



دانشکده فنی و مهندسی
پایان نامه کارشناسی مهندسی مکانیک

عنوان:

**بررسی انواع سیستم های ذخیره انرژی
(به صورت ویژه روش هوای فشرده)**

دانشجو:

رامین نوردیده

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر امین امیری دلوئی

شهریور ماه ۱۳۹۸

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

واگذاری حقوق:

کلیه حقوق مادی و معنوی مرتبط بر نتایج مطالعات،

ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع

این پایان نامه (رساله) متعلق به گروه مهندسی مکانیک دانشگاه بجنورد است.

*** تعهد نامه ***

اینجانب رامین نوردیده، دانشجوی کارشناسی رشته مهندسی مکانیک دانشگاه بجنورد، دانشکده فنی و مهندسی گروه مکانیک، تعهد می نمایم که محتوای این پایان نامه نتیجه تلاش و تحقیقات خود بوده و از جایی کپی برداری نشده و به پایان رسانیدن آن نتیجه تلاش و مطالعات مستمر اینجانب و راهنمایی و مشاوره اساتید بوده است.

با تقدیم احترام

۱۳۹۸ / ۶ / ۱۰



دانشکده فنی و مهندسی
گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی مهندسی مکانیک

عنوان:

بررسی انواع سیستم های ذخیره انرژی
(به صورت ویژه روش هوای فشرده)

دانشجو:

رامین نوردیده

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر امین امیری دلوئی

در تاریخ ۱۰ / ۶ / ۱۳۹۸ توسط استاد راهنما مورد بررسی قرار گرفت و با نمره ۱۸.۵ به تصویب رسید.

امضاء استاد راهنما

تقدیم به:

پدر و مادر مهربانم

و

تمامی عزیزانی

که موفقیت های زندگی ام بدون حمایت، تشویق و عشق بی پایانشان ممکن نبود.

تشکر و قدردانی:

بر خود واجب می دانم از استاد فرزانه، جناب آقای دکتر امین امیری دلوئی که به عنوان استاد راهنما در مراحل مختلف این پایان نامه همواره با سعه صدر و گشاده رویی در کنار من بودند و در طول مدت تحصیل از راهنمایی های اخلاقی و علمی ایشان بهره جسته ام تشکر و قدردانی نمایم.

چکیده ۵

فصل اول (مروری بر انواع انرژی های نو و تجدید پذیر)

۱- مقدمه ۷

۱-۲ انواع انرژی های نو ۸

۱-۲-۱ انرژی بادی ۸

۱-۲-۲ زیست انرژی ۸

۱-۲-۳ انرژی زمین گرمایی ۹

۱-۲-۴ انرژی اقیانوس ۹

۱-۲-۴-۱ انرژی جزر و مد ۹

۱-۲-۴-۲ انرژی موج ۱۰

۱-۲-۵ انرژی گرادیان شوری ۱۱

۱-۲-۶ انرژی خورشیدی ۱۱

۱-۲-۶-۱ فتولتائیک ۱۱

۱-۲-۶-۲ نیروی خورشیدی متمرکز ۱۱

۱-۳ موقعیت جغرافیایی ایران بهره برداری از انرژی خورشیدی ۱۲

فصل دوم (بررسی انواع روش های ذخیره سازی انرژی)

۱-۲ مقدمه ۱۵

۱-۲-۱ یکنواخت نبودن منحنی بار و پیک ۱۵

- ۱۶..... ۳-۲ روش های ذخیره سازی انرژی
- ۱۶..... ۱-۳-۲ انرژی مکانیکی
- ۱۷..... ۱-۱-۳-۲ ذخیره سازی تلمبه ای
- ۱۷..... ۲-۱-۳-۲ ذخیره سازی چرخ طیار
- ۱۷..... ۱-۲-۱-۳-۲ سه کاربرد مهم چرخ لنگر
- ۱۸..... ۲-۳-۲ ذخیره سازی انرژی مغناطیسی
- ۱۹..... ۳-۳-۲ ذخیره سازی انرژی در ابر خازن ها.....

فصل سوم (بررسی روش ذخیره سازی انرژی حرارتی)

- ۲۱..... ۱-۳ مقدمه.....
- ۲۱..... ۲-۳ دسته بندی ذخیره سازی حرارتی
- ۲۲..... ۱-۲-۳ شیمیایی
- ۲۲..... ۲-۲-۳ حرارتی
- ۲۲..... ۱-۲-۲-۳ ذخیره سازی گرمای محسوس
- ۲۳..... ۲-۲-۲-۳ ذخیره سازی گرمای نهان
- ۲۵..... ۳-۳ خواص مواد تغییر فاز دهنده
- ۲۵..... ۱-۳-۳ خواص حرارتی
- ۲۵..... ۲-۳-۳ خواص فیزیکی
- ۲۵..... ۳-۳-۳ خواص شیمیایی
- ۲۵..... ۴-۳-۳ اقتصادی
- ۲۵..... ۴-۳ طبقه بندی مواد تغییر فاز دهنده
- ۲۶..... ۵-۳ روش های بهبود عملکرد سیستم های ذخیره سازی انرژی با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده
- ۲۷..... ۱-۵-۳ بهبود عملکرد حرارتی سیستم ذخیره سازی PCM با استفاده از سطوح انتقال حرارت گسترده
- ۲۸..... ۲-۵-۳ بهبود عملکرد حرارتی سیستم ذخیره سازی PCM با استفاده از واسط انتقال گرمای متوسط

- ۳-۵-۳- بهبود عملکرد حرارتی سیستم ذخیره سازی PCM با استفاده از لوله های حرارتی ۲۸
- ۳-۶- نتیجه گیری ۲۹

فصل چهارم (بررسی روش ذخیره سازی انرژی هوای فشرده)

- ۱-۴- مقدمه ۳۱
- ۲-۴- تاریخچه ۳۳
- ۳-۴- نحوه عملکرد نیروگاه ذخیره ساز انرژی هوای فشرده ۳۵
- ۴-۴- اجزای فرایندهای کلی سیکل ذخیره ساز انرژی هوای فشرده ۳۸
- ۱-۴-۴- واحد نیروگاهی خود شامل ۴ بخش است ۳۹
- ۱-۱-۴-۴- روش آدیاباتیک ۴۰
- ۲-۱-۴-۴- روش غیر آدیاباتیک ۴۰
- ۳-۱-۴-۴- روش ایزوترمال ۴۰
- ۵-۴- مزایای CAES ۴۰
- ۶-۴- معایب CAES ۴۱
- ۷-۴- مخازن زیرزمینی ذخیره سازی هوای فشرده ۴۱
- ۱-۷-۴- دسترسی به گاز طبیعی ۴۳
- ۲-۷-۴- مجاورت و نزدیکی به خطوط انتقال ۴۳
- ۳-۷-۴- نویز ۴۳
- ۴-۷-۴- ویژگی های ژئوفیزیکی مخازن ۴۴

فصل پنجم (بررسی مشخصات اقتصادی و اجرائی و فنی ذخیره سازهای انرژی)

- ۱-۵- مقدمه ۴۶
- ۲-۵- زنجیره ارزش سنتی برق ۴۸
- ۱-۲-۵- انتقال و توزیع ۴۸

۴۹	..... برنامه ریزی تعمیرات
۴۹	..... ۳-۲-۵- مزایای مالی و فنی سیستم های ذخیره انرژی
۴۹	..... ۱-۳-۵- بلوغ فنی
۵۰	..... ۲-۳-۵- رتبه بندی توان و زمان تخلیه
۵۱	..... ۳-۳-۵- مدت زمان ذخیره سازی
۵۱	..... ۴-۳-۵- هزینه سرمایه گذاری
۵۲	..... ۵-۳-۵- بازده چرخه
۵۳	..... ۶-۳-۵- چگالی انرژی و نیرو
۵۳	..... ۷-۳-۵- زمان زندگی و عمر چرخه

فصل ششم (شبیه سازی احتراق متان در Fluent و بررسی تاثیر تزریق بخار به صورت پیش آمیخته با سوخت
بر میزان آلاینده های محفظه احتراق توربین گازی)

۵۵	..... ۱-۶- مقدمه
۵۸	..... ۲-۶- مسئله شبیه سازی شده و شرایط مرزی
۵۸	..... ۳-۶- مقداردهی اولیه و حل مسئله
۵۹	..... ۴-۶- فعال سازی معادلات NOx در fluent
۵۹	..... ۱-۴-۶- مقایسه کانتور مربوط به دماهای خروجی
۶۱	..... ۲-۴-۶- مقایسه کانتورهای مربوط به مقادیر جرم خروجی CO _۲
۶۳	..... ۳-۴-۶- مقایسه سرعت های میانگین خروجی در توربین
۶۴	..... ۴-۴-۶- مقایسه دما های میانگین خروجی در توربین
۶۵	..... ۵-۴-۶- مقایسه جرم های میانگین NOx خروجی در توربین
۶۶	..... ۵-۶- نتیجه گیری
۶۷	..... مراجع

فهرست اشکال

عنوان

صفحه

- شکل ۱-۱ نمایی از مزرعه توربین های بادی..... ۸
- شکل ۲-۱ نمایی از نمونه زیست انرژی ۹
- شکل ۳-۱ تصویری از انرژی جزرو مدامواج دریا ۱۰
- شکل ۴-۱ نمایی از انرژی امواج دریا ۱۱
- شکل ۵-۱ نمایی از نیروگاه خورشیدی ۱۲
- شکل ۶-۱ میزان روزانه تابش خورشید در نقاط مختلف ایران بر حسب وات ساعت [1] ۱۳
- شکل ۱-۲ تصویری از یک چرخ لنگر ۱۸
- شکل ۲-۲ نمونه ای از ابر خازن ها ۱۹
- شکل ۱-۳ طبقه بندی روش های ذخیره سازی انرژی حرارتی ۲۱
- شکل ۲-۳ طبقه بندی مواد تغییر فاز دهنده [۳] ۲۶
- شکل ۳-۳ نمونه ای از کپسول ها، با پوسته های پلاستیکی و فلزی [۷] ۲۷
- شکل ۴-۳ نمونه ای از لوله های پره دار برای افزایش انتقال حرارت [۷] ۲۷
- شکل ۵-۳ نمودار طرح کلی از مفهوم ذخیره سازی انتقال حرارت رفلاکس [۷] ۲۸
- شکل ۶-۳ بهبود عملکرد حرارتی با استفاده از لوله های حرارتی ۲۹
- شکل ۱-۴ نمای کلی یک سیستم CAES ۳۱
- شکل ۲-۴ تصویر نیروگاه CASE با ظرفیت ۲۹۰ Mw در هانتورف آلمان ۳۳
- شکل ۳-۴ نمایی از نیروگاه مک ایتناش آمریکا ۳۴
- شکل ۴-۴ یک طرح ساده از سیستم CAES ۳۶
- شکل ۵-۴ تصویر واقعی موتور-ژنراتور و مجموعه کمپرسورهای نیروگاه آلاباما ۳۶
- شکل ۶-۴ تصویر واقعی از اسپندر فشار قوی نیروگاه آلاباما ۳۷

- شکل ۴-۷ تصویر واقعی سیکل توربین CAES نیروگاه هانتورف آلمان ۳۷
- شکل ۴-۸ تصویر سه بعدی مجموعه کمپرسور و توربین نیروگاه CAES با ظرفیت ۱۱۰ مگاوات ۳۸
- شکل ۴-۹ تصویر شماتیک مجموعه کامل آزمایشی های دوار تک محوری به طول ۱۴۰ فوت در نیروگاه CAES با ظرفیت ۱۱۰ مگاوات ۳۸
- شکل ۴-۱۰ شماتیک یک نیروگاه ذخیره انرژی هوای فشرده ۳۹
- شکل ۴-۱۱ نحوه ایجاد مخزن در گنبد نمکی ۴۲
- شکل ۴-۱۲ یک نمونه مخزن زیر زمینی استفاده شده در نیروگاه CAES ۴۳
- شکل ۵-۱ مقایسه هزینه سرمایه گذاری ذخیره سازهای انرژی [۵۵۲] ۴۶
- شکل ۵-۲ مقایسه راندمان ذخیره سازهای انرژی بر حسب زمان شارژ و دشارژ آن ها [۵۲۴] ۴۷
- شکل ۵-۳ مقایسه هزینه تمام شده ذخیره سازهای انرژی و پیش بینی آن ها تا سال ۲۰۵۰ [۵۵۲] ۴۷
- شکل ۴-۵ مزایای ESS در طول زنجیره ارزشی برق ۴۸
- شکل ۵-۵ بلوغ فنی سیستم های EES [۲۵۶] ۵۰
- شکل ۵-۶ بازده چرخه سیستم های EES ۵۳
- شکل ۶-۱ طرحواره محفظه احتراق مورد مطالعه ۵۸
- شکل ۶-۲ نمودار میزان همگرایی توابع و باقی مانده ها و converge شدن در ۱۰۰ تکرار ۵۹
- شکل ۶-۳ کانتور دما مربوط به حالت بدون تزریق بخار بایشینه دمای ۳۰۰K ۵۹
- شکل ۶-۴ کانتور دما مربوط به حالت تزریق بخار بادی ۵۰ گرم بر ثانیه بایشینه دمای ۲۸۰K ۶۰
- شکل ۶-۵ کانتور دما مربوط به حالت تزریق بخار بادی ۱۰۰ گرم بر ثانیه بایشینه دمای ۲۶۴K ۶۰
- شکل ۶-۶ کانتور دما مربوط به حالت تزریق بخار بادی ۱۵۰ گرم بر ثانیه بایشینه دمای ۲۴۴K ۶۱
- شکل ۶-۷ کانتور جرمی CO₂ مربوط به حالت بدون تزریق بخار بایشینه مقدار جرمی ۰.۱۴۵ ۶۱
- شکل ۶-۸ کانتور جرمی CO₂ مربوط به حالت تزریق بخار بادی ۵۰ گرم بر ثانیه بایشینه مقدار جرمی ۰.۱۳۷ ۶۲
- شکل ۶-۹ کانتور جرمی CO₂ مربوط به حالت تزریق بخار بادی ۱۰۰ گرم بر ثانیه بایشینه مقدار جرمی ۰.۱۳ ۶۲

- شکل ۶-۱۰ کانتور جرمی CO_2 مربوط به حالت تزریق بخار بادبی ۱۵۰ گرم بر ثانیه بایشینه مقدار جرمی ۰.۱۲۱... ۶۲
- شکل ۶-۱۱ بدون تزریق بخار (۳.۹۴ m/s) ۶۳
- شکل ۶-۱۲ تزریق بخار بادبی ۵۰ گرم بر ثانیه (۴.۰۹۹ m/s) ۶۳
- شکل ۶-۱۳ تزریق بخار بادبی ۱۰۰ گرم بر ثانیه (۴.۱ m/s) ۶۳
- شکل ۶-۱۴ تزریق بخار بادبی ۱۵۰ گرم بر ثانیه (۴.۲ m/s) ۶۳
- شکل ۶-۱۵ بدون تزریق بخار (۲۱۹۲.۲ K) ۶۴
- شکل ۶-۱۶ تزریق بخار بادبی ۵۰ گرم بر ثانیه (۲۱۳۷.۱۹ K) ۶۴
- شکل ۶-۱۷ تزریق بخار بادبی ۱۰۰ گرم بر ثانیه (۱۹۷۹.۸ K) ۶۴
- شکل ۶-۱۸ تزریق بخار بادبی ۱۵۰ گرم بر ثانیه (۱۸۸۰.۴ K) ۶۴
- شکل ۶-۱۹ بدون تزریق بخار (۰.۰۰۸g) ۶۵
- شکل ۶-۲۰ تزریق بخار بادبی ۵۰ گرم بر ثانیه (۰.۰۰۵g) ۶۵
- شکل ۶-۲۱ تزریق بخار بادبی ۱۰۰ گرم بر ثانیه (۰.۰۰۳g) ۶۵
- شکل ۶-۲۲ تزریق بخار بادبی ۱۵۰ گرم بر ثانیه (۰.۰۰۰۵g) ۶۵

فهرست جداول

عنوان

صفحه

جدول ۱-۳ مواد ذخیره سازی گرمای محسوس [۳].....	۲۳
جدول ۱-۴ مشخصات مربوط به انواع ذخیره‌سازهای انرژی.....	۳۲
جدول ۲-۴ مقایسه اولین و دومین نیروگاه CAES جهان در مقیاس تجاری.....	۳۵
جدول ۱-۵ مقایسه ویژگی های فنی سیستم های EES [۴۵۲].....	۵۱
جدول ۲-۵ مقایسه مشخصات فنی سیستم های EES.....	۵۲

چکیده

امروزه تمام تلاش های مهندسی بر روی حداکثرسازی و بهره گیری موثر از منابع انرژی موجود متمرکز شده است. تامین انرژی با توجه به کمبود منابع عمومی انرژی در خیلی از کشورها از یک سو و قیمت بالای انرژی از سوی دیگر، درسراسر جهان به یک موضوع حیاتی تبدیل شده است. به همین جهت دو موضوع مطرح می شود یکی استفاده بهینه از منابع انرژی موجود و دیگری ذخیره سازی انرژی در مقیاس هر چه وسیع تر. از سوی دیگر قوانین منع انتشار آلاینده هایی مثل دی اکسید کربن و اثرات گلخانه ای آن و جریمه های سنگینی که برای آن در نظر گرفته می شود، طراحان سیستم های انرژی را مجاب به طراحی سیستم هایی با حداکثر انداختن و کمترین آلاینده می کند. این مباحث موجب ایجاد سیستم های ذخیره سازی انرژی الکتریکی در مقیاس بزرگ نیروگاهی می شود.

از جمله این سیستم ها، سیستم ذخیره سازی انرژی هوای فشرده می باشد. در این سیستم که متشکل از کمپرسور، مخزن ذخیره و اکسپندر (توربین) است، وقتی شبکه در حالت اوج بار قرار ندارد و بنابراین قیمت برق ارزان است، شبکه برق، کمپرسور را تغذیه کرده و کمپرسور، هوای فشرده را در مخزن زیرزمینی بسیار بزرگ ذخیره می کند. هنگامی که شبکه در حالت اوج مصرف قرار گرفت، هوای ذخیره شده در دسترس توربین قرار می گیرد تا برق مورد نیاز در شرایط اوج بار را تامین کند. در این سیستم چون کمپرسور از توربین جداست، بنابراین تمام توان تولیدی توربین به ژنراتور تحویل می شود. رانداختن این سیستم نسبت به توربین گاز متداول بیشتر و آلاینده گی این سیستم نیز بسیار کمتر است. ذخیره ی انرژی، روش ها و شیوه های گوناگونی دارد و برای آن از ابزارها و وسایل مختلفی استفاده می شود. در این پروژه ویژگی های هر یک از این روش های ذخیره سازی انرژی و مزایای آنها بیان شده است و به صورت کلی تر بر روی مبحث هوای فشرده تحقیق کرده ایم. در فصل ششم نیز بررسی جامعی از مشخصات اقتصادی و اجرائی و فنی ذخیره سازی انرژی صورت داده ایم. و در ادامه، در فصل پایانی پروژه به کمک شبیه سازی احتراق متان در **Fluent** تاثیر تزریق بخار به صورت پیش آمیخته با سوخت بر میزان آلاینده های محفظه احتراق توربین گازی تحقیق گسترده ای را انجام دادیم و به نتایج کلی و مفیدی دست یافتیم.

واژه های کلیدی: ذخیره سازی انرژی - منع انتشار آلاینده - ذخیره سازی انرژی هوای فشرده - شبیه سازی احتراق متان

فصل اول:

مروری بر انواع انرژی های نو

و تجدید پذیر

امروزه مسائل و مشکلات زیست محیطی مورد توجه بسیاری از صنایع قرار گرفته است، به طوری که حفظ سلامت اتمسفر از مهمترین پیش شرط ها جهت توسعه اقتصاد جهانی می باشد. از این رو است که دهه های آینده به عنوان سال های تلاش مشترک جامعه انسانی برای کنترل محیط زیستی سالم و در واقع تلاش برای تداوم زندگی انسان بر روی کره زمین خواهد بود. از این جهت استفاده از انرژی های نو مثل انرژی خورشیدی، انرژی بادی، انرژی زمین گرمایی و زیست توده به جای منابع فسیلی که علل اصلی تولید آلودگی هستند امری الزامی است. از طرف دیگر با توجه به بالا رفتن کیفیت زندگی امروزه نیاز بشر به منابع انرژی برای رفاه و آسایش نسبت به گذشته چندین برابر شده است. در حال حاضر سوختهای فسیلی هرچند باعث ایجاد آلاینده های زیست محیطی و غیره میشوند اما بیشترین سهم را در تامین منابع انرژی جهان دارند. این منابع دیر یا زود پایان می یابند این یک خطر بزرگ برای کشورهای در حال توسعه از جمله ایران می باشد. در ایران علاوه بر اینکه سوختهای فسیلی تقریباً صد درصد تامین کننده منابع انرژی هستند، پایه اساسی اقتصاد را نیز تشکیل میدهند و اگر این روند ادامه داشته باشد و فکراساسی برای آن نشود بدون شک دهه های آینده سالهای پر درد سری در تقابل محیط زیست و اقتصاد خواهد بود. لذا بایستی به صورت جدی به دنبال توسعه منابع انرژی تجدید پذیر رفت تا اینکه هم این وابستگی کمتر شود و هم اینکه از استفاده بی رویه منابع زیر زمینی جلوگیری به عمل آید.

۲-۱-انواع انرژی های نو

انرژی های تجدید پذیر نظیر انرژی خورشیدی، انرژی بادی، انرژی زمین گرمایی، انرژی دریایی، نیروگاه های آبی و انرژی زیست توده جزء انرژی های نو به حساب می آیند که در ادامه به بررسی آنها پرداخته خواهد شد.

۱-۲-۱-انرژی بادی

انرژی بادی نیز در زمینه تکنولوژی، بین انرژی های تجدیدپذیر شتاب رشد بالایی دارد. چرا که هزینه های آن در حال کاهش است. تولید برق بادی، بین سال های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳ دو برابر شده است. توربین های بادی، انرژی جنبشی باد را به انرژی الکتریسیته تبدیل می کنند. مقدار این انرژی تولید شده از باد به اندازه توربین ها و اندازه پره ها وابسته است. تولید انرژی از باد در بریتانیا و ایالات متحده آمریکا در سال های ۱۸۸۷ و ۱۸۸۸ انجام پذیرفت. اما توربین های مدرن، برای اولین بار در سال ۱۸۹۱ در کشور دانمارک ساخته شد. توربین های بادی بر اساس محور چرخش خود به دو نوع افقی و قائم دسته بندی می شوند. که برای مزارع بادی، محور افقی مرسوم تر است. این مزارع می توانند در خشکی^۱ یا در دریا ها و اقیانوس ها^۲ باشند. در حال حاضر ۵۲۰ هزار مگاوات ظرفیت نصب شده برای انرژی بادی در سراسر جهان وجود دارد. نکته حائز اهمیت در مورد این انرژی عدم نیاز به آب برای تولید انرژی است. مزرعه بادی گانسو در چین با ظرفیت ۷۹۰۰ مگاوات بزرگترین مزرعه بادی در جهان است. شکل ۱-۱ نمایی از توربین های بادی را نشان می دهد.



شکل ۱-۱ نمایی از مزرعه توربین های بادی

۱-۲-۲-زیست انرژی^۳

استفاده از زیست انرژی به دو دسته اصلی تقسیم می شود: سنتی و مدرن. استفاده سنتی، به سوزاندن زیست توده در اشکال چوب، لاشه حیوانات و زغال اشاره می کند. تکنولوژی زیست انرژی مدرن، شامل سوخت های زیستی مایع که از قارچ ها و دیگر گیاهان تولید می شود، پالایشگاه های زیستی، بیوگاز که از طریق هضم بی هوازی پسماند ها تولید می شود و دیگر تکنولوژی ها می باشد. زیست توده پتانسیل زیادی برای افزایش و ارتقاء تامین انرژی در

^۱ - onshore

^۲ - offshore

^۳ - Bioenergy

کشورهای پر جمعیت با افزایش تقاضا مانند برزیل، هند و چین را دارد. زیست توده می تواند بطور مستقیم برای گرمایش و یا تولید برق سوزانده شود یا می تواند به جایگزین نفت یا گاز تبدیل شود. سوخت های زیستی مایع، به عنوان یک جایگزین تجدیدپذیر مناسب برای بنزین، بطور گسترده در بخش حمل و نقل استفاده می شود. ظرفیت زیست انرژی تا پایان سال ۲۰۱۷ نزدیک به ۱۱۰ هزار مگاوات است که از این مقدار، حدود ۹۰ هزار سهم زیست توده، ۱۷ هزار مگاوات سهم بیوگاز و ۳ هزار سهم سوخت زیستی مایع است.



شکل ۱-۲ نمایی از نمونه زیست انرژی

۱-۲-۳- انرژی زمین گرمایی

مرکز زمین (به عمق تقریبی ۶۴۰۰ کیلومتر) که در حدود ۴۰۰۰ درجه سانتیگراد حرارت دارد، به عنوان یک منبع حرارتی عمل نموده و موجب تشکیل و پیدایش مواد مذاب با درجه حرارت ۶۵۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد در اعماق ۸۰ تا ۱۰۰ کیلومتری از سطح زمین می گردد. در واقع این میزان حرارت غیر عادی، عامل اصلی پدیده های زمین شناسی از جمله فعالیت های آتشفشانی، ایجاد زمین لرزه ها، پیدایش رشته کوهها (فعالیت های کوه زایی) و همچنین جابجایی صفحات تکتونیکی می باشد که کره زمین را به یک سیستم دینامیکی تبدیل نموده و پیوسته آن را تحت تغییرات گوناگون قرار میدهد. یکی از فاکتورهای مهم این انرژی نسبت به سایر انرژی های تجدید پذیر این است که به طور شبانه روز در طول سال قابل بهره برداری می باشند.

