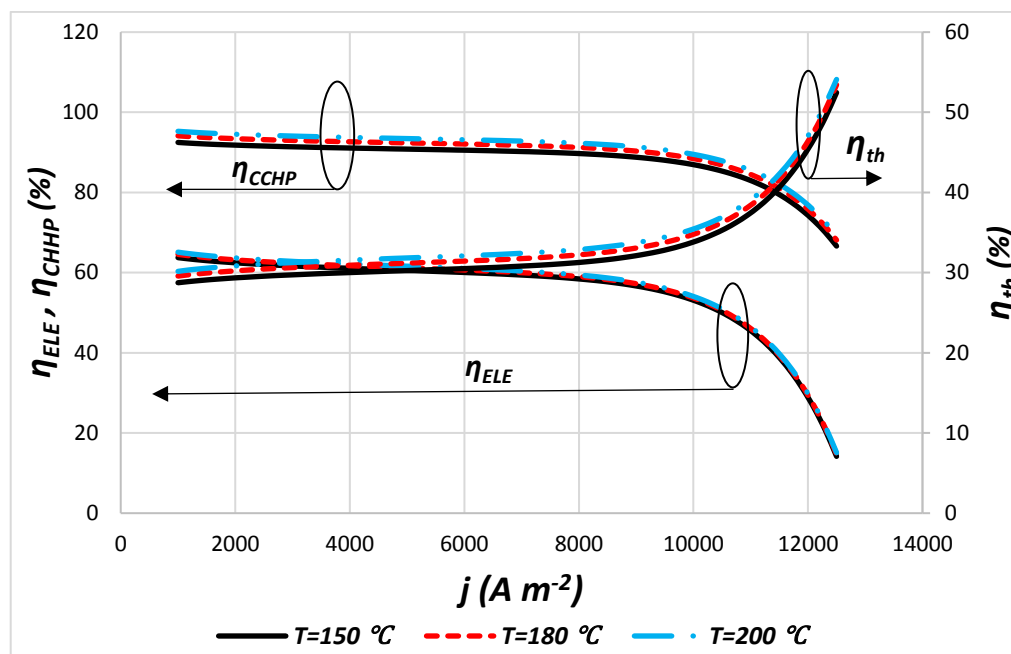
۴-۲-۶-۲- تاثیر دمای کاری

دمای کاری یکی از مهمترین پارامترها در سیستم پیل سوختی اسید فسفریک می باشد. با افزایش دما کاری، ولتاژ نرنست و افت ولتاژ فعال سازی افزایش می یابد، در حالی که با افزایش دما هدایت یونی در الکترولیت افزایش پیدا می کند و منجر به کاهش افت ولتاژ اهمی می شود. در نهایت تاثیر افزایش دمای کاری منجر به افزایش ولتاژ خروجی از پیل سوختی اسید فسفریک می شود.



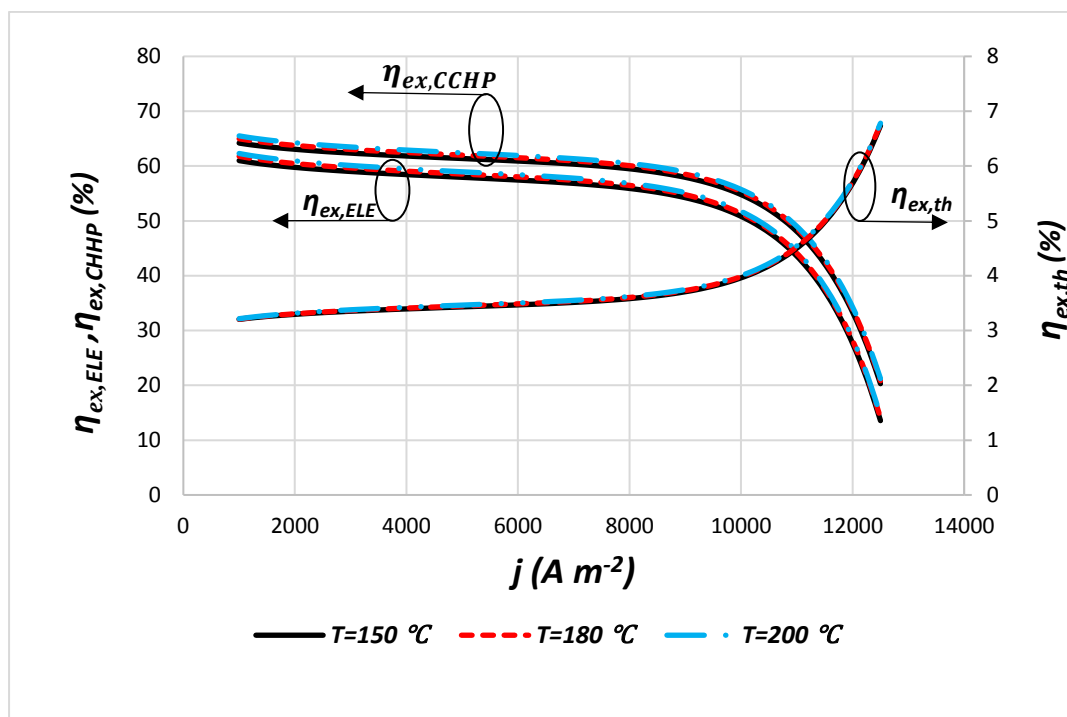
شکل ۴-۲۱: تاثیر دمای کاری بر روی توان و نرخ بار حرارتی سیستم تولید همزمان در شمایک دوم

