

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک
گروه سیالات

بررسی بهبود وضعیت انرژی در کارخانه سیمان شاهرود با نگرش انرژی و پینچ

دانشجو: امیر مسعود اخیانی

استاد راهنما:

دکتر سید مجید هاشمیان

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

ماه و سال انتشار: شهریور ۱۳۹۲



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره: ۳۵,۲۹۲,۱۹۲

تاریخ: ۹۲,۸,۲۴

ویرایش:

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای امیر مسعود اخینانی رشته مکانیک گرایش مهندسی سیستم‌های انرژی تحت عنوان بررسی بهبود وضعیت انرژی در کارخانه سیمان شاهرود با نگرش انرژی و پینچ که در تاریخ ۹۲/۶/۲۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه : <u>خوب</u> امتیاز <u>خوب</u>)	☒ دفاع مجدد	☐ مردود
---	---	--------------------------------

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استادارهنما	سید محمدهاشم	استاد	
۲- استاد مشاور			
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	احمد مرادی	د.ر	
۴- استاد ممتحن	علی عباسزاده	استاد	
۵- استاد ممتحن	محمد محسن شاه مراد	دانشیار	

رئیس دانشکده:

امضاء



تقدیم بہ برترین های زندگیم

پدر بزرگوارم

کہ لحظہ زیستہم را در سایہ بزرگواری و دانایی اش آسودم و وجود پر افتخارش سایہ ایست

جاودانہ بر فراز سربلندی های من

و

مادر مہربانم

کہ مفہوم بی دریغ مہربانی و صداقت است.

باسپاس فراوان و تشکر ویژه از همکاری ارزشمند دوستان گرامی آقایان مهندس کریم‌نی مدیر محترم بهره‌برداری کارخانه سیمان شاهرود،
مهندس ریاضی مدیر عامل محترم شرکت کاهنربا، اعضای محترم پژوهشکده علوم و فناوری انرژی شریف و کادر محترم انرژی و مکانیک
کارخانه سیمان شاهرود.

تعهد نامه

اینجانب امیرمسعود اخیانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی سیستم‌های انرژی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی بهبود وضعیت انرژی در کارخانه سیمان شاهرود با نگرش اگزرژی و پینچ تحت راهنمایی دکتر سید مجید هاشمیان...متعهد می شوم.

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

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

چکیده:

امروزه مصرف سیمان به عنوان یکی از مهم‌ترین مصالح ساختمانی در سطح وسیعی از جوامع گسترش یافته است. از این لحاظ امروزه میزان مصرف سیمان یکی از شاخص‌های مهم توسعه یافتگی به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه بشمار می‌رود.

هدف در این پروژه آن است تا فناوری‌های صنعت سیمان در کنار فناوری سیستم‌های بازیابی حرارتی به کمک تحلیل انرژی و انرژی ارزیابی گردد. در این گفتار، پس از ارائه روش بحث و بسط روابط، شماتیک تولید کلینکر در کارخانه سیمان توضیح داده شده و سپس با استفاده از روابط ذکر شده، به تجزیه و تحلیل انرژی و انرژی در هر یک از تجهیزات کارخانه سیمان پرداخته خواهد شد. با استفاده از آنالیز انرژی و انرژی، بازده قوانین اول و دوم ترمودینامیک در تجهیزات مختلف بدست آمده و سپس بازده کلی انرژی و انرژی کارخانه محاسبه خواهد شد. در ادامه تحلیل حساسیت در تجهیزات مختلف صورت گرفته و با توجه به آن پارامترهای حساس انرژی و انرژی در هر یک از تجهیزات بدست خواهد آمد. در ادامه کوشیده تا روند بهبود فناوری‌های صنعت سیمان به خصوص فناوری سیستم‌های بازیابی حرارتی را به کمک تحلیل انرژی و انرژی ارزیابی نماید. در این بحث با استفاده از گرمای گازهای خروجی دودکش خنک کن و گرمای اتلافی از جداره کوره که پتانسیل بالایی به منظور تولید الکتریسیته دارا می‌باشد به بازیافت حرارتی پرداخته. برای این منظور با توجه به راندمان حرارتی بالای چرخه بخار با تبخیر ناگهانی و در نظر گرفتن ملاحظات هزینه‌ای، فناوری و زیست محیطی، چرخه بخار با تبخیر ناگهانی برای شبیه سازی بازیافت حرارتی از جداره کوره و هوای داغ خروجی از خنک کن در طرح مذکور انتخاب شده است. از محاسبات مربوط به این بخش مشاهده می‌گردد چرخه مذکور قادر است به میزان ۶۹۵۵ KW از برق مورد نیاز کارخانه را تامین نماید.

واژه‌های کلیدی: ۱- صنعت سیمان ۲- سیستم‌های بازیاب حرارتی ۳- بازده ۴- انرژی

فهرست‌ها

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۲-۱ شناخت صنعت سیمان در ایران ۳

۱-۲-۱ تاریخچه مختصری در مورد سیمان ۳

۱-۲-۲ چگونگی توسعه صنعت سیمان در ایران ۵

۳-۱ ضرورت انجام پژوهش ۶

۱-۳-۱ مصرف انرژی در صنعت سیمان کشور ۷

۴-۱ اهداف پژوهش ۹

۵-۱ تاریخچه انجام پژوهش ۱۲

۱-۵-۱ تحلیل انرژی و انرژی‌های صنعت سیمان ۱۲

۱-۵-۲ بررسی سیستم‌های بازیافت انرژی در صنعت سیمان ۱۳

۶-۱ معرفی سیمان شاهرود ۱۴

فصل دوم: تئوری انرژی و پینچ ۱۶

۲-۱ مقدمه ۱۷

۲-۲ قانون اول ترمودینامیک ۱۷

۲-۲-۱ بررسی قانون اول ترمودینامیک در سیستم‌های بسته ۱۷

۲-۲-۲ بررسی قانون اول در سیستم‌های حجم کنترل (باز) ۱۸

۲-۲-۳ فرایند جریان پایدار ۱۸

۳-۲ قانون دوم ترمودینامیک ۱۹

۳-۲-۱ نامساوی کلازیوس ۱۹

۳-۲-۲ آنتروپی ۱۹

۳-۲-۳ اصل افزایش آنتروپی ۲۰

۴-۲ موازنه آنتروپی برای سیستم‌های بسته ۲۰

۴-۲-۱ موازنه آنتروپی برای حجم‌های کنترل ۲۱

۴-۲-۲ تغییر آنتروپی مواد خالص ۲۲

۴-۲-۳ تغییر آنتروپی جامدات و مایعات ۲۲

۴-۲-۴ تغییر آنتروپی یک گاز کامل ۲۲

۵-۲ قابلیت انجام کار (اگرژی) و مفاهیم اگرژی ۲۳

۵-۲-۱ مقدمه ۲۳

۵-۲-۲ تعریف اگرژی ۲۳

۵-۲-۳ انتقال اگرژی همراه تبادل کار و حرارت ۲۷

۶-۲ تحلیل اگرژی ۲۷

۶-۲-۱ تحلیل اگرژی سیستم‌های بسته ۲۷

۶-۲-۲ تحلیل اگرژی سیستم‌های باز ۳۰

۶-۲-۳ موازنه اگرژی برای یک حجم کنترل ۳۱

۷-۲ تکنولوژی پینچ ۳۵

۷-۲-۱ مفاهیم اولیه پینچ ۳۷

۷-۲-۲ منحنی‌های ترکیبی ۳۷

۷-۲-۳ منحنی‌های ترکیبی جامع ۴۰

فصل سوم: بررسی و تحلیل اگرژی کارخانه سیمان ۴۱

۳-۱ مقدمه ۴۲

۳-۲ کولر ۴۳

۳-۲-۱ تحلیل انرژی و انرژی کولر ۴۴

۳-۲-۲ مطالعه موردی سیستم کولر ۴۶

۳-۲-۳ تحلیل سیستم کولر ۴۸

۳-۲-۴ تحلیل حساسیت در سیستم کولر ۵۰

۳-۳ کوره ۵۶

۳-۳-۱ تحلیل انرژی سیستم کوره ۵۶

۳-۳-۲ مطالعه موردی سیستم کوره ۵۹

۳-۳-۳ تحلیل نتایج کوره ۶۱

۳-۳-۴ تحلیل حساسیت در سیستم کوره ۶۲

۳-۴ سیکلون شماره ۱ ۶۷

۳-۴-۱ تحلیل انرژی و انرژی ۶۸

۳-۴-۲ مطالعه موردی سیستم سیکلون ۷۰

۳-۴-۳ تحلیل سیکلون اول ۷۲

۳-۴-۴ تحلیل حساسیت در سیکلون اول ۷۵

۳-۵ سیکلون شماره ۲: ۷۸

۳-۵-۱ مطالعه موردی ۷۸

۳-۵-۲ تحلیل سیکلون دوم ۸۱

۳-۵-۳ تحلیل حساسیت در سیکلون دوم ۸۳

۳-۶ سیکلون شماره ۳: ۸۶

۳-۶-۱ مطالعه موردی ۸۶

۸۸	 ۲-۶-۳ تحلیل سیکلون سوم
۹۱	 ۳-۶-۳ تحلیل حساسیت در سیکلون شماره ۳
۹۴	 ۴-۷-۳ سیکلون شماره ۴
۹۴	 ۳-۷-۱ مطالعه موردی
۹۶	 ۳-۷-۲ تحلیل سیکلون چهارم
۹۸	 ۳-۷-۳ تحلیل حساسیت در سیکلون شماره ۴
۱۰۱	 ۳-۷-۴ جمع بندی رفتار سیکلون ها
۱۰۲	 ۳-۸ بازده کلی انرژی و انرژی و انرژی
۱۰۴	 فصل چهارم: بررسی فرایندهای بازیافت
۱۰۵	 ۴-۱ مقدمه:
۱۰۵	 ۴-۱-۱ بررسی مطالعات گذشته
۱۰۶	 ۴-۲ محاسبه میزان گرمای اتلافی
۱۰۶	 ۴-۲-۱ گرمای اتلافی از جداره کوره
۱۰۷	 ۴-۲-۲ گرمای اتلافی از کولر
۱۰۷	 ۴-۳ بررسی سیستم های بازیافت
۱۰۹	 ۴-۳-۱ چرخه بخار همراه با تبخیر ناگهانی
۱۱۲	 ۴-۳-۲ چرخه بخار دو فشاری
۱۱۵	 ۴-۳-۳ چرخه کالینا
۱۱۸	 ۴-۳-۴ چرخه رانکین با سیال عامل آلی
۱۱۹	 ۴-۴ نتیجه گیری و انتخاب سیکل مناسب

فصل پنجم: جمع بندی و نتیجه گیری.....۱۲۱

۱-۵ جمع بندی.....۱۲۲

۲-۵ پیشنهادها.....۱۲۳

۶ پیوست ها.....۱۲۵

الف-۱ شرح فرآیند تولید سیمان.....۱۲۶

الف-۱-۱ بررسی فعل و انفعالات شیمیایی در کوره سیمان.....۱۲۹

الف-۱-۲ روش های پخت سیمان.....۱۳۱

الف-۱-۳ شرح تجهیزات مورد استفاده در خط تولید سیمان.....۱۳۸

الف-۲ بررسی صنعت سیمان از نقطه نظر مصرف انرژی.....۱۴۹

الف-۲-۱ الگوهای نمونه مصرف انرژی.....۱۴۹

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱): روند ظرفیت‌سازی سیمان کشور (۹۰-۱۳۵۰)..... ۲۴
- شکل (۲-۱): سهم درصدی صنعت سیمان و سایر بخش‌ها از مصرف انرژی نهائی کشور (۱۳۹۰)..... ۸
- شکل (۱-۲): مثال برای انرژی..... ۲۴
- شکل (۲-۲): نحوه ترسیم نمودارهای ترکیبی جریان‌های گرم [35]..... ۳۸
- شکل (۳-۲): نحوه ترسیم نمودارهای ترکیبی جریان‌های سرد [35]..... ۳۸
- شکل (۴-۲): شماتیک یک نمونه منحنی ترکیبی جریان‌های گرم و سرد [35]..... ۳۹
- شکل (۵-۲): نحوه ترسیم نمودار ترکیبی جامع [35]..... ۴۰
- شکل (۱-۳): جریان‌های ورودی و خروجی سیستم کولر..... ۴۴
- شکل (۲-۳): جریان‌های ورودی و خروجی سیستم کوره..... ۵۷
- شکل (۳-۳): جریان‌های ورودی و خروجی سیستم سیکلون..... ۶۸
- شکل (۴-۳): جریان‌های ورودی و خروجی سیستم سیکلون ۲..... ۷۸
- شکل (۱-۴): منحنی جریان‌های گرم حاصل از بازیافت..... ۱۰۸
- شکل (۲-۴): نمونه‌ای از منحنی ترکیبی برای سیکل رانکین ساده..... ۱۰۹
- شکل (۳-۴): ساختار سیکل بخار تک مرحله با تبخیر ناگهانی پیشنهاد..... ۱۱۰
- شکل (۴-۴): منحنی‌های ترکیبی سیکل تبخیر ناگهانی..... ۱۱۰
- شکل (۵-۴): ساختار سیکل بخار دو فشاره پیشنهادی..... ۱۱۲
- شکل (۶-۴): منحنی‌های ترکیبی سیکل بخار دو فشاری پیشنهادی..... ۱۱۳
- شکل (۷-۴): ساختار سیکل کالینا پیشنهادی..... ۱۱۵
- شکل (۸-۴): منحنی‌های ترکیبی سیکل کالینا پیشنهادی..... ۱۱۵
- شکل (الف-۱): مراحل مختلف تولید سیمان پرتلند (فرایند خشک)..... ۱۲۸
- شکل (۲-۶): تولید سیمان به روش فرایند مرطوب..... ۱۳۲
- شکل (الف-۳): فرایند تولید سیمان (فرایند نیمه مرطوب)..... ۱۳۳
- شکل (الف-۴): دپارتمان پخت در فرآیند خشک شامل یک سیستم پیش‌گرمایش معلق..... ۱۳۵

فهرست جداول

جدول (۱-۳): جدول مشخصات کولر.....	۴۶
جدول (۲-۳): جدول نتایج قانون اول.....	۴۷
جدول (۳-۳): جدول نتایج تحلیل انرژی.....	۴۷
جدول (۴-۳): جدول نتایج بازده اول و دوم کولر.....	۴۸
جدول (۵-۳): تحلیل انرژی سیستم کولر.....	۴۸
جدول (۶-۳): تحلیل انرژی سیستم کولر.....	۴۹
جدول (۷-۳): تاثیر تغییرات دمای محیط بر بازگشت ناپذیری‌ها، بازده‌های اول و دوم.....	۵۰
جدول (۸-۳): تاثیر تغییرات دمای هوای خروجی از دودکش بر بازگشت ناپذیری‌ها، بازده‌های اول و دوم.....	۵۱
جدول (۹-۳): تاثیر تغییرات دمای کلینکر خروجی بر بازگشت ناپذیری‌ها، بازده‌های اول و دوم.....	۵۱
جدول (۱۰-۳): تاثیر تغییرات دمای هوای خروجی از دودکش بر آنتالپی هوای خروجی و آنتالپی کل.....	۵۳
جدول (۱۱-۳): جمع بندی سیستم کولر.....	۵۵
جدول (۱۲-۳): مشخصات کوره.....	۵۹
جدول (۱۳-۳): قانون بقای انرژی در سیستم کوره.....	۶۰
جدول (۱۴-۳): تحلیل قانون دوم در سیستم کوره.....	۶۰
جدول (۱۵-۳): تحلیل بازده سیستم کوره.....	۶۰
جدول (۱۶-۳): تحلیل انرژی سیستم کوره.....	۶۱
جدول (۱۷-۳): تحلیل انرژی سیستم کوره.....	۶۲
جدول (۱۸-۳): تاثیر تغییرات دمای محیط بر بازگشت ناپذیری‌ها، بازده‌های اول و دوم.....	۶۳
جدول (۱۹-۳): تاثیر دمای هوای ثانویه بر تغییرات بازگشت ناپذیری، بازده قانون اول و دوم.....	۶۳
جدول (۲۰-۳): تاثیر دمای مواد اولیه ورودی بر تغییرات بازگشت ناپذیری، بازده قانون اول و دوم.....	۶۴
جدول (۲۱-۳): جمع بندی سیستم کوره.....	۶۵
جدول (۲۲-۳): نسبت افزایش آنتالپی و انرژی ورودی را به کل آنتالپی و انرژی ورودی.....	۶۶
جدول (۲۳-۳): مشخصات سیکلون اول.....	۷۰