۱-۲-۴- انرژی اقیانوس

جزر و مد، امواج و جریان ها می توانند برای تولید انرژی استفاده شوند. اگر چه هنوز در مراحل تحقیق و توسعه است و بصورت اقتصادی در دسترس نیست. فناوری های اقیانوس برای تولید انرژی در ادامه آمده است:

۱-۲-۴-۱- انرژی جزر و مد

انرژی جزر و مد شکلی از انرژی آبی است که از تبدیل انرژی جزر و مد به اشکال مفید انرژی - عمدتاً نیروی برق - به دست می آید. گرچه هنوز استفاده فراگیر نیافته اما انرژی جزر و مد می تواند منبع مناسبی برای تولید برق در

آینده باشد. جزر و مد بهتر از انرژی باد و انرژی خورشیدی قابل پیش بینی است. در میان منابع انرژی تجدید پذیر، استفاده از انرژی جزر و مد همیشه با مشکل هزینه بالا و محدودیت در مکان های با کشند شدید یا سرعت بالای جریان آب روبرو بوده است. با وجود این، بسیاری از پیشرفتهای اخیر هم در طراحی (مانند نیروگاه کشند دینامیکی، تالابهای کشندی) و هم در تکنولوژی توربین (مانند توربین های جدید محوری و کراس فلو) نشان می دهد که کل برق کشندی موجود ممکن است از آنچه تا پیش از این فرض می شد بسیار بیشتر باشد و ممکن است هزینه های اقتصادی و زیست محیطی به سطح قابل رقابتی کاهش یابد. اولین نمونه تجاری ساخته شده از آن در ایرلند است. از نظر تاریخی آسیاب هایی که از انرژی کشندی بهره می گرفتند هم در اروپا وجود داشته اند و هم در سواحل شرقی آمریکای شمالی. آب ورودی در استخرهای بزرگی ذخیره می شدند و در هنگام فروکش کردن مد چرخ های آبی را به چرخش در می آوردند که از این نیروی مکانیکی برای آرد کردن غلات استفاده می کردند. تاریخ اولین آنها به قرون وسطی و حتی به روم باستان بر می گردد. تنها در قرن نوزدهم بود که فرایند استفاده از آب های ریزان و توربین های چرخان برای تولید الکتریسیته در آمریکا و اروپا معرفی شد. نیروگاه کشندی رانس اولین نیروگاه کشندی در مقیاس بزرگ است که در سال ۱۹۶۶ مورد بهره برداری قرار گرفت. تصویری از انرژی جزرومد امواج دریا در شکل ۱-۳ مشاهده می کنید.



شکل ۱-۳ تصویری از انرژی جزرومد امواج دریا

۱-۲-۴-۲- انرژی موج

انرژی موج در اقیانوس باز بر اثر عمل باد روی سطح اقیانوس تولید می شوند. کل انرژی موج توزیع شده در زمین در حدود $۱۰۶ \times ۲/۵$ مگاوات تخمین زده می شود که در حدود انرژی کلی توزیعی جزر و مد است. انرژی موج منبع تجدید شونده است و معمولاً نسبت به انرژی باد بیشتر قابل تولید است. انرژی که از امواج استخراج می شود، دوباره به سرعت توسط برهمکنش با دو سطح اقیانوس پر می شود. انرژی موج نامنظم، نوسانی و دارای فرکانس پائین است که قبل از اضافه شدن به شبکه باید به فرکانس ۶۰ هرتز تبدیل شود. نمایی از انرژی امواج دریا در شکل ۱-۴ آمده است.



شکل ۱-۴ نمایی از انرژی امواج دریا

۱-۲-۵- انرژی گرادیان شوری

این انرژی از اختلاف غلظت نمک بدست می آید که هنگام ورود یک رودخانه به اقیانوس اتفاق می افتد. این پروژه ها از "اسموز معکوس" با آب شیرینی که درون یک غشاء جریان دارد تا فشار را در یک تانک آب نمک افزایش دهد و "الکترو دیالیز معکوس" با یون های نمکی که از میان مخازن متناوب نمک و آب شیرین عبور می کند، استفاده می کنند.

۱-۲-۶- انرژی خورشیدی

این انرژی می تواند به طور مستقیم از خورشید و حتی در آب و هوای ابری بدست بیاید. انرژی خورشیدی، در سطح جهان و بصورت گسترده برای تولید برق، گرما و شیرین سازی آب مورد استفاده قرار می گیرد. انرژی خورشیدی به دو روش اصلی تولید می شود:

۱-۲-۶-۱- فتوولتائیک^۴

فتوولتائیک که سلول های خورشیدی هم نامیده می شوند، دستگاه های الکترونیکی هستند که نور خورشید را مستقیماً به الکتریسیته تبدیل می کنند. در حال حاضر، فتوولتائیک، یکی از سریعترین شتاب های رشد را در بین تکنولوژی های انرژی تجدیدپذیر دارد. سیستم خورشیدی فتوولتائیک، می تواند در مقیاس های مختلف مانند مقیاس تجاری و یا در مقیاس کوچکتر و مصارف شخصی استفاده شود. این سیستم در مقیاس کوچک، برای مردمی که در کنار خطوط انتقال زندگی نمی کنند روش بسیار مناسبی برای تامین برق است. علی الخصوص برای کسانی که در کشورهای در حال توسعه با تابش مناسب خورشید بسیار ایده آل است.

۱-۲-۶-۲- نیروی خورشیدی متمرکز

^۴-photovoltaic

در این روش از آئینه برای متمرکز کردن پرتوی خورشید استفاده می شود. این پرتوها سیال را گرم کرده و با ایجاد بخار و به چرخش در آوردن توربین، الکتریسیته تولید می شود. از این روش برای تولید الکتریسیته در نیروگاه ها با مقیاس بزرگ استفاده می شود.

ظرفیت نصب شده برای تولید انرژی خورشیدی، تا پایان سال ۲۰۱۷، حدود ۳۹۰ هزار مگاوات است که تنها ۵ هزار مگاوات آن از نوع نیروی خورشیدی متمرکز است. نیروگاه تنگر در چین، با ظرفیت ۱۵۴۷ مگاوات بزرگترین نیروگاه خورشیدی جهان است که در حال بهره برداری می باشد. در حال حاضر در کشور هند، نیروگاه پاوادا با ظرفیت ۲۰۰۰ مگاوات در حال احداث است که پس از بهره برداری، بزرگترین نیروگاه خورشیدی جهان خواهد بود. در ادامه نمایی از نیروگاه خورشیدی رادر شکل ۱-۵ مشاهده می کنید.

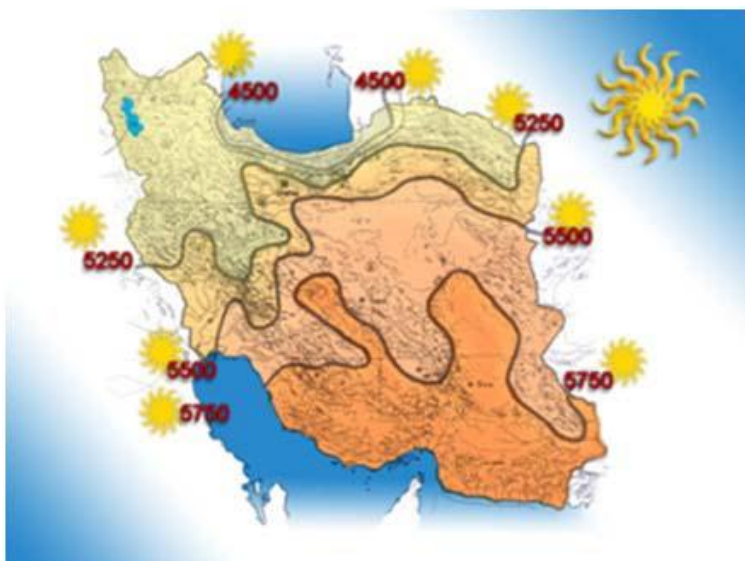


شکل ۱-۵ نمایی از نیروگاه خورشیدی

۱-۳- موقعیت جغرافیایی ایران برای بهره برداری از انرژی خورشیدی :

میزان انرژی که زمین در طول مدت یک ساعت از خورشید دریافت میکند، بیش از انرژی مصرفی تمام جهان در طول یک سال است. اگر چه توزیع این انرژی در سراسر جهان به طور یکسان نیست اما سطح وسیعی از آن امکان استفاده از انرژی خورشیدی را دارد. کشور ایران با عرض جغرافیایی ۲۵ الی ۴۵ درجه شمالی در منطقه ای از جهان قرار گرفته که از نظر دریافت انرژی خورشیدی در وضعیت بسیار مناسبی قرار دارد و این ثروت بسیار با ارزشمندتری از نفت و گازی است که در اختیار دارد. شکل ۱-۶ وضعیت تابش خورشید در نقاط مختلف ایران را نشان میدهد. در ایران روزانه به طور متوسط ۵/۵ کیلو وات ساعت انرژی خورشیدی بر هر متر مربع از سطح زمین می تابد و ۳۰۰ روز آفتابی در ۹۰ درصد خاک کشور داریم مساحت ایران تقریباً ۱۶۰۰۰۰۰ کیلومتر مربع است. میزان تابش روزانه انرژی خورشیدی در ایران برابر است با $10^{12} \times 5/5 \times 1/6$ کیلو وات ساعت است. میزان کل تابش در روز برای ایران تقریباً برابر با ۹۰۰۰۰۰۰۰۰۰ مگا وات ساعت است. اگر تنها از یک درصد مساحت ایران انرژی خورشید را دریافت کنیم و راندمان سیستم دریافت انرژی تنها ۱۰ درصد باشد باز هم می توان روزانه ۹۰۰۰۰۰۰۰ مگا وات ساعت انرژی از خورشید دریافت کرد. به این ترتیب باتوجه به موقعیت جغرافیایی

ایران از لحاظ تابشی میزان تابش روزانه در اکثر مناطق کشور بالا است که این خود نوید استفاده از کاربردهای انرژی خورشیدی را می دهد. از آنجایی که خورشید دارای طبیعتی متناوب میباشد، ذخیره سازی انرژی برای تامین بدون وقفه به منظور مطابقت با نیازها مورد نیاز است. محدودیت عمده انرژی خورشید این است که فقط ۶ الی ۸ ساعت در یک روز در دسترس می باشد. متناوب بودن انرژی خورشید یکی از عواملی است که مانع از امکان بهره برداری بهینه و حداکثر از آن میتوان انرژی مازاد را در زمان بهره برداری در سیستم ذخیره سازی انرژی گرمایی ذخیره نمود و در مواقعی که مورد نیاز است از آن استفاده کرد.



شکل ۱-۶ میزان روزانه تابش خورشید در نقاط مختلف ایران بر حسب وات ساعت [۱]

فصل دوم:

بررسی انواع روش های

ذخیره سازی انرژی

امروزه، به علت مزایای فراوان انرژی های نو و تجدید پذیر نسبت به انرژی های فسیلی، استفاده از این انرژی ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از جمله انرژی های تجدید پذیر پر کاربرد در صنعت برق نظیر انرژی باد، انرژی خورشیدی و انرژی زمین گرمایی می باشند. انرژی زمین گرمایی یکی از منابع انرژی پایان ناپذیر جهان هستی است که بر اثر اختلافات ترمودینامیکی نظیر اختلاف دما و فشار بین نواحی مجاور به وجود می آید. یکی از بهترین روش های بهره برداری از انرژی باد، تولید انرژی الکتریکی از باد است. به این صورت که با قرار دادن یک توربین بادی در مسیر باد و انتقال انرژی مکانیکی توربین به یک ژنراتور، انرژی الکتریکی حاصل می شود. در سال های اخیر، استفاده از انرژی باد جهت تولید برق رایج شده و این موضوع به دلیل تجدیدپذیر بودن این منبع و عوامل زیست محیطی که چالش اصلی جهان امروزی می باشد، رو به گسترش است. با افزایش سطح نفوذ انرژی باد در تولید انرژی الکتریکی، باید اثرات مختلف آن را بر روی جنبه های گوناگون سیستم قدرت از جمله پایداری کیفیت توان و قابلیت اطمینان بررسی نمود. عدم امکان پیش بینی دقیق و متغیر بودن توان خروجی نیروگاه های بادی، کنترل پذیری آنها را دشوارتر نموده و ممکن است در صورت سهم زیاد واحدهای بادی در تولید توان سیستم، سیستم قدرت قادر به داشتن پاسخ مناسب به تغییرات توان خروجی آنها نباشد. به دلیل عدم قطعیت و تصادفی بودن سرعت وزش باد، توان تولیدی توسط واحدهای بادی متغیر می باشد و این امر، اثرات مختلفی بر روی سیستم قدرت و از جمله بر روی قابلیت اطمینان سیستم خواهد داشت. قابلیت اطمینان در این نوع کاربردها، درجه عملکرد اجزاء سیستم است که، نتیجه آن تحویل برق با استانداردهای قابل قبول و به مقدار لازم به مصرف کننده ها می باشد. رقابتی شدن بازار برق و کشورها وابستگی به تکنولوژی هایی که نیروی برق با قابلیت اطمینان را بالا نیاز دارند، اهمیت استانداردهای قابلیت اطمینان افزایش یافته است.

۲-۲- یکنواخت نبودن منحنی بار و پیک بار:

یکی از مسائلی که امروزه در سیستم های قدرت به ویژه ی شبکه قدرت ایران با توجه به شرایط جغرافیایی خاص آن، بسیار مورد توجه برنامه ریزان و بهره برداران سیستم قرار دارد، تغییرات زیاد و عدم یکنواخت بودن منحنی بار در ساعات مختلف شبانه روز است. این موضوع منجر شده است تا تنها در ساعات پیک بار از تمامی ظرفیت نصب شده تولید کشور استفاده شود و در ساعات کم باری و میان باری مقدار زیادی از ظرفیت نصب شده خارج از مدار باشد که این مطلب به معنای خواب سرمایه ی ملی است. مشکل کمابیش در شبکه های قدرت دنیا که دارای منحنی های بار با تغییرات زیاد هستند مشاهده می شود. این موضوع محققان را برآن داشته است تا با نگاهی به تجربیات بشر و پیش ذخیره ی زمینه سازی از دیرباز، در اندیشه ذخیره کردن انرژی الکتریکی باشند. از آنجا که هزینه تولید برق و قیمت فروش آن در ساعات مختلف شبانه روز با توجه به راه افتادن بازار برق، تفاوت های چشمگیری دارد، بنابراین ایده ذخیره سازی برق در ساعات غیر پیک برق (ارزان) و استفاده از آن در ساعات پیک برق (گران) در تمام دنیا و در کشور ما مطرح است. در این پروژه به روش های ذخیره سازی انرژی برق و استفاده از آن در موارد مورد نیاز از جمله پیک بار اشاره می کنیم و همچنین به بررسی مزایا و معایب هر روش می پردازیم.

۲-۳- روش های ذخیره سازی انرژی

در سال های اخیر ذخیره سازی انرژی آن چنان توسعه یافته است که می تواند تاثیر قابل توجهی بر تکنولوژی مدرن بگذارد. به طور خاص، ذخیره انرژی نقش مهمی در موفقیت منابع انرژی متناوب در مواجهه با تقاضای بار ایفا میکند. برای مثال نیاز به ذخیره سازی برای برنامه های کاربردی انرژی خورشیدی شدیداً مورد نیاز است، بخصوص برای ساعات یا روزهایی که این انرژی کمتر در اختیار است. سیستم های ذخیره انرژی میتوانند به میزان قابل توجهی به رفع نیازهای جامعه در زمینه استفاده از انرژی در گرمایش و سرمایش ساختمان، هوا فضا، و برنامه های کاربردی به نحوی کارا تر و سازگار با محیط زیست کمک کند. استفاده از سیستم های ذخیره انرژی مزایای قابل توجهی خواهد داشت که عبارتند از:

- کاهش هزینه انرژی
 - کاهش مصرف انرژی
 - بهبود کیفیت هوای داخلی
 - افزایش انعطاف سیستم
 - کاهش هزینه های اولیه و تعمیر و نگهداری
- به علاوه، دینسر^۵ در سال ۱۹۹۷ میلادی [۲] یک سری مزایای دیگر برای این سیستم ها بیان کرد که عبارتند از:
- کاهش ابعاد تجهیزات
 - کارایی بهتر و موثرتر تجهیزات
 - حفاظت از سوخت های فسیلی (با تسهیل در استفاده از انرژی کارا تر و یا جایگزینی سوخت مصرفی)
 - کاهش گازهای آلاینده (مثل CO₂ و CFC)

سیستم های ذخیره انرژی از پتانسیل عظیمی برای افزایش کارایی تجهیزات تبدیل انرژی وهم چنین تسهیل در جایگزینی سوخت در مقیاس های بزرگ برخوردارند. سیستم های ذخیره سازی انرژی را می توان، براساس شکلی که انرژی ذخیره می شود طبقه بندی کرد. در ادامه انواع روشهای مختلف ذخیره سازی انرژی معرفی میگردد.

۲-۳-۱- انرژی مکانیکی

انرژی مکانیکی ممکن است به صورت انرژی جنبشی یک حرکت خطی یا دورانی، انرژی پتانسیل یک جسم بالارونده، انرژی متراکم سازی یا کششی یک ماده الاستیک، و یا به صورت انرژی متراکم سازی در یک گاز ذخیره شود. ذخیره

^۵ - dinser

مقادیر زیادی از انرژی در حرکت خطی دشوار است. اما، ذخیره انرژی جنبشی چرخشی به سادگی امکان پذیر است. در واقع، چرخ سفالگری، شاید از اولین موارد استفاده انسان برای ذخیره انرژی باشد که چندین هزار سال پیش توسعه داده شد و هنوز هم مورد استفاده قرار می گیرد. دو نوع اصلی ذخیره سازی مکانیکی وجود دارد که معرفی می گردد:

۲-۳-۱-۱- ذخیره سازی تلمبه ای^۶

ذخیره سازی تلمبه ای یک روش ساده ذخیره انرژی است.

نیروگاه تلمبه ذخیره ای، از انواع نیروگاه های برق آبی هستند که با عملکرد موتوری (پمپاژ آب به سد بالادست) طی ساعات کم باری شبکه برق از یک سو و تولید برق در شرایط پیک بار سیستم از سوی دیگری می توانند نقش موثری در بهبود عملکرد سیستم داشته باشند.

در هنگامی که تقاضای انرژی کم است، پمپ ها آب یک مخزن در ارتفاع کم یا آب یک رودخانه را به سمت بالا پمپ می کنند. این آب از طریق یک لوله به یک مخزن پمپ می شود و در زمانی که تقاضای انرژی بالا است، مخزن آب را آزاد می کند و اجازه می دهد آب به سمت پایین به جریان افتد.

در ایران نیز باتوجه به خشک سالی و کمبود باش جوی در سال های اخیر، روش تلمبه ذخیره ای، روش مناسب و به صرفه ای می باشد.

۲-۳-۱-۲- ذخیره سازی انرژی در چرخ طیار^۷

چرخ لنگر یا چرخ طیار یک وسیله ی مکانیکی گردان سنگین است که برای ذخیره سازی انرژی دورانی به کار می رود. چرخ لنگرها دارای گشتاور لختی بالایی هستند و بنابراین در برابر تغییر سرعت دورانی مقاومت می کنند. میزان انرژی ذخیره شده در یک چرخ لنگر با توان دوم سرعت دورانی آن متناسب است. برای انتقال انرژی به چرخ لنگر به آن گشتاور اعمال می کنند که موجب بالا رفتن سرعت دورانی و در نتیجه بالا رفتن انرژی ذخیره شده در آن می شود، و در حالت معکوس، چرخ لنگر می تواند انرژی گردشی را به بار مکانیکی منتقل کند که موجب پایین آمدن سرعت دورانی آن خواهد شد.

چرخ طیار های جدید دارای اشکال متنوعی هستند. از چرخ طیار های کامپوزیتی که برای سرعت های دورانی بسیار بالا مناسب هستند گرفته تا چرخ های فولادی قدیمی که به موتور های دورانی کوپل می گردند .

۲-۳-۱-۲- سه کاربرد مهم چرخ لنگر عبارتند از:

^۶ - Hydrostorage

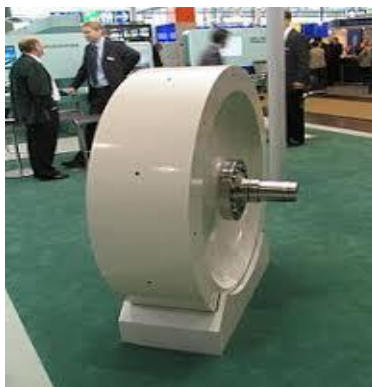
^۷ - Flywheel Energy Storage (FES)

✓ فراهم آوردن انرژی پیوسته هنگامی که منبع انرژی ناپیوسته است. برای نمونه چرخ لنگرهایی که در موتورهای رفت و برگشتی استفاده می‌شوند چنین کاربردی دارند، زیرا گشتاور حاصل از موتور ناپیوسته است.

✓ انتقال انرژی با سرعتی که از عهده‌ی یک منبع انرژی پیوسته بر نمی‌آید. برای اینکار انرژی را در طول زمان در چرخ لنگر ذخیره می‌کنند و سپس به صورت ناگهانی آن را آزاد می‌کنند.

✓ برای کنترل جهت یک سامانه‌ی مکانیکی در چنین کاربردهایی تکانه‌ی زاویه‌ای چرخ لنگر را هنگام انتقال انرژی به‌از چرخ لنگر عمداً به بار منتقل می‌کنند.

انرژی یک فلاپیول با سرعت بالا (حداکثر تا ۶۰ هزار دور در دقیقه) دارای قدرت تخریب زیادی است. انرژی یک فلاپیول یک کیلو وات ساعتی، قادر است خودرویی با اندازه متوسط را بیشتر از ۱۰۰ فوت به‌طور عمودی در هوا بلند کند. در نتیجه، قسمت چرخنده آن باید در محفظه‌ای محافظ، محبوس شود. نمایی شماتیک از تصویر چرخ لنگر را در شکل ۱-۲ مشاهده می‌کنیم.



شکل ۱-۲ تصویری از چرخ لنگر

۲-۳-۲- ذخیره سازی انرژی مغناطیسی

امروزه کیفیت توان تأمینی در سیستم‌های الکتریکی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. استفاده از روش‌های مختلف ذخیره‌سازی انرژی در سیستم‌های الکتریکی یکی از زمینه‌هایی است که در جهت بهبود کیفیت توان تأمینی و افزایش قابلیت اطمینان سیستم مورد توجه قرار دارد.

انرژی را می‌توان در یک میدان مغناطیسی (به عنوان مثال، در آهنربای الکتریکی) ذخیره کرد. یک طرح پیشرفته که در آن از مواد ابر رسانا استفاده میشود در حال توسعه است. ذخیره‌سازی انرژی مغناطیسی به کمک خاصیت ابررسانایی یکی از روش‌های نوین و بسیار با کیفیت در موضوع ذخیره سازی انرژی است.

ابررسانایی به وضعیتی از فلزات، آلیاژها و برخی سرامیک‌ها گفته می‌شود که در دماهای پایین اتفاق می‌افتد. با توجه به دو مشخصه اصلی ابررسانایی یعنی مقاومت تقریباً صفر و نفوذناپذیری مغناطیسی، مواد ابررسانا کاربردهای

فراوانی دارند که امروزه در پروژه های متعددی از جمله سیم ها و کابل های ابررسانا، ترانسفورماتورهای ابررسانا، موتورها و ژنراتورهای ابررسانا، ذخیره سازهای مغناطیسی انرژی و غیره استفاده می شوند.

به طور کلی بازده ذخیره سازی ۸۰-۹۰ درصد برای سیستم های ذخیره انرژی ابررسانای مغناطیسی پیش بینی می شود.