با افزایش دما کاری، ولتاژ خروجی پیل سوختی افزایش می یابد که منجر به افزایش توان خروجی از پیل سوختی می شود، همچنین با افزایش دمای کاری پیل سوختی، دمای اواپراتور سیکل ارگانیک رانکین افزایش یافته و منجر به افزایش توان تولیدی در توربین می شود، در نتیجه با افزایش دمای کاری از ۱۵۰ °C تا ۲۰۰ °C توان الکتریکی افزایش می یابد. همچنین با افزایش دمای کاری، دمای گازهای خروجی از آند و کاتد افزایش یافته که باعث بهبود عملکرد مشعل پس سوز و افزایش دمای گازهای حاصل از احتراق در آن می شود، در نتیجه گاز خروجی با دما بیشتری وارد مبدل حرارتی (۶) و (۳) می شود که به ترتیب باعث افزایش نرخ بار سرمایشی و نرخ بار آب گرم خانگی می شود. با توجه به شکل ۴-۲۲ با افزایش دما کاری از ۱۵۰ °C تا ۲۰۰ °C نرخ بار حرارتی سیستم افزایش می یابد.



شکل ۴-۲۲. تاثیر دمای کاری بر روی بازده های انرژی در شماتیک دوم

همانطور که از شکل ۴-۲۲ ملاحظه می شود، با افزایش دمای کاری، بازده الکتریکی افزایش یافته است، از آنجایی که با افزایش دمای کاری پیل سوختی، سوخت مصرفی در زیر سیستم ریفرمر بخار تغییری نمی کند و با افزایش دمای کاری، توان پیل سوختی و توان خالص سیکل ارگانیک رانکین در صورت کسر بازده انرژی الکتریکی افزایش می یابند، منجر به افزایش بازده الکتریکی از دمای 150°C تا 200°C شده است. همچنین با افزایش دمای کاری بازده حرارتی سیستم افزایش می یابد که منجر به بهبود بازده انرژی سیستم تولید همزمان سه گانه با افزایش دمای کاری پیل سوختی می شود.

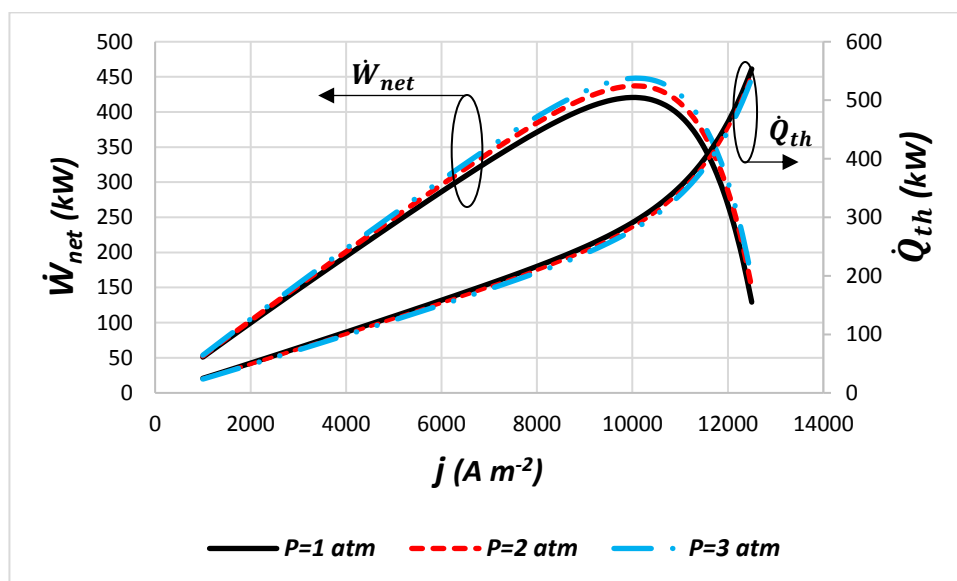


شکل ۲۳-۴. تاثیر دمای کاری بر روی بازده های اگزرژی در شماتیک دوم

همانطور که از شکل ۲۳-۴ ملاحظه می شود، با افزایش دمای کاری پیل سوختی، بازده اگزرژی الکتریکی افزایش می یابد، چون با افزایش دمای کاری اگزرژی ورودی به سیستم تغییر نمی کند، و افزایش توان خالص الکتریکی در صورت کسر بازده اگزرژی منجر به افزایش بازده اگزرژی الکتریکی شده است، از آنجایی که تاثیر بار حرارتی بر روی بازده اگزرژی کمتر از توان الکتریکی می باشد، تاثیر افزایش بازده اگزرژی حرارتی با افزایش دمای کاری پیل سوختی بر روی بازده اگزرژی سیستم تولید همزمان سه گانه کمتر می باشد.