جدول ۳-۲۴: بقای انرژی سیکلون اول.....	۷۱
جدول (۳-۲۵): قانون دوم ترمودینامیک در سیکلون اول.....	۷۲
جدول (۳-۲۶): تحلیل بازده سیکلون اول.....	۷۲
جدول (۳-۲۷): تحلیل انرژی سیستم سیکلون اول.....	۷۳
جدول (۳-۲۸): تحلیل انرژی سیستم سیکلون اول.....	۷۴
جدول (۳-۲۹): تاثیر دمای محیط بر تغییرات بازگشتناپذیری، بازده قانون اول و دوم.....	۷۵
جدول (۳-۳۰): تاثیر دمای گرم ورودی بر تغییرات بازگشتناپذیری، بازده قانون اول و دوم.....	۷۵
جدول (۳-۳۱): تاثیر دمای مواد اولیه خروجی بر تغییرات بازگشتناپذیری، بازده قانون اول و دوم.....	۷۶
جدول (۳-۳۲): جمع بندی سیکلون اول.....	۷۷
جدول (۳-۳۳): مشخصات سیکلون دوم.....	۷۸
جدول (۳-۳۴): بقای انرژی سیکلون دوم.....	۸۰
جدول (۳-۳۵): تحلیل قانون دوم ترمودینامیک در سیکلون دوم.....	۸۰
جدول (۳-۳۶): تحلیل بازده سیکلون دوم.....	۸۰
جدول (۳-۳۷): تحلیل انرژی سیستم سیکلون دوم.....	۸۱
جدول (۳-۳۸): تحلیل انرژی سیستم سیکلون دوم.....	۸۲
جدول (۳-۳۹): تاثیر دمای محیط بر تغییرات بازگشتناپذیری، بازده قانون اول و دوم.....	۸۳
جدول (۳-۴۰): تاثیر دمای هوای گرم ورودی بر تغییرات بازگشتناپذیری، بازده قانون اول و دوم.....	۸۴
جدول (۳-۴۱): تاثیر دمای مواد اولیه خروجی بر تغییرات بازگشتناپذیری، بازده قانون اول و دوم.....	۸۴
جدول (۳-۴۲): جمع بندی سیکلون دوم.....	۸۵
جدول (۳-۴۳): مشخصات سیکلون سوم.....	۸۶
جدول (۳-۴۴): بقای انرژی در سیکلون سوم.....	۸۸
جدول (۳-۴۵): تحلیل قانون دوم در سیکلون سوم.....	۸۸
جدول (۳-۴۶): تحلیل بازده در سیکلون سوم.....	۸۸
جدول (۳-۴۷): تحلیل انرژی سیستم سیکلون سوم.....	۸۹
جدول (۳-۴۸): تحلیل انرژی سیستم سیکلون سوم.....	۸۹

جدول (۳-۴۹): تاثیر دمای محیط بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم.....	۹۱
جدول (۳-۵۰): تاثیر دمای هوای گرم ورودی بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم.....	۹۱
جدول (۳-۵۱): تاثیر دمای مواد اولیه خروجی بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم.....	۹۲
جدول (۳-۵۲): جمع بندی سیکلون سوم.....	۹۳
جدول (۳-۵۳): مشخصات سیکلون چهارم.....	۹۴
جدول (۳-۵۴): بقای انرژی در سیکلون چهارم.....	۹۵
جدول (۳-۵۵): تحلیل قانون دوم در سیستم سیکلون چهارم.....	۹۵
جدول (۳-۵۶): تحلیل بازده سیکلون چهارم.....	۹۶
جدول (۳-۵۷): تحلیل انرژی سیستم سیکلون چهارم.....	۹۶
جدول (۳-۵۸): تحلیل انرژی سیستم سیکلون چهارم.....	۹۷
جدول (۳-۵۹): تاثیر دمای محیط بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم.....	۹۸
جدول (۳-۶۰): تاثیر دمای هوای گرم ورودی بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم.....	۹۹
جدول (۳-۶۱): تاثیر دمای مواد اولیه خروجی بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم.....	۹۹
جدول (۳-۶۲): جمع بندی سیکلون چهارم.....	۱۰۰
جدول (۳-۶۳): جمع بندی رفتار سیکلونها.....	۱۰۱
جدول (۳-۶۴): اختلاف دماها در سیکلونها.....	۱۰۲
جدول (۳-۶۵): بازده کلی قانون اول در کارخانه.....	۱۰۲
جدول (۳-۶۶): بازده کلی قانون دوم در کارخانه.....	۱۰۳
جدول (۴-۱): توزیع دما در نقاط مختلف کوره.....	۱۰۶
جدول (۴-۲): میزان گرمای اتلافی از کوره.....	۱۰۶
جدول (۴-۳): ثابت‌های عملیاتی برای سیکل‌های مختلف.....	۱۰۹
جدول (۴-۴): شرایط عملیاتی در بخش‌های مختلف سیکل بخار همراه با تبخیر ناگهانی.....	۱۱۱
جدول (۴-۵): جزئیات عملکرد سیکل بخار همراه با تبخیر ناگهانی.....	۱۱۱
جدول (۴-۶): میزان انرژی ورودی و تخریب انرژی در اجزای مختلف سیکل بخار همراه با تبخیر ناگهانی.....	۱۱۲

- جدول (۷-۴): شرایط عملیاتی در بخش‌های مختلف سیکل بخار دو فشاری..... ۱۱۳
- جدول (۸-۴): جزئیات عملکرد سیکل بخار دو فشاری..... ۱۱۴
- جدول (۹-۴): میزان انرژی ورودی خروجی و تخریب انرژی در اجزای مختلف سیکل بخار دو فشاری..... ۱۱۴
- جدول (۱۰-۴): شرایط عملیاتی در بخش‌های مختلف سیکل کالینا..... ۱۱۶
- جدول (۱۱-۴): جزئیات عملکرد سیکل کالینا..... ۱۱۷
- جدول (۱۲-۴): میزان انرژی ورودی خروجی و تخریب انرژی در اجزای مختلف سیکل کالینا..... ۱۱۷
- جدول (۱۳-۴): هزینه سرمایه گذاری اولیه سیستم‌های بازیافت حرارت [34]..... ۱۲۰
- جدول (۱-۶): ترکیبات کلینکر سیمان پرتلند..... ۱۲۷
- جدول (۲-۶): مصرف ویژه انرژی مخصوص حرارتی و الکتریکی برای تولید سیمان..... ۱۴۹

فهرست علائم انگلیسی

مساحت	A	فشار	p
ضریب گرما‌ی ویژه	C	انرژی حرارتی	Q
کلینکر	Cl	رینولدز	Re
قطر	D	آنتروپی	S
انرژی	E	دما	T
آنتالپی	h	زمان	t
نخرب اگزرژی	I	انرژی داخلی	u
انرژی جنبشی	K	حجم	V
ضریب هدایت حرارتی	k	حجم مخصوص	v
کیلوگرم کلینکر	Kg-Cl	کار	W
دبی جرمی	m	اگزرژی	X
ناسلت	Nu	کیفیت بخار	x
انرژی پتانسیل	P	راندمان حرارتی کولر	Z

فهرست علائم یونانی

داتا	Δ	ثابت استفان - بولتزمن	σ
ضریب صدور انرژی تشععی	ε	بازده قانون دوم	ψ
بازده قانون اول	η		

فهرست اندیس‌ها

0	حالت مرده	i	ورودی
1	حالت اولیه	min	حداقل
2	حالت ثانویه	o	خروجی
12	تغییرات از حالت اول به حالت دوم	Q	انتقال حرارت
b	مرز انتقال حرارت	rev	بازگشت پذیری
CV	حجم کنترل	sys	سیستم
Cl	کلینکر	total	کل
e	خروجی	u	مفید
f	جریان	W	کار
gen	تولیدی		

فصل اول: مقدمه

امروزه مولفه‌ی بهای انرژی مصرفی در قیمت تمام شده محصول نقش بسزایی دارد. هر قدر مقدار انرژی مصرفی به ازای واحد کالای تولید شده کمتر باشد یا به عبارتی هر قدر سرانه انرژی مصرفی در تولید هر واحد کالا کمتر باشد، آن کالا ارزش افزوده بیشتر و زمان بازگشت سرمایه سریعتری خواهد داشت. مصرف انرژی در صنایع انرژی‌بر، از جهات مختلف حائز اهمیت است نکته اول آنکه با عنایت به قیمت نسبتاً بالای نفت خام باید انرژی حاصل صرف تولید کالایی گردد که ارزش افزوده‌ای بیشتر از قیمت نفت داشته باشد. دوم اینکه محدودیت انرژی در کشورها باعث می‌گردد تا مقوله بهره‌وری انرژی اهمیت پیدا کند. این محدودیت صنایع را وادار به کاهش انرژی مصرفی خود نموده و دولت‌ها نیز در صدد وضع قوانینی جهت اعمال این محدودیت در صنایع می‌باشند.

نکته مهمتر اینکه دنیای امروز دنیای رقابتی است. در نتیجه صنایعی پایدار و پویا خواهند ماند که هزینه تمام شده تولید کمتری داشته باشند در غیر اینصورت خودبه‌خود از گردونه رقابت حذف خواهند شد و صنعت سیمان در کشورهای مختلف نیز بعنوان یک صنعت مادر از این قاعده مستثنی نیست.

بعلاوه نیاز روزافزون بشر به سیمان جهت ایجاد سرپناه و فراهم کردن زیرساخت‌های توسعه مدرن، در کنار شدت مصرف انرژی بالا و انتشار حجم زیاد آلاینده زیست محیطی دی‌اکسید کربن، صنعت سیمان را در کانون توجه تحلیل‌های انرژی و محیط زیست قرار داده است. با وجودی که شدت مصرف انرژی این صنعت پایین‌تر از صنایعی چون صنعت فولاد است اما حجم بالای تولید سیمان، اهمیت تحلیل انرژی در این صنعت را افزایش داده است [1].

۱-۲ شناخت صنعت سیمان در ایران

۱-۲-۱ تاریخچه مختصری در مورد سیمان

از نظر نوع مواد ، سیمان ها مواد چسبنده ای هستند که قابلیت چسبانیدن ذرات به یکدیگر و ایجاد جسمی یکپارچه از ذرات متشکله را دارند . مطابق با این تعریف سیمان ها بطور جامع شامل انواع چسب ها از جمله چسب های مایع برای چسبانیدن قطعات سنگ و یا فلزات خواهند شد.

اما بطور کلی منظور از سیمان (Cement) را می توان آن نوع از سیمان هایی دانست که دارای ریشه آهکی می باشند به عبارت دیگر سیمان هایی که ماده اصلی تشکیل دهنده آن ها آهک و ماده اولیه اصلی آن ها سنگ آهک است . بر این مبنا سیمان ترکیبی از اکسید کلسیم (آهک) و سایر اکسیدها نظیر اکسید آلومینیم، اکسید سیلیسیم، اکسید آهن ، اکسید منیزیوم و اکسیدهای قلیایی است که میل ترکیبی با آب داشته و در مجاورت هوا و در زیر آب به مرور سخت و دارای مقاومت می شوند.

به این ترتیب سیمان جزء ملات های آبی محسوب می شود این ملات ها از زمان های قدیم شناخته شده بودند نمونه ای از این ملات ها آهک است که رومی ها و یونانی ها با مخلوط کردن آن با خاکستر آتشفشانی ، خاک آجر و آب ، به نوعی آهک آبی دست می یافتند که خاصیت سخت شدن و فشار پذیری داشته است . با بکار بردن این ملات رومی ها توانستند ساختمان های عظیمی بسازند که بقایای آن ها هنوز قابل مشاهده است.

در ایران نیز از زمان های دور در مناطق مرطوب (سواحل شمالی خلیج فارس) از نوعی ساروج استفاده شده که دارای خواص هیدرولیکی جالب و مقاومت فشاری بالایی بوده است معروفترین این ساروج ها، ساروج خمیر است که در بندر خمیر تهیه می گردیده و هنوز در تأسیسات بندری بجای مانده می توان این نوع ملات را یافت.

در سال ۱۸۲۴ با رفع نقیصه‌های سیمان موجود، سیمان پرتلند امروزی کشف و ثبت گردید. و پس از ملاحظه خواص سیمان تقاضا برای مصرف آن فزونی یافت و در نتیجه صنعت سیمان به آنچنان رشدی رسید که بعنوان یک صنعت معتبر و گسترده در آمد. برای اولین بار در تاریخ تولید صنعتی سیمان، در کشور آلمان در سال ۱۸۷۷ اولین مؤسسه استاندارد سیمان توسط تولید کنندگان سیمان بوجود آمد و پس از آن مؤسسه استاندارد در انگلستان و آمریکا ایجاد و استانداردهای سیمان تدوین گردید.

ورود سیمان در ایران ابتدا توسط خارجی‌ان و برای ساخت بناهای مربوط به ایشان صورت گرفت اما با شروع پیشرفت‌های صنعتی در اوایل قرن جاری ضرورت استفاده از سیمان برای ساخت پل‌ها، تونل‌ها و خطوط راه آهن محسوس گردید.

تا قبل از سال ۱۳۱۴ ایران وارد کننده سیمان بود اما به دلیل آنکه سیمان کالایی ارزان ، سنگین و آسیب پذیر بوده و هزینه حمل و نقل آن نیز در مقایسه با قیمت سیمان بسیار بالا می باشد فکر تأسیس کارخانه تولید سیمان در ایران همزمان با شروع طرح‌های عمرانی پای گرفت. بطوریکه نهایتاً پس از انجام مطالعات بر روی مواد اولیه که از سال ۱۳۰۷ آغاز شده بود در سال ۱۳۱۰ قراردادی بین دولت ایران و شرکت ایران و سوئد جهت خرید یک کارخانه سیمان با ظرفیت ۱۰۰ تن در روز از شرکت اف. ال. اسمیت^۱ دانمارک بسته شد . کارخانه مذکور در ۸ کیلومتری جنوب تهران و در امتداد کوه‌های بی بی شهر بانو احداث گردید و در سال ۱۳۱۲ رسماً افتتاح شد. این کارخانه به نام کارخانه سیمان ری نامیده شد . و بدین ترتیب سیمان در کشور برای نخستین بار تولید شد[۱].