۲-۳-۳- ذخیره انرژی در ابر خازن^۸

ابر خازن ها انرژی الکتریکی را درون دو خازن دو لایه ای الکتریکی، بین هر کدام از الکترودها و الکترولیت ها ذخیره میکنند. فاصله ای که در آن تجزیه بارها رخ می دهد، تنها چند آنگستروم^۹ است. ظرفیت خازنی و چگالی انرژی الکتریکی این قطعات هزاران برابر بیشتر از خازنهای الکترولیتی است. در مقایسه با باتری های سرب اسید^{۱۰} ابرخازنها چگالی انرژی الکتریکی کمتری دارند اما می توانند ده ها هزار سیکل کار کنند و همچنین در مقایسه با باتری ها، توانایی شارژ و دشارژ سریع تری دارند. تحقیقات جدید، در استفاده از ابرخازن ها در کاربردهای کیفیت توان، تأمین مقطعی تقاضای حداکثر توان بالا، تجمیع با سایر تکنولوژی های ذخیره سازی انرژی و توسعه کاربردهای ولتاژ بالا متمرکز شده است. ابرخازن ها به عنوان باتری استفاده می شوند و در مقایسه با خازن های معمولی دارای چگالی انرژی بیشتری هستند. زمان شارژ ابرخازن ها (حدود چند ثانیه) نسبت به باتری های قابل شارژ سنتی در حدود (چند ساعت) بسیار کمتر است. همچنین تعداد چرخه های قابل شارژ و دشارژ ابرخازن میلیون ها بار است و نسبت به باتری های معمولی که تا ۱۰۰۰ بار قابلیت شارژ دارند، عمر طولانی تری دارند. مقاومت داخلی بسیار کم و راندمان زیاد این ابر خازن ها از دیگر مزایای آنهاست. دلایل عمده عدم استفاده گسترده از وسایل ذخیره ساز انرژی این است که اولاً رقیب اقتصادی سوخت فسیلی نیستند و ثانیاً قابلیت اطمینان بالای آنها در دوره های طولانی بهره برداری به اثبات نرسیده است. نمونه ای از تصویر ابرخازن ها در شکل ۲-۲ مشاهده می شود. [۳]



شکل ۲-۲ نمونه ای از ابرخازن ها

^۸ - Super Capacitor

^۹ - Angstrom

^{۱۰} - Lead acid

فصل سوم :

بررسی روش ذخیره سازی

انرژی حرارتی

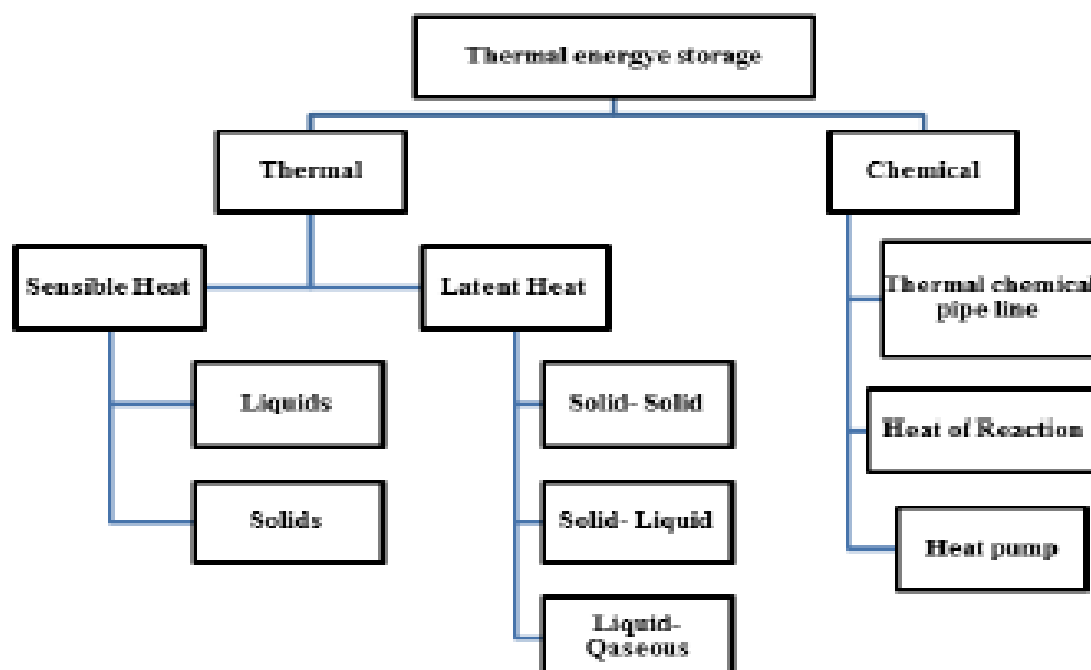
افزایش تقاضای انرژی، کمبود سوخت های فسیلی و گران بها در مورد اثرات زیست محیطی باعث ایجاد انگیزه برای توسعه منابع انرژی تجدید پذیر مانند انرژی خورشیدی، زیست توده و انرژی باد شده است. با توجه به عدم پیوستگی در تامین این نوع انرژی ها، استفاده موثر از این انرژیها به بهره گیری مناسب از سیستم های ذخیره سازی انرژی وابسته شده است. ذخیره سازی انرژی حرارتی به عنوان یک فن آوری پیشرفته، نقش بسزایی در افزایش استفاده از کاربردهای حرارتی مانند گرم کردن فضا، تولید آب گرم، سیستم های خنک کنندگی و تهویه مطبوع ایفا کرده است.

سیستم های ذخیره سازی حرارتی به صورت بالقوه توانایی افزایش استفاده موثر از تجهیزات انرژی حرارتی و تسهیل در جایگزینی سوخت در مقیاس های بزرگ (نیروگاه های حرارتی) را دارند.

همچنین سیستم های ذخیره سازی حرارتی برای پرداختن به مسائلی از قبیل عدم تطابق بین عرضه و تقاضای انرژی از اهمیت بالایی برخوردار هستند.

۳-۲- عمدتاً ذخیره سازی حرارتی، به دو دسته تقسیم بندی میشوند که در شکل ۳-۱ نشان داده شده

اند :



شکل ۳-۱ طبقه بندی روش های ذخیره سازی انرژی حرارتی [4]

۳-۲-۱- شیمیایی

انرژی ممکن است در سیستم های متشکل از یک یا چند ترکیب شیمیایی ذخیره شود. به این صورت که در زمان انجام واکنش برای تشکیل ترکیبات مختلف انرژی آزاد و یا جذب می شود. معروف ترین و پرکاربردترین دستگاه باتری شیمیایی است. از انرژی ذخیره شده در باتری اغلب به عنوان انرژی الکتروشیمیایی نام برده می شود، به این دلیل که واکنش های شیمیایی در باتری توسط انرژی الکتریکی ایجاد می شود و در نهایت منجر به تولید انرژی الکتریکی می شود.

۳-۲-۲- حرارتی

۳-۲-۱- ذخیره سازی گرمای محسوس

ذخیره سازی که با افزایش و یا کاهش دمای یک ماده انجام می شود ذخیره سازی حرارت محسوس نامیده می شود، که اثربخشی آن به گرمای ویژه ماده ذخیره کننده انرژی بستگی دارد و اگر حجم ذخیره سازی مهم و محدود باشد به چگالی آن بستگی دارد. سیستم های ذخیره سازی محسوس معمولاً از سنگ ها، زمین، یا آب به عنوان واسط ذخیره سازی استفاده می کنند، و انرژی حرارتی با افزایش دمای واسط ذخیره سازی ذخیره می شود. جدول ۳-۱ برخی از مواد که برای ذخیره سازی گرمای محسوس بکار می روند.

جدول ۳-۱ مواد ذخیره سازی گرمای محسوس [4]

جنس	حالت	محدوده دمایی (°C)	چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)	ظرفیت گرمای ویژه ($\frac{kJ}{kgK}$)	ضریب رسانندگی گرمایی ($\frac{W}{mK}$)
آب	مایع	۰-۱۰۰	۱۰۰۰	۴/۲	۰/۵۸
اتانول	مایع	بالتر از ۷۸	۸۶۷	۲/۲	۰/۱۷۱
پروپانال	مایع	بالتر از ۹۷	۸۰۰	۲/۵	۰/۱۶۱
بوتانول	مایع	بالتر از ۱۱۸	۸۰۹	۲/۴	۰/۱۶۷
ایزوبوتانول	مایع	بالتر از ۱۰۰	۸۰۸	۳	۰/۱۳۳
ایزوپنتانول	مایع	بالتر از ۱۴۸	۸۳۱	۲/۲	۰/۱۴۱
روغن موتور	مایع	بالتر از ۱۶۰	۸۸۸	۱/۸۸	-
آجر نسوز سیلیکا	جامد	۲۰۰-۷۰۰	۱۸۲۰	۱	۱/۵
بتون	جامد	۲۰۰-۷۰۰	۲۲۴۰	۱/۱۳	۰/۹-۱/۳
خاک رس	جامد	-	۱۹۰۰	۰/۸۳۵	۰/۸۵
چوب	جامد	-	۸۰۰	۲/۰۹۳	۰/۱۶
آلومینیوم	جامد	بالتر از ۱۶۰	۲۷۰۷	۰/۸۹۶	۲۰۴
مس	جامد	بالتر از ۱۶۰	۸۹۵۴	۰/۳۸۳	۳۸۵
سنگ	جامد	بالتر از ۱۶۰	۲۲۰۰	۰/۷۱	۱/۸۳
سنگ گرانیت	جامد	بالتر از ۱۶۰	۲۶۴۰	۰/۸۲	۱/۷-۳/۹۸
آهن خالص	جامد	بالتر از ۱۶۰	۷۸۹۷	۰/۴۵۲	۷۳

۳-۲-۲-۲-۲-ذخیره سازی گرمای نهان

ذخیره سازی با تغییر فاز (انتقال از جامد به مایع و یا از مایع به بخار بدون تغییر در درجه حرارت) یک نوع سیستم ذخیره سازی حرارتی است که به عنوان ذخیره سازی گرمای نهان شناخته می شود. سیستم های ذخیره سازی گرمای نهان، انرژی حرارتی را در مواد تغییر فاز دهنده (PCMs) در هنگام تغییر فاز مواد (که معمولاً از یک ماده جامد به مایع است) ذخیره می کنند. گرمای ویژه انجماد/ذوب یا تبخیر و درجه حرارتی که در آن تغییر فاز رخ می دهد از پارامترهای مهم در طراحی هستند.

که امروزه از بسترهای بسته بندی شده با مواد تغییر فاز دهنده (PCM) یکی از کارآمدترین این سیستم ها نام برده می شود زیرا این مواد دارای گنجایش ذخیره انرژی بالا در حجم کم را دارند .

به طور کلی تغییر فاز می تواند به شکل جامد - جامد، جامد - مایع، جامد - گاز، مایع - گاز و بالعکس رخ دهد.

در تغییر فاز جامد - جامد با تغییر شکل ماده از یک کریستال به کریستال دیگر گرما ذخیره میکند و معمولا این انتقالها دارای گرمای نهان و نیز تغییرات حجم کمتری نسبت به انتقال جامد - مایع می باشند. از این رو مواد تغییر فاز دهنده جامد-جامد دارای این مزیت هستند که طراحی مخازن آنها ساده تر است.

تغییر شکلهای جامد - مایع دارای گرمای نهان کمتری در مقایسه با مایع - گاز هستند اگرچه این تغییرات شامل تغییر حجم کوچکتری نیز می باشند (حدود ۱۰٪ کمتر از مایع - گاز)، تغییرات فاز جامد - مایع از نظر اقتصادی برای استفاده در سیستمهای ذخیره سازی انرژی گرمایی مقرون به صرفه هستند. باید توجه نمود که خود مواد تغییر فاز دهنده نمی تواند بعنوان ماده انتقال دهنده حرارت بکار رود، بلکه ماده جداگانه ای برای انتقال حرارت از منبع انرژی به مواد تغییر فاز دهنده و بالعکس مورد استفاده قرار میگیرد [۵]

انتقال جامد - گاز و مایع - گاز دارای گرمای نهان تغییر فاز بالاتری هستند ولی تغییر حجم بالا در هنگام تغییر فاز منجر به مشکلاتی در نگهداری آنها می شود.

هر سیستم ذخیره سازی گرمای نهان حداقل باید داری ویژگیهای زیر باشد که عبارتند از:

(۱) سطح انتقال حرارت مناسب

(۲) یک مخزن مناسب برای ماده تغییر فاز دهنده

(۳) یک ماده تغییر فاز دهنده که دارای نقطه ذوبی در بازه دلخواه باشد

(۴) پیکر بندی واحد ذخیره سازی

(۵) نوع سیال انتقال حرارت

همان طور که قبلا بیان شده مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره سازی گرمای نهان بکار می روند که این کار با تغییر فاز در ماده ی تغییر فاز دهنده صورت میگیرد. بر خلاف مواد ذخیره کننده گرمای محسوس جذب و آزاد سازی انرژی به وسیله مواد تغییر فاز دهنده تقریبا در دمای ثابتی صورت میگیرد. علاوه بر این گرمای ذخیره شده در این حالت حدود ۵ الی ۱۴ برابر گرمای محسوس ذخیره شده توسط سیستم های ذخیره مربوطه نظیر آب و سنگ می باشد. لذا این مواد به دلیل دارا بودن چگالی ذخیره سازی انرژی بالا با نوسانات دمایی کمتر دارای اهمیت فراوانی می باشند به همین علت می باشد که سیستم های ذخیره سازی گرمای نهان نسبت به سیستم های گرمای محسوس توجه زیادی را به خود جلب کرده اند [۶]

۳-۳-۳- خواص مواد تغییر فاز دهنده

ماده PCM که قرار است در طراحی سیستم های ذخیره سازی انرژی بکار رود باید دارای خواص ترموفیزیکی، شیمیایی، سینتیکی مناسب باشد.

۳-۳-۳-۱- خواص حرارتی

- دمای تغییر فاز مناسب و متناسب با کاربرد
- گرمای نهان بالا برای اینکه سیستم طراحی شده دارای حداقل حجم ممکن باشد.
- هدایت حرارتی بالا جهت بهبود فرآیند شارژ و تخلیه

۳-۳-۳-۲- خواص فیزیکی

- چگالی بالا برای اینکه مخزن ذخیره دارای حداقل حجم باشد
- تغییر حجم کوچک جهت کاهش مشکلات نگهداری
- تعادل فاز هنگام ذوب و انجماد
- فشار بخار پایین در دمای عملیاتی

۳-۳-۳-۳- خواص شیمیایی

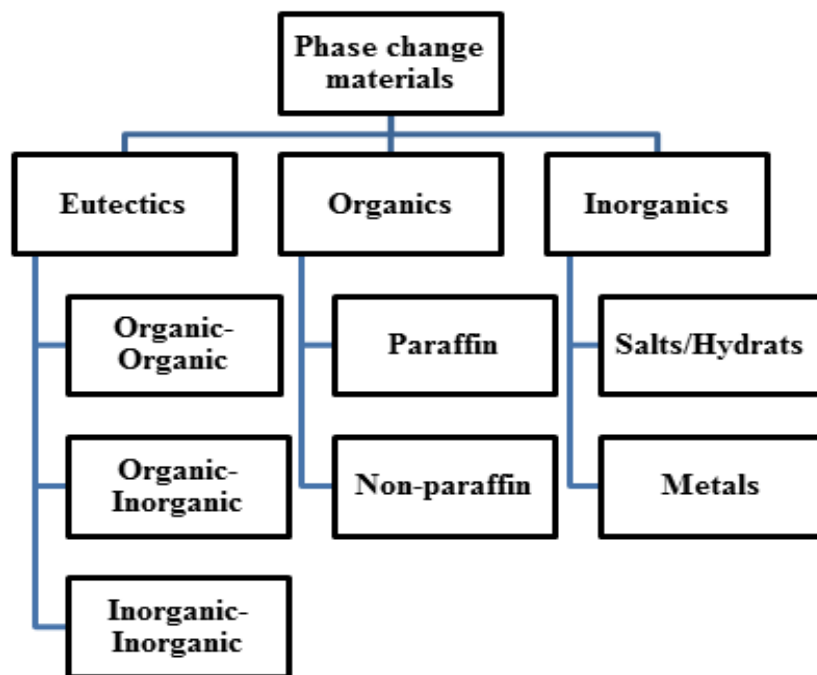
- تعادل شیمیایی دراز مدت
- سازگار با ظروف طراحی
- سمی نبودن
- غیر قابل اشتعال و غیر قابل انفجار بودن

۳-۳-۳-۴- اقتصادی

- در دسترس بودن
- مقرون به صرفه بودن

۳-۴- طبقه بندی مواد تغییر فاز دهنده

تعدادی از مواد تغییر فاز دهنده (آلی، معدنی و آلیاژی) در هر بازه دمای عملیاتی مورد نیاز وجود دارد که به صورت طبقه بندی در شکل ۳-۲ نشان داده شده اند.



شکل ۳-۲ طبقه بندی مواد تغییر فاز دهنده [4]

تعداد زیادی از مواد آلی و معدنی از نقطه نظر دمای ذوب و گرمای نهان ذوب می‌توانند به عنوان مواد تغییر فازدهنده مشخص گردند. اما بسیاری از آنها مشخصات لازم فوق‌الذکر را دارا نیستند. از آنجا که هیچ ماده واحدی نمی‌تواند تمام خواص مورد نیاز را به عنوان یک ماده ایده آل ذخیره کننده حرارت دارا باشد، باید ماده در دسترس را انتخاب نموده و تلاش شود که با طراحی مناسب سیستم، خواص ضعیف را پوشش داد. برای مثال فینهای فلزی برای افزایش هدایت مواد تغییر فازدهنده بکار می‌روند. همچنین مادون سرد شدن با استفاده از یک عامل هسته ای در مواد تغییر فازدهنده قابل بهبود است. با استفاده از ضخامت مناسب می‌توان دارای ذوب یکپارچه بود. به طور کلی ظرفیت ذخیره گرمای نهان مواد معدنی تقریباً دو برابر ظرفیت ذخیره گرمای نهان مواد آلی است.

۳-۵- روش های بهبود عملکرد سیستم های ذخیره سازی انرژی با استفاده از مواد تغییر فازدهنده

از آنجایی که طراحی یک سیستم ذخیره سازی انرژی حرارتی PCM هزینه بر است. برای بهبود عملکرد این سیستم ها نیاز به بکارگیری تکنیک های مناسب برای افزایش کارایی حرارتی آنها است.

که بر اساس تحقیقات گذشته انجام شده در زمینه سیستم های ذخیره سازی PCM تکنیک هایی برای افزایش عملکرد حرارتی سیستم ذخیره سازی ارائه شده که عبارتند از:

- گسترش سطوح انتقال حرارت توسط بال ها و کپسول ها
- استفاده از واسط انتقال حرارت متوسط یا لوله های گرمایی

• استفاده از چندین PCM

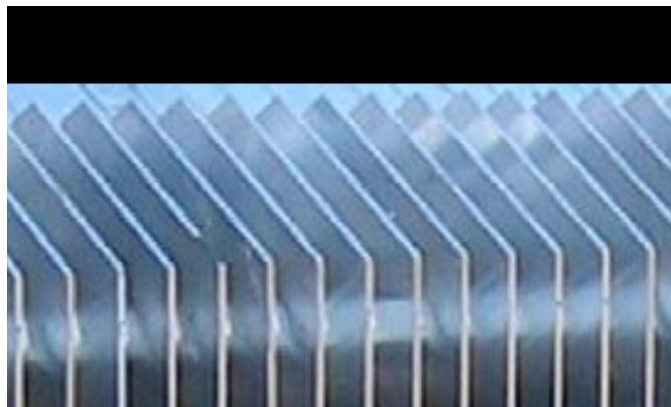
۳-۵-۱- بهبود عملکرد حرارتی سیستم ذخیره سازی PCM با استفاده از سطوح انتقال حرارت گسترده

افزایش سطح انتقال حرارت از طریق کپسول ها و لوله های پره دار باعث میشود، که نسبت سطح به حجم افزایش یابد و در واقع سیال انتقال حرارت در سطح بیشتری با PCM در تماس است یا به عبارتی باعث کاهش فاصله انتقال گرما به PCM میشود که این خود باعث بهبود انتقال حرارت میشود. کپسول های انعطاف پذیر و معمولا پلاستیک ها، برای کاربردهای PCM در دمای پایین مورد استفاده قرار میگیرند. برای کپسوله کردن PCM ها با دمای ذوب بالاتر از ۲۰۰ درجه سانتیگراد، اگر از کپسولهای سفت (خشک) برای دربرگرفتن PCM استفاده شود، حجم اولیه PCM برای مقاومت کردن در برابر تغییرات فشار در طول چرخه ذوب/انجماد نباید از ۸۰٪ تجاوز کند. در شکل ۳-۳ مجموعه ای از کپسول ها نشان داده شده است.



شکل ۳-۳ نمونه ای از کپسول ها، با پوسته های پلاستیکی و فلزی [7]

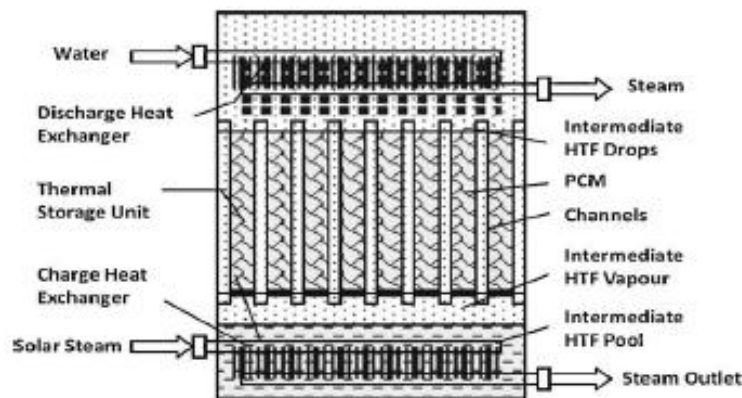
باله هایی که به صورت عمود بر محور لوله های سیال انتقال حرارت سازماندهی شده اند، در شکل ۳-۴ نشان داده شده اند. این باله ها به طور عمومی برای بهبود انتقال حرارت در واحدهای ذخیره سازی تغییر فاز در دمای بالا مورد استفاده قرار میگیرند. ماده باله میتواند ورقه گرافیت، آلومینیوم، فولاد و مس باشد.



شکل ۳-۴ نمونه ای از لوله های پره دار برای افزایش انتقال حرارت [7]

۳-۵-۲- بهبود عملکرد حرارتی سیستم ذخیره سازی PCM با استفاده از واسط انتقال گرمای متوسط

مفهوم ذخیره سازی حرارت ترکیب شده با سیال با رسانندگی متوسط به بالادرشکل ۳-۵ نشان داده شده است، که ذخیره سازی انتقال حرارت برگشتی نامیده میشود. این مفهوم بر پایه تبخیر - میعان برگشتی که در HTF متوسط رخ میدهد، بنا شده است. کل سیستم ذخیره سازی شامل یک واحد ذخیره سازی PCM و مبدل های حرارتی شارژ و تخلیه است که خارج از PCM در بالا و پایین واحد ذخیره سازی قرار گرفته اند. مبدل حرارتی شارژ در HTF متوسط مایع شناور شده است. در فرایند شارژ، HTF مایع، انرژی را از طریق تبخیر و بخارهایی که به سمت بالا در طول کانال انتقال در جریان هستند و در PCM پخش شده اند، جذب میکند. سپس بخار بر روی سطح کانال متراکم میشود و گرمای نهان بخار در سراسر دیوارها به PCM منتقل میشود. سیال انتقال حرارت مایع با استفاده از نیروی گرانشی به مخزن برگردانده میشود. در فرایند تخلیه، PCM گرم باعث تبخیر HTF مایع میشود و این بخار، انرژی را به سیال کاری که از طریق مبدل حرارتی بالا عبور داده میشود، منتقل میکند.

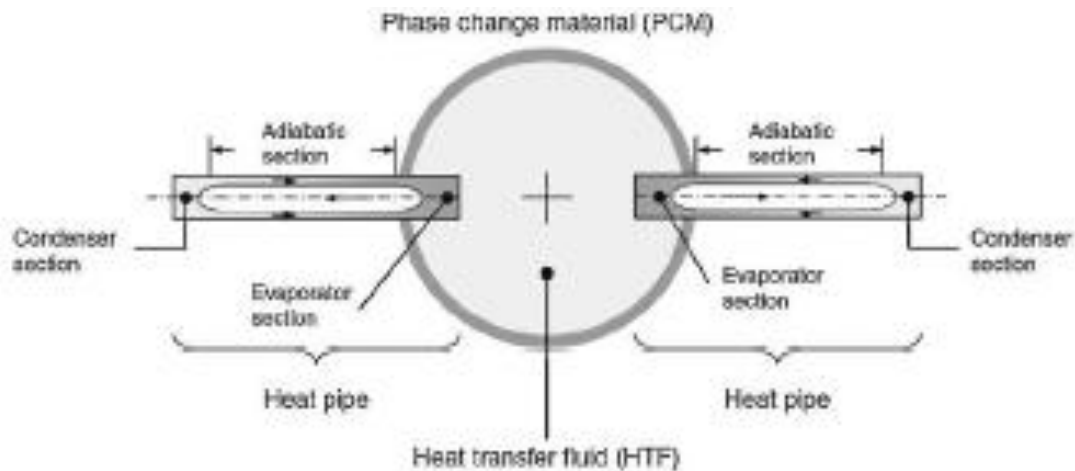


شکل ۳-۵ نمودار طرح کلی از مفهوم ذخیره سازی انتقال حرارت رفلاکس [7]

۳-۵-۳- بهبود عملکرد حرارتی سیستم ذخیره سازی PCM با استفاده از لوله های حرارتی

از آن جای که لوله های حرارتی رسانندگی حرارتی موثر بالایی دارند. آنها می توانند در داخل سیستم های ذخیره سازی حرارتی تغییر فاز برای تبادل حرارتی بین HTF و PCM گنجانده شوند.

در یک سیستم ذخیره سازی حرارتی تغییر فاز که از لوله های حرارتی برای بهبود انتقال گرما استفاده میکند، نشان داده شده است. لوله های حرارتی میتوانند گرما را بین HTF و PCM بوسیله تبخیر و میعان که در انتهای لوله های گرمایی رخ میدهد انتقال دهند.



شکل ۳-۶ بهبود عملکرد حرارتی با استفاده از لوله های حرارتی [۷]

۳-۶- نتیجه گیری:

در این تحقیق انواع روش های ذخیره سازی انرژی حرارتی که شامل ذخیره گرمای نهان و روش ترموشیمیایی است معرفی گردید. در روش ذخیره سازی گرمای محسوس، انرژی حرارتی بوسیله بالا بردن دمای ماده مورد نظر ذخیره می شود. در سیستم های ذخیره گرمای محسوس، مقدار گرمای ذخیره شده بستگی به گرمای ویژه مواد و دمای آنها ضمن ذخیره گرمادارد. ذخیره گرمای محسوس مشکلاتی به همراه دارد که استفاده از آن راکمی نامطلوب می سازد. به عنوان مثال چگالی پایین انرژی حرارتی محسوس، موجب بالا رفتن حجم وسایز تجهیزات و به دنبال آن بالا رفتن هزینه های سیستم می شود. ذخیره گرمای نهان بر پایه جذب یا آزاد سازی گرماست. زمانی که ماده مورد استفاده برای ذخیره انرژی حرارتی دچار یک فرایند تغییر فاز مثلا از جامد به مایع یا مایع به گاز... شود. تغییر فازهای جامد-مایع نسبت به مایع-گاز گرمای نهان کمتری دارند ولی دارای تغییر حجم کمتری (حدود ۱۰ درصد) می باشند و از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه هستند. استفاده از سیستم های ذخیره گرمای نهان توسط مواد تغییر فاز دهنده به علت داشتن چگالی بالای انرژی و انجام گرفتن در دمای ثابت بسیار سودمندتر از روش گرمای محسوس است.