۴-۲-۳-۳ تاثیر فشار کاری

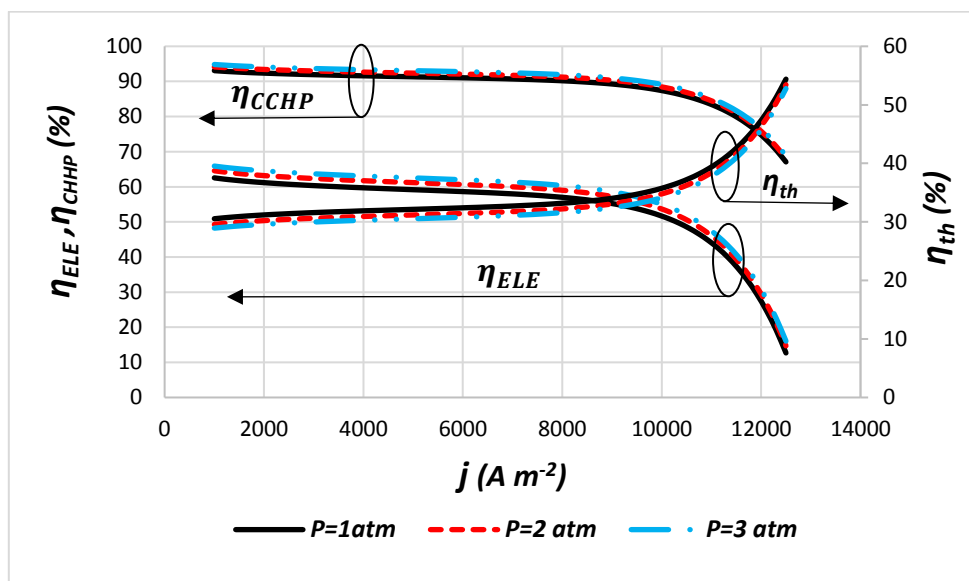
افزایش فشار کاری منجر به افزایش فشار های جزئی واکنش دهنده ها و فراورده ها، در واکنش الکتروشیمیایی شده که باعث افزایش ولتاژ تئوری می شود. از این رو باعث بهبود ولتاژ خروجی پیل سوختی می شود.



شکل ۴-۲۴. تاثیر فشار کاری بر روی توان و نرخ بار حرارتی سیستم تولید همزمان در شماتیک دوم

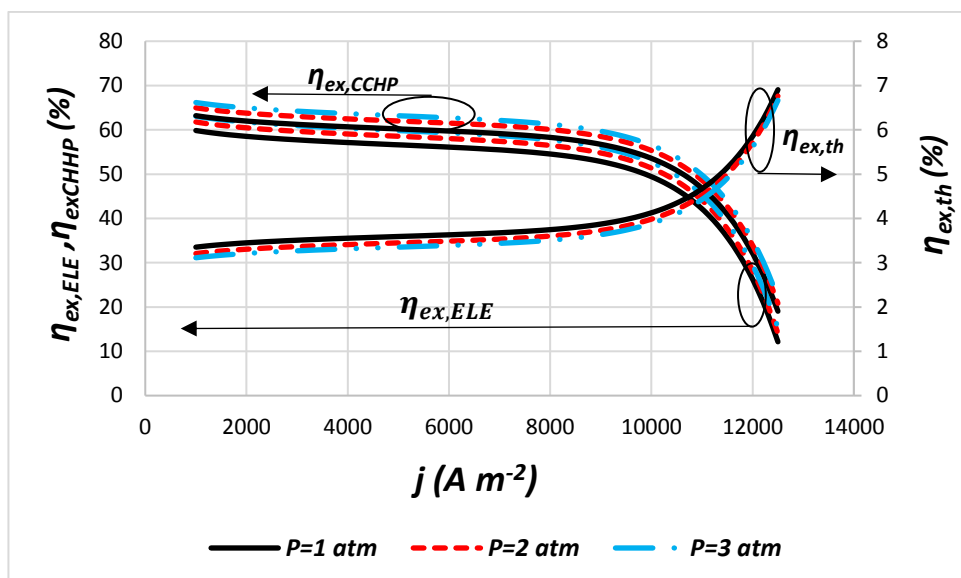
همانطور که از شکل ۴-۲۴ ملاحظه می شود، افزایش فشار کاری پیل سوختی از ۱ اتمسفر تا ۳ اتمسفر منجر به افزایش توان الکتریکی و کاهش بار حرارتی سیستم می شود. با افزایش فشار کاری، توان خروجی پیل سوختی افزایش می یابد، و طبق رابطه (۳-۲۱) حرارت تولیدی ناشی از واکنش الکتروشیمیایی در پیل سوختی کاهش می یابد و باعث کاهش حرارت ورودی به اواپراتور سیکل ارگانیک رانکین می شود که باعث کاهش توان خالص تولید سیکل ارگانیک رانکین با افزایش فشار کاری پیل سوختی می شود، اما تاثیر افزایش توان پیل سوختی بیشتر از کاهش توان خالص سیکل ارگانیک رانکین بر روی توان الکتریکی بوده است و باعث افزایش توان الکتریکی می شود، همانطور که از شکل ۴-۲۵ مشاهد می شود در چگالی جریان های بالا تاثیر کاهش توان خالص سیکل ارگانیک رانکین بیشتر شده و منجر به کاهش تاثیر فشار کاری بر روی توان الکتریکی شده است. بار حرارتی

سیستم با افزایش فشار کاری کاهش می‌یابد، چون حرارت تولید پیل سوختی با افزایش فشار کاری کاهش می‌یابد و منجر به کاهش نرخ بار گرمایشی در مبدل حرارتی (۷) می‌شود، از آنجایی که آنتالپی گازهای ایده ال به فشار بستگی ندارد، افزایش فشار گازهای خروجی از آند و کاتد تاثیری بر روی نرخ بار سرمایشی و نرخ بار آب گرم خانگی نداشته است.