¹ F.L. Smith

۲-۲-۱ چگونگی توسعه صنعت سیمان در ایران

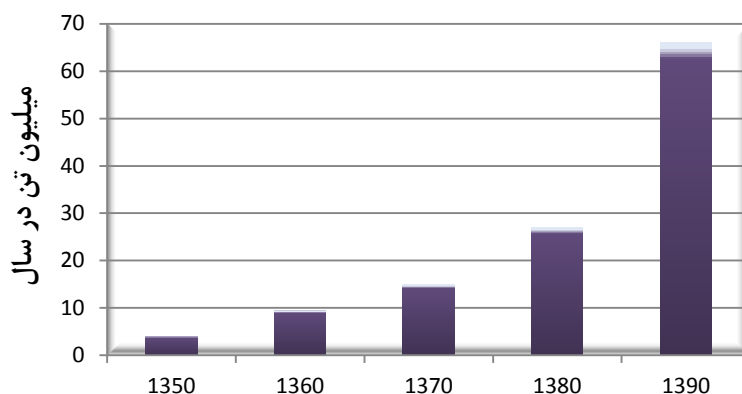
از سال ۱۳۱۲ تا سال ۱۳۱۵ ظرفیت تولیدی سیمان کشور ۱۰۰ تن در روز بود و سپس به دلیل رشد تقاضا و نیاز به مصرف سیمان با خرید خط دوم تولید سیمان با ظرفیت ۲۰۰ تن در روز از شرکت پولیزیوس^۱ آلمان و راه اندازی آن در سال ۱۳۱۶ به ۳۰۰ تن در روز افزایش یافت. این ظرفیت تا سال ۱۳۳۴ ثابت و سپس بتدریج با راه اندازی واحد سوم سیمان ری در آن سال و همچنین احداث و راه اندازی واحدهای سیمان مشهد، شمال، فارس، اصفهان، دورود و لوشان، ظرفیت روزانه تولید سیمان در سال ۱۳۳۹ به ۳۴۰۰ تن در روز رسید.

در طول سالهای ۱۳۴۴ تا ۱۳۵۷ واحدهای جدید دیگری از جمله سیمان صوفیان، کرمان، آبیک، غرب، سپاهان و بهبهان به تولید رسیدند و نیز در برخی از واحدهای موجود برنامه های توسعه مکرراً اجرا گردید بطوری که ظرفیت تولید سیمان در کشور به بیش از ۳۹۰۰۰ تن در روز رسید که سالانه بالغ بر ۱۲/۲ میلیون تن می شد.

لازم به ذکر است که از سال ۱۳۵۷ به بعد بتدریج خطوط قدیمی تولید سیمان از قبیل ری کوره شماره ۱ شیراز، کوره صفر اصفهان، کوره های عمودی شرق و کوره های مرطوب ۱ و ۲ سیمان دورود متوقف شدند [۱].

شکل (۱-۱) روند ظرفیت سازی برای تولید سیمان کشور را در ۴۰ سال اخیر نشان می دهد. چنانچه ملاحظه می گردد، میزان تولید سیمان کشور تنها در یک دهه اخیر ۲/۵ برابر شده است.

¹ polysius



شکل (۱-۱): روند ظرفیت‌سازی سیمان کشور (۱۳۵۰-۹۰) [2]

کشور ایران در پایان سال ۲۰۱۱ میلادی، با حجم تولید سالانه ۶۱ میلیون تن سیمان در رده پنجم کشورهای تولید کننده سیمان قرار گرفته است. در همین سال جایگاه ایران در مصرف سیمان نیز جایگاه مشابهی است و با مصرف ۵۶ میلیون تن سیمان در سال، پس از کشور های چین، هند، آمریکا و برزیل، در رده پنجم قرار گرفته است [3].

سهم این صنعت در تولید ناخالص ملی کشور نیز در سال‌های اخیر همواره در حال رشد بوده و در سال ۱۳۹۱ به ۲/۵٪ بر اساس قیمت‌های مصوب داخلی و حدود ۴٪ بر اساس قیمت‌های خارجی رسیده است [2].

انتظار آن می‌رود که در سال‌های آتی نیز، روند افزایش ظرفیت تولید سیمان و مشارکت بیشتر این صنعت در تولید ناخالص ملی کشور با توجه به روند ساخت و ساز داخل کشور و کمبود عرضه این محصول در کشورهای همسایه چون عراق و افغانستان ادامه یابد. در واقع، وجود بازارهای مصرف سیمان در کشورهای همسایه و امکان صادرات این محصول یکی از انگیزه‌های توسعه صنعت سیمان در کشور جمهوری اسلامی ایران به شمار می‌رود.

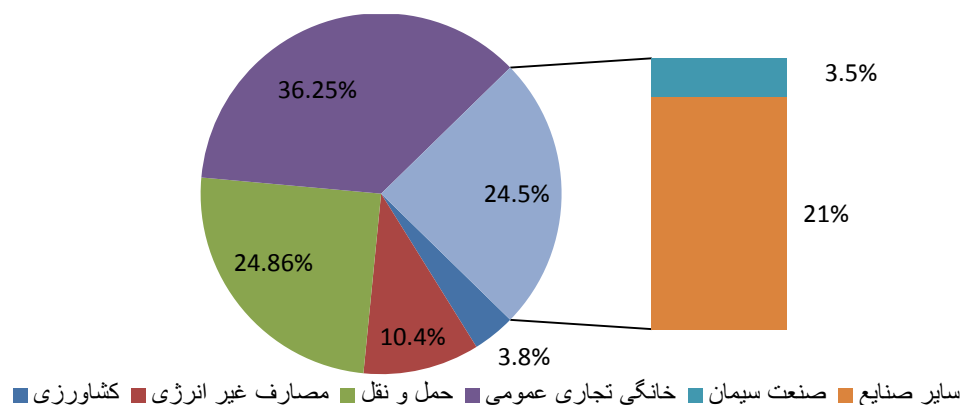
۳-۱ ضرورت انجام پژوهش

در کشور ما به دلیل قیمت نسبی کمتر انرژی در مقایسه با سایر عوامل تولید در صنعت و نبود یا

عدم اجرای معیارها و ضوابط لازم برای تغییر نرخ‌ها و تعرفه‌های تشویقی مصرف و نیز بی‌توجهی به شیوه‌های مصرف، پویایی در استفاده بهینه انرژی در بخش‌های مختلف و بخصوص در بخش صنعت حاصل نشده است. در حال حاضر، زمینه موجود برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در کلیه بخش‌های مصرف‌کننده کشور مشهود است. انجام مطالعات لازم برای تعیین الگوی صحیح مصرف انرژی توسط مصرف‌کنندگان مختلف و از جمله بخش صنعت امکان‌پذیر شده و انتظار می‌رود تا با تعیین ضوابط و معیارهای مصرف، گام‌هایی بلند در راستای کارایی و استفاده صحیح تر از انرژی برداشته شود. از طرفی همکاری مشترک وزارتخانه‌های نفت، نیرو، صنایع و معادن و سازمان برنامه ریزی و مدیریت کشور مبنی بر اهمیت مسئله مدیریت مصرف انرژی منجر به تصویب تبصره ۱۹ قانون برنامه دوم با تأکید بر تأسیس واحد مدیریت انرژی در صنایع پر مصرف انرژی و همچنین ماده ۱۲۱ قانون برنامه سوم توسعه با موضوع تدوین معیار مصرف انرژی، شده است.

۱-۳-۱ مصرف انرژی در صنعت سیمان کشور

صنعت سیمان در جمهوری اسلامی ایران، بعد از صنعت فولاد بالاترین میزان مصرف انرژی را به خود اختصاص داده است [1]. محاسبات اولیه نشان می‌دهد که در سال ۱۳۹۰، حدود ۴۰ میلیون بشکه معادل نفت خام به مصرف صنعت سیمان کشور رسیده است. به عبارت دیگر، صنعت سیمان کشور در همین سال حدود ۱۴/۵٪ از انرژی نهایی مصرفی بخش صنعت و ۳/۵٪ از کل مصرف انرژی نهایی کشور جمهوری اسلامی ایران را به خود اختصاص داده است. شکل (۱-۲) سهم صنعت سیمان را در کنار سهم سایر بخش‌ها از مصرف انرژی نهایی کشور را نشان می‌دهد [4] و [5].



شکل (۲-۱): سهم درصدی صنعت سیمان و سایر بخش‌ها از مصرف انرژی نهایی (سال ۱۳۹۰) کشور [5]

انرژی مصرفی در صنعت سیمان به دو شکل انرژی حرارتی ناشی از واکنش سوختن و انرژی الکتریکی است. شدت مصرف انرژی حرارتی و الکتریکی صنعت سیمان کشور در سال ۱۳۹۰ به ترتیب برابر ۳/۷۶ گیگاژول بر تن کلینکر و ۱۰۵ کیلووات ساعت بر تن سیمان است. این در حالی است که بهترین فناوری‌های جهانی موجود^۱ در صنعت سیمان، شدت مصرف انرژی حرارتی و الکتریکی به ترتیب معادل با ۳/۳ - ۲/۹ گیگاژول بر تن کلینکر و ۹۵-۱۰۰ کیلووات ساعت بر تن سیمان دارد [4]، [6] و [7].

تفاوت فناوری موجود در صنعت سیمان کشور با بهترین فناوری‌های موجود در سطح جهانی از دیدگاه شدت مصرف انرژی، نشانگر اهمیت فراوان بهبود فناوری در این صنعت می‌باشد.

چنانچه بررسی شد، حدود ۹۰٪ از انرژی مورد نیاز برای تولید سیمان، انرژی گرمایی ناشی از سوخت است که صرف تولید کلینکر در کوره می‌شود، ۱۰٪ باقی انرژی مورد نیاز نیز انرژی الکتریکی است که به صورت عمده در واحدهای سنگ شکن مواد اولیه و افزودنی‌های سیمان، آسیاب مواد خام،

¹ Best Available Techniques

کوره، خنک‌کن و آسیاب سیمان به مصرف می‌رسد.

در فرایند تولید کلینکر در کوره، سهم چشمگیری از انرژی گرمایی حاصل از سوختن سوخت، به صورت گرمای گازهای خروجی از فرایند به محیط اطراف آزاد می‌شود. گازهای خروجی شامل گازهای ناشی از احتراق و گاز دی‌اکسیدکربن محصول واکنش تولید کلینکر (کلسیناسیون) در کوره است. این میزان انرژی هدررفت از نظر کمی قابل توجه بوده و به همین جهت، بازیابی حرارتی در صنعت سیمان و بهبود فناوری امری ضروری می‌نماید.

در واقع، بهره‌گیری از فناوری‌های جدید چون فناوری بازیابی حرارتی در کارخانه‌های سیمان جدیدالاحداث و بهینه‌سازی عملکرد واحدهای تولید فعلی، از شدت مصرف انرژی کاسته و بدین ترتیب، هزینه انرژی تولید سیمان را کاهش می‌دهد. در عین حال، بواسطه بهبود فناوری در این صنعت، حجم انتشار دی‌اکسیدکربن نیز کاهش خواهد یافت.

۴-۱ اهداف پژوهش

بنابه گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، کاهش شدت مصرف انرژی حرارتی و الکتریکی صنعت سیمان به کمک:

الف) فناوری‌های مختلفی چون سیستم تولید توان از گرمای اتلافی و سایر فناوری‌های بازیابی انرژی.

ب) جایگزینی کلینکر و کاهش نسبت کلینکر به سیمان.

ج) استفاده از سوخته‌های جایگزین به ویژه پسماندها.

د) بهره‌برداری از فناوری جذب و ذخیره‌سازی کربن از اولویت‌های توسعه فناوری در صنعت

سیمان به شمار می‌روند [8].

تاریخچه راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی نشان می‌دهد که در هر صنعت فرایندی این راهکارها به سه دسته عمده تقسیم می‌شود: راهکارهای کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت [9].

راهکارهای کوتاه مدت همچون بازرسی‌های مداوم جهت تشویق به صرفه جویی در مصرف انرژی و برنامه‌های مهارت آموزی نیروی انسانی برای کار با تجهیزات به شدت انرژی بر، روش‌هایی هستند که به سرمایه گذاری نیازی ندارد و بیشتر به صورت تمهیدات مدیریتی هستند.

راهکارهای میان مدت، حرکت به سوی فناوری‌های جدید و کارا تر هستند. هدف این روشها، کاهش مصرف انرژی بدون نیاز به سرمایه گذاری قابل توجه است. بهبود تکنیک‌های عملیات و نگهداری، پیوسته کردن فرایند و بالا بردن بازده تولید محصول، از جمله این راهکارها هستند.

بر خلاف دو راهکار قبلی (کوتاه مدت و میان مدت)، راهکارهای بهینه‌سازی بلند مدت سرمایه‌گذاری قابل توجه و نوآوری پیشرفته‌ای را می‌طلبند. ترکیبی از موارد زیر به عنوان راهکارهای بلند مدت در بهینه‌سازی مصرف انرژی مطرح می‌باشد:

۱. مدیریت و برقراری ارتباط بین نیازهای مختلف واحد (همچون تولید همزمان)
 ۲. بهینه کردن اتصالات بین تجهیزات جهت بهره‌برداری کارا از مواد و حامل‌های انرژی واسط
 ۳. استفاده از سیستم اتوماسیون مرکزی و به هم پیوسته
 ۴. اصلاح یا باز طراحی فرایند (فناوری‌های جدید جایگزین فناوری‌های قبلی می‌شود)
- با توجه به حجم بالای انرژی حرارتی اتلافی در واحدهای تولید سیمان، سیستم‌های بازیافت انرژی حرارتی و تولید برق به عنوان راهکاری بلند مدت برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنعت سیمان مورد توجه قرار گرفته و یکی از فناوری‌های شاخص در این زمینه به شمار می‌رود.
- هدف انجام این پروژه فراهم ساختن روشی برای اعمال قانونهای اول و دوم ترمودینامیک در

آنالیز یک کارخانه سیمان می‌باشد. در این گفتار، پس از ارائه روش بحث و بسط روابط، شماتیک تولید کلینکر در کارخانه سیمان توضیح داده شده و سپس با استفاده از روابط ذکر شده، به تجزیه و تحلیل انرژی و انرژی و انرژی در هر یک از تجهیزات کارخانه سیمان پرداخته خواهد شد. با استفاده از آنالیز انرژی و انرژی، بازده قوانین اول و دوم ترمودینامیک در تجهیزات مختلف بدست آمده و سپس بازده کلی انرژی و انرژی کارخانه محاسبه خواهد شد. در ادامه تحلیل حساسیت در تجهیزات مختلف صورت گرفته و با توجه به آن پارامترهای حساس انرژی و انرژی در هر یک از تجهیزات بدست خواهد آمد. در ادامه کوشیده تا روند بهبود فناوری‌های صنعت سیمان به خصوص فناوری سیستم‌های بازیابی حرارتی را به کمک تحلیل انرژی و انرژی ارزیابی نماید. به عبارت دیگر، تأثیر بهبود فناوری‌های صنعت سیمان با تأکید ویژه بر سیستم‌های بازیابی حرارتی، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

یکی از مؤثرترین روش‌های بازیابی حرارتی در صنعت سیمان، تولید برق در واحدهای تولید از منبع حرارت اتلافی گازهای خروجی است که از یک سو، با کاهش وابستگی به برق شبکه، انرژی الکتریکی مورد نیاز واحد را تا حدود ۴۵-۳۰٪ میزان تقاضای خط تولید سیمان تأمین می‌کند و از سوی دیگر، به طور غیرمستقیم از پدیده آلودگی گرمایی و انتشار گازهای گلخانه‌ای جلوگیری می‌نماید [10].