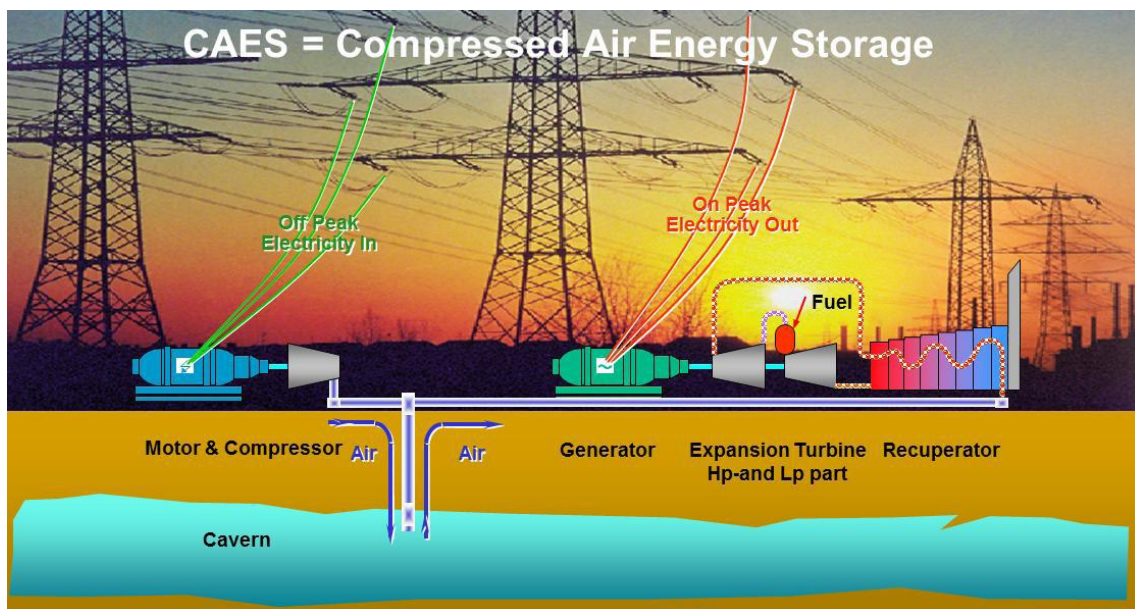
فصل چهارم:

بررسی روش ذخیره سازی

انرژی هوای فشرده

ذخیره انرژی به روش هوای فشرده روشی است که برای پیک سایی شبکه برق مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش از انرژی برق در ساعات غیرپیک برای فشرده کردن هوا توسط کمپرسور و ذخیره سازی آن در مخازن زیرزمینی استفاده می شود و در ساعات پیک هوای ذخیره شده برای به حرکت درآوردن توربین مورد بهره برداری قرار میگیرد و برق تولید می کند. در واقع سیستم ذخیره ساز هوای فشرده از انرژی الکتریکی ارزان و کم ارزش در ساعات غیرپیک استفاده کرده و انرژی الکتریکی گران قیمت و پرارزش در ساعات پیک را به شبکه تحویل می دهد و از این جهت صرفه اقتصادی سیستم را بالا می برد. در سال های اخیر به دلیل روبه اتمام بودن سوخت های فسیلی و مضرات فراوان آنها

برای محیط زیست، بحث گسترش استفاده از منابع انرژی های تجدیدپذیر قوت گرفته است. منابع تجدیدپذیر انرژی مانند انرژی باد و خورشید بسیار نامنظم و متغیر هستند. استفاده از انرژی باد و خورشید که امروزه از مهم ترین منابع تجدیدپذیر محسوب می شوند به دلیل متغیر بودن و ناپایداری محدود شده اند. به خصوص اینکه الگوی وزش باد و ساعات موثر تابش خورشید در طول ساعات شبانه روز با الگوی تقاضا برای انرژی برق مطابقت ندارد، به این معنی که وزش باد در ساعات بعد از نیمه شب و ابتدای صبح که ساعات غیر پیک و کمترین تقاضا محسوب می شود، شدید تر است. بنابراین تلفیق نیروگاه خورشیدی و بادی، با سیستم ذخیره ساز مانند CAES ایده بسیار خوبی است که در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته و چند نیروگاه تلفیقی به همین منظور هم اکنون در حال ساخت هستند. در شکل ۱-۴ شمائی از نیروگاه ذخیره سازی انرژی با هوای فشرده رسم شده است.



شکل ۱-۴ نمای کلی یک سیستم CAES

جدول ۴-۱ یک مقایسه جامعی را با توجه به ویژگی‌های انواع ذخیره‌سازها نشان می‌دهد [۸,۹] برق ذخیره شده در این ذخیره‌سازها به طور مستقیم در شبکه قدرت قابل کنترل می‌باشد .

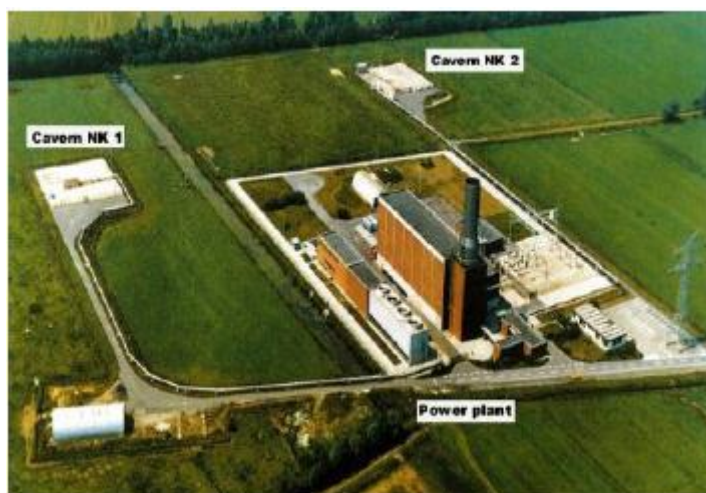
جدول ۴-۱ مشخصات مربوط به انواع ذخیره‌سازهای انرژی [۸,۹]

ذخیره ساز هوا ذخیره ای	ذخیره ساز پمپ ذخیره ای	خازن‌هایی با ظرفیت بالا	ذخیره سازی انرژی مغناطیسی با ابررسانا	ذخیره ساز حرارتی	پیل سوختی	چرخ طیار	باتری اسید سرب	باتری سولفور سدیم	
خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	عالی	عالی	خیلی خوب	خیلی خوب	خوب	خوب	چگالی توان
خیلی خوب	خیلی خوب	خوب	نسبتا خوب	عالی	خیلی خوب	نسبتا خوب	خیلی خوب	عالی	چگالی انرژی
۳۰سال	۳۰سال	۸-۱۰ سال	بیشتر از ۲۰سال	۲۰ سال	کمتر از ۲۰سال	سال ۲۰	۳-۱۲ سال	۱۵سال	طول عمر
نسبتا خوب				خیلی خوب	نسبتا خوب	عالی	خوب	خیلی خوب	زمان دشارژ
کمتر از ۱۰ دقیقه	کمتر از ۳ دقیقه	کمتر از ۱ دقیقه	میلی ثانیه	۱ ثانیه	۱ ثانیه	میلی ثانیه	میلی ثانیه	میلی ثانیه	پاسخ دینامیکی
پایین	بالا	بالا	پایین	پایین	پایین	متوسط	بالا	متوسط	هزینه
بی خطر	تاثیر نامطلوب	بی خطر	تاثیر نامطلوب بر سلامتی	بی خطر	بی خطر	بی خطر	سمی	بی خطر	تاثیرات محیطی
۴۰۰دلار	۱۰۰۰دلار	۱۲۰دلار	۹۷۵دلار	۶۰۰دلار	۴۰۰۰دلار	۱۰۰- ۳۰۰دلار	۱۲۰دلار	۱۸۰۰دلار	هزینه تولید به ازای هر کیلووات
بالای ۷۰	۷۰-۸۵	۹۵	۹۵-۹۰	بستگی دارد	۵۹	۹۰-۸۵	۷۵	۸۹-۹۲	بازده

باتوجه به جدول ۴-۱ مشاهده می گردد که ذخیره ساز هوای فشرده یک تکنولوژی ذخیره سازی با جذابیت بالا از نظر ذخیره سازی انرژی در مقیاس بالا، طول عمر طولانی، ظرفیت توان بالا، هزینه های تعمیر و نگهداری پایین و بازده قابل قبول می باشد. علاوه بر این ذخیره ساز هوا فشرده جهت ارائه خدمات جانبی شبکه همچون پیک سایه بار نیز در شبکه قدرت به کار برده می شود [۱۰]. ذخیره سازی هوای فشرده همچون یک تکنولوژی سبز سبب کاهش تغییرات انرژی باد به وسیله تامین کاستی های انرژی باد (در حالتی که تولید بادی کمتر از سطح تقاضا می باشد)، تنظیم فرکانس، کاهش و یا حذف مازاد انرژی باد می شود.

۴-۲- تاریخچه:

ذخیره سازی انرژی به روش ذخیره ساز هوای فشرده بیشتر از ۳۵ سال عمر دارد. روش ذخیره ساز هوای فشرده با عملکرد خوب دنیروگاه CAES موجود، به خوبی اثبات شده است: ۱- نیروگاه هانتورف در آلمان و ۲- نیروگاه مک اینتاش در آمریکا.



شکل ۴-۲ تصویر نیروگاه CASE با ظرفیت ۲۹۰ Mw در هانتورف آلمان



شکل ۳-۴ نمایی از نیروگاه مک اینتاش آمریکا [۱۱]

نیروگاه "هانتورف"^{۱۱} آلمان یک نیروگاه ۲۹۰ MW است که در سال ۱۹۷۸ شروع به کار کرده و نیروگاه "مک اینتاش"^{۱۲} یک نیروگاه ۱۱۰ MW است که در سال ۱۹۹۱ شروع به کار کرده است [۱۱]. هر دو نیروگاه از انرژی شبکه در ساعات غیرپیک برای ذخیره سازی هوای فشرده استفاده می کنند و هیچکدام به صورت تلفیقی با نیروگاه بادی کار نمی کنند [۱۲]. مخزن زیرزمینی ذخیره سازی هوای فشرده برای هر دو نیروگاه حفره های ایجاد شده در گنبد های نمکی می باشد [۱۳]. هر دو نیروگاه نیروگاه های هیبریدی هستند که از گاز طبیعی برای گرم کردن هوای خارج شده از مخزن زیرزمینی استفاده می کنند. نیروگاه هانتورف آلمان از ۲ مخزن که هر کدام ۱۱ میلیون فوت مکعب (۳۱۱۵۰۰ متر مکعب) حجم دارد استفاده می کند و نیروگاه مک اینتاش از مخزن با حجم ۲۰ میلیون فوت مکعب (۵۶۶۰۰۰ متر مکعب) استفاده می کند و می تواند به مدت ۲۶ ساعت با توان ۱۱۰ MW برق تولید کند [۱۴]. نیروگاه مک اینتاش برای تولید هر KWh انرژی الکتریکی به ۰/۶۹ KWh انرژی الکتریکی ورودی و ۱/۲ KWh انرژی از گاز طبیعی نیاز دارد. زمان لازم برای رسیدن این نیروگاه به بار کامل ۹ دقیقه است و این نیروگاه در طول سال حدوداً ۲۱۸ بار روشن می شود [۱۵]. این نیروگاه از بازتاب انرژی که از گازهای خروجی توربین برای پیش گرمایش هوای خارج شده از مخزن بهره می برد استفاده می کند [۱۶].

مشخصات نیروگاه های مذکور در جدول ۲-۴ مقایسه شده است.

^{۱۱} - Huntorf
^{۱۲} - McIntosh

جدول ۴-۲ مقایسه اولین و دومین نیروگاه CAES جهان در مقیاس تجاری

داده‌های فنی	نیروگاه CAES هاتنورف آلمان	نیروگاه CAES آلاباما آمریکا
توان خروجی	۲۹۰ مگاوات	۱۱۰ مگاوات
ذخیره انرژی برای	۴hr* ۲۹۰ MW=۱۱۶۰ MWh	۲۴hr* ۱۱۰ MW=۲۶۴۰ MWh
حجم گنبد نمکی	۳۱۰۰۰۰ m ³	۵۶۰۰۰۰ m ³
دبی دود در توربین گاز	۴۱۶ kg/s	۱۵۴ kg/s
دبی هوا در کمپرسور	۱۰۴ kg/s	۹۶ kg/s

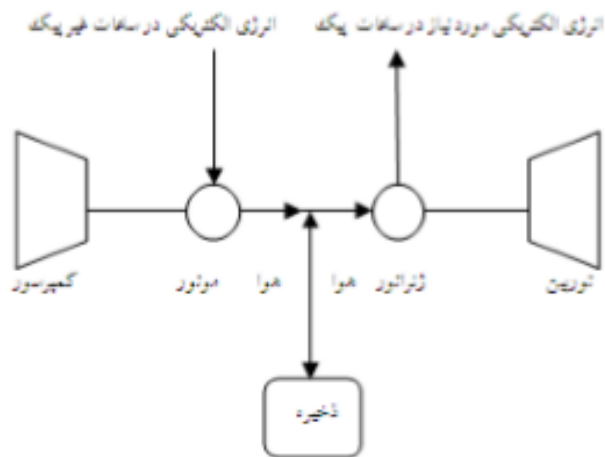
۴-۳- نحوه عملکرد نیروگاه ذخیره ساز انرژی هوای فشرده

نحوه عملکرد سیستم ذخیره ساز انرژی هوای فشرده، بدین صورت است که در ساعات غیرپیک که تقاضا برای انرژی برق کم است و وزش باد زیاد است یادر طول روز که تابش وجود دارد از برق غیرپیک و همچنین انرژی الکتریکی که نیروگاه بادی و یا خورشیدی تولید کرده برای به حرکت درآوردن یک موتور که یک کمپرسور را به کار می اندازد استفاده می کند. این کمپرسور، هوای فشرده تحت فشار را به مخزن زیرزمینی جهت ذخیره سازی می فرستد.

در ساعات پیک که تقاضا برای انرژی برق بیشتر از بار پایه است، هوای فشرده توسط کانال های مخصوص از مخزن زیرزمینی بیرون می آید و از طریق توربین های فشار-بالا و فشار-پایین که باعث چرخش ژنراتور می شوند، برق تولید می کند. در این اثنا برای گرم کردن گاز خروجی در محفظه احتراقی که طراحی شده مقداری گاز طبیعی محترق می شود [۱۷]. یک نیروگاه wind-CAES باید در منطقه ای احداث شود که به صورت بهینه هم دارای مخازن زیرزمینی مانند معادن خالی شده، سفره های آب زیرزمینی، گنبد های نمکی و یا چاه های گاز خالی شده باشد و هم دارای منابع خوب انرژی باد و نیروگاه های بادی باشد. همچنین منطقه مورد نظر قابلیت استفاده از گاز طبیعی را نیز داشته باشد. نکته دیگر در مورد نیروگاه های ذخیره ساز انرژی هوای فشرده این است که باتوجه به این که در این سیستم کمپرسور به صورت جداگانه از برق غیرپیک و یا انرژی الکتریکی تولیدی نیروگاه های بادی تغذیه می شود و برعکس سیکل ساده توربین گاز، انرژی گاز طبیعی صرف به حرکت درآوردن آن نمی شود، مصرف گاز طبیعی در این سیستم به میزان قابل توجهی کاهش میابد. اما این سیستم عاری از سوخت فسیلی و آلودگی های زیست محیطی ناشی از آن نمی شود. در این حالت سیستم ذخیره ساز انرژی هوای فشرده به ازای هر ۸۰۰ kwh تا ۱۲۰۰ kwh گاز طبیعی مصرف می کند و ۴۰-۶۰ گرم گاز گلخانه ای تولید می کند. اخیرا طرحی مطرح شده است که در سیستم ذخیره ساز انرژی هوای فشرده به جای استفاده از گاز طبیعی از سوخت سنتزی که از تبدیل به گاز کردن زیست توده به دست می آید، استفاده

شود. بدین ترتیب تولید CO_2 که مهم ترین گاز گلخانه ای محسوب می شود حذف خواهد شد و سیستم مستقل از تغییرات احتمالی قیمت گاز طبیعی در آینده ای نزدیک خواهد شد.

در شکل ۴-۴، بلوک دیاگرام یک سیستم ساده CAES نشان داده شده است.



شکل ۴-۴ یک طرح ساده از سیستم CAES

در اشکال زیر تصویر واقعی سیکل توربین گاز CAES نیروگاه هانتورف و آلاباما نشان داده شده است. در شکل ۴-۵ تصویر واقعی از موتور-ژنراتور و مجموعه کمپرسورهای نیروگاه آلاباما در آمریکا نشان داده شده است [۱۸].



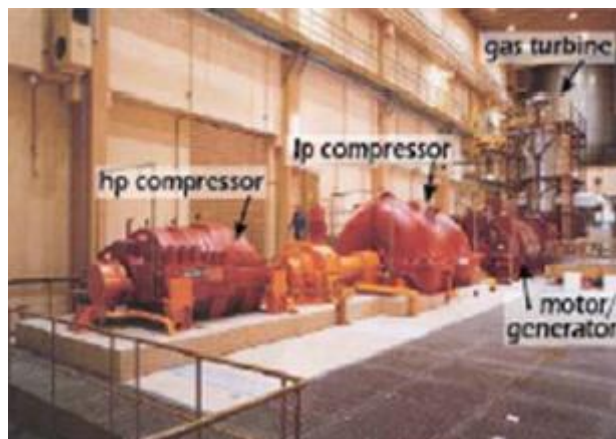
شکل ۴-۵ تصویر واقعی موتور-ژنراتور و مجموعه کمپرسورهای نیروگاه آلاباما

هم چنین شکل ۴-۶ تصویر واقعی از اکسپندر فشار قوی نیروگاه آلاباما را نمایش می دهد [۱۹].

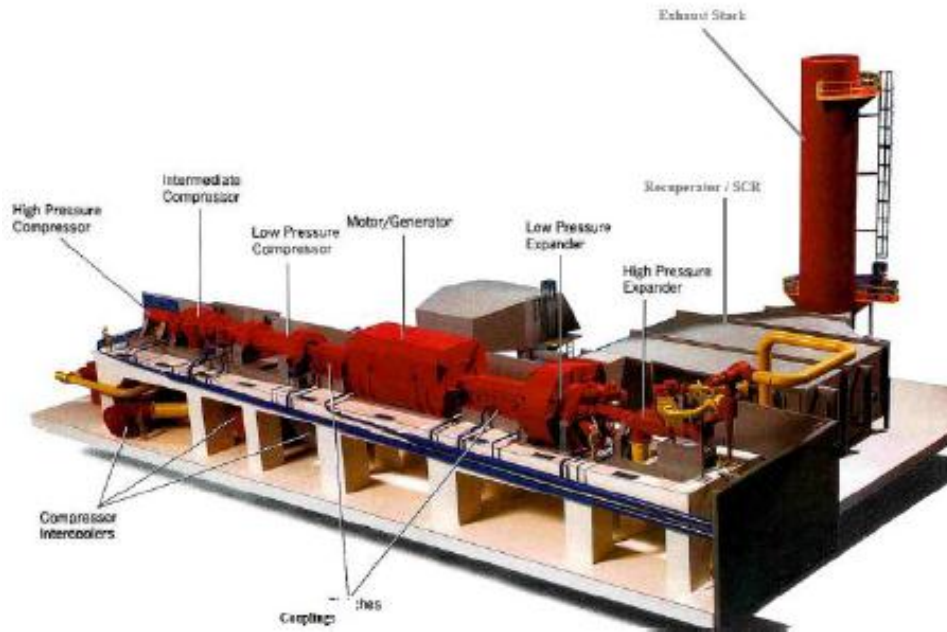


شکل ۴-۶ تصویر واقعی از اکسپندر فشار قوی نیروگاه آلاباما

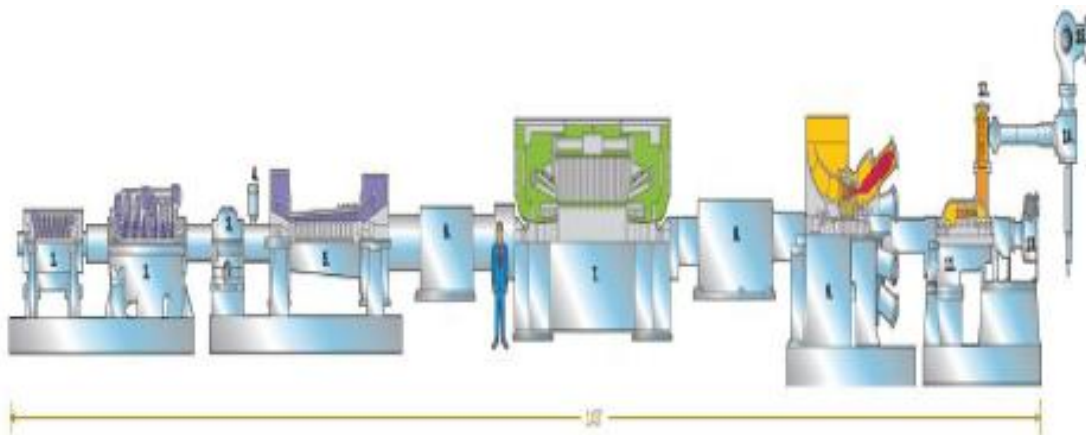
همینطور شکل ۴-۷ تصویر واقعی سیکل توربین CAES نیروگاه هانتورف آلمان را نمایش می دهد. در شکل ۴-۸ تصویر سه بعدی مجموعه کمپرسور و توربین نیروگاه CAES ۱۱۰ مگاواتی ایالت آلاباما نشان داده شده است. شکل ۴-۹ تصویر شماتیک یک مجموعه کامل از ماشین های دوار تک محوری به طول ۱۴۰ فوت در نیروگاه CAES با ظرفیت ۱۱۰ مگاوات را نمایش می دهد [۱۹].



شکل ۴-۷ تصویر واقعی سیکل توربین CAES نیروگاه هانتورف آلمان



در شکل ۴-۸ تصویر سه بعدی مجموعه کمپرسور و توربین نیروگاه CAES با ظرفیت ۱۱۰ مگاوات



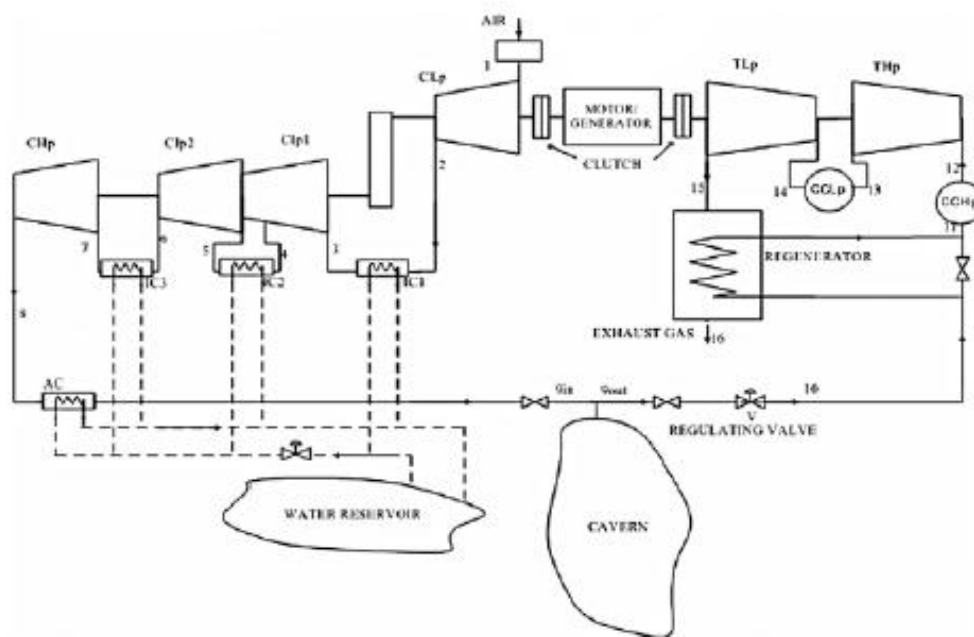
شکل ۴-۹ تصویر شماتیک مجموعه کامل آزمایشی های دوار تک محوری به طول ۱۴۰ فوت در نیروگاه CAES با ظرفیت ۱۱۰ مگاوات

در شکل ۴-۹ با توجه به اعداد روی شکل هریک از اجزای نیروگاه به این صورت می باشد: ۱- کمپرسور فشار قوی ۲- کمپرسور فشار متوسط ۳- دنده افزایش سرعت ۴- ترنینگیر ۵- کمپرسور فشار ضعیف ۶- کلاچ ۷- موتور/ژنراتور ۸- کلاچ ۹- اکسپندر فشار ضعیف ۱۰- اتاق های احتراق فشار ضعیف ۱۱- اکسپندر فشار قوی ۱۲- اتاق های احتراق فشار قوی ۱۳- ترنینگیر ۱۴- شیرخفه کننده بخار ۱۵- شیر تریپ هوا

۴-۴- اجزای فرایندهای کلی سیکل ذخیره ساز انرژی هوای فشرده

در واقع سیکل ذخیره ساز هوای فشرده اعمال تغییری در سیکل استاندارد توربین گاز محسوب می گردد. در سیکل ساده توربین گاز، شفت توربین به شفت کمپرسور متصل است. وقتی گاز در محفظه احتراق محترق می گردد و با انبساط در توربین آن رابه حرکت درمی آورد حدود دو سوم انرژی تولید شده صرف چرخاندن کمپرسور می شود. اما در سیکل ذخیره ساز انرژی هوای فشرده بخش کمپرسور از قسمت احتراق و توربین جدا شده است [۲۰]. بخش کمپرسور با استفاده

آزموتوری که انرژی الکتریکی را از نیروگاه خورشیدی یابادی ویابرق غیرپیک شبکه دریافت می کند به حرکت درمی آید و هوای فشرده ۶۰-۱۰۰ بار کمپرس میکند که این عمل باعث افزایش دمای هوا ۶۰۰ سلسیوس می شود. نسبت تراکم در مرحله تراکم سیستم ذخیره ساز انرژی هوای فشرده در مقایسه با مرحله تراکم سیکل ساده گازی بسیار بزرگتر است [۲۱]. بنابراین لازم است با استفاده از یک سری کولرمیانی از هوا گرما گرفته شود تا دمای آن به حدود ۵۰ سلسیوس برسد. هنگام بازیافت انرژی، هوای فشرده از مخزن زیرزمینی بالایی آید و ابتدا توسط یک هیتر گرم میشود و سپس در یک توربین هوا فشار-بالا منبسط می گردد و آن را به حرکت درمی آورد. سپس هوا با سوخت ترکیب شده و محترق می گردد و در یک توربین گازی فشار-بالا خطرات فنی سیستم را کاهش می دهد. زیرا باعث می شود توربین گاز فشار-پایین دقیقا همان فشار، همان دما و همان دبی را تجربه کند که اگر سیستم دارای کمپرسور بود تجربه می کرد. توربین هوا فشار-بالا یک توربین انبساطی اصلاح شده است و توربین گاز فشار-پایین همان توربین گاز استاندارد است که کمپرسور آن حذف شده است. از انرژی گازهای خروجی توربین گاز فشار-پایین می توان در هیتر استفاده کرد. هیتر در واقع یک مبدل حرارتی هوا به هوا است که در این سیکل با گرفتن گرما از گازهای خروجی توربین گاز فشار-پایین که دمایی حدود ۴۰۰ سلسیوس دارند و استفاده از آن برای گرم کردن هوای ورودی به توربین هوا فشار-بالا باعث افزایش بهره وری سیستم می شود. شماتیک کامل یک نیروگاه CAES که برگرفته از نیروگاه موجود در ایالات آلاباما است در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۰ شماتیک یک نیروگاه ذخیره انرژی هوای فشرده

بنابراین می توان گفت که یک سیستم ذخیره ساز انرژی هوای فشرده از ۴ مولفه تشکیل شده است: واحد نیروگاهی، واحد فشرده سازی، بخش زیرزمین (معمولا گنبدنمکی) و واحد تعادلی نیروگاه.