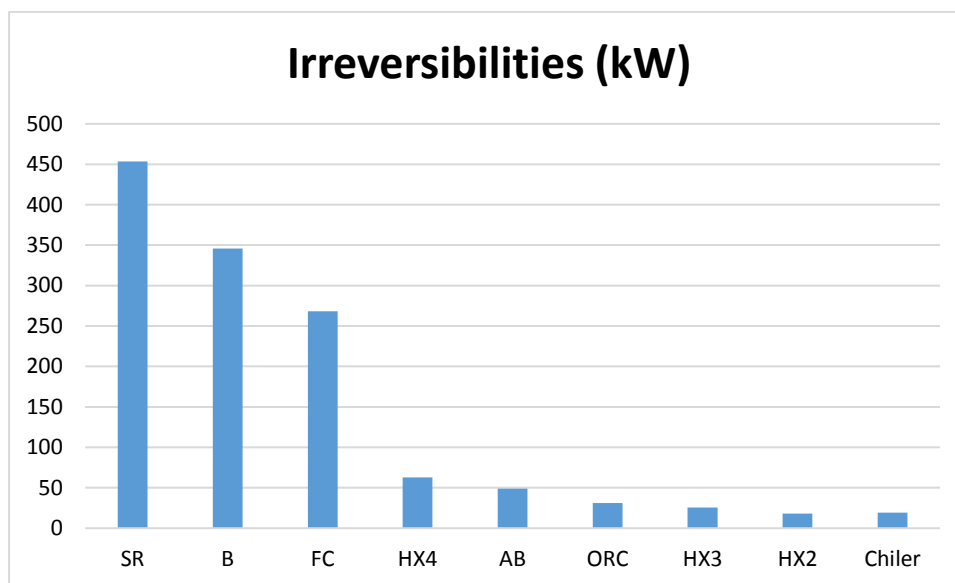
شکل ۲۵-۴. تاثیر فشار کاری بر روی بازده ها انرژی در شماتلک دوم

همانطور که از شکل ۲۵-۴ ملاحظه می‌شود، با افزایش فشار کاری از ۱ اتمسفر تا ۳ اتمسفر بازده الکتریکی افزایش می‌یابد، از آنجایی که با افزایش فشار کاری سوخت مصرفی در زیر سیستم ریفرمر بخار ثابت می‌ماند، انرژی ورودی به سیستم تغییری نکرده در حالی که افزایش فشار کاری منجر به افزایش توان خالص الکتریکی سیستم در صورت بازده الکتریکی شده است و سیستم از انرژی ورودی خود استفاده بیشتری می‌کند. با افزایش فشار کاری بازده حرارتی سیستم کاهش می‌یابد که منجر به کاهش تاثیر فشار کاری بر روی بازده سیستم تولید همزمان سه گانه بازده می‌شود.



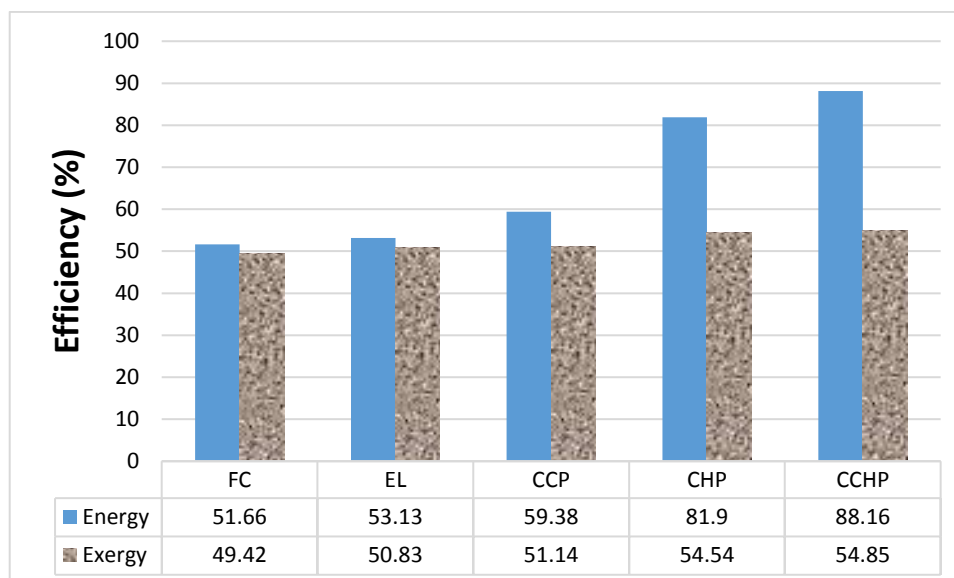
شکل ۲۶-۴. تاثیر فشار کاری بر روی بازده های اگزورژی در شماتیک دوم

همانطور که از شکل ۲۶-۴ ملاحظه می شود، با افزایش فشار کاری پیل سوختی، بازده اگزورژی الکتریکی افزایش می یابد، چون با افزایش فشار کاری اگزورژی ورودی به سیستم تغییر نمی کند، و افزایش توان خالص الکتریکی در صورت کسر بازده اگزورژی منجر به افزایش بازده اگزورژی الکتریکی شده است، از آنجایی که تاثیر بار حرارتی بر روی بازده اگزورژی کمتر از توان الکتریکی می باشد، تاثیر کاهش بازده اگزورژی حرارتی با افزایش فشار کاری پیل سوختی بر روی بازده اگزورژی سیستم تولید همزمان سه گانه کمتر می باشد.



شکل ۲۷-۴. نرخ بازگشت ناپذیری اجزاء اصلی شماتیک دوم

باتوجه به شکل ۲۷-۴ ملاحظه می‌شود که منبع اصلی بازگشت ناپذیری مربوط به ریفمرم بخار، مشعل و پیل سوختی می‌باشد. در این اجزاء عمده ترین تخریب اگزرژی ناشی از بازگشت ناپذیری های بالای واکنش شیمیایی، انتقال حرارت و اگزرژی تلف شده ناشی از جریان گازهای خروجی می‌باشد. بنابراین بهبود بیشتر عملکرد این اجزاء لازم است.