در حالی که بویلرهای بازیابی حرارتی برای تولید برق در واحدهای تولید سیمان کشورهای ژاپن و چین به طور گسترده به کار می‌روند، انتظار آن می‌رود که در سایر نقاط جهان نیز، از این امکان به نحو احسن بهره‌برداری گردد [10]. قیمت در حال افزایش برق تحویلی به صنعت سیمان (پس از اجرای قانون هدفمندسازی یارانه‌ها) در کنار هزینه اولیه سرمایه‌گذاری در حال کاهش واحدهای بازیابی، محرک‌های اصلی توسعه این سیستم‌ها در کشور جمهوری اسلامی ایران خواهند بود.

حذف یارانه حامل‌های انرژی با عنایت به سهم بالای هزینه انرژی از کل هزینه تولید سیمان،

حاشیه سود خالص تولید سیمان را در سال‌های آتی نیز تهدید می‌کند. لذا، بهبود فناوری و کاهش شدت مصرف انرژی حرارتی و الکتریکی در واحدهای تولید سیمان اجتناب ناپذیر است و لزوم برنامه‌ریزی برای توسعه فناوری‌های کم انرژی‌بر در صنعت سیمان بیش از پیش احساس می‌شود.

۵-۱ تاریخچه انجام پژوهش

مدلسازی انرژی و انرژی برای اولین بار توسط ریستاد^۱ در سال ۱۹۷۵ در کشور آمریکا انجام شد این تکنیک پس از آن در کشورهای دیگری نظیر سوئد در سال ۱۹۸۶ و سال‌های بعد از آن، ژاپن در سال ۱۹۸۵ و بعد از آن، ایتالیا در سال ۹۰، ازبکستان در سال ۱۹۹۳، چین در سال ۱۹۹۷، قرقیزستان در سال ۱۹۹۹ و تعداد زیادی از کشورهای دیگر بکار گرفته شده است و آمار حاکی از آن است که در بسیاری از این کشورها رشد چشمگیری در بازده انرژی مشاهده شده است [11].

در ایران نیز تاکنون فعالیت‌هایی در زمینه مدلسازی انرژی و انرژی در موارد خاص نظیر نیروگاه‌ها، سیستم‌های سرمایشی، برج‌های تقطیر و ساختمان‌ها انجام شده است [12].

۱-۵-۱ تحلیل انرژی و انرژی صنعت سیمان

تحلیل انرژی و اکسرژی به کمک موازنه جرم، انرژی و اکسرژی انجام می‌گیرد و اغلب مطالعات این حوزه به صورت بررسی موردی بوده است. از این بین، میتوان به مطالعات در مورد واحدهای تولید سیمان کشورهای اندونزی، ترکیه، هند، ایران و ... اشاره کرد [9] و [13-18] با ارزیابی میزان مصرف انرژی و اکسرژی است که فرصت‌ها یا پتانسیل بهبود کارایی انرژی به کمک مقایسه نتایج ارزیابی‌ها با فناوری‌های به روز^۲ مشخص می‌گردد.

¹ Reistad

² state of art technology

برای تعیین پتانسیل بهبود کارایی انرژی در صنعت سیمان علاوه بر روش فوق، برخی معیارهای دیگر چون هزینه انرژی صرفه جویی شده^۱ نیز استفاده شده است [19] و [20]. یکی از مطالعات مهم در این زمینه که به کرات مورد استناد قرار گرفته است، مقاله آقای وارل و همکاران تحت عنوان (پتانسیل‌های بهبود بازده انرژی در صنعت سیمان امریکا) است [19].

آقای وارل و همکاران در این مقاله به تحلیل عمیق صنعت سیمان امریکا پرداخته و روش‌های مقرون به صرفه بهبود بازده انرژی را بررسی کرده‌اند. این تحلیل در سه مرحله صورت گرفته است. ابتدا روند پایه سال ۱۹۹۴ مصرف انرژی و مواد اولیه استخراج شده است. سپس فناوریهای بهبود بازده انرژی و تأثیر به کار بردن این فناوری‌ها بررسی گردیده و در مرحله آخر، مقرون به صرفه بودن روش‌های مختلف بهبود بازده انرژی به کمک منحنی عرضه بهینه‌سازی^۲ مصرف انرژی ارزیابی شده است. فرض اساسی این تحلیل به کارگیری اقتصادی ترین فناوری است.

۱-۵-۲ بررسی سیستم‌های بازیافت انرژی در صنعت سیمان

بنابه مطالعات کتابخانه‌ای صورت گرفته، بازیابی حرارتی در صنعت سیمان برای اولین بار در لنگفورت^۳ آلمان به سال ۱۹۹۸ انجام گرفته است. آقای لگمن با بررسی چرخه رانکین با سیال عامل آلی به کار رفته در این واحد ۱/۵ مگاواتی (با بازیابی انرژی ۸/۲ مگاواتی از خنک‌کن کلینکر) نشان داده است که این فرایند در عین انعطاف‌پذیری در شرایط عملیاتی مختلف، هیچ گونه مشکلی برای فرایند تولید سیمان ایجاد نمی‌کند [21].

البته در یکی از بررسیهای معدود انجام گرفته در باب مقایسه چرخه‌های توانی بازیافت حرارتی،

¹ cost of conserved energy

² energy conservation supply curve

³ Lengfurt

آقای وانگ و همکاران [22] سیستم‌های مختلف تولید برق از گازهای خروجی در یک واحد سیمان ۵۰۰۰ تنی در روز را به کمک بهینه‌یابی پارامتریک مقدار بازده اکسرژی با الگوریتم ژنتیک تحلیل کرده‌اند. چرخه بخار با تبخیر ناگهانی، چرخه بخار دو فشاری، چرخه رانکین با سیال عامل آلی و چرخه کالینا در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

لازم به ذکر است در این تحقیق بازیافت حرارتی از کوره دوار صورت نگرفته و بازیافت حرارتی تنها از خنک‌کن کلینکر و خروجی پیشگرم انجام گرفته است.

وجه تمایز تحقیق حاضر با سایر کارهای انجام گرفته بررسی بازیافت حرارت اتلافی از جدازه کوره دوار به همراه گازهای داغ خروجی از خنک‌کن کلینکر و ارائه سیکل توان مناسب به منظور تولید الکتریسیته با نگرش اگزرژی و پینچ می‌باشد.

۱-۶ معرفی سیمان شاهرود

کارخانه سیمان شاهرود با ظرفیت نامی ۲۶۰۰ تن کلینکر در روز در خط تولید شماره ۱ و ۳۳۰۰ تن کلینکر در روز خط تولید شماره ۲، در ۱۰ کیلومتری شهرستان شاهرود واقع شده است. که خط تولید شماره ۲ تولید سیمان این کارخانه به عنوان نمونه برای انجام محاسبات مورد بررسی قرار گرفته است.

علل اصلی انتخاب خط ۲ تولید سیمان شاهرود به عنوان مبنای مدلسازی همکاری نزدیک با تیم تحقیقاتی کارخانه و امکان دسترسی به نتایج ممیزی‌های انجام شده از یک سو و رایج بودن فناوری سازنده غالب تجهیزات واحد سیمان شاهرود در بین سایر واحدهای تولید سیمان در کشور از سوی دیگر می‌باشد.

لازم به ذکر است به جهت پیوستگی مطالب و رعایت انسجام پایان‌نامه، توضیحات مربوط به

شناسایی و بررسی فرآیندهای مختلف در تولید سیمان در پیوست (الف) پایان نامه آورده شده است. در صورت عدم برخورداری از اطلاعات کافی در این زمینه، مطالعه‌ی این بخش نیز توصیه می‌گردد.

فصل دوم: تئوری اگزورژی و پینچ

۲-۱ مقدمه

موازنه انرژی معادل با قانون بقای انرژی (قانون اول ترمودینامیک) می‌باشد. اما موازنه انرژی بیانگر افت کیفیت انرژی (ترکیب قوانین اول و دوم ترمودینامیک) می‌باشد. افت کیفیت انرژی یا تخریب انرژی نیز به دلیل بازگشت ناپذیری فرایندهای واقعی اتفاق می‌افتد. تحلیل انرژی یا برقراری موازنه انرژی به تنهایی قادر به شناسایی عدم کارایی‌های ترمودینامیک واقعی نیست. در حقیقت تحلیل انرژی یک سیستم تنها منجر به شناسایی انتقال یا هدر رفت انرژی از سیستم به بیرون می‌گردد بنابراین تحلیل انرژی برخی کج‌فهمی‌ها به دنبال خواهد داشت چرا که به دنبال شناسایی عدم کارایی‌های درونی سیستم نیست. این در حالی است که بسیاری از عدم کارایی‌ها در درون سیستم رخ می‌دهد.

قانون دوم ترمودینامیک به کیفیت انرژی می‌پردازد این قانون بیشتر به تجزیه و تحلیل انرژی در خلال یک فرایند، آنتروپی تولید شده و هدر رفتن فرصت‌ها و مجال‌های انجام کار می‌پردازد و میدان وسیعی برای اصلاح و توسعه پیشنهاد می‌کند. در این فصل پس از توضیحاتی پیرامون قوانین ترمودینامیکی حاکم بر فرایندهای مختلف به تعریف و بررسی مفاهیم انرژی می‌پردازیم.

۲-۲ قانون اول ترمودینامیک

قانون اول ترمودینامیک بیانی است از قانون بقای انرژی و بر حسب تعریف سیستم‌های بسته و باز می‌توان به فرموله نمودن این قانون پرداخت.

۲-۲-۱ بررسی قانون اول ترمودینامیک در سیستم‌های بسته

این قانون در سیستم‌های بسته بصورت زیر است:

[افزایش (یا کاهش) خالص انرژی کل سیستم] = [انرژی خالصی که بصورت کار یا حرارت به (یا از)

سیستم منتقل می شود].

$$Q-W = \Delta E \quad (1-2)$$

که تغییرات انرژی کل حاصل جمع تغییرات انرژی درونی، انرژی جنبشی و پتانسیل است.

$$\Delta E = \Delta U + \Delta K + \Delta P \quad (2-2)$$

با صرف نظر کردن از انرژی جنبشی و پتانسیل در سیستم‌های بسته داریم:

$$Q-W = \Delta U \quad (3-2)$$

۲-۲-۲ بررسی قانون اول در سیستم‌های حجم کنترل (باز)

اصول حاکم بر قانون اول در سیستم‌های حجم کنترل (باز) به شرح زیر می‌باشد.

$$\sum m_i - \sum m_o = \Delta m_{cv} \quad \text{اصل بقای جرم:}$$

$$Q-W + \sum E_{in} - \sum E_{out} = \Delta E_{cv} \quad \text{اصل بقای انرژی:}$$

۳-۲-۲ فرایند جریان پایدار

تعداد زیادی از وسایل مهندسی مانند توربین‌ها، کمپرسورها و شیلرها تحت شرایط یکسانی برای مدت زمان طولانی کار می‌کنند و بعنوان وسایل جریان پایدار طبقه بندی می‌شوند. فرایندهای مربوط به جریان پایدار، می‌توانند بطور معقولی با یک فرایند تا حدی ایده آل به نام فرایند جریان پایدار بیان گردند. یک فرایند جریان پایدار عبارتست از فرایندی که طی آن یک سیال از میان یک حجم کنترل بصورت پایدار جریان می‌یابد. یعنی خواص سیال می‌تواند از نقطه‌ای به نقطه دیگر در داخل حجم کنترل تغییر کند اما در تمام طول فرایند ثابت می‌ماند.

در حالت جریان پایدار قانون اول برای حجم کنترل بصورت زیر است:

$$\Sigma \dot{m}_i = \Sigma \dot{m}_e \quad (4-2)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \Sigma \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \Sigma \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) \quad (5-2)$$

۲-۳ قانون دوم ترمودینامیک

قانون دوم ترمودینامیک مشخص می‌کند که انرژی همانند کمیت دارای کیفیت نیز می‌باشد. یک تحول، بدون ارضاء قوانین اول و دوم انجام پذیر نمی‌باشد. بر مبنای قانون دوم مفهوم آنتروپی توضیح داده می‌شود. آنتروپی یک خاصیت بدون بقا بوده و چیزی به نام قانون بقای آنتروپی وجود ندارد.

۱-۳-۲ نامساوی کلازیوس

قانون دوم ترمودینامیک غالبا به روابطی که دارای علامت نامساوی هستند منجر می‌شود.

نامساوی کلازیوس بصورت زیر بیان شده است:

$$\oint \left(\frac{\delta Q}{T} \right) \leq 0 \quad (6-2)$$

این نامساوی برای تمامی چرخه‌های برگشت پذیر و برگشت ناپذیر صادق است.

در چرخه‌های برگشت پذیر داخلی داریم:

$$\oint \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{int,rev}} = 0 \quad (7-2)$$

۲-۳-۲ آنتروپی

آنتروپی را بصورت زیر تعریف می‌کنند:

$$ds = \oint \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{int,rev}} \quad (8-2)$$

تغییر آنتروپی یک سیستم طی یک فرایند برگشت پذیر را می‌توان به وسیله انتگرال گیری از این رابطه، بین حالات ابتدایی و انتهایی بدست آورد:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{int,rev}} \quad (9-2)$$

برای بدست آوردن تغییرات آنتروپی بایستی رابطه بین انتقال حرارت و دما را در طی یک فرایند داشته باشید. این رابطه اغلب قابل دستیابی نمی‌باشد و این انتگرال تنها برای بعضی حالات قابل استفاده است. یکی از این حالات خاص حالتی است که انتقال حرارت بصورت برگشت‌پذیر داخلی و در دمای ثابت صورت می‌پذیرد. در این صورت:

$$\Delta S = \frac{Q}{T_0} \quad (10-2)$$

۳-۳-۲ اصل افزایش آنتروپی

هر سیستم و محیط اطراف آن را می‌توان بعنوان دو سیستم جزئی از یک سیستم ایزوله در نظر گرفت و تغییرات آنتروپی در این سیستم عایق شده در یک فرایند را می‌توان مجموع تغییرات آنتروپی همان سیستم عایق شده و محیط اطراف آن دانست. این مقدار را تغییرات کلی آنتروپی S_{total} یا تولید آنتروپی S_{gen} می‌نامند و اصل افزایش آنتروپی را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$S_{\text{gen}} = \Delta S_{\text{total}} = \Delta S_{\text{sys}} + \Delta S_{\text{e}} \geq 0 \quad (11-2)$$

این معادله یک بیان عمومی از اصل افزایش آنتروپی است که هم در سیستم‌های بسته (جرم کنترل) و هم در سیستم‌های باز (حجم کنترل) بکار می‌رود. بطور خلاصه اصل افزایش آنتروپی را می‌توان بصورت زیر نشان داد:

$$S_{\text{gen}} = \Delta S_{\text{total}} \begin{cases} > 0 & \text{ناپذیر بازگشت فرایند} \\ = 0 & \text{پذیر بازگشت فرایند} \\ < 0 & \text{ممکن غیر فرایند} \end{cases}$$

۴-۲ موازنه آنتروپی برای سیستم‌های بسته

در یک سیستم بسته هیچگونه جریان جرم عبوری از مرزها وجود ندارد و تغییر آنتروپی آن به

سادگی از اختلاف بین مقادیر آنتروپی در حالت‌هایی ابتدایی و نهایی سیستم بدست می‌آید:

تغییرات آنتروپی = انتقال آنتروپی با حرارت + آنتروپی ایجاد شده در سیستم

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_{\text{gen,sys}} \quad (12-2)$$

در این حالت اصل افزایش آنتروپی بصورت زیر در می‌آید.

$$S_{\text{gen}} = \Delta S_{\text{total}} = \Delta S_{\text{sys}} + \Delta S_e \geq 0 \quad (13-2)$$

که در آن:

$$\Delta S_{\text{sys}} = S_2 - S_1 = m(S_2 - S_1) \quad (14-2)$$

$$\Delta S_e = \sum \frac{Q_R}{T_R} \quad (15-2)$$

و علامت Q_R با توجه به منابع حرارتی تعیین می‌شود.