۴-۱-۴ واحد نیروگاهی خود شامل ۴ بخش است: توربین انبساطی، محفظه احتراق، ژنراتور و هیتر. فرایند فشرده سازی و انبساط از دیدگاه ترمودینامیکی به ۳ روش زیر می تواند انجام بگیرد:

۴-۴-۱-۱- روش آدیباتیک

در این روش، بعد از کمپرسور درهنگام ذخیره سازی بعد از هوای فشرده گرما گرفته شده و ذخیره شده و درهنگام خارج شدن هوا از مخزن برای گرم کردن مورد استفاده قرار می گیرد. این روش می تواند به طور عملی بازده راتا ۷۰٪ افزایش دهد، موادی که در این روش می توانند گرما را ذخیره کنند عبارتند از: بتون، سنگ، آجرهای سرامیکی، سنگلاخ ها و مایعاتی مانند روغن داغ (تا دمای ۳۰۰ سلسیوس) و نمک مذاب (در دمای ۶۰۰ سلسیوس). مطالعات در زمینه استفاده از این روش در حال انجام است ولی تاکنون به مرحله اجرا نرسیده است [۲۲].

۴-۴-۱-۲- روش غیر آدیباتیک

در این روش که در حال حاضر مورد استفاده قرار می گیرد، گرما بعد از کمپرسور درهنگام ذخیره سازی توسط کولرمیانی از هوا گرفته می شود و در محیط هدر می رود و سپس درهنگام خروج از مخزن هوا دوباره توسط هیتر و احتراق گاز گرم می شود. این روش نسبت به روش آدیباتیک بازده کمتری دارد ولی به دلیل ساده تر بودن و صرفه اقتصادی تا به حال مورد استفاده قرار گرفته .

۴-۴-۱-۳- روش ایزوترمال

این روش در دمای ثابت انجام می گیرد. در این روش مقدار گرما و کار مبادله شده از سیستم و به سیستم با هم برابرند، بنابراین انرژی داخلی و در نتیجه دما ثابت باقی می ماند و تنها برای سیستم هایی با سطح انتقال انرژی بالا و حجم کم و سرعت آهسته عملی است مگر اینکه از مبدل های حرارتی بسیار کارآمد استفاده شود. استفاده از کولر میانی در بین طبقات کمپرسور هم به منظور نزدیک کردن آن به شرایط ایزوترمال است [۲۳].

۴-۵- مزایای CAES :

فن آوری CAES دارای قابلیت بهره برداری بالا و هماهنگی قابل توجه با منابع دیگر تولید انرژی است. به طور کلی یک سیستم ذخیره سازی انرژی برای داشتن بازده بالا باید دارای توانایی قابل ملاحظه ای جهت ایجاد هماهنگی با نوع کاربرد مورد نظر و همچنین با نوع تولیدی که از آن انتظار می رود، باشد که این امر نیاز به هماهنگی باشکله دارد. فناوری CAES مورد استفاده در توان های بالا در این زمینه نیز نسبت به سایر روش های ذخیره سازی انرژی دارای وضعیت مطلوبی است. از جمله مزایای استفاده از سیستم ذخیره سازی هوای فشرده، ارائه برخی خدمات پشتیبانی به شبکه است، خدماتی نظیر کاهش پیک بار، کاهش ذخیره چرخشی^{۱۳}، تامین توان راکتیو، تنظیم فرکانس و کاهش قیمت برق. از مزایای دیگر این سیستم در زمینه خدمات مدیریت شبکه می توان به توانایی عملکرد موثر این سیستم در شرایط وجود بارهای جزئی در شبکه اشاره کرد. که این مزیت از توانایی تغییر حالت سریع CAES قادر به پاسخ گویی به بارهای متغیر در شبکه هستند چرا که در مقابل تغییرات مداوم روشن/ خاموش مقاوم هستند.

^{۱۳}- Spinning reserve

توان تولیدی توسط این نیروگاه هامعمولا بین ۵۰ تا ۳۰۰ مگاوات است که از تمامی روش های ذخیره سازی به جز روش پمپ ذخیره ای بیشتر است. [۸]

۴-۶- معایب CAES :

این روش نیز مانند هر فن آوری دیگر تولید شده توسط بشر، دارای معایب و نواقصی می باشد که ذکر چند مورد از آن ها ضروری می باشد. در مکانیزم CAES نیز مانند هر مورد دیگر از تبدیلات انرژی، اتلاف انرژی، اجتناب ناپذیر است. فشرده سازی و انبساط دو فرآیند اصلی در CAES هستند. اگرچه فشرده سازی به طور جداگانه صورت می گیرد ولی به هنگام بازیافت آن، بخشی از انرژی دریافتی معمولا به هدر می رود. از این رو باید بهره دریافت مجدد انرژی بهبود بخشیده شود. بدین منظور باید انرژی که در خلال فشرده کردن هوا به صورت حرارت خارج می گردد مجددا دریافت و در حین مرحله انبساط مورد استفاده مجدد واقع گردد. اما مهم ترین عیب CAES، نیاز به گرمای اضافی در خلال فرآیند انبساط است که این خود باعث بالا رفتن مصرف سوخت در، حین فرآیند انبساط می شود و دلایل آن در اصول فیزیکی انبساط گازها نهفته است. این ازدیاد مصرف سوخت، موجب می شود تا ارزش اقتصادی طرح با تغییرات قیمت سوخت، کاهش یابد. همچنین سوخت اضافی باعث افزایش هزینه های جانبی تولید می شود. یکی از راه های جلوگیری از اتلاف انرژی در حین انجام فرآیند انبساط، بازیافت حرارت باقی مانده از دود جهت گرم کردن هوا می باشد. وازچالش ها و به اصطلاح سایر معایب اصلی شامل، محدودیت جغرافیایی، بهره وری پایین تر به دلیل تبدیل رفت و برگشت، زمان پاسخ کندتر از فلاپویل یا باتری، و اثرات زیست محیطی مخرب می باشد. [۸]

۴-۷- مخازن زیرزمینی ذخیره سازی هوای فشرده

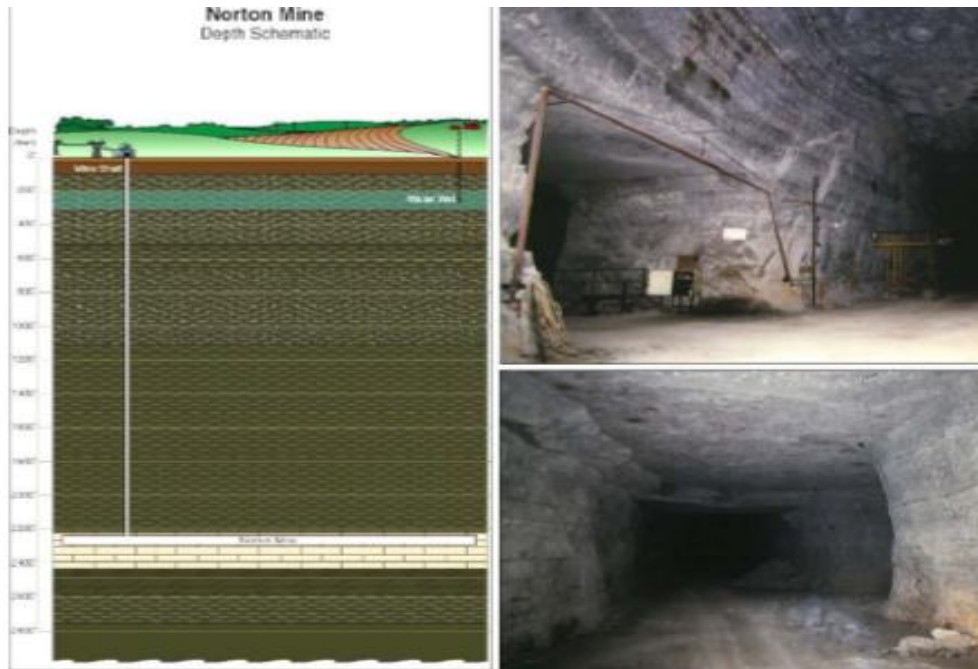
یکی از مهم ترین قسمت های یک سیستم ذخیره ساز انرژی هوای فشرده مخزن زیرزمینی مورد نیاز برای ذخیره سازی هوای فشرده است. ایده این نوع ذخیره سازی از ذخیره کردن گاز طبیعی در مخازن زیرزمینی که بیش از ۶۰ سال عمر دارد، نشأت گرفته است. این روش، به این دلیل انتخاب شده است که می تواند حجم بالایی از هوا و در نتیجه میزان زیادی از انرژی را با تغییرات بسیار اندک در فشار ذخیره سازی کند. در این حالت تغییرات دمای هوای فشرده و اتلافات حرارتی نیز اندک خواهد بود. این مخزن زیرزمینی می تواند معادن خالی شده، حفره های ایجاد شده در گنبد های نمکی، سفره آب های زیرزمینی، چاه های خالی شده و لایه های موجود بین صخره های زیرزمین باشد [۲۴].

هر دو نیروگاه ذخیره ساز انرژی هوای فشرده موجود از حفره های ایجاد شده در گنبد های نمکی استفاده می کنند ولی نیروگاه ذخیره ساز انرژی هوای فشرده مربوط به پروژه Isep از سفره های آب زیرزمینی استفاده خواهد کرد. روش ایجاد این حفره ها به این صورت است که ابتدا چاهی را تا عمقی از گنبد نمکی حفر میکنند، سپس آب را با فشار به گنبد نمکی تزریق کرده تا با حل کردن بخشی از نمک، حفره ای ایجاد کنند. سپس آب شور حاصل به سطح زمین برگردانده می شود. این عمل تازمانی که حفره با حجم مورد نظر حاصل شود ادامه می یابد.



شکل ۴-۱۱ نحوه ایجاد مخزن درگنبد نمکی

همانطور که می دانیم مزیت سفره های آب زیرزمینی این است که فشارهیدرواستاتیک آب فشارهوای فشرده درون مخزن را کنترل کرده و ثابت نگه می دارد. فشار هوای فشرده درون مخزن زیرزمینی در حدود ۶۰-۱۰۰ بار است. برای ذخیره کردن هر MWh انرژی به حدود ۲۰۰-۳۰۰ مترمکعب فضا در مخزن نیاز است. روش دیگری که برای ذخیره سازی هوای فشرده پیشنهاد شده، استفاده از مخازن انعطاف پذیر در کف دریاچه ها و دریاها است. در این روش فشار ثابت می ماند. کلاچ های مورد استفاده در سیستم های ذخیره ساز انرژی هوای فشرده به یک موتور-ژنراتور اجازه می دهد تا بتواند هم برای کمپرس کردن و هم برای تولید برق استفاده شود تا هم در هزینه و هم در مکان صرفه جویی شود و همچنین بتواند راحت از حالتی به حالت دیگر تغییر کاربرد دهد. در طی روز که حالات پیک و آف پیک مصرف رخ می دهد و بین ذخیره سازی و تولید تغییر حالت رخ می دهد، این کلاچ ها بدون نیاز به نگهداری این بارگذاری و باربرداری را انجام می دهد. این نوع کلاچ ها ۴۰ سال است مورد استفاده قرار می گیرد و در اوایل برای موارد با انتقال قدرت با توان بالا و سرعت بالا کاربرد داشته است. در شکل ۴-۱۲ نمونه ای از مخزن زیرزمینی برای ذخیره سازی هوای فشرده نمایش داده شده است.



شکل ۴-۱۲ یک نمونه مخزن زیر زمینی استفاده شده در نیروگاه CAES

مکان مورد نظر از هر نوع که باشد باید دارای ویژگی های مناسب زمین شناسی و موقعیت مکانی مناسب جهت احداث پروژه باشد که در ادامه توضیح می دهیم.

۴-۷-۱- دسترسی به گاز طبیعی

برای راه اندازی سیستم CAES نیاز به سوخت فسیلی (گاز طبیعی) می باشد که این فن آوری وابسته به نیروگاه های گازی است و باید با آنها در ارتباط باشد. بنابراین مکان احداث پروژه باید در جایی انتخاب شود که تا حد امکان به منابع گاز طبیعی و همچنین به نیروگاه های گازی نزدیک باشد.

۴-۷-۲- مجاورت و نزدیکی به خطوط انتقال

انتقال انرژی از نیروگاه به مرکز بار از طریق خطوط انتقال صورت می گیرد و هرچه نیروگاه از خطوط انتقال دورتر باشد به معنی دوری از مرکز بار خواهد بود. این مسأله برای سیستم های ذخیره ساز انرژی اهمیت بسیاری دارد، زیرا تلفات انتقال انرژی در دو وضعیت ذخیره سازی انرژی و همچنین بازیافت انرژی وجود خواهد داشت. بنابراین هزینه های بهره برداری طرح افزایش یافته و توجیه پذیری اقتصادی آن کاهش می یابد.

۴-۷-۳- نویز

تاسیسات CAES باید در جایی واقع شود که نویز حاصل از توربین آن تاثیر منفی بر تجهیزات و محیط اطراف نداشته و یا تاثیر آن به حداقل مقدار ممکن کاهش یابد.

۴-۷-۴- ویژگی های ژئوفیزیکی مخازن

مخازن گاز طبیعی که به منظور ذخیره سازی هوای فشرده به کار گرفته می شوند بایستی برخی خصوصیات را دارا باشند، از جمله این خصوصیات قابلیت تحمل فشار و قابلیت نفوذپذیری مخازن می باشد.

فصل پنجم:

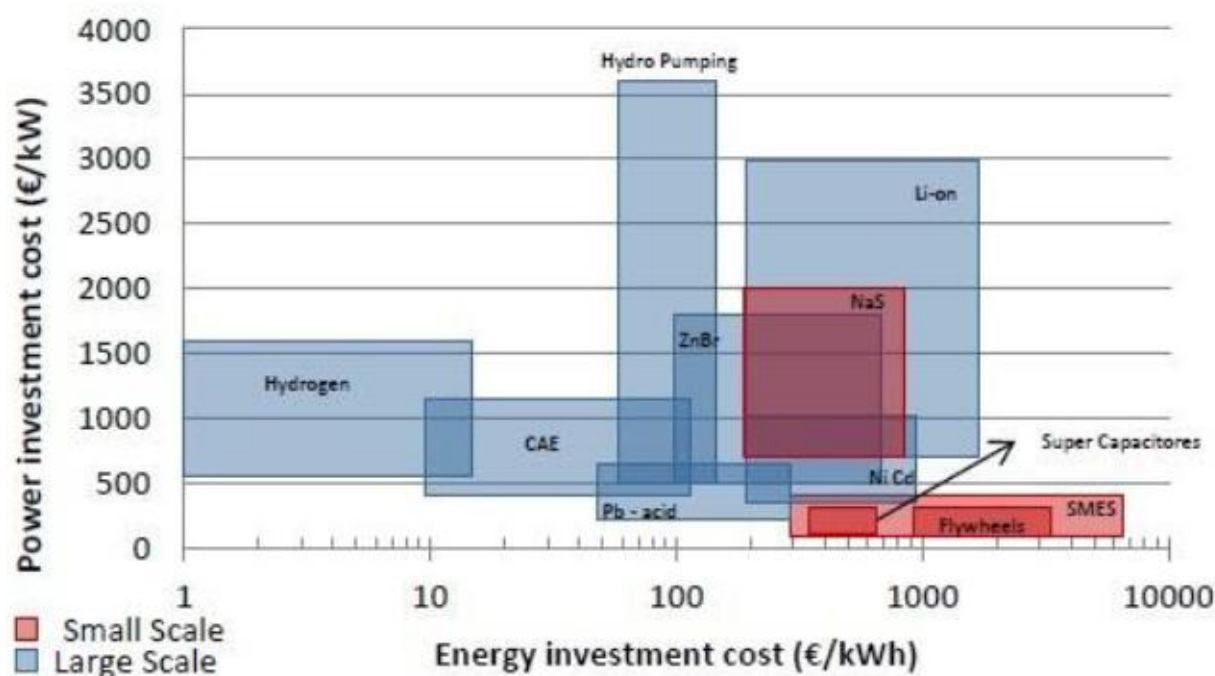
بررسی مشخصات

اقتصادی و اجرائی و فنی

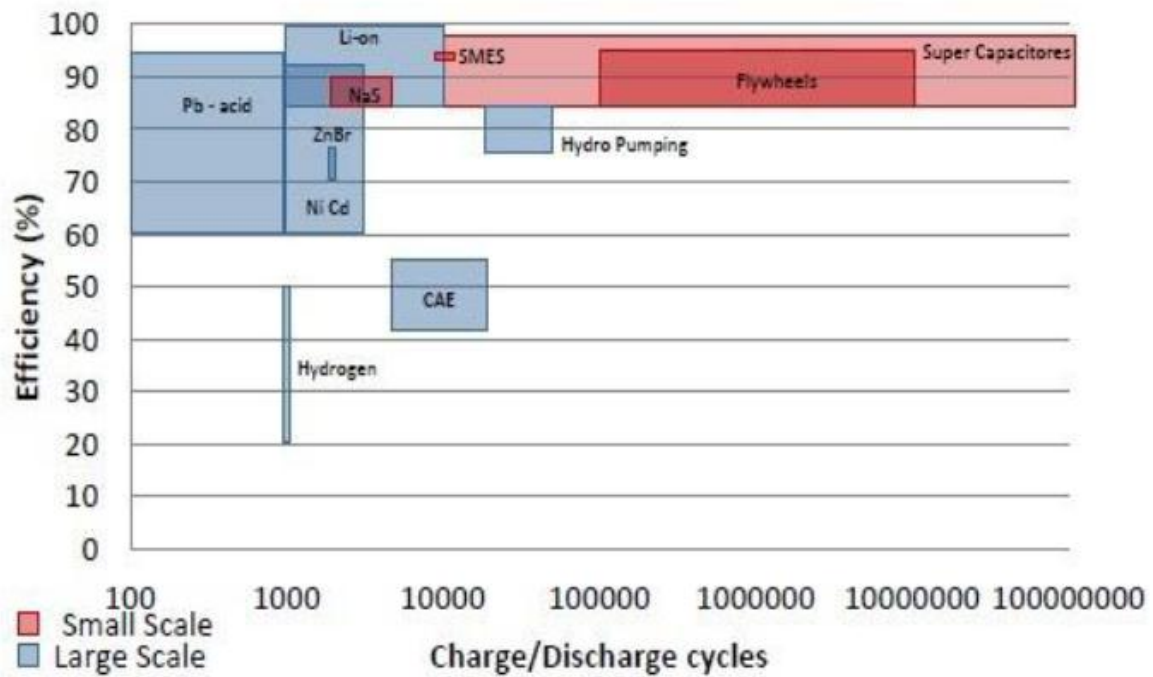
ذخیره سازهای انرژی

۵-۱ مقدمه

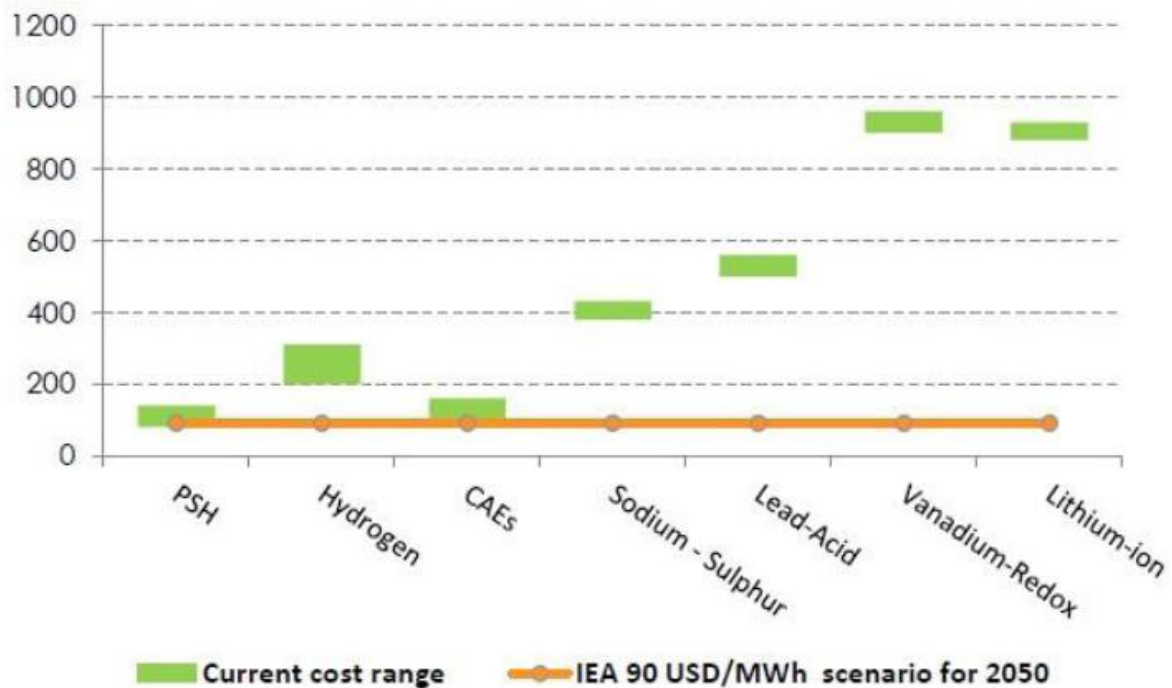
برای محاسبه ی هزینه ی ذخیره سازها سه پارامتر راندمان، هزینه های سرمایه گذاری و چرخه ی عمر می بایست در نظر گرفته شود [۲۵]. شمائی مختصر و مفید از این سه پارامتر به ترتیب در اشکال ۵-۱ و ۵-۲ و ۵-۳ قابل مشاهده می باشند. تجربه نشان می دهد که تحلیل گسترده و همه جانبه منجر به بهبود اقتصاد می گردد. هزینه های انرژی عامل مهمی در هزینه های کل تاسیسات محسوب می شود. بنابراین، می بایست راه حل هایی را بیابیم تا با تقاضا برای اجرا و کیفیت و تجهیزات راندمان انرژی مطابقت داشته باشد.