شکل ۲۸-۴. بازده انرژی و انرژی شماتیک دوم در حالت های مختلف کاری

همانطور که از شکل ۲۸-۴ ملاحظه می شود، استفاده از سیکل ارگانیک رانکین منجر به افزایش ۲.۸۴٪ و ۲.۸۵٪ به ترتیب در بازده انرژی و انرژی الکتریکی شده است، در حالی که اضافه کردن چیلر جذبی منجر به افزایش ۱۲٪ و ۰.۶۲٪ به ترتیب در بازده انرژی و انرژی تولید همزمان برق-سرمایش شده است، استفاده از مبدل حرارتی آب گرم خانگی برای بازیافت حرارت گازهای خروجی از مشعل پس سوز و مبدل حرارتی (۶) منجر به افزایش ۵۴.۱٪ و ۸.۲۵٪ به ترتیب در بازده انرژی و انرژی تولید همزمان برق-حرارت شده است، و در نهایت استفاده از تمامی اجزاء سیستم تولید همزمان پیشنهادی برای تامین نیاز انرژی ساختمان منجر به افزایش ۷۰٪ و ۱۰.۹٪ به ترتیب در بازده انرژی و انرژی تولید همزمان سه گانه نسبت به کارکرد پیل سوختی به تنهایی شده است. که نشان دهنده بهبود عملکرد پیل سوختی هنگام استفاده از سیستم تولید همزمان پیشنهادی می باشد.

فصل پنجم

نتیجه گیری و ارائه پیشنهاداتی برای آینده

۵-۱- نتیجه گیری

در این پایان نامه به تحلیل انرژی و انرژی سیستم تولید همزمان سه گانه جدید مبتنی بر پیل سوختی اسید فسفریک به همراه سیکل ارگانیک رانکین پرداخته شده است. عملکرد سیستم پیشنهادی تحت تاثیر تغییرات چگالی جریان و دما و فشار کاری پیل سوختی دمای محیط، فشار اواپراتور و دبی جرمی سوخت مورد مطالعه قرار گرفته است،

۵-۱-۱- نتیجه گیری شماتیک اول

برخی از مهم ترین نتایج بدست آمده برای شماتیک اول به شرح زیر است: از دید گاه انرژی نتایج بدست آمده را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- توان الکتریکی خالص سیستم تولید همزمان سه گانه 435.7 KW ، ظرفیت سرمایشی 26 KW ، ظرفیت گرمایشی 153.3 KW ، و بار آب گرم خانگی 97.42 KW می باشد.
- بازده پیل سوختی به تنهایی برای تامین توان 55.52% ، در حالت هیبریدی همراه سیکل ارگانیک رانکین برای تامین توان 56.97% ، در حالت تولید همزمان برق و سرمایش 60.38% ، در حالت تولید همزمان برق و حرارت 89.82% و در حالت تولید همزمان سه گانه 93.23% بدست آمده است.
- از دید گاه انرژی نتایج بدست آمده را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:
- بازده انرژی پیل سوختی به تنهایی برای تامین توان 56.42% ، در حالت ترکیبی پیل سوختی به همراه سیکل ارگانیک رانکین برای تامین توان 57.9% ، در حالت تولید همزمان برق و سرمایش 58.07% ، در حالت تولید همزمان برق و حرارت 61.07% و در حالت کارکرد تولید همزمان سه گانه 61.25% بدست آمده است.
- تاثیر چگالی جریان نسبت به سایر پارامتر ها بر روی عملکرد سیستم تولید همزمان بیشتر است.

- بازگشت ناپذیری کل سیستم تولید همزمان 440 kW بدست آمده است.
- افزایش چگالی جریان منجر به افزایش 1131 kW در بازگشت ناپذیری کل سیستم شده است.
- افزایش فشار و دمای کاری در چگالی جریان کاری به ترتیب منجر به کاهش 37 kW و 40 kW در بازگشت ناپذیری کلی سیستم شده است.
- بیشترین بازگشت ناپذیری در سیستم تولید همزمان پیشنهادی که باید مورد توجه قرار بگیرد به منظور بهبود عملکرد سیستم مربوط به پیل سوختی اسید فسفریک است.

۵-۱-۲- نتیجه گیری شماتیک دوم

از دید گاه انرژی نتایج بدست آمده را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- توان الکتریکی خالص سیستم تولید همزمان سه گانه 437.1 kW ، ظرفیت سرمایشی 51.49 kW ، ظرفیت گرمایشی 138.4 kW ، و بار آب گرم خانگی 98.3 kW می باشد.
- بازده پیل سوختی به تنهایی برای تامین توان 51.66% ، در حالت هیبریدی همراه سیکل ارگانیک رانکین برای تامین توان 53.13% ، در حالت تولید همزمان برق- سرمایش 59.38% ، در حالت تولید همزمان برق- حرارت 81.9% ، و در حالت تولید همزمان سه گانه 88.16% بدست آمده است.

از دید گاه انرژی نتایج بدست آمده را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- بازده انرژی پیل سوختی به تنهایی برای تامین توان 49.42% در حالت هیبریدی همراه سیکل ارگانیک رانکین برای تامین توان الکتریکی 50.38% ، در حالت تولید همزمان برق و سرمایش 51.14% ، در حالت تولید همزمان برق و حرارت 54.54% ، و در حالت کارکرد تولید همزمان سه گانه 54.85% بدست آمده است.

- بازگشت ناپذیری کل سیستم تولید همزمان 1335 kW بدست آمده است.
- افزایش چگالی جریان منجر به افزایش 2154 kW در بازگشت ناپذیری کلی سیستم شده است.
- افزایش فشار و دمای کاری در چگالی جریان کاری به ترتیب منجر به کاهش 45 kW و 40 kW در بازگشت ناپذیری کلی سیستم شده است.
- بیشترین بازگشت ناپذیری در سیستم تولید همزمان پیشنهادی که باید مورد توجه قرار بگیرد به منظور بهبود عملکرد سیستم مربوط به ریفرمر بخار، پیل سوختی اسید فسفریک و مشعل است.