در این حالت فرض کرده‌ایم که دمای مرزی که در آن انتقال حرارت با یک منبع حرارتی انجام می‌گیرد برابر با دمای محیط است. یعنی محیط را شامل منابع حرارتی تحت فرایندهای ایزوترم برگشت‌پذیر داخلی فرض کرده‌ایم.

۲-۴-۱ موازنه آنتروپی برای حجم‌های کنترل

برای یک حجم کنترل داریم:

$$\frac{ds_{\text{cv}}}{dt} = \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \sum \dot{m}_i s_i - \sum \dot{m}_e s_e + \dot{S}_{\text{gen,cv}} \quad (16-2)$$

بنابراین:

$$\dot{S}_{\text{gen,cv}} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i + \frac{ds_{\text{cv}}}{dt} + \sum \frac{\dot{Q}_R}{T_R} \quad (17-2)$$

علامت Q_R با توجه به منابع حرارتی تعیین می‌شود و i ، بیانگر ورودی و e بیانگر خروجی سیستم

مورد نظر می باشد.

برای یک فرایند جریان پایدار این رابطه بصورت زیر خلاصه می شود.

$$\dot{S}_{\text{gen,cv}} = \sum \dot{m}_e S_e - \sum \dot{m}_i S_i + \frac{dS_{\text{cv}}}{dt} + \sum \frac{\dot{Q}_R}{T_R} \geq 0 \quad (18-2)$$

۲-۴-۲ تغییر آنتروپی مواد خالص

تغییر آنتروپی یک ماده خالص در یک فرایند به سادگی از اختلاف بین مقادیر آنتروپی در حالت نهایی و حالت ابتدایی بدست می آید.

$$\Delta S = S_2 - S_1 = m(s_2 - s_1) \quad (19-2)$$

۳-۴-۲ تغییر آنتروپی جامدات و مایعات

جامدات و مایعات می توانند مواد غیر قابل تراکم ایده آل در نظر گرفته شوند. برای مواد غیر قابل تراکم $C_p = C_v = C$ بوده و $dU = C dT$. بنابراین:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 C(T) \frac{dT}{T} = C_{\text{av}} \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \quad (20-2)$$

۴-۴-۲ تغییر آنتروپی یک گاز کامل

با استفاده از خواص گازهای کامل روابط زیر بدست می آیند:

$$dS = C_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v} \quad (21-2)$$

در نتیجه با انتگرال گیری بین حالت ابتدایی و انتهایی تحول:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 C_v(T) \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1} = \int_1^2 C_p(T) \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (22-2)$$

۲-۵ قابلیت انجام کار (اگرژی) و مفاهیم اگرژی

۲-۵-۱ مقدمه

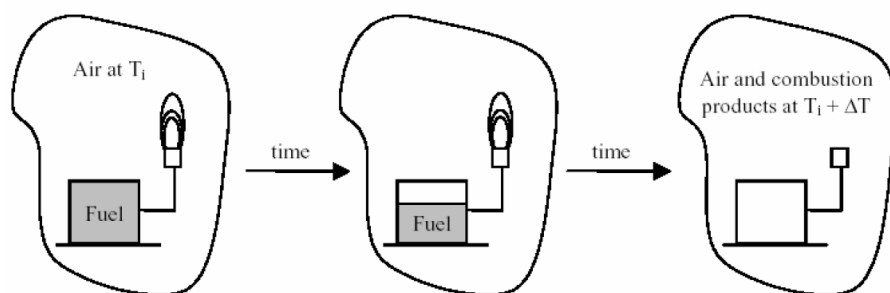
قابلیت انجام کار (اگرژی) عبارتست از: ماکزیمم کار مفیدی که از یک سیستم در حالت معین می‌تواند تولید شود. برای این منظور محیط مرجع اگرژی (حالت مرده) را تعریف می‌کنند که عبارت است از محیطی که در حالت تعادل ترمودینامیکی با اطراف خود باشد.

کار برگشت پذیر مقدار کار مفید حداکثری است که می‌تواند در یک سیستم در طی یک فرایند بین دو حالت معین ابتدایی و انتهایی تولید شود. این کار مفید خروجی (یا ورودی) وقتی بدست می‌آید که فرایند بین حالت ابتدایی و انتهایی کاملاً در یک حالت برگشت‌پذیر اتفاق بیفتند. وقتی که حالت نهایی حالت مرده باشد، کار برگشت پذیر برابر قابلیت انجام کار (اگرژی) خواهد بود.

بدیهی است که طراحی سیستم‌های گرمایی پربازده که به خوبی از منابع تجدید ناپذیر انرژی استفاده می‌کنند، از اهمیت بسیاری برخوردار است. (تحلیل اگرژی) ابزاری برای تعیین نوع، محل و مقادیر تلفات حرارتی، معین کردن و کمی سازی این تلفات، ما را قادر می‌سازد تا طراحی سیستم‌های ترمودینامیکی را ارزیابی کرده و سپس بهبود بخشیم.

۲-۵-۲ تعریف اگرژی

سیستم ایزوله زیر را در نظر بگیرید. سیستم شامل یک مخزن کوچک سوخت و هوای اطراف آن است. با احتراق سوخت، انرژی شیمیایی به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود و دمای هوا افزایش می‌یابد.



شکل (۱-۲): مثال برای انرژی

از آنجائیکه سیستم ایزوله است، مقدار کل انرژی ثابت باقی می ماند. گرچه مقدار انرژی ثابت باقی می ماند، ولی با گذشت زمان توانایی ما برای انجام کار کاهش می یابد. به عبارت دیگر، در حالت ابتدایی، انرژی سیستم پتانسیل بیشتری از حالت انتهایی دارد. به دلیل بازگشت ناپذیری های بوجود آمده در طول این فرایند، پتانسیل کاربری انرژی یا انرژی سیستم کاهش می یابد. انرژی را (حداکثر کار تئوری قابل حصول سیستم در اثر تعامل آن با محیط اطرافش و تا رسیدن به تعادل) تعریف می کنند. وقتی یک سیستم با محیط اطرافش در حال تعادل باشد، استفاده از انرژی برای تولید کار غیر ممکن است. اینجاست که می گوئیم، انرژی سیستم کاملاً از بین رفته است.

انرژی یک سیستم، حداکثر کاریست که می توان از آن سیستم بدست آورد. به منظور کمی کردن انرژی یک سیستم، ما باید هم سیستم و هم محیط را مشخص کنیم. (محیط مرجع انرژی) به منظور استاندارد کردن کمی سازی انرژی به کار می رود

حالت های مشخص از انرژی الکتریکی قابلیت تولید کار مفید با بازده ۱۰۰٪ را دارا می باشد اما تولید کار با بازده ۱۰۰٪ برای هر حالتی ممکن نیست و بازده تبدیل به کیفیت آن حالت انرژی بستگی دارد به عنوان مثال اگر دمای محیط را ۲۵ درجه سانتیگراد فرض کنیم هر یک کیلو ژول انرژی حرارتی در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد و تحت شرایط ایده آل می تواند معادل ۰/۶۱۴ کیلو ژول کار تولید کند. این در حالی است که همان مقدار انرژی گرمایی در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد

توان تولید ۰/۷۶۶ کیلو ژول کار را دارد به عبارت دیگر کیفیت انرژی در بازده تبدیل تاثیر گذار است و قابلیت تولید کار مفهومی است که به عنوان انرژی شناخته می شود انرژی بیشینه کار مفید نظری است که با به تعادل رسیدن ترمودینامیکی یک سیستم در حال تعامل با محیط اطراف (فقط با محیط) خود به دست می آید.

محیط مرجع انرژی یا به سادگی (محیط) یک سیستم بزرگ، ساده و تراکم پذیر فرض می شود. دمای محیط در مقدار T_0 و فشار آن در مقدار P_0 یکنواخت فرض می شوند. همچنین، فرض می شود که خواص شدتی محیط با هر نوع فرایندی، تغییرات قابل ملاحظه ای ندارند. بنابراین محیط به عنوان یک مخزن گرمایی در دمای T_0 مدل می شود.

سیستم بسته ای را در نظر بگیرید که با محیط مرجع انرژی تعامل دارد. با به کارگیری قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$Q - W = \Delta E \quad (2-23)$$

و از آنجائیکه محیط، مخزنی در دمای T_0 است، نتیجه موازنه آنتروپی مطابق زیر است :

$$S_{\text{gen}} = \Delta S - \frac{Q}{T_0} \quad (2-24)$$

با جمع کردن قانون اول و موازنه آنتروپی و حل کردن آن به ازای کار خواهیم داشت:

$$W = -\Delta E + T_0 \Delta S - T_0 S_{\text{gen}} \quad (2-25)$$

همه کار تولید شده توسط سیستم را نمی توان به صورت مطلوب به کار برد. برای مثال، هنگامی که گاز درون سیلندر-پیستون منبسط می شود، مقداری از کار برای تراکم محیط مورد نیاز است. چون محیط یک سیستم تراکم پذیر ساده است و فشار آن ثابت است، کار محیط برابر می شود با:

$$W_e = P_0 \Delta V_e = P_0 \Delta V \quad (2-26)$$

کار مفید با کم کردن کار محیط بدست می‌آید:

$$W_u = W - W_e = -\Delta E + T_0 \Delta S - T_0 S_{gen} - P_0 \Delta V \quad (27-2)$$

$$W_e = (E_1 - E_2) + P_0(V_1 - V_2) - T_0(S_1 - S_2) - T_0 S_{gen} \quad (28-2)$$

اگر حالت دوم سیستم در تعادل با محیط باشد (حالت مرده)،

$$E_2 = U_0, V_2 = V_0, S_2 = S_0 \quad (29-2)$$

و کار مفید با رابطه زیر داده می‌شود:

$$W_u = (E - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) - T_0 S_{gen} \quad (30-2)$$

واضح است، هنگامی که فرایند بازگشت پذیر است و $S_{gen}=0$ کار مفید بیشینه خواهد بود. حداکثر کار مفیدی که می‌توان از یک سیستم در تعامل با محیط مرجع اگزرژی بدست آورد، همانا اگزرژی سیستم است.

$$X = (E - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) \quad (31-2)$$

یک سیستم ممکن است فرایندی را طی کند که در آن فرایند حالت نهایی، در تعادل با محیط نباشد. برای این فرایندها، تغییر اگزرژی سیستم با رابطه زیر داده می‌شود:

$$W_{rev} = X_2 - X_1 = (E_2 - E_1) + P_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1) \quad (32-2)$$

برای فرایندهایی که احتیاج به کار دارند، کار برگشت پذیر بیان کننده حداقل مقدار کار لازم برای انجام فرایند است. هر مقدار تفاوتی که بین کار برگشت پذیر W_{rev} و کار مفید W_u وجود داشته باشد، باعث پدید آمدن برگشت ناپذیری در طول فرایند می‌شود. این اختلاف برگشت ناپذیری (I) نامیده می‌شود.

$$I = W_{rev} - W_u \quad (33-2)$$

$$\dot{I} = \dot{W}_{rev} - \dot{W}_u \quad (34-2)$$

برای فرایندهای کاملاً برگشت پذیر، عبارت‌های کار واقعی و کار برگشت‌پذیر یکی می‌باشد و بنابراین میزان بازگشت‌ناپذیری برابر با صفر می‌باشد. برای تمام فرایندهای واقعی (برگشت‌ناپذیر)، مقدار برگشت‌ناپذیری مثبت است. چون در وسایل تولید کننده کار عبارت کار مثبت و در نتیجه $(W_u < W_{rev})$.

۳-۵-۲ انتقال انرژی همراه تبادل کار و حرارت

انرژی حداکثر کاریست که می‌تواند از یک منبع در رسیدن به حالت مرده بدست آید. این مقدار برابر است با کاری که یک موتور حرارتی کارنو بین این منبع و محیط تولید می‌نماید. بازده کارنو $\eta_c = 1 - \frac{T_0}{T}$ بیانگر قسمت قابل حصول از انرژی این منبع حرارتی در دمای T می‌باشد. انتقال حرارت Q همیشه همراه با انتقال انرژی بوده و مقدار آن از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$X_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) * Q \quad (35-2)$$

وقتی که دمای T در محلی که انتقال حرارت اتفاق می‌افتد ثابت نباشد انرژی از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$X_Q = \int \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) * \delta Q \quad (36-2)$$

انرژی بواسطه انجام کار با X_W نشان داده می‌شود و همان کار مفید است.

$$X_W = W_u = \left\{ W - P_0(V_2 - V_1) \right\}_W \quad (37-2)$$

۲-۶ تحلیل انرژی

۱-۶-۲ تحلیل انرژی سیستم‌های بسته

یک سیستم بسته در عین اینکه با محیط اطرافش تبادل کار و گرما دارد، از یک حالت به حالت

دیگر می‌رود. چون حالت سیستم در طی تبادل کار و حرارت تغییر می‌کند، خواص سیستم، از جمله اگزرژی سیستم، نیز تغییر خواهند نمود. اگزرژی یک سیستم، با انتقال اگزرژی از مرز سیستم یا با از بین رفتن اگزرژی، تغییر خواهد کرد. مفاهیم تغییر اگزرژی، انتقال اگزرژی و از بین رفتن اگزرژی برای نوشتن موازنه اگزرژی به کار می‌روند. موازنه‌های اگزرژی بر مبنای قوانین اول و دوم ترمودینامیک هستند و اساس (تحلیل اگزرژی) را فراهم می‌آورند. موازنه اگزرژی نیز مانند موازنه آنتروپی بیانی جایگزین برای قانون دوم است.