شکل ۵-۱ مقایسه هزینه سرمایه گذاری ذخیره سازهای انرژی [۲۵]



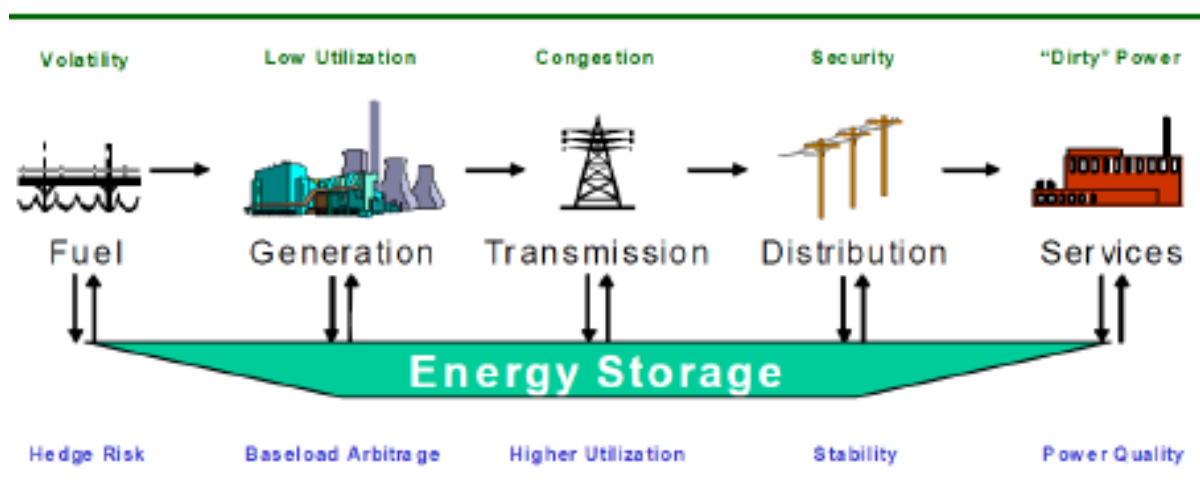
شکل ۲-۵ مقایسه راندمان ذخیره سازهای انرژی برحسب زمان شارژ و دشارژ آن ها [25]



شکل ۳-۵ مقایسه هزینه تمام شده ذخیره سازهای انرژی و پیش بینی آن ها تا سال ۲۰۵۰ [25]

۵-۲- زنجیره ارزش سنتی برق شامل ۵ پیوند در نظر گرفته شده است:

سوخت/منبع انرژی، تولید، انتقال، توزیع و سرویس دهی انرژی باتامین نیرو توسط ذخیره سازهای انرژی در زمان لزوم که در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. با ادغام انرژی ذخیره شده در سیستم شبکه تولیدی بخش های موجود و ایجاد ارتباط بیشتر، به ششمین پیوند تبدیل می شود. دیده می شود که برنامه های کاربردی بالقوه ذخیره سازها بیشمار و متنوع است و می تواند طیف کاملی از مقیاس بزرگتر را شامل شود. [۲۶]



شکل ۴-۵ مزایای ESS در طول زنجیره ارزشی برق [۲۶]

۵-۲-۱- انتقال و توزیع

- **پایداری سیستم:** امکان نگهداری کلیه مؤلفه های سیستم در یک خط انتقال در عملکرد همزمان با یکدیگر برای جلوگیری از سقوط سیستم [۲۶].
- **پایداری زاویه ای شبکه ای:** پایداری زاویه ای شبکه به معنای کاهش نوسانات قدرت (به دلیل وقایع سریع) با تزریق و جذب قدرت واقعی.
- **زمان شارژ:** زمان شارژ عبارت از مدت زمان لازم برای شارژ کامل مخزن در محدوده فشار بیشینه می باشد. زمان شارژ بستگی به حجم مخزن و نرخ کمپرسور (مقدار توان کمپرسور در پمپ کردن هوا به داخل مخزن) داشته و بر حسب ساعت می باشد.
- **زمان دشارژ:** زمان دشارژ عبارت از مدت زمان لازم برای دشارژ مخزن ذخیره از ظرفیت کامل (در محدوده فشار بیشینه) به محدوده کمترین فشار می باشد. زمان دشارژ بستگی به حجم مخزن و نرخ توربین (مقدار توانایی توربین در دشارژ مخزن) داشته و بر حسب ساعت بیان می شود.

۵-۲-۲- برنامه ریزی تعمیرات

با برنامه ریزی مناسب برای تعمیرات سیستم می توان هزینه های وابسته به تعمیرات را کاهش و طول عمر دستگاه و تجهیزات جانبی را افزایش داد. هزینه های وابسته به رفع نواقص جزئی نیز کمتری شود و آسیب های ناشی از این نواقص را کمتری کند. دستگاه های پیشرفته مجهز به ابزار تشخیص می باشند. با وجود ابزار تشخیص، اجزای دستگاه به طور بهینه ای استفاده می شوند و در صورت نیاز تعویض می شوند. با تشخیص زود هنگام نیاز به تعویض اجزا می توان از آسیب های جدی تر و توقف غیر ضروری دستگاه جلوگیری کرد. ارزیابی تعمیرات مورد نیاز توسط تکنسین های متخصص صورت می گیرد و هم چنین به پرسنل تعمیراتی خط نیز آموزش داده می شود. یک تکنسین می بایست روزانه دستگاه را بازرسی کند.

۵-۳- مزایای مالی و فنی سیستم های ذخیره انرژی

• ارزیابی و مقایسه فن آوری های ذخیره انرژی:

در ادامه، برخی از اعداد و ارقام ارائه شده است که جنبه های مختلف ذخیره سازها را با یکدیگر مقایسه می کنند. این فن آوری ها از نظر موضوعاتی از قبیل: بلوغ فنی، دامنه برنامه ها، کارایی، طول عمر، هزینه ها، تراکم حجم و غیره بررسی شده اند.

۵-۳-۱- بلوغ فنی

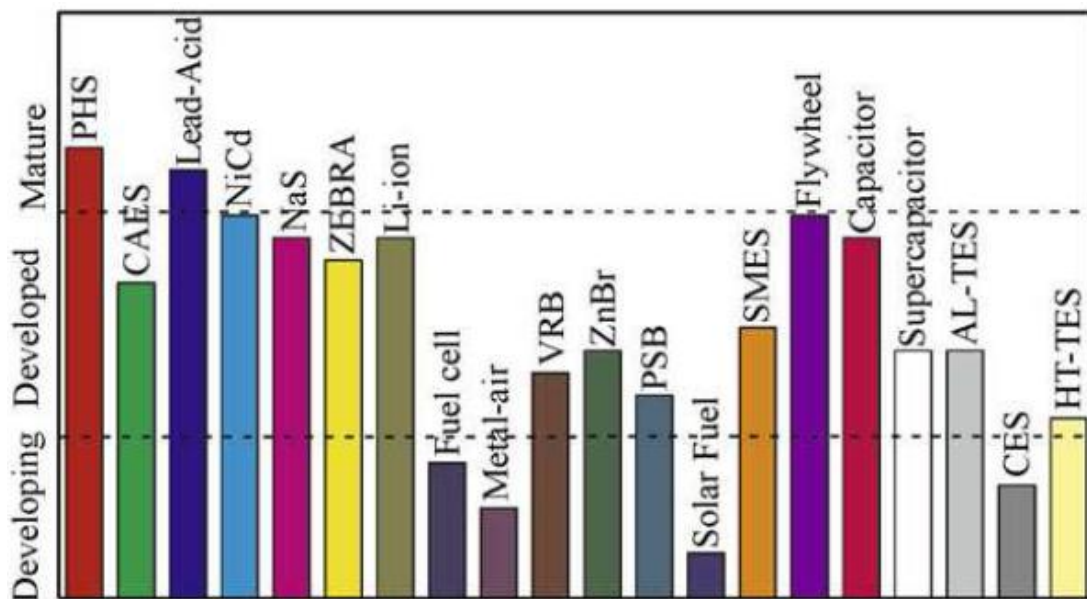
بلوغ فنی سیستم های ذخیره ساز انرژی در شکل ۵-۵ نشان داده شده است. فناوری های ذخیره سازی می توانند از نظر بلوغ به سه دسته تقسیم شوند [۲۷]:

۱- فن آوری های بالغ: PHS و باتری اسید-سرب بالغ هستند و از آنها بیش از ۱۰۰ سال استفاده شده اند.

۲- فن آوری های توسعه یافته: CAES، NiCd، NaS، ZEBRA Li-ion، باتری های جریان، SMES،

فلایویل، خازن، ابررسانا، Al-TES و HT-TES توسعه یافته اند. فن آوری های تمام این سیستم های EES از لحاظ فنی توسعه یافته و از لحاظ تجاری در دسترس هستند.

۳- فن آوری های در حال توسعه: سلول سوخت، باتری متال-هوا، سوخت خورشیدی و CES (ذخیره انرژی کرایونیک) هنوز در دست توسعه است و از نظر تجاری بالغ نیستند.



شکل ۵-۵ بلوغ فنی سیستم های EES [256]

۵-۳-۲- رتبه بندی توان و زمان تخلیه

رتبه بندی توان سیستم های مختلف در جدول ۵-۱ با یکدیگر مقایسه می شوند. به طور گسترده ، سیستم های ذخیره ای با توجه به برنامه های کاربردی آنها به سه دسته تقسیم می شوند [۲۷]، [۲۸]:

۱- مدیریت انرژی: PHS ، CAES و CES برای برنامه های کاربردی در مقیاس بالا ۱۰۰ مگاوات با مدت زمان خروجی ساعتی و روزانه انرژی استفاده می شوند [۲۷]، [۲۹].

۲- کیفیت انرژی: فلاپویل ، باتری ، SMES ، خازن و ابرسانا پاسخ سریع دارند و بنابراین می توان از آن ها برای کیفیت توان استفاده کرد [۲۹].

۳- قدرت اتصال: باتری ها ، باتری های جریان ، سلول های سوختی و سلول های Metal-Air نه تنها دارای یک پاسخ نسبتاً سریع (کمتر از ۱ ثانیه) بلکه زمان تخلیه نسبتاً طولانی (ساعت) نیز دارد ، بنابراین آنها برای پل زدن قدرت مناسب تر هستند [۲۸]، [۲۹].

جدول ۵-۱ مقایسه ویژگی های فنی سیستم های EES [27]

Systems	Power rating and discharge time		Storage duration		Capital cost		
	Power rating	Discharge time	Self discharge per day	Suitable storage duration	\$/kW	\$/kWh	¢/kWh-Per cycle
PHS	100-5000 MW	1-24 h+	Very small	Hours-months	600-2000	5-100	0.1-1.4
CAES	5-300 MW	1-24 h+	Small	Hours-months	400-800	2-50	2-4
Lead-acid	0-20 MW	Seconds-hours	0.1-0.3%	Minutes-days	300-600	200-400	20-100
NiCd	0-40 MW	Seconds-hours	0.2-0.6%	Minutes-days	500-1500	800-1500	20-100
NaS	50 kW-8 MW	Seconds-hours	~20%	Seconds-hours	1000-3000	300-500	8-20
ZEBRA	0-300 kW	Seconds-hours	~15%	Seconds-hours	150-300	100-200	5-10
Li-ion	0-100 kW	Minutes-hours	0.1-0.3%	Minutes-days	1200-4000	600-2500	15-100
Fuel cells	0-50 MW	Seconds-24 h+	Almost zero	Hours-months	10,000+		6000-20,000
Metal-Air	0-10 kW	Seconds-24 h+	Very small	Hours-months	100-250	10-60	
VRB	30 kW-3 MW	Seconds-10 h	Small	Hours-months	600-1500	150-1000	5-80
ZnBr	50 kW-2 MW	Seconds-10 h	Small	Hours-months	700-2500	150-1000	5-80
PSB	1-15 MW	Seconds-10 h	Small	Hours-months	700-2500	150-1000	5-80
Solar fuel	0-10 MW	1-24 h+	Almost zero	Hours-months	-	-	-
SMES	100 kW-10 MW	Milliseconds-8 s	10-15%	Minutes-hours	200-300	1000-10,000	
Flywheel	0-250 kW	Milliseconds-15 min	100%	Seconds-minutes	250-350	1000-5000	3-25
Capacitor	0-50 kW	Milliseconds-60 min	40%	Seconds-hours	200-400	500-1000	
Super-capacitor	0-300 kW	Milliseconds-60 min	20-40%	Seconds-hours	100-300	300-2000	2-20
AL-TES	0-5 MW	1-8 h	0.5%	Minutes-days		20-50	
CES	100 kW-300 MW	1-8 h	0.5-1.0%	Minutes-days	200-300	3-30	2-4
HT-TES	0-60 MW	1-24 h+	0.05-1.0%	Minutes-months		30-60	

۵-۳-۳- مدت زمان ذخیره سازی

جدول ۵-۱ همچنین مقادیر زمانی دشارژ یا تخلیه انرژی در روز، برای سیستم های ذخیره ی انرژی را نمایش می دهد. می توانید ببینید که:

۱- PHS، CAES، سلولهای سوختی، سلولهای فلزی-هوایی، سوختهای خورشیدی و باتری های جریان دارای نسبت خود تخلیه بسیار کوچک بنابراین برای یک دوره طولانی مدت ذخیره سازی مناسب هستند.

۲- سرب-اسید، TES و CES نسبت خود تخلیه متوسط دارند و برای یک دوره ذخیره سازی مناسب هستند نه بیشتر از دهها روز [۲۷].

۳- NaS، ZEBRA، SMES، خازن و ابررسانا نسبت خود شارژ بسیار بالایی دارند (۱۰٪-۴۰٪ در روز) آنها فقط برای دوره های چرخه کوتاه حداکثر قابل اجرا هستند.

اگر مدت زمان ذخیره طولانی تر ۱ روز باشد، فلاپویل ها ۱۰۰٪ انرژی ذخیره شده را تخلیه می کنند.

۵-۳-۴- هزینه سرمایه گذاری

هزینه سرمایه گذاری عبارت است از؛ هزینه درانرژی واحد، تقسیم بر عمر چرخه. که یکی از بهترین راه های ارزیابی هزینه است و واحد آن هزینه در هر کیلووات ساعت در هر چرخه می باشد. در جدول ۵-۲ اشکال مختلف هزینه های انواع روش های ذخیره انرژی بیان شده اند [۲۷]، [۲۹].

جدول ۵-۲ مقایسه مشخصات فنی سیستم های EES

Systems	Energy and power density				Life time and cycle life		Influence on environment	
	Wh/kg	W/kg	Wh/L	W/L	Life time (years)	Cycle life (cycles)	Influence	Description
PHS	0.5-1.5		0.5-1.5		40-60		Negative	Destruction of trees and green land for building the reservoirs
CAES	30-60		3-6	0.5-2.0	20-40		Negative	Emissions from combustion of natural gas
Lead-acid	30-50	75-300	50-80	10-400	5-15	500-1000	Negative	Toxic remains
NiCd	50-75	150-300	60-150		10-20	2000-2500		
NaS	150-240	150-230	150-250		10-15	2500		
ZEBRA	100-120	150-200	150-180	220-300	10-14	2500+		
Li-ion	75-200	150-315	200-500		5-15	1000-10,000+		
Fuel cell	800-10,000	500+	500-3000	500+	5-15	1000+	Negative	Remains and/or combustion of fossil fuel
Metal-Air	150-3000		500-10,000			100-300	Small	Little amount of remains
VRB	10-30		16-33		5-10	12,000+	Negative	Toxic remains
ZnBr	30-50		30-60		5-10	2000+		
PSB	-	-	-	-	10-15			
Solar fuel	800-100,000		500-10,000		-	-	Benign	Usage and storage of solar energy
SMES	0.5-5	500-2000	0.2-2.5	1000-4000	20+	100,000+	Negative	Strong magnetic fields
Flywheel	10-30	400-1500	20-80	1000-2000	~15	20,000+	Almost none	
Capacitor Super-	0.05-5	~100,000	2-10 capacitor	100,000+	~5	50,000+	Small	Little amount of remains 100,000+
20+		100,000+	Small	Little amount of remains		10-30		
AL-TEES	80-120		80-120		10-20		Small	
CES	150-250	10-30	120-200		20-40		Positive	Removing contaminates during air liquefaction (Charge)
HT-TEES	80-200		120-500		5-15		Small	

CAES، باتری Metal-Air، PHS، TESS و CES از نظر هزینه سرمایه در کیلووات ساعت در دامنه پایین قرار دارند. در بین تکنیک های توسعه یافته، CAES کمترین هزینه سرمایه را در مقایسه با تمام سیستم های دیگر دارد. همچنین لازم به ذکر است که هزینه سرمایه سیستم های ذخیره انرژی می تواند به میزان قابل توجهی باشد متفاوت از تخمین های داده شده در اینجا. به دلیل پیشرفت در فن آوری ها، زمان ساخت، محل استقرارشان و اندازه سیستم. اطلاعات خلاصه شده در اینجا فقط باید مقدماتی تلقی شوند [۲۷]، [۲۹].

۵-۳-۵- بازده چرخه

بازده سیکل سیستم های ذخیره ساز انرژی در شکل ... نشان داده شده است. سیستم های ذخیره ساز انرژی را می توان بطور گسترده به سه گروه تقسیم کرد:

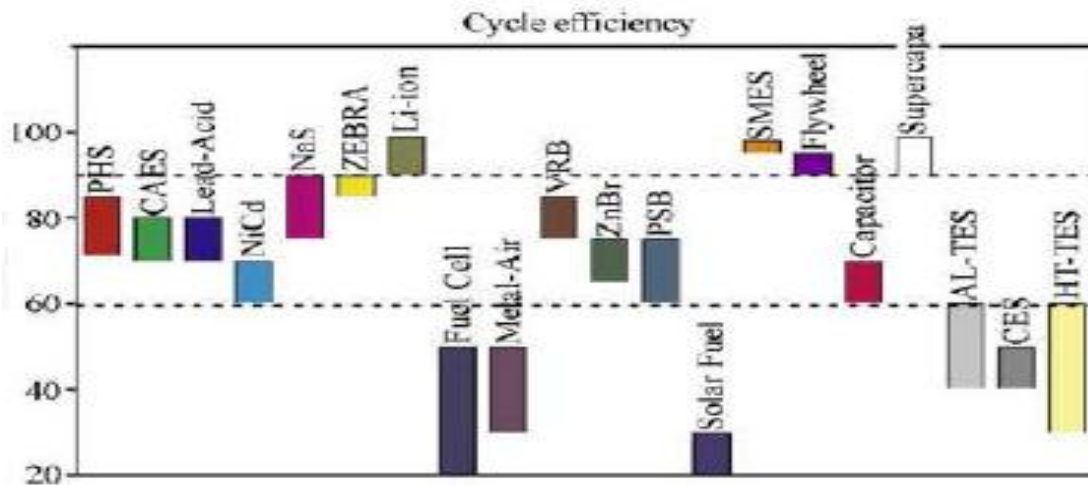
۱-راندمان بسیار بالا: SMES، فلاپویل، باتری لیتیوم-یون بازده چرخه بزرگتر از ۹۰٪ هستند.

۲- راندمان بالا: CAES, PHS, باتری (به استثنای یون- لیتیوم) ، باتری های جریان و خازن های مرسوم دارای بازده چرخه ۶۰-۹۰٪ است [۲۷],[۲۹].

۳- راندمان پایین: هیدروژن ، DMFC ، Metal-air ، سوخت خورشیدی ، TESS و CES دارای بازده پایین تر از ۶۰٪ هستند [۲۷],[۲۹].

۵-۳-۶- چگالی انرژی و نیرو

چگالی توان (W / kg یا W / Lit) قدرت خروجی دارای امتیاز است که بر اساس حجم دستگاه ذخیره سازی تقسیم می شود. چگالی انرژی به عنوان یک انرژی ذخیره شده تقسیم بر حجم محاسبه می شود. حجم دستگاه ذخیره سازی ، حجم کل سیستم ذخیره انرژی است.



شکل ۵-۶ بازده چرخه سیستم های EES [۲۷]

۵-۳-۷- زمان زندگی و عمر چرخه

همچنین در جدول ۱ زمان زندگی و یا چرخه عمر برای ذخیره ساز های انرژی مختلف مقایسه شده است. دیده می شود که عمر چرخه سیستم های EES که اصول آنها تا حد زیادی بر پایه برق استوار است و این فن آوری ها به طور معمول بسیار طولانی تر از ۲۰,۰۰۰ چرخه هستند. این نمونه ها شامل SMES ، خازن و ابررسانا هستند.

سیستم های ذخیره انرژی مکانیکی و حرارتی؛ از جمله CAES, PHS ، فلاپویل، AL-TES, CES و HT-TES نیز دارای عمر طولانی در چرخه هستند. در مهندسی مکانیک، زمان زندگی عمدتاً توسط زمان زندگی اجزا مکانیکی تعیین می شود. باتری های Metal-air به دلیل خراب شدن ساختار شیمیایی شان، فقط عمر چند مرحله ای دارد و بدیهی است باید بیشتر توسعه یافته شود [۲۷],[۲۹].

فصل ششم:

شبیه سازی احتراق متان در FLUENT و
بررسی تاثیر تزریق بخار به صورت
پیش آمیخته با سوخت بر میزان آلاینده
های محفظه احتراق توربین گازی

اکثر توربین های گازی از سوخت مایع یا گازی استفاده نموده و برخی از آنها قابلیت کار نمودن با هر دو نوع سوخت را دارا می باشند. امروزه توربین های گاز بدلیل هزینه پایین، سهولت نصب و راه اندازی، راندمان و قابلیت اطمینان بالا، کم آلاینده بودن و انعطاف پذیری وسیع بسیار مورد توجه و استفاده قرار گرفته اند.

مبنای انتخاب سوختی که در توربین های گازی استفاده می شود دسترسی آسان، ملاحظات اقتصادی و زیست محیطی می باشد. گاز طبیعی بدلیل هزینه پایین، دسترسی مناسب و میزان آلایندهی پایین انتخاب مناسبی برای استفاده در توربین های گازی می باشد. سوخت های گازی که در توربین های گاز استفاده می شود مشتمل بر گازهای قابل احتراق و یامخلوطی از گازهای قابل احتراق و گازهای خنثی می باشد. سوخت های گازی دارای کیفیت مختلف از کیفیت پایین مانند گاز سرچاه تا کیفیت بالا مانند گاز خط لوله خانگی می باشد. کیفیت و ترکیب درصد اجزای سوخت تاثیر بسزایی بر روی عملکرد و عمر مفید توربین و آلاینده های منتشر شده از توربین دارد. متان با فرمول مولکولی CH_4 یک گاز گلخانه ایست و معمولاً به عنوان سوخت استفاده می گردد. متان ساده ترین آلکان است. ماده اصلی متان (گاز طبیعی) همراه بانفت یافت می گردد. از تجزیه مواد گیاهی در نواحی مردابی تشکیل می گردد.

این گاز اثر گلخانه ای زیادی نسبت به CO_2 دارد. از این سوخت در اکثر صنایع از جمله حمل و نقل، پتروشیمی و نیروگاهها استفاده می گردد.

با توجه به گسترش استفاده از توربین گاز در صنایع مختلف، قوانین سخت گیرانه برای کنترل آلاینده های خروجی توربین گاز وضع شده است. گازهای خروجی توربین گاز عبارت است از دی اکسید کربن، بخار آب، دی اکسید گوگرد، هیدروکربن های نسوخته، مونواکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، ذرات معلق و اکسیژن و نیتروژن اضافی هوا هستند. در این بین بخار آب و دی اکسید کربن آلاینده محسوب نمی شوند، اما در فرآیند گرمایش جهانی نقش موثری دارند [۳۰]. برای سوخت گاز طبیعی، آلاینده های دی اکسید گوگرد، هیدروکربن های نسوخته و مونواکسید کربن عموماً قابل چشم پوشی هستند [۳۱]، اما اهمیت آلاینده های NO_x به قوت خود باقی است. NO_x منجر به مشکلاتی نظیر غبار فوتوشیمیایی، باران های اسیدی، اوزون تروپوسفری، تخریب لایه اوزون و حتی افزایش دمای زمین می شود [۳۲].

در فرایند احتراق سه نوع NO_x تولید می شود که عبارت اند از: NO_x حرارتی، NO_x سوختی و NO_x سریع هستند. در فشارها و دماهای بالا بیشترین میزان NO_x تولیدی، NO_x حرارتی است. NO_x سوختی مربوط به سوخت هایی است که شامل نیتروژن باشند (مانند زغال سنگ). NO_x سریع نیز هنگامی که نسبت هم ارزی بیشتر از یک باشد، اتفاق می افتد. لذا در توربین گاز که بسیار رقیق سوز است (نسبت هم ارزی کمتر از یک است)، NO_x سریع نیز بسیار ناچیز است. بنابراین در توربین گازی که با گاز طبیعی کار کند، مهمترین عامل تولید NO_x ، مکانیزم NO_x حرارتی خواهد بود.

روش های کاهش آلاینده NOx به سه گروه زیر تقسیم می شوند:

۱- قبل از احتراق (مانند حذف نیتروژن از سوخت، استفاده از اکسیژن خالص برای احتراق و رقیق کردن سوخت با هوای اضافی)

۲- حین احتراق (مانند بازگردانی گازهای اگزوز و تزریق بخار یا قطرات آب به محفظه)

۳- پس از احتراق (مانند جذب NOx موجود در محصولات احتراق، کاهش انتخابی کاتالیستی توسط آمونیاک و استفاده از مبدل کاتالیست بدون آمونیاک) [۳۱]، [۳۲].

روش های حین احتراق معمولاً در دسترس ترین و مناسب ترین روش ها هستند.

اکسیدهای نیتروژن و کربن مونواکسید، اصلی ترین آلاینده های تولیدی توربین گاز هستند. کربن مونواکسید در اثر احتراق ناقص سوخت های فسیلی، و اکسیدهای نیتروژن به طور عمده در اثر شکستن پیوندهای نیتروژنی هوا در دمای بالای ناشی از احتراق تولید می شوند. اکسیدهای نیتروژن گستره وسیعی از ترکیبات نیتروژن دار هستند که

اثرات زیان باری بر سلامت انسان و محیط زیست بر جای می گذارند. اکسیدهای نیتروژن در فرآیند احتراق توربین های گازی، بیشتر به صورت مونواکسید نیتروژن تولید می شوند. به طور کلی از دیاد انتشار اکسیدهای نیتروژن، نسبت مستقیم با از دیاد دمای محفظه احتراق دارد [۳۳].