۵-۲-ارائه پیشنهاداتی برای آینده

۱. مدل سازی و طراحی سیستم جدید با استفاده از سیستم بازیافت حرارت کالینا و چیلر جذب سطحی
۲. بررسی شرایط استفاده از انرژی خورشیدی و انرژی بادی به منظور تامین هیدروژن
۳. تحلیل $4E$ (اقتصادی، انرژی، محیط زیست) بر روی سیستم پیشنهادی

مراجع

- [1] H. [Al Moussawi], F. Fardoun, and H. Louahlia-Gualous, "Review of tri-generation technologies: Design evaluation, optimization, decision-making, and selection approach," *Energy Convers. Manag.*, vol. 120, pp. 157–196, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.085>.
- [2] D. W. Wu and R. Z. Wang, "Combined cooling, heating and power: A review," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 32, no. 5, pp. 459–495, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.02.001>.
- [3] J.-J. Wang, Y.-Y. Jing, C.-F. Zhang, and Z. (John) Zhai, "Performance comparison of combined cooling heating and power system in different operation modes," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 12, pp. 4621–4631, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.007>.
- [4] E. Açıkkalp and M. H. Ahmadi, "Parametric investigation of phosphoric acid fuel cell - Thermally regenerative electro chemical hybrid system," *J. Clean. Prod.*, vol. 203, pp. 585–600, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.231>.
- [5] A. Huicochea, W. Rivera, G. Gutiérrez-Urueta, J. C. Bruno, and A. Coronas, "Thermodynamic analysis of a trigeneration system consisting of a micro gas turbine and a double effect absorption chiller," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 16, pp. 3347–3353, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.06.016>.
- [6] F. A. Al-Sulaiman, F. Hamdullahpur, and I. Dincer, "Performance comparison of three trigeneration systems using organic rankine cycles," *Energy*, vol. 36, no. 9, pp. 5741–5754, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.06.003>.
- [7] M. Ebrahimi and A. Keshavarz, "Climate impact on the prime mover size and design of a CCHP system for the residential building," *Energy Build.*, vol. 54, pp. 283–289, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.029>.
- [8] M. Ghouse, H. Abaoud, A. Al-Boeiz, and M. AbdulHadi, "Development of a 1 kW Phosphoric Acid Fuel Cell stack," *Appl. Energy*, vol. 60, no. 3, pp. 153–167, 1998, doi: [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(98\)00031-2](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(98)00031-2).
- [9] M. A. Darwish, "Building air conditioning system using fuel cell: Case study for Kuwait," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 27, no. 17, pp. 2869–2876, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.06.001>.

- [10] S. Mekhilef, R. Saidur, and A. Safari, "Comparative study of different fuel cell technologies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 1, pp. 981–989, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.020>.
- [11] P. Yang, H. Zhang, and Z. Hu, "Parametric study of a hybrid system integrating a phosphoric acid fuel cell with an absorption refrigerator for cooling purposes," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 5, pp. 3579–3590, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.10.149>.
- [12] X. Chen, Y. Wang, Y. Zhao, and Y. Zhou, "A study of double functions and load matching of a phosphoric acid fuel cell/heat-driven refrigerator hybrid system," *Energy*, vol. 101, pp. 359–365, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.029>.
- [13] H. Zhang, G. Lin, and J. Chen, "Multi-objective optimisation analysis and load matching of a phosphoric acid fuel cell system," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 4, pp. 3438–3446, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.11.030>.
- [14] A. Mahmoudi, M. Fazli, and M. R. Morad, "A recent review of waste heat recovery by Organic Rankine Cycle," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 143, pp. 660–675, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.136>.
- [15] J. Deng, R. Z. Wang, and G. Y. Han, "A review of thermally activated cooling technologies for combined cooling, heating and power systems," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 37, no. 2, pp. 172–203, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2010.05.003>.
- [16] M. Jradi and S. Riffat, "Tri-generation systems: Energy policies, prime movers, cooling technologies, configurations and operation strategies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 32, pp. 396–415, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.039>.
- [17] X. Chen, G. Gong, Z. Wan, L. Luo, and J. Wan, "Performance analysis of 5 kW PEMFC-based residential micro-CCHP with absorption chiller," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 33, pp. 10647–10657, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.06.139>.
- [18] B. Najafi, S. [De Antonellis], M. Intini, M. Zago, F. Rinaldi, and A. Casalegno, "A tri-generation system based on polymer electrolyte fuel cell and desiccant wheel – Part A: Fuel cell system modelling and partial load analysis," *Energy Convers. Manag.*, vol. 106, pp. 1450–1459, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.004>.
- [19] M. Intini, S. [De Antonellis], C. M. Joppolo, and A. Casalegno, "A trigeneration system based on polymer electrolyte fuel cell and desiccant wheel – Part B: Overall system design and energy performance analysis," *Energy Convers. Manag.*, vol. 106, pp. 1460–1470, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.005>.
- [20] E. Baniasadi, S. Toghyani, and E. Afshari, "Exergetic and exergoeconomic evaluation of a trigeneration system based on natural gas-PEM fuel cell," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42,

no. 8, pp. 5327–5339, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.063>.