موازنه اگزرژی برای یک سیستم بسته، با در نظر گرفتن فرم دیفرانسیلی قانون اول برای سیستم بسته، بدست می‌آید.

$$dE = \delta Q - \delta W \quad (38-2)$$

یک موازنه آنتروپی نیز در نظر گرفته می‌شود.

$$dS = \frac{\delta Q}{T_b} + \delta S_{gen} \quad (39-2)$$

که در آن T_b بیانگر دمای مرز انتقال حرارت می‌باشد. موازنه آنتروپی را در دمای محیط T_0 ضرب می‌کنیم تا:

$$T_0 dS = T_0 \frac{\delta Q}{T_b} + T_0 \delta S_{gen} \quad (40-2)$$

با کم کردن این معادله از قانون اول خواهیم داشت:

$$dE - T_0 dS = \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \delta Q - \delta W - T_0 \delta S_{gen} \quad (41-2)$$

انتگرال گیری از این معادله نتیجه می‌دهد:

$$E_2 - E_1 - T_0(S_2 - S_1) = \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) Q_{12} - W_{12} - T_0 S_{gen} \quad (42-2)$$

سپس به هر طرف این معادله عبارت $P_0(V_2 - V_1)$ را اضافه می‌کنیم تا موازنه اگزرژی برای یک

سیستم بسته را بدست آوریم:

$$E_2 - E_1 + P_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1) \quad (43-2)$$

$$= \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) Q_{12} - |W_{12} - P_0(V_2 - V_1)| - T_0 S_{gen}$$

$$X_2 - X_1 = (E_2 - E_1) + P_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1) \quad (44-2)$$

$$= \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) Q_{12} - [W_{12} - P_0(V_2 - V_1)] - T_0 S_{gen}$$

موازنهٔ انرژی را بر اساس شدت جریان نیز می‌توان نوشت.

$$\frac{dx}{dt} - \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) Q_j - \left(\bar{W} - P_0 \frac{dV}{dt}\right) - T_0 \bar{S}_{gen} \quad (45-2)$$

در نتیجه، با جمع بندی مطالب برای یک سیستم بسته داریم:

$$Q - W = U_1 - U_2 \quad \text{قانون اول}$$

$$S_{gen} = (S_2 - S_1)_{sys} + \frac{Q_e}{T_e} \quad \text{قانون دوم}$$

که در آن e بیانگر محیط می‌باشد. با حذف عبارت انتقال حرارت بین دو معادله داریم:

$$W = (U_1 - U_2) - T_0(S_1 - S_2) - T_0 S_{gen} \quad (46-2)$$

این کار، کل کار حقیقی انجام شده در طول فرایند است اگر حجم سیستم در طول فرایند تغییر

کند در آن صورت کار مفید بصورت زیر در می‌آید. در نتیجه

$$W_u = W - W_e = W - P_0(V_2 - V_1) \quad (47-2)$$

$$W_u = (U_1 - U_2) - T_0(S_1 - S_2) + P_0(V_2 - V_1) - T_0 S_{gen} \quad (48-2)$$

کار برگشت پذیر با مساوی صفر قرار دادن آنتروپی تولید شده بدست می‌آید:

$$W_{rev} = (U_1 - U_2) - T_0(S_1 - S_2) + P_0(V_2 - V_1) \quad (49-2)$$

اگر بجای حالت ۲ حالت مرده را داشته باشیم در آن صورت انرژی بدست می‌آید:

$$X=(U_1-U_0)-T_0(S_1-S_0)+P_0(V_1-V_0) \quad (50-2)$$

برای یک فرایند بین حالت‌های ۱ و ۲ داریم.

$$W_{rev} = X = X_1 - X_2 \quad (51-2)$$

$$I = X - W_u = T_0 S_{gen} \quad (52-2)$$

۲-۶-۲ تحلیل اگزرژی سیستم‌های باز

در هنگام بررسی سیستم‌های باز در نظر گرفتن انتقال اگزرژی با جریان جرمی و کار جریان اهمیت زیادی دارد. استفاده از مفهوم اگزرژی جریان، بهترین راه برای وارد نمودن این روش‌های انتقال اگزرژی در تحلیل اگزرژی یک حجم کنترل است. حالت نشان داده شده در شکل را در نظر بگیرید. منطقه هاشور خورده را به عنوان جرم کنترل فرض کنید.

در زمان t ، جرم کنترل و حجم کنترل منطقه یکسانی از فضا را اشغال می‌کنند. در زمان $t+\Delta t$ مقداری از جرم کنترل از حجم کنترل خارج می‌شود و منطقه e از فضا را پر می‌کند.

میزان انتقال اگزرژی از جرم کنترل انجام دهنده کار، با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\left[\begin{array}{c} \text{exergy transfer from the control} \\ \text{mass accompanying work} \end{array} \right] = W - P_0 \Delta V = W - m_e P_0 V_e \quad (53-2)$$

با تقسیم این عبارت بر Δt و با میل دادن Δt ، به سمت صفر، شدت انتقال اگزرژی از جرم کنترل بدست می‌آید.

$$\left[\begin{array}{c} \text{Rate of exergy transfer from the control} \\ \text{mass accompanying work} \end{array} \right] \quad (54-2)$$

$$= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{W}{\Delta t} \right) - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{m_e}{\Delta t} \right) P_0 V_e$$

با میل کردن Δt به سمت صفر، مرزهای جرم کنترل و حجم کنترل بر هم منطبق می‌شوند. بنابراین کار انجام شده توسط جرم کنترل مساوی کار انجام شده توسط حجم کنترل و به کلام

ساده تر برابر کار جریان در مورد مذکور است. لذا شدت انتقال انرژی از جرم کنترل برابر شدت انتقال انرژی از جرم کنترل است.

$$\left[\begin{array}{c} \text{Rate of exergy transfer from the control} \\ \text{volume accompanying flow work} \end{array} \right] = \dot{m}_e(P_e v_e - P_0 v_e) \quad (55-2)$$

تحلیلی مشابه در مورد ورودی به جرم کنترل نشان می دهد که شدت انتقال انرژی به جرم کنترلی که کار انجام می دهد برابر است با:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Rate of exergy transfer from the control} \\ \text{volume accompanying flow work} \end{array} \right] = \dot{m}_i(P_i v_i - P_0 v_i) \quad (56-2)$$

۳-۶-۲ موازنه انرژی برای یک جرم کنترل

موازنه انرژی برای یک جرم کنترل درست مانند روشی که موازنه انرژی را برای یک جرم کنترل می نویسیم، نوشته می شود. جرم کنترل m را در نظر بگیرید که در زمانهای t و $t + \Delta t$ مناطق مختلفی را اشغال می کند.

در زمان t کل انرژی در نظر گرفته شده با رابطه زیر داده می شود.

$$\begin{aligned} X(t) &= X_{cv}(t) + X_i \\ &= X_{cv}(t) + m_i[(e_i - u_0) + P_0(v_i - v_0) - T_0(S_i - S_0)] \end{aligned} \quad (57-2)$$

در طی بازه زمانی Δt کل جرم موجود در منطقه i به جرم کنترل وارد می شود و مقداری از جرم داخل جرم کنترل به منطقه e منتقل می گردد. در زمان $t + \Delta t$ کل انرژی در نظر گرفته شده برابر است با:

$$\begin{aligned} X(t + \Delta t) &= X_{cv}(t + \Delta t) + X_e \\ &= X_{cv}(t + \Delta t) + m_e[(e_e - u_0) + P_0(v_e - v_0) \\ &\quad - T_0(S_e - S_0)] \end{aligned} \quad (58-2)$$

با کم کردن $X(t)$ از $X(t + \Delta t)$ خواهیم داشت.

$$X_{cv}(t + \Delta t) - X_{cv}(t) \quad (59-2)$$

$$= X(t + \Delta t) - m_e[(e_e - u_0) + P_0(v_e - v_0) - T_0(S_e - S_0)] - X(t) + m_i[(e_i - u_0) + P_0(v_i - v_0) - T_0(S_i - S_0)]$$

در طی این فرایند ممکن است تعامل کار و گرما رخ دهد، لذا انتقال انرژی تعامل کار و گرما را به همراه خواهد داشت. گرچه جرم کنترل مورد نظر در زمان‌های مختلف مناطق مختلفی از فضا را اشغال می‌نماید، اما هنوز یک جرم کنترل یا یک سیستم بسته است. بنابراین، می‌توان موازنه انرژی سیستم بسته را برای آن به کار برد.

$$X(t + \Delta t) - X(t) = (1 - \frac{T_0}{T_b})Q - [W - P_0(V(t + \Delta t) - V(t)) - T_0S_{gen} \quad (60-2)$$

جمع کردن دو معادله اخیر نتیجه می‌دهد.

$$X_{cv}(t + \Delta t) - X_{cv}(t) \quad (61-2)$$

$$= (1 - \frac{T_0}{T_b})Q - [W - P_0(V(t + \Delta t) - V(t)) - T_0S_{gen} + m_i[(e_i - u_0) + P_0(v_i - v_0) - T_0(S_i - S_0)] - m_e[(e_e - u_0) + P_0(v_e - v_0) - T_0(S_e - S_0)]$$

$$X_{cv}(t + \Delta t) - X_{cv}(t) \quad (62-2)$$

$$= (1 - \frac{T_0}{T_b})Q - [W - P_0(V_{cv}(t + \Delta t) + m_e v_e - v_{cv}(t) + m_i V_i] - T_0S_{gen} + m_i[(e_i - u_0) + P_u(v_i - v_0) - T_0(S_i - S_0)] - m_e[(e_e - u_0) + P_u(v_e - v_0) - T_0(S_i - S_0)]$$

با تقسیم این عبارت بر Δt خواهیم داشت:

$$\frac{X_{cv}(T + \Delta T) - X_{cv}(T)}{\Delta T} \quad (۶۳-۲)$$

$$= \left(1 - \frac{T_a}{T_b}\right) \frac{Q}{\Delta T} - \left[\frac{W}{\Delta T} - P_0 \left(\frac{V_{cv}(T + \Delta T) - V_{cv}(T)}{\Delta T} \right) - \frac{m_e}{\Delta t} P_0 V_0 - \frac{m_i}{\Delta t} P_0 V_i \right] - T_0 \frac{S_{gen}}{\Delta t} + \frac{m_i}{\Delta t} [(e_i - u_0) + P_0(v_i - v_0) - V_0(S_i - S_0)] + \frac{m_i}{\Delta t} [(e_i - u_0) + P_0(v_t - v_0) - t_0(S_i - S_0)]$$

با میل دادن Δt به سمت بینهایت عبارت نهایی تبدیل می گردد به

$$\frac{dX_{cv}}{dt} = \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \dot{Q} - \left[\dot{W} - P_0(\dot{m}_i v_i - \dot{m}_e v_e) - P_0 \left(\frac{dV_{cv}}{dt} \right) \right] \quad (۶۴-۲)$$

$$-T_0 S_{gen} + \dot{m}_i [(e_i - u_i) + P_0(v_i - v_0) - T_0(S_i - S_0)]$$

$$- \dot{m}_e [(e_e - u_0) + P_0(v_e - v_0) - T_0(S_e - S_0)]$$

سپس فرض می شود که همهٔ تعاملات گرمایی در مرز حجم کنترل انجام می گیرد، لذا:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{cv} \quad (۶۵-۲)$$

همچنین می دانیم که

$$\dot{W} = \dot{W}_{cv} + \dot{W}_f = \dot{W}_{cv} + \dot{m}_e P_e v_e - \dot{m}_i P_i v_i \quad (۶۶-۲)$$

$$e = u + \frac{V^2}{2} + gz \quad (۶۷-۲)$$

$$h = u + PV \quad (۶۸-۲)$$

با استفاده از این روابط، موازنهٔ انرژی به فرم زیر تبدیل می شود

$$\frac{dX_{cv}}{dt} = \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \dot{Q}_{cv} - \left[\dot{W}_{cv} - P_0 \left(\frac{dV_{cv}}{dt} \right) \right] \quad (۶۹-۲)$$

$$-T_0 S_{gen} + \dot{m}_i [h_i - h_0 + \frac{V_i^2}{2} + gZ_i - T_0(S_i - S_0)]$$

$$-\dot{m}_e[h_e - h_0 + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e - T_0(S_e - S_0)]$$

این معادله بهترین و مفیدترین شکل موازنه انرژی برای یک حجم کنترل یا یک سیستم باز است. سمت راست این معادله راه های مختلفی که از طریق آنها انرژی می تواند تغییر کند را نشان می دهد.

$$\left[\begin{array}{c} \text{Rate of exergy transfer} \\ \text{accompanying heat transfer} \end{array} \right] = \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \dot{Q}_{cv} \quad (70-2)$$

$$\left[\begin{array}{c} \text{Rate exergy transfer} \\ \text{accompanying work through the control volume} \end{array} \right] = \dot{W}_{cv} - P_0 \left(\frac{dV_{cv}}{dt} \right) \quad (71-2)$$

$$\left[\begin{array}{c} \text{Rate of exergy transfer accompanying} \\ \text{mass flow through the control volume} \end{array} \right] = \quad (72-2)$$

$$\dot{m}_i[h_i - h_0 + \frac{V_i^2}{2} + gZ_i - T_0(S_i - S_0)]$$

$$-\dot{m}_e[h_e - h_0 + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e - T_0(S_e - S_0)]$$

عبارات داخل کروشه، را انرژی جریانی مخصوص می نامند و با نشانگر X_{Fi} نشان داده می شود.

$$\left[\begin{array}{c} \text{Rate of exergy transfer accompanying} \\ \text{mass flow through the control volume} \end{array} \right] = \dot{m}_i X_{Fi} - \dot{m}_e X_{Fe} \quad (73-2)$$

$$[\text{Rate of exergy destruction}] = T_0 \dot{S}_{gen} \quad (74-2)$$

با جمع بندی مطالب برای یک فرایند جریان پایدار داریم:

$$Q - W = \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e \right) - \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gZ_e \right) \quad (75-2)$$

$$\dot{S}_{gen} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i + \frac{\dot{Q}_e}{T_e} \quad (76-2)$$

$$\dot{Q}_e = \sum -\dot{Q}, T_e = T_0 \quad (77-2)$$

با حذف عبارت انتقال حرارت بین دو معادله داریم:

$$W = \sum m_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i - T_0 S_i \right) - \sum m_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e - T_0 S_e \right) - T_0 S_{gen} \quad (78-2)$$

کار برگشت پذیر با مساوی صفر قرار دادن آنتروپی تولید شده بدست می آید:

$$W_{rev} = \sum m_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i - T_0 S_i - T_0 S_i \right) - \sum m_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e - T_0 S_e \right) \quad (79-2)$$

اگر بجای حالت ۲ حالت مرده را داشته باشیم در آن صورت اگزورژی سیستم بدست می آید:

$$x_f = (h - h_0) - T_0(S - S_0) + \frac{V^2}{2} + gz \quad (80-2)$$

برای یک فرایند بین حالت های ۱ و ۲ داریم.

$$\dot{W}_{rev} = \dot{X} = \sum \dot{m}_i x_{fi} - \sum \dot{m}_e x_{fe} \quad (81-2)$$

$$\dot{I} = \dot{X} - \dot{W}_u = T_0 \dot{S}_{gen} \quad (82-2)$$

۷-۲ تکنولوژی پینچ

در اواخر دهه ۷۰، یومدا^۱ و همکارانش روش نوینی برای به سازی فرآیندها پایه گذاری کردند. این گروه در فاصله زمانی ۱۹۷۸ تا ۱۹۸۲ با ارائه مفاهیم تجزیه و تحلیل فرآیندها و نمودار ترکیبی نشان دادند که چگونه می توان میزان یوتیلیتی مورد نیاز فرآیندها را ارزیابی کرده، سپس به بازیافت حرارتی و در نتیجه کاهش هزینه ها پرداخت. در همان ایام، لینهوف^۲ و همکارانش، سنتز شبکه مبدل های حرارتی را با هدف مصرف انرژی مورد توجه قرار داده و برخلاف گروه یومدا بر نقطه پینچ به عنوان

¹ yomeda

² Linhoff

نقطه کلیدی بازیافت حرارتی تاکید داشتند و در نتیجه نام "پینچ" را بر این تکنولوژی نهادند، که اصلی ترین تاثیر آن این بود که در عین سادگی استفاده برای مهندس، قدرت تحلیل مفهومی را ایجاد می نمود.

اساس تکنولوژی پینچ بر مبنای اصول ترمودینامیکی بوده و اهدافی غیر از انرژی را نیز در بر می گیرد که از آن جمله می توان به هزینه سرمایه گذاری، قابلیت عملکرد، عملی بودن و انتشار آلودگی در محیط اشاره نمود.