بنابراین یک راه ساده برای کاهش NOx، کاهش دمای منطقه احتراقی است. افزودن هوای اضافه، روش مؤثری برای کاهش NOx است [۳۳]، ولی به دلیل افزایش سرعت جریان در ناحیه اولیه و تأثیر بر پایداری شعله، زیاد مورد استفاده قرار نمی گیرد. یک روش جایگزین، ایجاد چاه حرارتی مانند آب یا بخار در منطقه احتراقی است. اولین بار ایده تزریق بخار به سیکل توربین گاز در سال ۱۹۰۳ مطرح شد [۳۴]. هدف اصلی در تزریق بخار به سیکل توربین گاز، در ابتدا افزایش توان خروجی، با افزایش دبی جرمی سیکل بود. اما با توجه به تحقیقات انجام شده در این زمینه، مشاهده شد که تزریق بخار با کاهش دمای محفظه احتراق، سبب کاهش اکسیدهای نیتروژن تولید شده در توربین گاز نیز می شود [۳۵].

گریوز ۱ و همکاران به مطالعه تجربی تأثیر تزریق آب به محفظه احتراق موتور دیزل، بر مصرف سوخت، تأخیر احتراق و آلاینده های کربن مونواکسید، NOx و هیدروکربن های نسوخته خروجی پرداختند. تزریق آب به سه روش تزریق آب در هوا، تزریق آب در سوخت و تزریق مستقیم آب به محفظه انجام شده و نتایج نشان می دهند که میزان تولید NOx ناشی از احتراق در تزریق آب به سوخت نسبت به تزریق آب به هوا یا تزریق مستقیم آب کاهش بیشتری دارد. علاوه بر آن در حالی که دو روش دیگر سبب افزایش تولید کربن مونواکسید و دوده می شوند، تزریق آب به سوخت، میزان تولید کربن مونواکسید را نسبت به احتراق بدون تزریق آب تا حدود ۵۰ درصد کاهش می دهد [۳۶].

آسنی ۵ و همکاران تأثیر تزریق بخار بر عملکرد و آلاینده های سیکل توربین گازی را بررسی کردند. در این مطالعه، به کمک روابط تحلیلی ترمودینامیکی برای سیکل توربین گازی و روابط نیمه تجربی برای آلاینده ها، مشخصه های

ترمودینامیکی سیکل و میزان آلاینده ها محاسبه و با تزریق بخار به داخل محفظه تأثیر این پارامتر بررسی شد. نتایج نشان می دهد که تزریق بخار سبب بهبود عملکرد سیکل، کاهش NOx تولیدی محفظه و افزایش کربن مونواکسید می شود [۳۷].

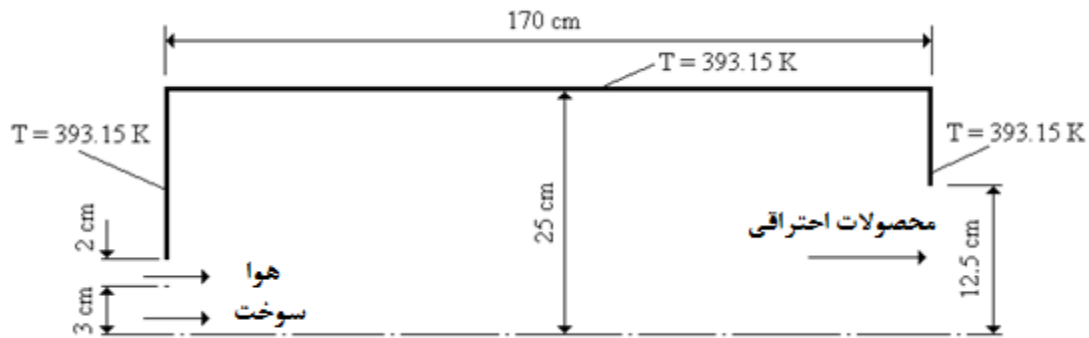
ایده روش CLN اولین بار در سال ۱۹۷۴ توسط چنگ ۷ مطرح شد و پس از انجام مطالعات وسیع و تحقیقات تجربی، در سال ۱۹۹۴ به صورت گسترده برای محفظه احتراق توربین گازی و سایر سیستم های احتراقی مورد استفاده قرار گرفت [۳۸]. در این روش بخار به شعله غیرپیش آمیخته تزریق شده و علاوه بر کاهش NOx، از افزایش کربن مونواکسید جلوگیری می کند. چنگ ادعا کرده است که پیش آمیختگی بخار با سوخت، علاوه بر کاهش دما، منطقه احتراقی که اکسیدهای نیتروژن در آن تولید می شود را محدود می کند. در شعله غیرپیش آمیخته وجود مناطق سوخت غلیظ و سوخت رقیق در کنار هم باعث می شود که در برخی مناطق، دما بالا رفته و تولید اکسیدهای نیتروژن افزایش یابد و در برخی مناطق، احتراق ناقص سبب افزایش تولید کربن مونواکسید شود. در سیستم CLN با افزایش درجه همگنی ۸ مخلوط سوخت و بخار، فاصله مناطق سوخت غلیظ و سوخت رقیق کمتر شده و میزان تولید کربن مونواکسید نیز کاهش می یابد [۳۹]. از محدودیت های روش CLN این است که پیش آمیختن بخار و سوخت کار ساده ای نیست و برای رسیدن به ترکیب سوخت و بخار با درجه همگنی بالا به تکنولوژی های خاصی نیاز است که هزینه های زیادی را بر سیستم تحمیل می کند.

هدف از کار حاضر به منظور بررسی روش CLN، تأثیر تزریق بخار به صورت پیش آمیخته با سوخت بر میزان آلاینده های محفظه احتراق توربین گازی باشد.

بدین منظور جریان غیرپیش آمیخته درون یک محفظه به صورت متقارن محوری به کمک نرم افزار فلونت ۱۰ مدل شده و تأثیر تزریق بخار به داخل محفظه، در شرایط مختلف مطالعه می شود.

۲-۶ مسئله شبیه سازی شده و شرایط مرزی

برای شبیه سازی عددی محفظه احتراق توربین گاز با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، کار تجربی گرتون ۱۵ و همکاران مبنای مطالعه و مدلسازی قرار می گیرد. ایشان در سال ۱۹۹۴ به مطالعه احتراق غیرپیش آمیخته گاز طبیعی درون یک محفظه استوانه ای پرداختند [۴۰]. طرحواره هندسه محفظه مورد نظر در شکل ۱-۶ نشان داده شده است.



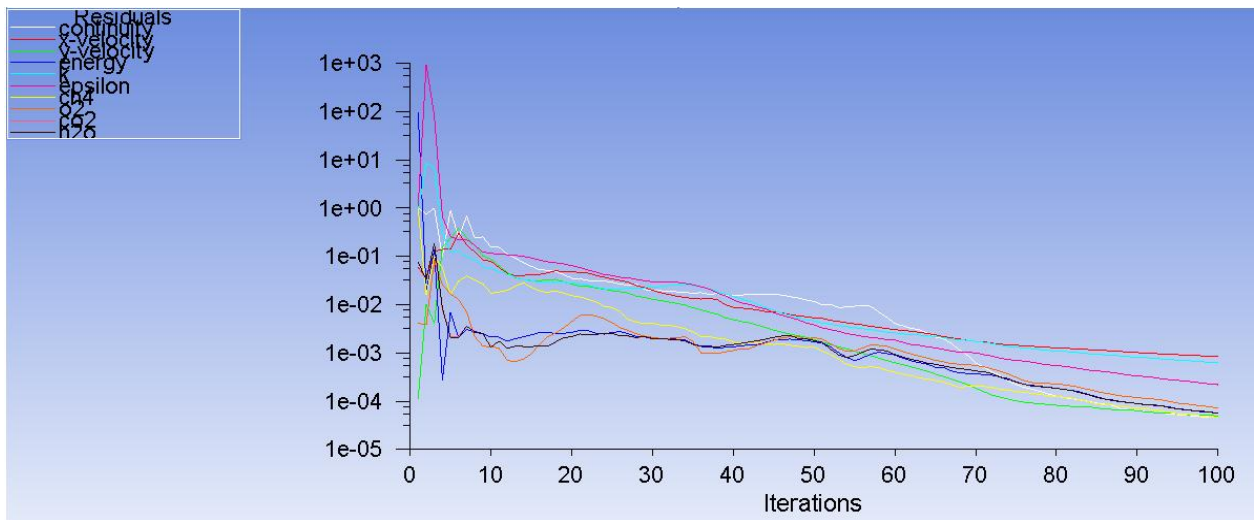
شکل ۱-۶ طرحواره محفظه احتراق مورد مطالعه

سوخت ورودی به محفظه گاز طبیعی با ترکیب ۹۰٪ جرمی متان و ۱۰٪ جرمی نیتروژن است. همچنین ترکیب هوای ورودی به صورت ۲۳٪ جرمی اکسیژن و ۷۶٪ جرمی نیتروژن و ۱٪ جرمی بخار آب می باشد. با توجه به دبی ها و قطر نازل ها، سرعت سوخت 8 m/s و سرعت هوا 25 m/s می باشد.

در مرز ورودی که محل ورود سوخت و هوا به صورت مجزا است، شرط مرزی، سرعت ورودی سوخت و هواست. در محل خروج گازهای احتراقی روی مرز خروجی، از شرط فشار نسبی صفر استفاده می شود. در مرز مشترک سیال با دیواره کوره، از شرط مرزی عدم لغزش روی دیواره ها برای سرعت استفاده می شود. همچنین دیواره محفظه در دمای ثابت قرار دارد. برای مسئله متقارن محوری، محور محفظه به عنوان محور تقارن در نظر گرفته شده و تغییرات حول محور تقارن، صفر است.

۳-۶ مقداردهی اولیه و حل مسئله:

طبق شکل ۲-۷ مشاهده می گردد که نمودار باقی مانده ها در تکرار ۱۰۰ کاملاً همگرا شده است.

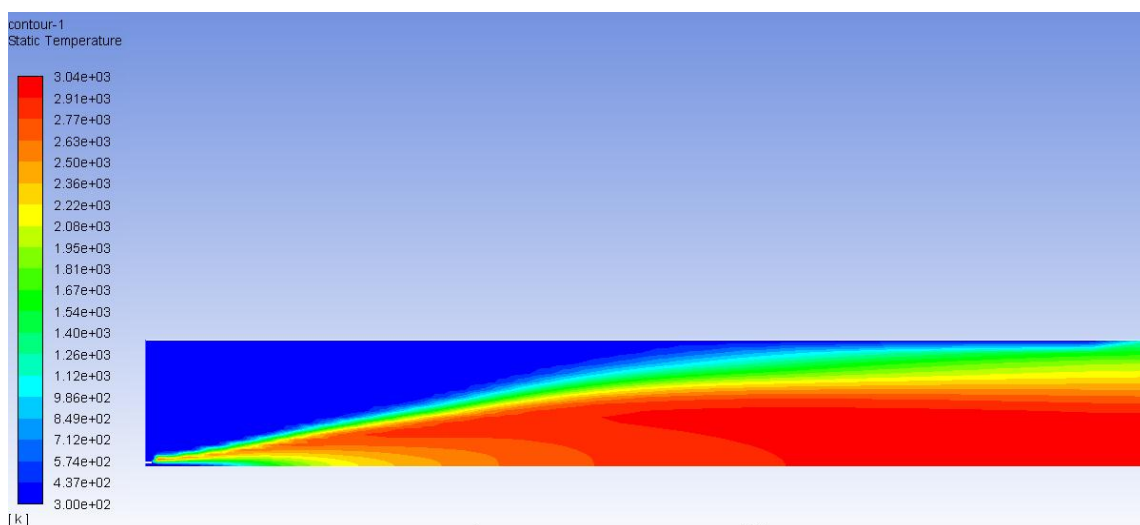


شکل ۲-۶ نمودار میزان همگرایی توابع و باقی مانده ها و converge شدن در ۱۰۰ تکرار

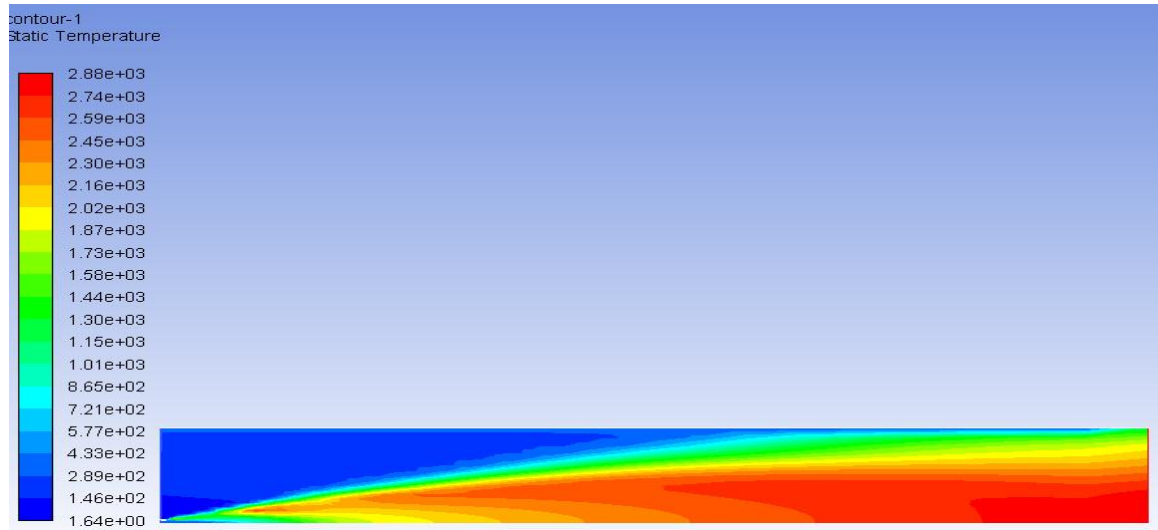
۴-۶ فعال سازی معادلات NOx در fluent

سپس با فعال سازی معادلات Nox در fluent و تزریق قطرات بخار آب با دبی های ۵۰ گرم برثانیه، ۱۰۰ گرم برثانیه و ۱۵۰ گرم برثانیه نسبت به حالتی که بدون تزریق قطرات بخار انجام دادیم. مقادیر مربوطه را از نظر میزان دمای میانگین خروجی، سرعت میانگین خروجی، جرم میانگین NOx خروجی، کانتورهای مربوط به جرم CO_2 و دماها را مقایسه می کنیم تا به نتیجه گیری کلی برسیم.

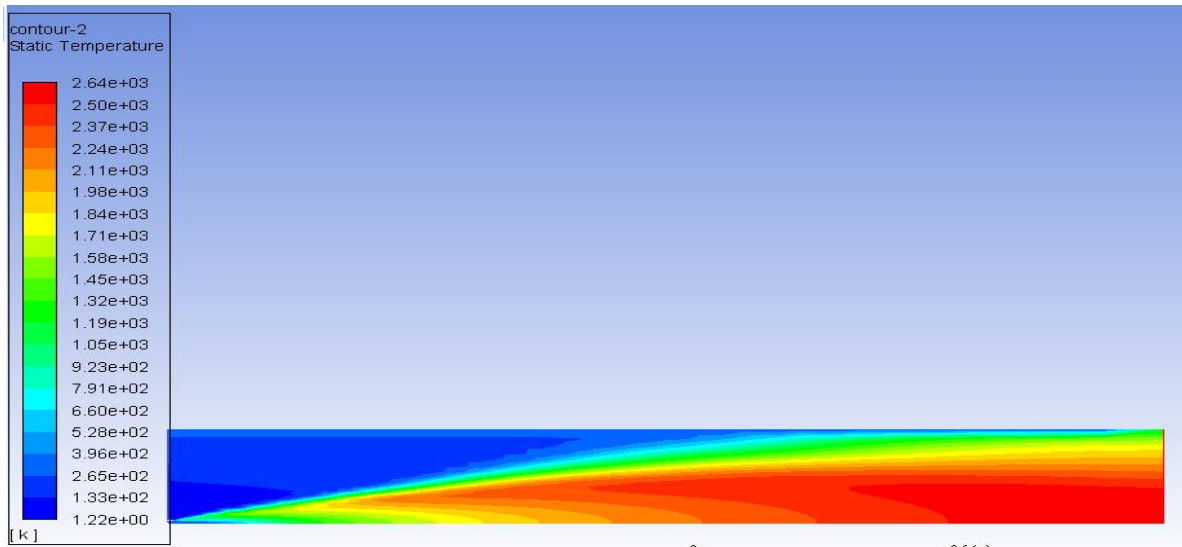
۱-۴-۶ مقایسه کانتور مربوط به دماهای خروجی



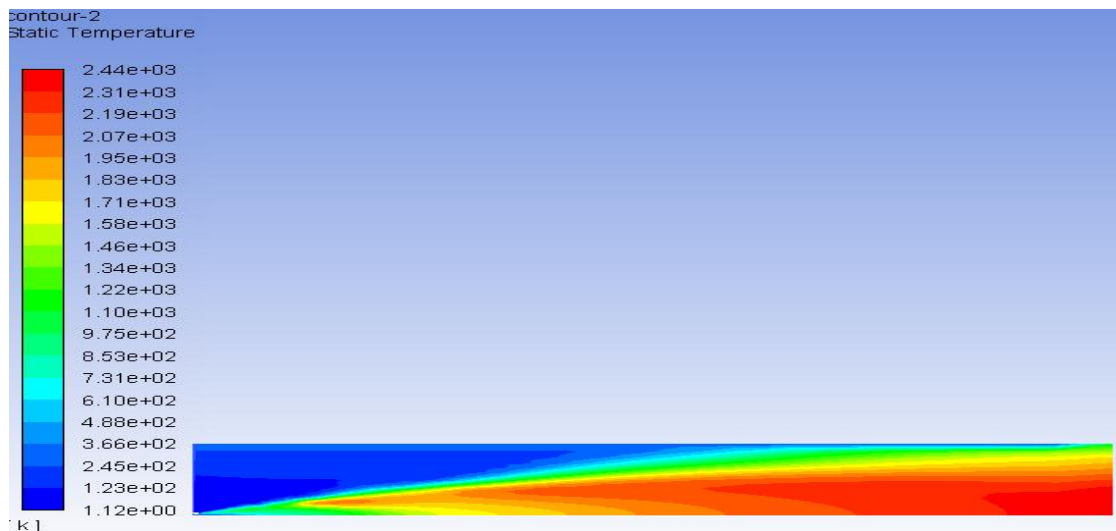
شکل ۳-۶ کانتور دما مربوط به حالت بدون تزریق بخار بایشینه دمای ۳۰۰۰k



شکل ۴-۶ کانتور دما مربوط به حالت تزریق بخار بادبی ۵۰ گرم بر ثانیه بایشینه دمای ۲۸۸۰K



شکل ۵-۶ کانتور دما مربوط به حالت تزریق بخار بادبی ۱۰۰ گرم بر ثانیه بایشینه دمای ۲۶۴۰K

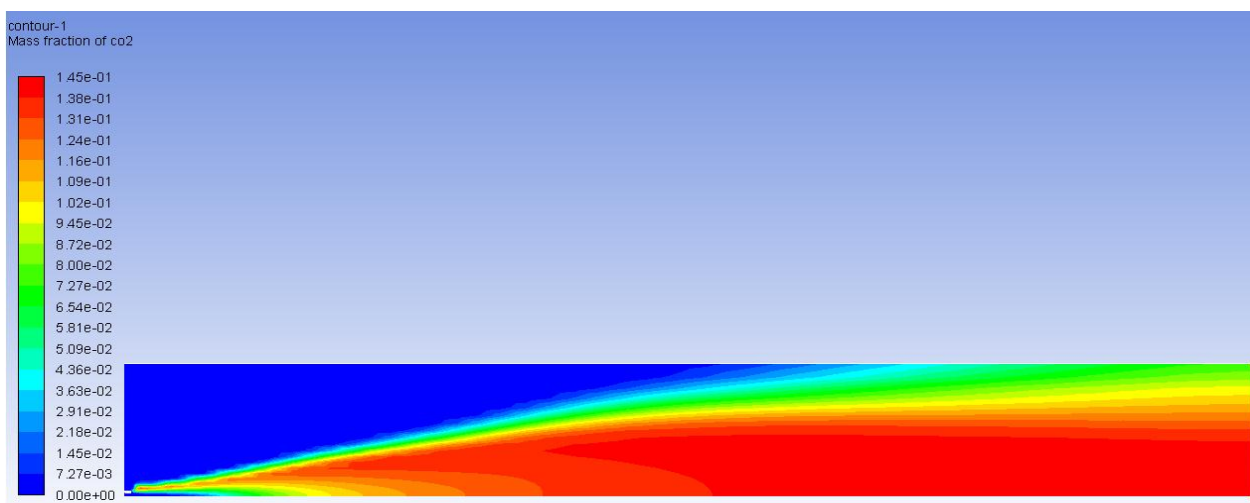


شکل ۶-۶ کانتور دما مربوط به حالت تزریق بخار بادی ۱۵۰ گرم بر ثانیه بایشینه دمای ۲۴۴۰K

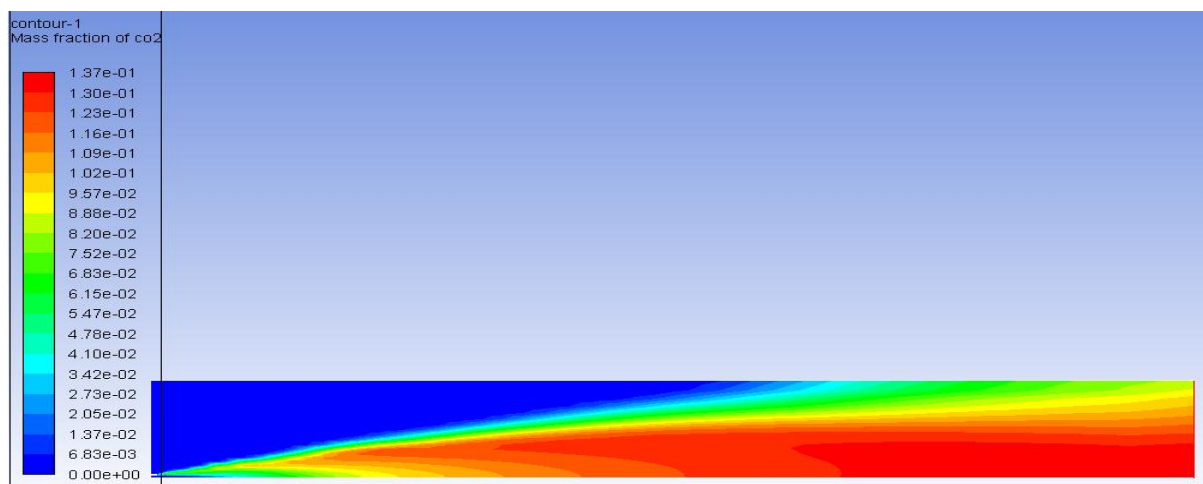
همان طور که در شکل های ۶-۳ و ۶-۴ و ۶-۵ و ۶-۶ مشاهده می شود تزریق بخار به صورت پیش آمیخته با سوخت، به طور قابل ملاحظه ای سبب کاهش تولید NOX درون محفظه می شود. در این حالت احتمالاً به دلیل افزایش نرخ نفوذ هوا به داخل سوخت و اختلاط سوخت و هوا در طول کوتاه تر، منطقه شعله محدودتر شده و حجم ناحیه دما بالایی که NOX در آن تولید می شود، کاهش می یابد. همچنین به دلیل افزایش مومنتم جت، زمان اقامت گازهای داغ داخل محدوده شعله کاهش یافته و فرصت کافی برای تشکیل NOX فراهم نمی شود.

براساس مشاهدات کانتور های بدست آمده نتیجه براین است که همواره با افزایش بخار میزان دمای خروجی به میزان قابل توجهی کاهش می یابد و این موضوع بر کاهش آلاینده NOX تاثیر بسیاری دارد.

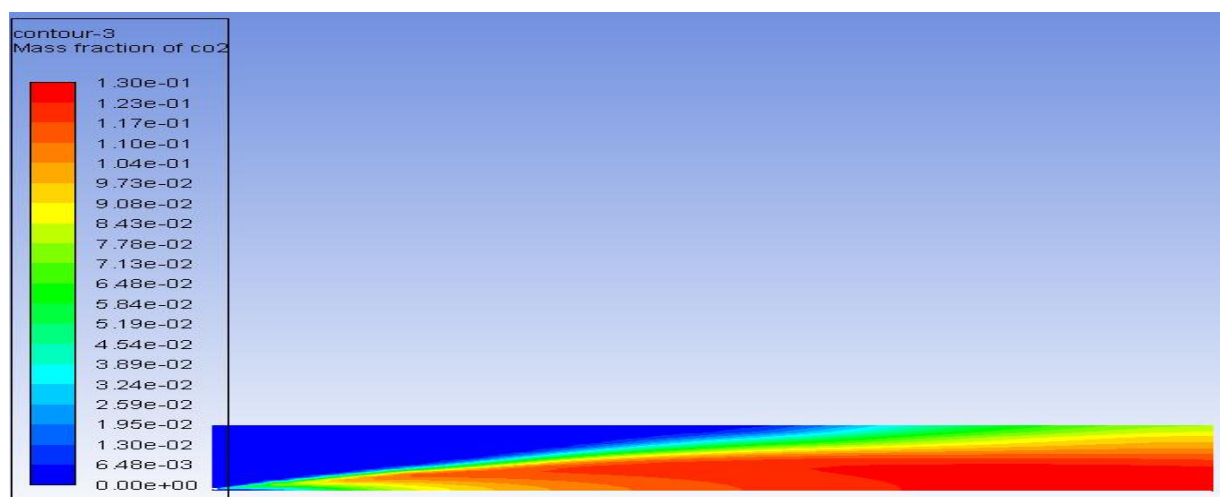
۶-۴-۲ مقایسه کانتورهای مربوط به مقادیر جرم خروجی CO₂



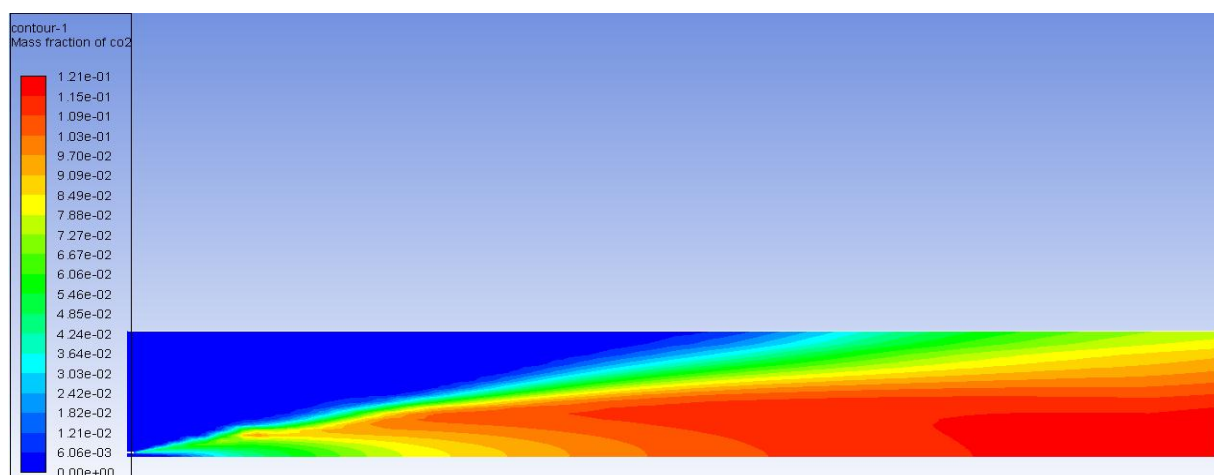
شکل ۶-۷ کانتور جرمی CO₂ مربوط به حالت بدون تزریق بخار بایشینه مقدار جرمی ۰.۱۴۵



شکل ۶-۸ کانتور جرمی CO_2 مربوط به حالت تزریق بخار بادبی ۵۰ گرم بر ثانیه بایشینه مقدار جرمی ۰.۱۳۷.