- [21] M. Chahartaghi and B. A. Kharkeshi, “Performance analysis of a combined cooling, heating and power system with PEM fuel cell as a prime mover,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 128, pp. 805–817, Jan. 2018, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2017.09.072](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.072).
- [22] G. Loreti, A. L. Facci, I. Baffo, and S. Ubertini, “Combined heat, cooling, and power systems based on half effect absorption chillers and polymer electrolyte membrane fuel cells,” *Appl. Energy*, vol. 235, pp. 747–760, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.109>.
- [23] M. Ebrahimi and E. Derakhshan, “Thermo-environ-economic evaluation of a trigeneration system based on thermoelectric generator, two-bed adsorption chiller, and polymer exchange membrane fuel cell,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 180, pp. 269–280, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.093>.
- [24] A. H. Keshavarzzadeh, P. Ahmadi, and M. R. Safaei, “Assessment and optimization of an integrated energy system with electrolysis and fuel cells for electricity, cooling and hydrogen production using various optimization techniques,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 39, pp. 21379–21396, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.127>.
- [25] I. Verhaert, G. Mulder, and M. [De Paepe], “Evaluation of an alkaline fuel cell system as a micro-CHP,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 126, pp. 434–445, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.058>.
- [26] J. Wang, J. Wu, Z. Xu, and M. Li, “Thermodynamic performance analysis of a fuel cell trigeneration system integrated with solar-assisted methanol reforming,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 150, pp. 81–89, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.012>.
- [27] I. Moradpoor and M. Ebrahimi, “Thermo-environ analyses of a novel trigeneration cycle based on clean technologies of molten carbonate fuel cell, stirling engine and Kalina cycle,” *Energy*, vol. 185, pp. 1005–1016, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.112>.
- [28] F. Zink, Y. Lu, and L. Schaefer, “A solid oxide fuel cell system for buildings,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 48, no. 3, pp. 809–818, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.09.010>.
- [29] I. Malico, A. P. Carvalhinho, and J. Tenreiro, “Design of a trigeneration system using a high-temperature fuel cell,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 33, no. 2, pp. 144–151, 2009, doi: [10.1002/er.1430](https://doi.org/10.1002/er.1430).
- [30] F. A. Al-Sulaiman, I. Dincer, and F. Hamdullahpur, “Energy analysis of a trigeneration plant based on solid oxide fuel cell and organic Rankine cycle,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 10, pp. 5104–5113, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.09.047>.
- [31] Z. Yu, J. Han, and X. Cao, “Investigation on performance of an integrated solid oxide fuel

cell and absorption chiller tri-generation system,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 19, pp. 12561–12573, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.06.147>.

- [32] F. Ranjbar, A. Chitsaz, S. M. S. Mahmoudi, S. Khalilarya, and M. A. Rosen, “Energy and exergy assessments of a novel trigeneration system based on a solid oxide fuel cell,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 87, pp. 318–327, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.014>.
- [33] A. Chitsaz, S. M. [S. Mahmoudi], and M. A. Rosen, “Greenhouse gas emission and exergy analyses of an integrated trigeneration system driven by a solid oxide fuel cell,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 86, pp. 81–90, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.040>.
- [34] A. Chitsaz, A. S. Mehr, and S. M. S. Mahmoudi, “Exergoeconomic analysis of a trigeneration system driven by a solid oxide fuel cell,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 106, pp. 921–931, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.009>.
- [35] E. Gholamian, V. Zare, and S. M. Mousavi, “Integration of biomass gasification with a solid oxide fuel cell in a combined cooling, heating and power system: A thermodynamic and environmental analysis,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 44, pp. 20396–20406, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.217>.
- [36] H. [Al Moussawi], F. Fardoun, and H. Louahlia, “4-E based optimal management of a SOFC-CCHP system model for residential applications,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 151, pp. 607–629, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.09.020>.
- [37] H. Zhao and Q. Hou, “Thermodynamic performance study of the MR SOFC-HAT-CCHP system,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 8, pp. 4332–4349, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.129>.
- [38] M. Mehrpooya, M. Sadeghzadeh, A. Rahimi, and M. Pouriman, “Technical performance analysis of a combined cooling heating and power (CCHP) system based on solid oxide fuel cell (SOFC) technology – A building application,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 198, p. 111767, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.078>.
- [39] Y. Liu, J. Han, and H. You, “Performance analysis of a CCHP system based on SOFC/GT/CO₂ cycle and ORC with LNG cold energy utilization,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 56, pp. 29700–29710, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.201>.
- [40] P. L. Zervas, M. K. Koukou, and N. C. Markatos, “Predicting the effects of process parameters on the performance of phosphoric acid fuel cells using a 3-D numerical approach,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 47, no. 18, pp. 2883–2899, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.03.030>.
- [41] Ö. Kaşka, “Energy and exergy analysis of an organic Rankine for power generation from

waste heat recovery in steel industry,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 77, pp. 108–117, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.026>.