استراتژی این تکنولوژی بدین صورت است که هدفها و تخمینها قبل از طراحی قابل تعیین شدن هستند. با کمک مفاهیم این تکنولوژی یک مهندس می تواند کلیه امور را در کنترل خود داشته باشد و با استفاده از هدف گذاری اولیه، قابلیت عملکرد سیستمها، نقشه واحدهای صنعتی، مسائل ایمنی و دیگر موارد، طراحی را به سویی ببرد که نه تنها از نظر راندمان حرارتی بالا باشد، بلکه از لحاظ صنعتی نیز قابل قبول باشد.

به عبارت دیگر آنالیز پینچ به عنوان یک روش عمومی جهت طراحی مفهومی سیستمهای فرآیندی به کار برده می شود و تنها به شبکه مبدلهای حرارتی محدود نمی گردد.

آنالیز پینچ علاوه بر آنکه روش مناسبی جهت طراحی شبکه های جدید است به عبارت بهتر ابزار مناسبی جهت طراحی اولیه است، بلکه ابزار مناسبی نیز جهت اصلاح و بهینه سازی شبکه ها و طرح های موجود نیز می باشد به عبارت دیگر از ابزارهای مناسب طراحی اصلاحی نیز به شمار می آید.

امروزه از این تکنولوژی در بهینه سازی برج های تقطیر، کوره ها، سیستم های زیر درجه حرارت محیط، تبخیرکننده ها، راکتورها، توربین ها و نیز به وفور استفاده می شود.

آنالیز پینچ جهت سودمندی هرچه بیشتر در زمینه طراحی و بهینه سازی فرآیندها از ابزارهای

مناسبی بهره می‌برد که از مهمترین آنها می‌توان به دیاگرام شبکه، منحنی‌های ترکیبی، منحنی‌های ترکیبی جامع، نمودار نیروی محرکه، آنالیز مسائل باقی مانده و هدف‌گذاری‌های شبکه و سطح اشاره نمود.

۱-۷-۲ مفاهیم اولیه پینچ

اولین مرحله از کار که در آنالیز شبکه مبدل‌های حرارتی بایستی بدان توجه نمود، شناسایی جریان‌های گرم و سرد موجود در واحد می‌باشد.

جهت آنالیز هرچه بهتر شبکه، لازم است اطلاعات مربوط به دمای جریان‌های گرم و سرد، میزان تغییرات در آنتالپی هردو جریان، گرماهای ویژه هر جریان و ضرایب حرارتی مؤثر در طراحی شبکه مبدلی به طور کامل اندازه‌گیری و مشخص گردد. سپس با توجه به مشخصات جریان‌ها و توجه به محدودیت‌ها اگر چنانچه در مرحله طراحی هستیم بایستی کمترین اختلاف دمای مناسب جهت تبادل حرارت بین جریان‌ها در شبکه مبدلی را برای شروع تخمین بزنیم، و اگر چنانچه در مرحله بهینه‌سازی شبکه موجود هستیم با توجه به اطلاعات موجود بایستی این اختلاف دما را بدست آوریم. ΔT_{min} فاکتوری بسیار با اهمیت در طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی می‌باشد، برای تعیین دقیق آن بایستی یک بررسی اثر متقابل بین هزینه‌های اصلی و انرژی صورت پذیرد.

ΔT_{min} بسیار کوچک به معنای یک سطح انتقال حرارت یا هزینه اصلی بینهایت می‌باشد و این در حالی است که یوتیلیتی در حداقل خود قرار خواهد داشت.

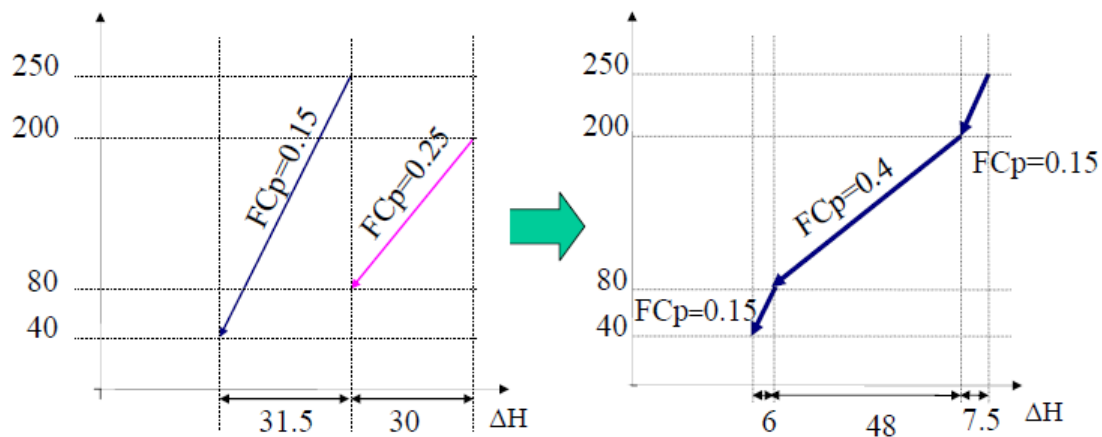
۲-۷-۲ منحنی‌های ترکیبی^۱

پس از بدست آوردن اطلاعات مربوط به جریان‌های گرم و سرد موجود در شبکه نمودار منحنی

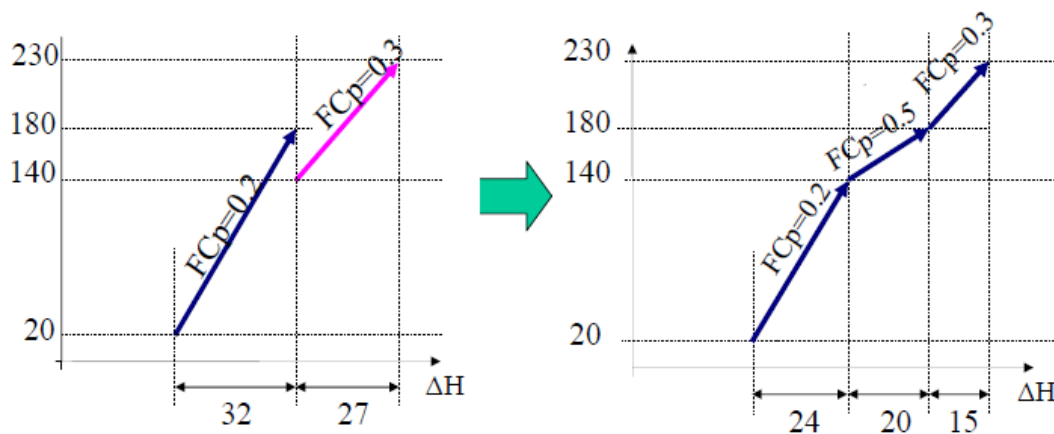
¹ Composite curves

ترکیبی را با ترسیم تغییرات دمایی بر حسب تغییرات آنتالپی و ترکیب آن‌ها با هم بدست می‌آوریم.

نحوه ترسیم منحنی‌های ترکیبی جریان‌های گرم و سرد در شکل (۲-۲) و شکل (۳-۲) نشان داده شده است.



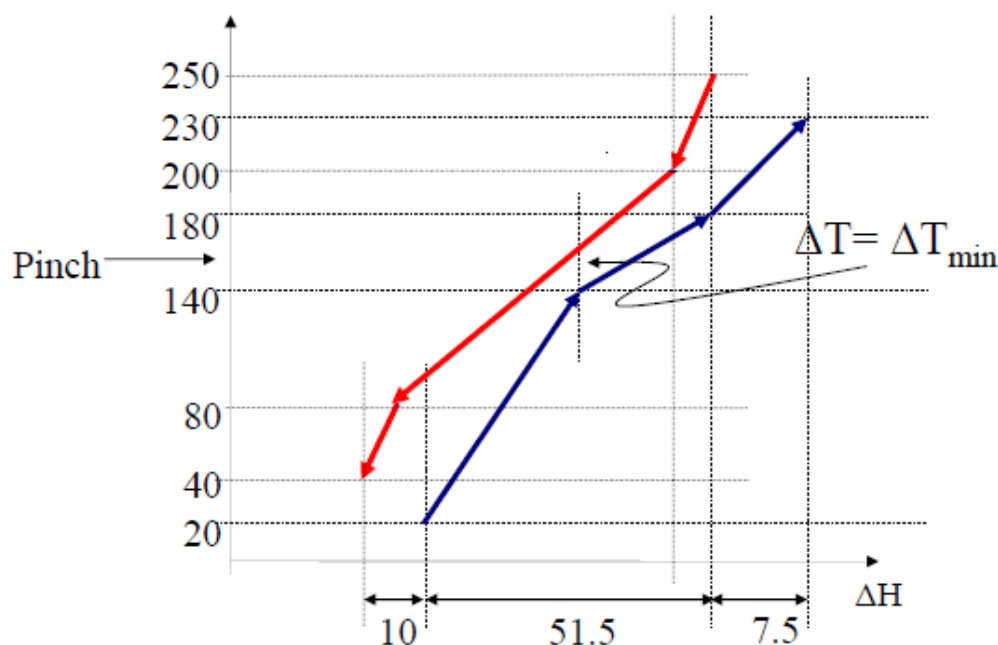
شکل (۲-۲): نحوه ترسیم نمودارهای ترکیبی جریان‌های گرم [35]



شکل (۳-۲): نحوه ترسیم نمودارهای ترکیبی جریان‌های سرد [35]

و در نهایت بعد از ترکیب منحنی‌ها، منحنی نهایی که در آن هم جریان‌های گرم و هم جریان‌ات سرد موجود در شبکه قابل تشخیص هستند با عنوان منحنی ترکیبی شبکه بدست می‌آید که در شکل

(۴-۲) نشان داده شده است.



شکل (۴-۲): شماتیک یک نمونه منحنی ترکیبی جریان‌های گرم و سرد [35]

منحنی‌های ترکیبی این مزیت را دارند که در آنها علاوه بر آنکه $\Delta T_{\min}$ قابل تشخیص می‌باشد، دمای پینچ نیز بدست می‌آید.

مهمترین استفاده‌ای که از این منحنی می‌توان نمود آنست که به کمک آن قادر خواهیم بود تا به طور دقیق میزان یوتیلیته‌های گرم و سرد که مورد نیاز است و بایستی از خارج شبکه تامین شود و همچنین میزان انتقال حرارت بین فرآیندی را بدست آورد.

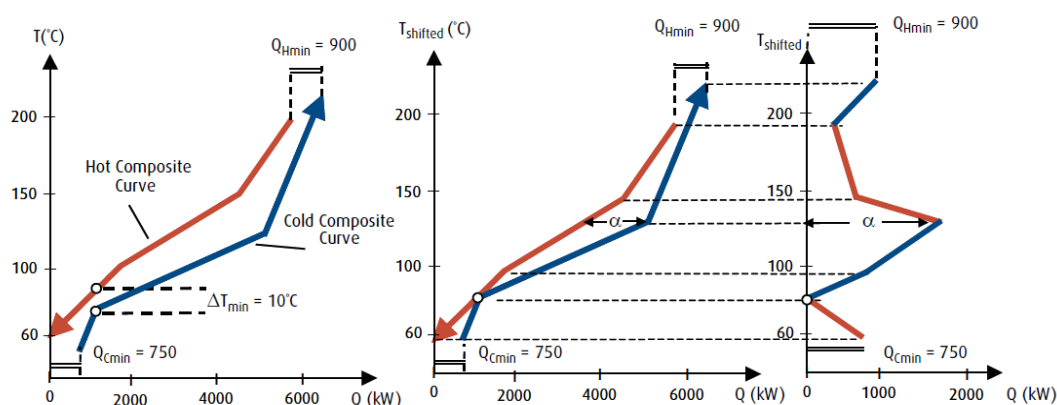
با افزودن اینتروال‌های آنتالپی در مراحل بعدی به این منحنی می‌توان حداقل مساحت شبکه تبدیلی را نیز پیش‌بینی نمود. بعد از یافتن اقتصادی‌ترین $\Delta T_{\min}$ و تعیین نقطه پینچ، به حداکثر بازیافت حرارتی دست یافته و از میزان بار یوتیلیته‌های گرم و سرد مورد نیاز خود مطلع می‌شویم.

اگرچه منحنی‌های ترکیبی برای هدف‌گذاری انرژی استفاده می‌شوند، اما ابزار مناسبی برای انتخاب نوع یوتیلیتی و کیفیت آن نیستند. بدین منظور از منحنی‌های ترکیبی جامع استفاده می‌نماییم.

۳-۷-۲ منحنی‌های ترکیبی جامع^۱

منحنی‌های ترکیبی جامع بهترین و اختصاصی‌ترین ابزار برای توزیع مناسب یوتیلیتی‌ها و میزان انتقال حرارت بین فرآیندی بوده و ابزار بسیار مناسبی نیز جهت بهینه‌سازی راکتورها و سیستم‌های جداسازی نیز می‌باشند.

جهت ترسیم این نمودارها از دمای اینتروال در برابر آنتالپی اینتروال استفاده می‌شود که نحوه ترسیم آن باتوجه به نمودارهای ترکیبی در شکل (۵-۲) نشان داده شده است.



شکل (۵-۲): نحوه ترسیم نمودار ترکیبی جامع [35]

¹ Grand Composite Curves

فصل سوم: بررسی و تحلیل اگزورژی کارخانه

سیمان

۳-۱ مقدمه

در فصول قبل به بررسی روش‌های تولید سیمان و نیز بیان تئوری اگزرژی پرداختیم. در این فصل ضمن بیان و شرح خط تولید سیمان، به بررسی و تحلیل اگزرژی سیستم می‌پردازیم. بر این اساس در ابتدا تجهیزات فرایند تولید سیمان مورد بررسی قرار گرفته و پس از مشخص نمودن حجم‌های کنترل، روابط حاکم بر حجم کنترل نوشته شده و به تحلیل اگزرژی پرداخته می‌شود. همچنین در هر قسمت به مطالعه‌ای موردی خواهیم پرداخت.

در ادامه تغییرات خواص در تجهیزات مختلف و تاثیر آن‌ها بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری و بازده‌ها بررسی خواهد شد. این امر به ما در یافتن عوامل حساس هر یک از تجهیزات کمک می‌نماید. با استفاده از نتایج این تحلیل‌ها می‌توان به نتایج مفیدی درباره اعمال راهکارهای مختلف بهبود در تجهیزات مختلف دست یافت.

راهکارهای بهبود مصرف انرژی و سوخت، بطور کلی در تمامی کارخانجات صنعتی و به ویژه در هر صنعت خاص شناخته شده می‌باشد. بعنوان مثال دودکش در سیستم‌های صنعتی محلی بالقوه جهت استفاده از حرارت خروجی آن برای مصارف گرمایش، تهیه آب گرم و یا سیستم همزمان برق و حرارت می‌باشد. این تحلیل‌ها با توجه به تاثیر این راهکارها بر بازده‌های اول و دوم و نیز بازگشت‌ناپذیری‌ها بررسی شده است.

در فصل دوم، تجهیزات مختلف در خط تولید شرح داده شدند. مهمترین قسمت در خط تولید، قسمت پخت یعنی واحدهای پیش گرمکن، کوره و کولر می‌باشد.

با توجه به مطالب ذکر شده تحلیل اگزرژی در تجهیزات زیر انجام خواهد گرفت.