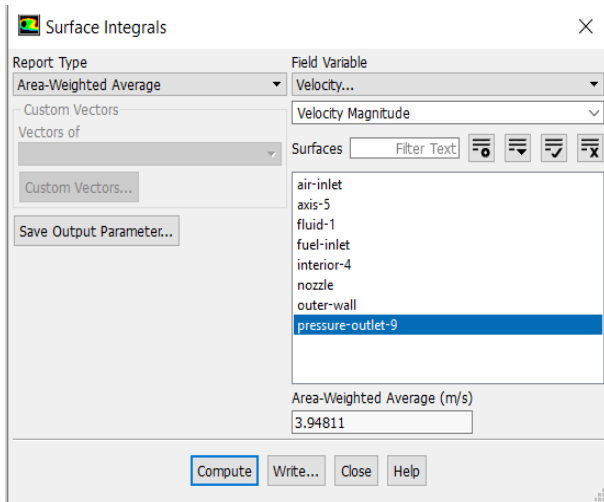
شکل ۶-۹ کانتور جرمی CO_2 مربوط به حالت تزریق بخار بادبی ۱۰۰ گرم بر ثانیه بایشینه مقدار جرمی ۰.۱۳.



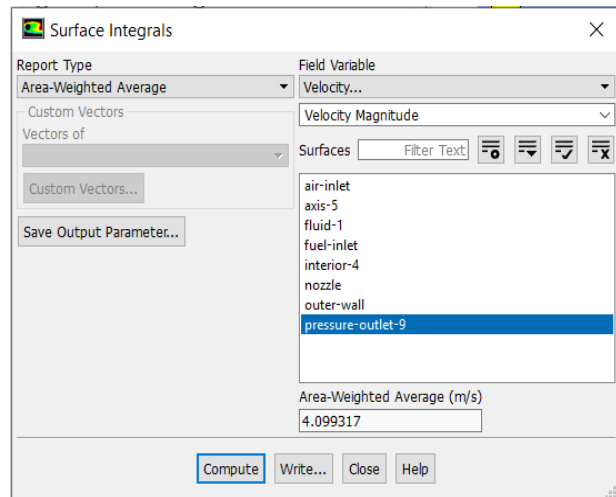
شکل ۶-۱۰ کانتور جرمی CO_2 مربوط به حالت تزریق بخار بادبی ۱۵۰ گرم بر ثانیه بایشینه مقدار جرمی ۰.۱۲۱.

براساس مشاهده کانتورهای مربوط به جرم CO_2 خروجی، نتیجه براین است که باتزریق بخارمقادیر CO_2 نیز به صورت تصاعدی کاهش می یابد.

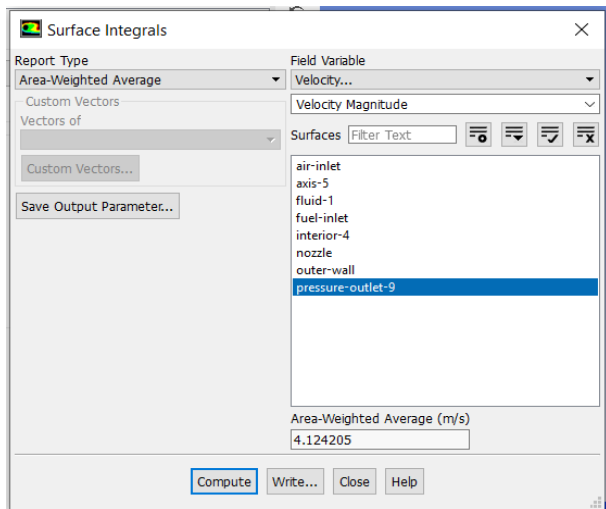
۳-۴-۶ مقایسه سرعت های میانگین خروجی در توربین



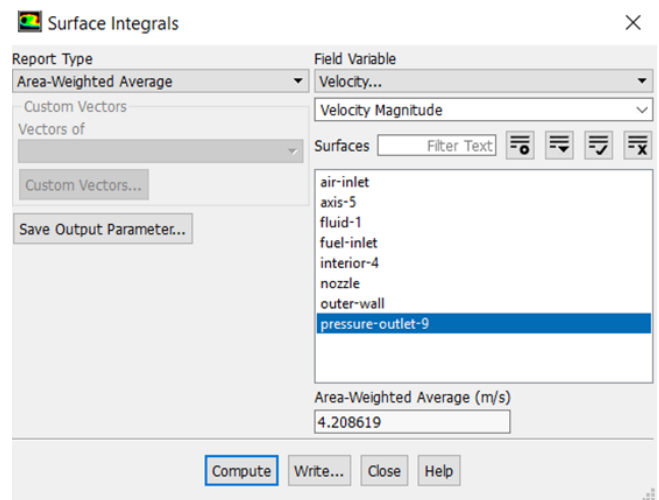
شکل ۶-۱۱ بدون تزریق بخار (3.94 m/s)



شکل ۶-۱۲ تزریق بخار بادی 50°C بر تانیه (4.099 m/s)



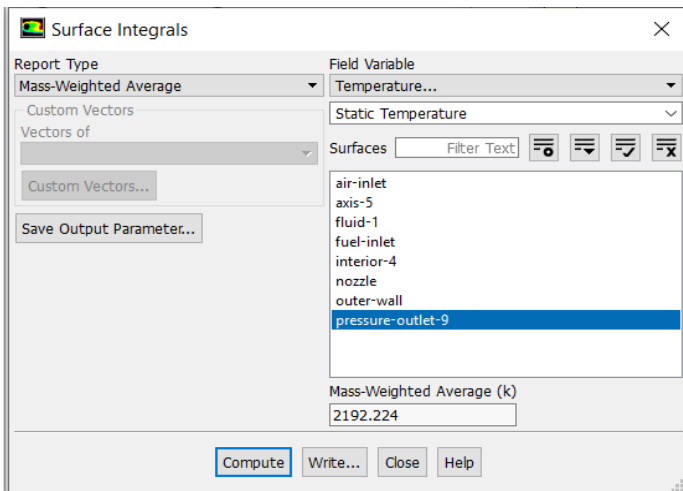
شکل ۶-۱۳ تزریق بخار بادی 100°C بر تانیه (4.1 m/s)



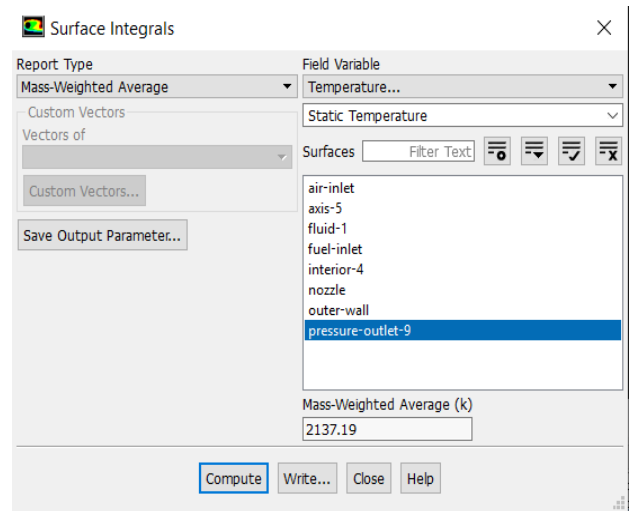
شکل ۶-۱۴ تزریق بخار بادی 150°C بر تانیه (4.2 m/s)

- مشاهده می گردد که با افزایش مقدار تزریق قطرات آب سرعت میانگین خروجی افزایش پیدا می کند.

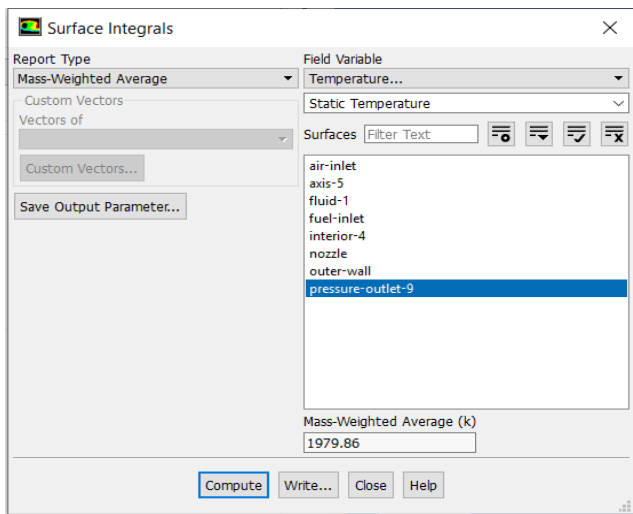
۴-۴-۶ مقایسه دما های میانگین خروجی در توربین



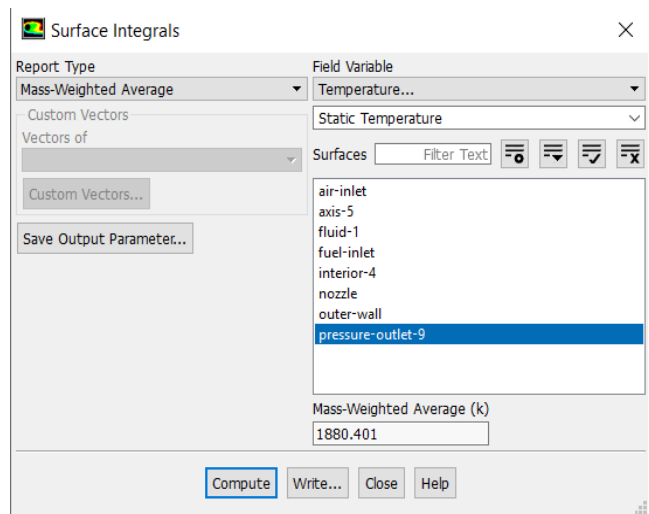
شکل ۶-۱۵ بدون تزریق بخار (۲۱۹۲.۲ K)



شکل ۶-۱۶ تزریق بخار بادبی ۵۰ گرم بر ثانیه (۲۱۳۷.۱۹ K)



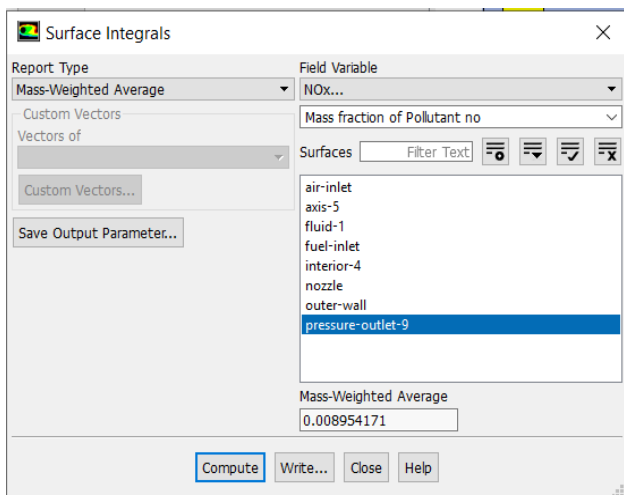
شکل ۶-۱۷ تزریق بخار بادبی ۱۰۰ گرم بر ثانیه (۱۹۷۹.۸ K)



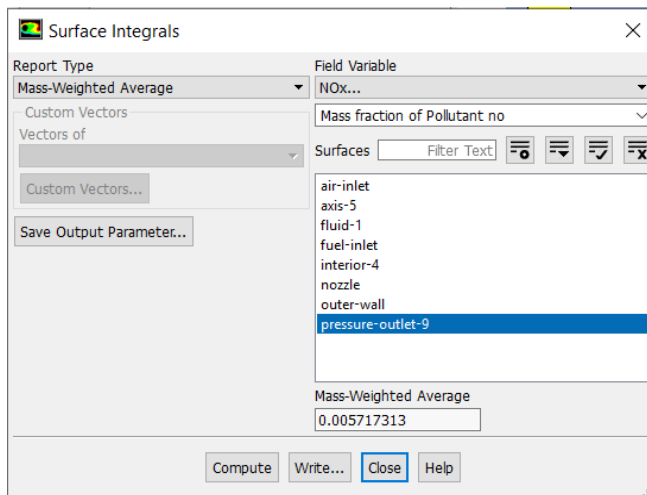
شکل ۶-۱۸ تزریق بخار بادبی ۱۵۰ گرم بر ثانیه (۱۸۸۰.۴ K)

- مشاهده می گردد که با افزایش مقدار تزریق قطرات آب دمای میانگین خروجی کاهش پیدا می کند.

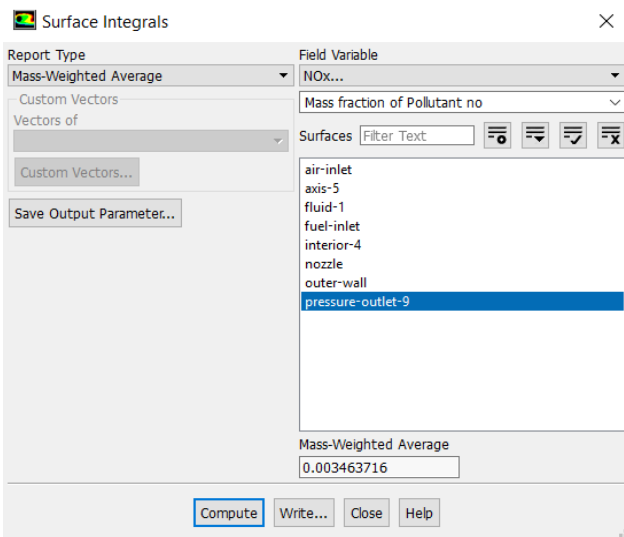
۵-۴-۶ مقایسه جرم های میانگین NOx خروجی در توربین



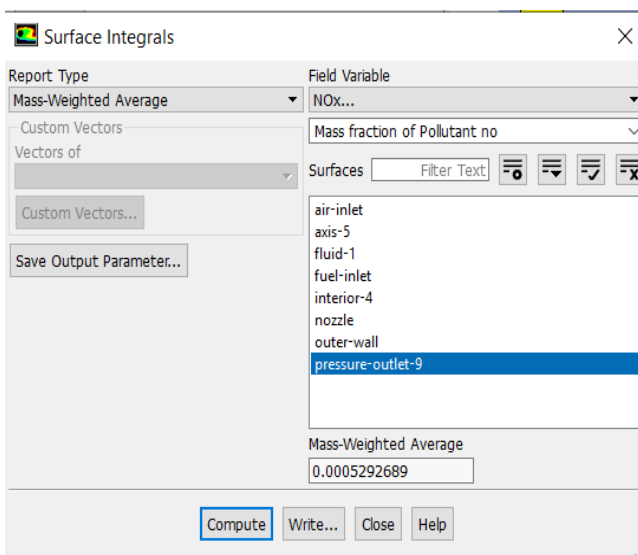
شکل ۶-۱۹ بدون تزریق بخار (۰.۰۰۸g)



شکل ۶-۲۰ تزریق بخار بادی ۵۰ گرم بر ثانیه (۰.۰۰۵g)



شکل ۶-۲۱ تزریق بخار بادی ۱۰۰ گرم بر ثانیه (۰.۰۰۳g)



شکل ۶-۲۲ تزریق بخار بادی ۱۵۰ گرم بر ثانیه (۰.۰۰۰۵g)

- براساس شکل های ۷-۱۱ و ۷-۱۲ و ۷-۱۳ و ۷-۱۴ مشاهده می گردد که با افزایش مقدار تزریق قطرات بخار جرم میانگین NOX خروجی کاهش پیدا می کند.

۵-۶ نتیجه گیری

ایده اصلی روش CLN، تزریق بخار به صورت پیش آمیخته با سوخت به محفظه احتراق است. چنگ ۲۷ ادعا کرده است که تزریق بخار پیش آمیخته با سوخت سبب محدود شدن منطقه شعله و محدود شدن منطقه احتراقی دما بالایی می شود که NOx در آن تولید می شود. [۱۶]

همچنین در این حالت برای محدوده مشخصی از نسبت آب به سوخت، کربن مونواکسید کاهش می یابد. ایشان علت این موضوع را افزایش نفوذ هوای اطراف جت سوخت به داخل آن و افزایش اختلاط سوخت و هوا در اثر تزریق آب از طریق سوخت عنوان کردند. [۴] این پدیده سبب می شود جرم سیال اطراف جت، به صورت شعاعی به داخل سطح مخروطی جت کشیده شود. دبی جرمی ورودی به مقطع عمود بر محور جت ۲۸ از رابطه زیر به دست می آید:

$$m = 0.32 \frac{X}{d_0} \left(\frac{\rho_1}{\rho_0} \right)^{0.5} m_0$$

در رابطه فوق d ، m و ρ به ترتیب قطر و دبی جرمی، چگالی جت بوده و ρ_1 و X چگالی سیال اطراف جت و فاصله از سر نازل می باشند. این رابطه نشان می دهد که دبی جرمی سیال اطراف جت که به داخل آن کشیده می شود مستقیماً متناسب با دبی جرمی جت است. بنابراین با تزریق بخار از طریق سوخت، دبی جرمی جت سوخت افزایش یافته و دبی جرمی هوای اطراف سوخت که به داخل آن نفوذ می کند نیز افزایش می یابد. بنابراین در این حالت اختلاط سوخت و هوا در طول کوتاه تری نسبت به سر نازل صورت گرفته و این موضوع سبب محدود شدن منطقه شعله می شود.

مراجع

[۱] م. یعقوبی " انرژی های تجدیدپذیر و پتانسیل کاربردهای مختلف انرژی خورشیدی در ایران. " همایش بهینه سازی تولید و مصرف انرژی در کشاورزی. ۱۳۹۰.

[۲] I. Dincer and M. Rosen, Thermal energy storage: systems and applications: Wiley. Com , ۲۰۰۲.
[۳] آقازاده، ه، مددی کجابدی، ح، صادقی یزدان خواه، بررسی روشهای مختلف ذخیره سازی انرژی در تولیدات پراکنده ، اولین کنفرانس انرژی های تجدید پذیر و تولید پراکنده ایران، بیرجند، ۱۳۸۸، ۷.

[۴] Y. Tian and C -.Y. Zhao, "A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications," Applied Energy, Vol. ۱۰۴, pp. ۵۳۸-۵۵۳, ۲۰۱۳.

[۵] G. Lane, "Solar heat storage: Latent heat materials. Volume ۱. Background and scientific principles," ۱۹۸۳.

[۶] A. F. Regin, S. Solanki and J. Saini, "Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. ۱۲, pp. ۲۴۳۸-۲۴۵۸, ۲۰۰۸.

[۷] M. Liu, W. Saman and F. Bruno, "Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. ۱۶, pp. ۲۱۱۸-۲۱۳۲, ۲۰۱۲.
-۱۷۱۶, ۲۰۰۲.

[۸], S.M, Schoenung. , *Characteristics and Technologies for Long-vs. Short-Term Energy Storage*,. A Study by the DOE Energy Storage Systems Program. ۲۰۰۱.

[۹], Huang.W, et.al. ,Discussion on application of super capacitor energy storage system in microgrid,. *Sustainable Power Generation and Supply* (pp. ۱-۴). SUPERGEN '۰۹. April, ۲۰۰۹.

[۱۰], EPRI-DOE., *Handbook of Energy Storage for Transmission and Distribution Applications*,. ۲۰۰۳.

[۱۱]- A Brief History of Batteries and Stored Energy, <http://www.ihatebatteries.com/BatteryHistory>.

[۱۲]- SECO, "wind in reserve", http://www.seco.cpa.state.tx.us/re_windreserve.htm.

[۱۳]- Paul Delholm, "Improving the technical, environmental & social performance of wind energy systems, using bio-mass based energystorage", July ۲۱۱۵

[۱۴]- PB energy storage services, "Compressed Air Energy Storage", <http://www.pbenergy.com/caes.htm>.

[۱۵]- Bob Haug, Executive director, "The Iowa Stored Energy Park: Aproject review & update", May ۲۱۱۵.

[۱۶]- Ridge energy storage & grid services, "The economic impact ofCAES on wind in TX, OK, and NM", June ۲۱۱۵. ۱۴۳

[۱۷]- Adam Aston, "catching the wind in a bottle", BusinessWeek,

http://businessweekthursday.com/magazine/content/۱۷_۴۱/b۴۱۵۳۱۹۲.htm

[۱۸] Compressed Air Energy Storage (CAES) Scoping Workshop Enabling Solar and Wind Energy Technologies on a Grand Scale, Organized by Vasilis Fthenakis, Center for Energy & Life Cycle Analysis, Columbia University, October ۲۱ & ۲۲, ۲۰۰۸

[۱۹] Richard M, Valenti B, Compressed Air Energy Storage (CAES) Act KCC Rule

Development, KCC Open Meeting, Issue ۳- Final, June ۱۶, ۲۰۱۰

[20]- Ridge energy storage & grid services, “The economic impact of CAES on wind in TX, OK, and NM”, June 2010. 143

[21]- Michael Nakhamkin, “Compressed Air Energy Storage, Turbomachinery cycle with compression heat recovery, storage, steam generation, and utilization during power generation”, May 12th 1989

[22]- Energy Storage & Power LLC, “Compressed Air Energy Storage (CAES)”, <http://www.energystorageandpower.com>

[23]- Simon Pockley, “CAES, Prepared for Intro. to Renewable Energy”, 24/11/2012.

[24]- Robert Haug, “The Iowa Stored Energy Plant, DOE energy storage systems, annual peer review” November 2016.

[25]. Large Scale Storage Market Opportunities

[26] Makansi J, Abboud J. Energy storage: the missing link in the electricity value chain-An ESC White Paper. Energy storage Council 2002; p. 1-23.

[27] Haisheng Chen, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li, Yulong Ding. Progress in electrical energy storage system: A critical review. Progress in Natural

[28] H. Ibrahim, A. Ilinca, J. Perron, Energy storage systems—Characteristics and comparisons, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 12, Issue 6, June 2008, Pages 1221–1250.

[29] Energy Storage Association, www.electricitystorage.org

[30]- Lefebvre AH, Ballal DR. Gas turbine combustion: Alternative fuels and emissions. Boca Raton: CRC Press; 2010.

[31]- Schorr MM, Chalfin J. Gas turbine NOx emissions approaching zero – is it worth the price?. General Electric Power Systems. 1999; GER 4172.

[32]- Skalska K, Miller JS, Ledakowicz S. Trends in NOx abatement: A review. Science of The Total Environment. 2010; 408(19):3976-3989.

[33] B. S. Brewster, S. M. Cannon, J. R. Farmer, F. Meng, 1999. “Modeling of lean premixed combustion in stationary gas turbines”, *Progress in Energy and Combustion Science*, 20, pp. 303–380.

[34] J.B. Burnham, M.H. Giuliani, D.J. Moeller, 1987. “Development, Installation, and Operating Results of Steam Injection System (STIG) in a General Electric LM6000 Gas Generator”, *ASME, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 109, pp 20-34.

[35] H. Shaw, 1974. “The Effect of Water, Pressure, and Equivalence Ratio on Nitric Oxide Production in Gas Turbine”, *ASME, Journal of Engineering for Gas*

Turbine and Power, 96, pp. 240-246.

[36] G. Greeves, I. M. Khan, G. Onion, 1997. "Effects of water introduction on diesel engine combustion and emissions", *International Symposium on Combustion*, 16, pp. 321-336

[37] S. Aissani, A. Bouam, R. Kadi, "Evaluation of Gas Turbine Performances and NOX and CO Emissions during the Steam Injection in the Upstream of Combustion Chamber", 2007. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 327-330.

[38] <http://www.chengpower.com>, "Cheng Power System".

[39] V. Biasi, 2012. "CLN uprates 0.1 to 6 MW with under 18 ppm NOx and zero CO", *Gas Turbine World Magazine*, July-August.

[40] D. Garréton, O. Simonin, 1994. "Aerodynamics of steady state combustion chambers and furnaces", *ASCF Ercofac CFD Workshop*, EDF Org, Chatou, France.