- [42] M. Azhar and M. A. Siddiqui, “Exergy analysis of single to triple effect lithium bromide-water vapour absorption cycles and optimization of the operating parameters,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 180, pp. 1225–1246, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.062>.
- [43] S. Sadeghi and I. Baniasad Askari, “Performance and economic investigation of a combined phosphoric acid fuel cell/organic Rankine cycle/electrolyzer system for sulfuric acid production; Energy-based organic fluid selection,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 44, no. 4, pp. 2704–2725, 2020, doi: [10.1002/er.5073](https://doi.org/10.1002/er.5073).
- [44] S. Ahmadi, H. Ghaebi, and A. Shokri, “A comprehensive thermodynamic analysis of a novel CHP system based on SOFC and APC cycles,” *Energy*, vol. 186, p. 115899, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115899>.
- [45] E. Bellos and C. Tzivanidis, “Parametric analysis and optimization of a solar driven trigeneration system based on ORC and absorption heat pump,” *J. Clean. Prod.*, vol. 161, pp. 493–509, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.159>.
- [46] S. Toghyani, E. Afshari, and E. Baniasadi, “Performance evaluation of an integrated proton exchange membrane fuel cell system with ejector absorption refrigeration cycle,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 185, pp. 666–677, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.035>.
- [47] W. Chen, C. Xu, H. Wu, Y. Bai, Z. Li, and B. Zhang, “Energy and exergy analyses of a novel hybrid system consisting of a phosphoric acid fuel cell and a triple-effect compression–absorption refrigerator with [mmim]DMP/CH₃OH as working fluid,” *Energy*, vol. 195, p. 116951, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116951>.
- [48] T. Elmer, M. Worall, S. Wu, and S. Riffat, “Assessment of a novel solid oxide fuel cell tri-generation system for building applications,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 124, pp. 29–41, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.010>.
- [49] T.-H. Yen *et al.*, “Experimental investigation of 1kW solid oxide fuel cell system with a natural gas reformer and an exhaust gas burner,” *J. Power Sources*, vol. 195, no. 5, pp. 1454–1462, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.09.021>.
- [50] K. Rahbar, S. Mahmoud, R. K. Al-Dadah, N. Moazami, and S. A. Mirhadizadeh, “Review of organic Rankine cycle for small-scale applications,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 134, pp. 135–155, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.023>.
- [51] J. Bao and L. Zhao, “A review of working fluid and expander selections for organic Rankine

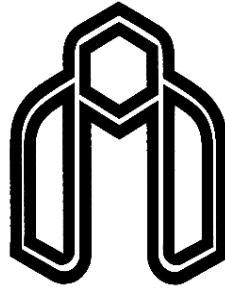
cycle,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 24, pp. 325–342, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.040>.

- [52] M. A. Rosen, “The exergy of stratified thermal energy storages,” *Sol. Energy*, vol. 71, no. 3, pp. 173–185, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(01\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(01)00036-6).
- [53] B. Rezaie, B. V Reddy, and M. A. Rosen, “Exergy analysis of thermal energy storage in a district energy application,” *Renew. Energy*, vol. 74, pp. 848–854, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.014>.
- [54] A. Arora and S. C. Kaushik, “Theoretical analysis of LiBr/H₂O absorption refrigeration systems,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 33, no. 15, pp. 1321–1340, 2009, doi: 10.1002/er.1542.
- [55] S. Anvari, H. Taghavifar, and A. Parvishi, “Thermo- economical consideration of Regenerative organic Rankine cycle coupling with the absorption chiller systems incorporated in the trigeneration system,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 148, pp. 317–329, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.077>.
- [56] A. Yilanci, I. Dincer, and H. K. Ozturk, “Performance analysis of a PEM fuel cell unit in a solar–hydrogen system,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 24, pp. 7538–7552, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.10.016>.
- [57] A. P. Simpson and A. E. Lutz, “Exergy analysis of hydrogen production via steam methane reforming,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 18, pp. 4811–4820, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.08.025>.
- [58] M. Chahartaghi and B. A. Kharkeshi, “Performance analysis of a combined cooling, heating and power system with PEM fuel cell as a prime mover,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 128, pp. 805–817, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.072>.

Abstract:

In this thesis, a novel trigeneration system based on a phosphoric acid fuel cell and an Organic Rankin Cycle is modeled and analyzed from energy and exergy viewpoint. In this thesis two configurations for trigeneration system proposed to recover waste heat energy of fuel cell. The system consists of a Hydrogen storage tank, phosphoric acid fuel cell, after burner, Organic Rankin Cycle, Thermal Energy storage tank, steam reformer, burner and heat exchangers. The proposed system, using Three heat recovery Systems (ORC-ACH-HX) to meet the Cooling, Heating and Power needs of a building in order to utilize waste heat from a fuel cell. The mathematical models PAFC, ORC and ACH are validated with the results of other articles in this research. The effect of important PAFC performance Parameters (current density, temperature and operating pressure) on the performance of the proposed trigenerating system from the perspective of energy and exergy are investigated. The results show that the energy and exergy efficiency of the fuel cell in the first configuration are 55.52% and 56.42% respectively, and in the second configuration 51.66% and 49.42% have been calculated respectively. Whereas when three heat recovery systems (ORC-ACH-HX) to utilize the waste heat from a fuel cell, the energy and exergy efficiency in the first configuration reach 93.23% and 61.25% respectively and in the second configuration they reach 88.16% and 54.85% respectively. Also, the study shows that as the current density and temperature of the PAFC increases, the energy and exergy efficiencies of the power cycle, cooling cogeneration, heating cogeneration and trigeneration both decrease. While increasing the operating pressure causes the increased energy and exergy efficiency in the expressed states. In addition, increasing the working pressure leads to increased energy efficiency and exergy efficiency both. The highest exergy destruction in the first configuration is related to PAFC and AB respectively, while in the second configuration the highest exergy destruction is related to SR, B and PAFC respectively. The highest and lowest exergy efficiencies in the both configurations are related to turbine and domestic hot water heat exchangers respectively.

Keywords: Trigeneration; Exergy; Phosphoric Acid fuel cell; Organic Rankine cycle; Steam reforming



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Energy Systems Engineering

**Energy and exergy analysis of a combined cooling, heating
and power systems with Phosphoric Acid fuel cell as a prime
mover integrated with ORC**

By:

Mehrdad Einanlou

Supervisors:

Dr. Mahmood Chahartaghi

Dr. Seyed Majid Hashemian

August, 2020