۱: کولر	۴: سیلکون شماره ۲
۲: کوره و متعلقات	۵: سیلکون شماره ۳
۳: سیلکون شماره ۱	۶: سیلکون شماره ۴

به دلیل اینکه تمامی اعداد مندرج در هندبوک‌های سیمان بر حسب کیلوگرم کلینکر می‌باشد، در اینجا نیز اعداد بر همین واحد آورده می‌شوند و تمامی محاسبات بر حسب کیلوگرم کلینکر صورت می‌پذیرد [۲۶].

۳-۲ کولر

راندمان حرارتی یک کولر با نسبت گرمایی که از کلینکر بازیافت می‌شود و برای فرایند پخت مورد استفاده قرار می‌گیرد، به کل محتوی گرمای کلینکری که کوره را ترک می‌کند، تعریف می‌شود. در این صورت راندمان حرارتی Z برابر است با:

$$Z = [(A-B)/A] * 100 \quad (۱-۳)$$

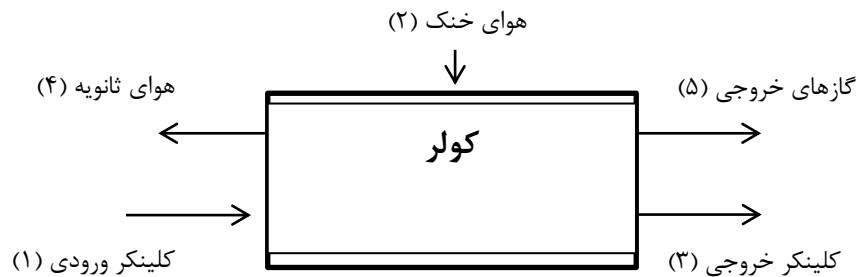
در فرمول (۱-۳) A بیانگر محتوای انرژی حرارتی کلینکر که از کوره وارد می‌شود و B مجموع افت حرارتی کولر کلینکر، افت حرارتی همراه کلینکر خروجی و افت حرارتی با انتقال حرارت می‌باشد.

راندمان حرارتی کولر، در انواع مختلف در محدوده ۶۰ تا بالاتر از ۸۰٪ قرار دارد.

مقیاس دیگر برای راندمان کوره، اختلاف دمای بین کلینکر داغ وارد شونده به کولر و هوای ثانویه داغ خارج شونده از کولر است. در این صورت آن کولری دارای راندمان حرارتی بالاتری است که بر اساس عملکردش، گرمای زیادتری با هوای ثانویه به کوره وارد نماید.

۱-۲-۳ تحلیل انرژی و انرژی کولر

بطور کلی جریان‌های ورودی و خروجی کولر را می‌توان بصورت زیر نشان داد:



شکل (۱-۳): جریان‌های ورودی و خروجی سیستم کولر

فرضیات:

- فرآیند جریان پایدار
- از انرژی‌های پتانسیل و جنبشی صرف نظر می‌گردد.
- محیط در شرایط دمای ۲۵ درجه سلسیوس و فشار ۱ اتمسفر فرض می‌گردد.

۱-۱-۲-۳ قانون بقای جرم

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (۲-۳)$$

چون کلینکر جامد می‌باشد بنابراین موازنه جرمی بصورت زیر در می‌آید :

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 + \dot{m}_4 + \dot{m}_5 \rightarrow \begin{cases} \dot{m}_1 = \dot{m}_3 \\ \dot{m}_2 = \dot{m}_4 + \dot{m}_5 \end{cases} \quad (۳-۳)$$

۲-۱-۲-۳ قانون اول ترمودینامیک

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_i(h_e) - \sum \dot{m}_i(h_i) \quad (۴-۳)$$

چون کاری صورت نمی‌گیرد بنابراین :

$$\dot{Q} - 0 = (\dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_5 h_5) - (\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2) \quad (5-3)$$

در هندبوک‌های صنعت سیمان، مقادیر خواص بر حسب کیلوگرم کلینکر داده می‌شود. بنابراین پس از یکی کردن تمامی خواص بر حسب کیلوگرم کلینکر (kg-Cl) داریم:

$$Q = (h_3 + h_4 + h_5) - (h_1 + h_2) \quad (6-3)$$

مقدار Q منفی می‌گردد چرا که سیستم به محیط گرما می‌دهد.

۳-۲-۱-۳ قانون دوم ترمودینامیک و تحلیل انرژی

برای هر جریان می‌توان نوشت :

$$x = (h - h_0) - T_0(S - S_0) \quad (7-3)$$

$$X = \dot{W}_{rev} = \sum \dot{m}_i x_i - \sum \dot{m}_e x_e \rightarrow x = W_{rev} = \sum x_i - \sum x_e \quad (8-3)$$

$$\dot{I} = \dot{W}_{rev} - \dot{W}_u = T_0 \dot{S}_{gen} \quad (9-3)$$

چون در سیستم کولر هیچ کاری انجام نمی‌شود بنابراین مقادیر کار برگشت پذیر و بازگشت ناپذیری با هم برابرند .

$$I = x = W_{rev} = \sum x_i - \sum x_e \quad (10-3)$$

۳-۲-۱-۴ بازده قانون اول

بازده قانون اول یک کولر با نسبت تغییرات حرارتی کلینکر به کل انرژی که وارد سیستم می‌گردد، تعریف می‌گردد.

بنابراین:

$$\eta = \frac{h_{Cl,in} - h_{Cl,out}}{q_{in}} * 100 \quad (11-3)$$

که در آن $h_{Cl,in}$ ، آنتالپی کلینکر ورودی به کولر، $h_{Cl,out}$ ، آنتالپی کلینکر خروجی از کولر و q_{in} ،

کل انرژی ورودی به سیستم می‌باشد.

۳-۲-۱-۵ بازده قانون دوم

برای سیستم کولر بازده قانون دوم بصورت زیر تعریف می‌گردد.

$$\psi = \left(1 - \frac{X_{out}}{X_{in}}\right) * 100 \quad (۱۲-۳)$$

که در آن X_{in} برابر است با انرژی ورودی به سیستم و X_{out} بیانگر میزان انرژی خروجی از سیستم می‌باشد.

با توجه به روابط بالا به تحلیل موردی می‌پردازیم.

۳-۲-۲ مطالعه موردی سیستم کولر

مشخصات زیر را برای سیستم کولر داریم:

جدول (۱-۳): جدول مشخصات کولر

کولر			
کلینکر ورودی	K	دما	۱۶۲۳/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۱/۱۲
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۳۰۳۰/۰۰
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۱۵۴۶/۰۰
هوای ورودی به کولر	K	دما	۲۹۸/۰۰
	Kpa	فشار	۱۰۵/۷۴
	m ³ /Kg-Cl	دبی	۱/۲۷
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۹۱/۳۱
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۹۱/۳۱
کلینکر خروجی	K	دما	۳۷۳/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۱/۱۰
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۱۶۲۸/۵۰
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۱۵۴۶/۰۰
هوای ورودی به دودکش	K	دما	۵۴۳
	Kpa	فشار	۱۰۳/۲۹

	$m^3/Kg-Cl$	دبی	۱/۷۴
	$KJ/Kg-Cl.K$	گرمای ویژه	۲/۶۰
	$KJ/Kg-Cl$	آنتالپی	۵۹۴/۵۰
	$KJ/Kg-Cl$	آنتالپی اولیه	۶۱/۵۰
هوای ورودی به کوره	K	دما	۹۷۳/۰۰
	Kpa	فشار	۱۰۸/۱۹
	$m^3/Kg-Cl$	دبی	۰/۸۴
	$KJ/Kg-Cl.K$	گرمای ویژه	۱/۲۳
	$KJ/Kg-Cl$	آنتالپی	۸۶۰/۲۵
	$KJ/Kg-Cl$	آنتالپی اولیه	۳۰/۰۰
محیط	K	دمای محیط	۲۹۸/۰۰
	Kpa	فشار محیط	۱۰۱/۳۳

با توجه به موارد عنوان شده جداول زیر بدست می آیند:

جدول (۲-۳): جدول نتایج قانون اول

قانون اول = بقای انرژی	Hi-He-Loss=0	$\Sigma He (KJ/Kg-Cl)$	$\Sigma Hi (KJ/Kg-Cl)$
		۳۰۸۳/۲۵	۳۱۲۱/۳۱
اتلافات	Loss (KJ/Kg-Cl)	۳۸/۰۶	

جدول (۳-۳): جدول نتایج تحلیل انرژی

تحلیل انرژی		$H(T)$ (KJ/Kg-Cl)	$H(T_0)$ (KJ/Kg-Cl)	$S-S_0$ (KJ/Kg-Cl.K)	X (KJ/Kg-Cl)
	کلینکر ورودی	۳۰۳۰/۰۰	۱۵۴۶/۰۰	۱/۹۰	۹۱۸/۳۰
	هوای ورودی	۹۱/۳۱	۹۱/۳۱	-۰/۰۲	۵/۷۲
	جمع ورودی	۳۱۲۱/۳۱	۱۶۳۷/۳۱	۱/۸۸	۹۲۴/۰۲
	کلینکر خروجی	۱۶۲۸/۵۰	۱۵۴۶/۰۰	۰/۲۵	۸/۹۱
	هوای ثانویه	۸۶۰/۲۵	۳۰/۰۰	۱/۴۵	۳۹۸/۳۶
	گازهای خروجی	۴۵۳/۵۰	۶۱/۵۰	۱/۳۵	۱۲۹/۴۳
	جمع خروجی	۳۰۸۳/۲۵	۱۶۳۷/۵۰	۳/۰۵	۵۳۶/۷۰
کار برگشت پذیر=Xi-Xe=بازگشت ناپذیری					۳۸۷/۳۲

جدول (۳-۴): جدول نتایج بازده اول و دوم کولر

تحلیل بازدهی	بازده قانون اول	٪
	۴۴/۹۰	
	بازده قانون دوم	
	۴۱/۹۲	

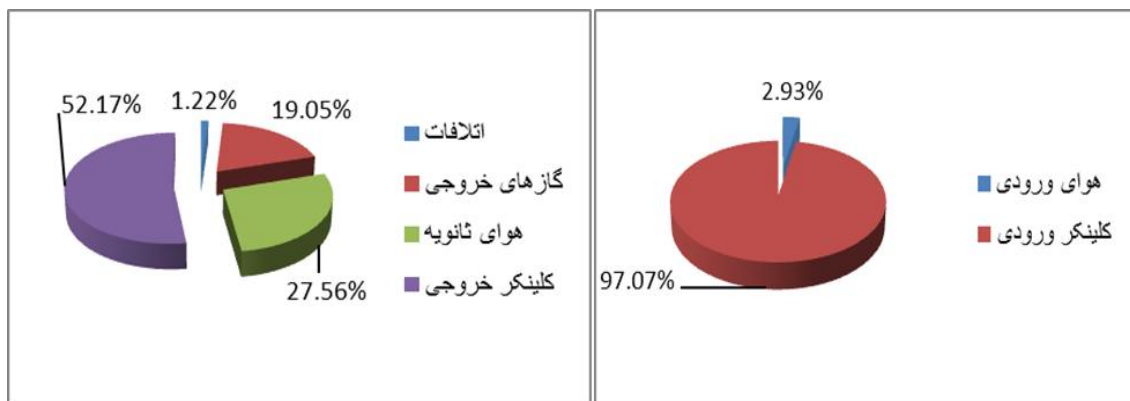
۳-۲-۳ تحلیل سیستم کولر

با تحلیل جداول، نتایج زیر بدست می آیند:

۳-۲-۳-۱ تحلیل انرژی

جدول (۳-۵): تحلیل انرژی سیستم کولر

تحلیل انرژی			H(T) (KJ/Kg-Cl)	آنتالپی کل (KJ/Kg-Cl)	درصد نسبت آنتالپی به آنتالپی کل
	آنتالپی ورودی	کلینکر ورودی	۳۰۳۰/۰۰	۳۱۲۱/۳۱	۹۷/۰۷
		هوای ورودی	۹۱/۳۱		۲/۹۳
	آنتالپی خروجی	کلینکر خروجی	۱۶۲۸/۵۰		۵۲/۱۷
		هوای ثانویه	۳۸/۰۶		۲۷/۵۶
		گازهای خروجی	۴۵۳/۵		۱۹/۰۵
		اتلافات	۳۸/۰۶		۱/۲۲



نمودار (۱-۳): درصد نسبت آنتالپی خروجی به آنتالپی کل در سیستم کولر

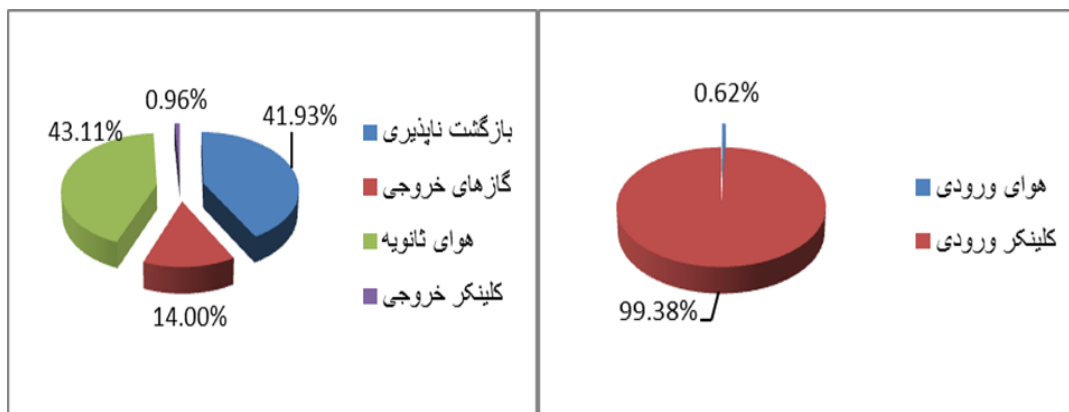
نمودار (۲-۳): درصد نسبت آنتالپی ورودی به آنتالپی کل در سیستم کولر

بیش از ۵۲٪ آنتالپی کل را در بر دارد. هوایی که از دودکش به هدر می‌رود، معادل ۱۹٪ آنتالپی را به هدر می‌دهد که کاهش هر چه بیشتر آن برای افزایش راندمان کولر مناسب است. بیش از ۲۷٪ از آنتالپی ورودی نیز وارد کوره می‌شود. افزایش این مقدار بواسطه کاهش در آنتالپی گازهای دودکش می‌تواند به افزایش راندمان کوره انجامد.

۲-۳-۲-۳ تحلیل اگزرژی

جدول (۶-۳): تحلیل اگزرژی سیستم کولر

تحلیل اگزرژی			X (KJ/Kg-Cl)	اگزرژی کل (KJ/Kg-Cl)	درصد نسبت اگزرژی به اگزرژی کل
	اگزرژی ورودی	کلینکر ورودی	۹۱۸/۳۰	۹۲۴/۰۲	۹۹/۳۸
		هوای ورودی	۵/۷۲		۰/۶۲
	اگزرژی خروجی	کلینکر خروجی	۸/۹۱		۰/۹۶
		هوای ثانویه	۳۹۸/۳۶		۴۳/۱۱
		گازهای خروجی	۱۲۹/۴۳		۱۴
		بازگشت ناپذیری	۳۸۷/۳۲		۴۱/۹۳



نمودار (۳-۴): درصد انرژی ورودی به انرژی کل در سیستم کولر
 نمودار (۳-۳): درصد انرژی خروجی به انرژی کل در سیستم کولر

کلینکر ورودی که بیش از ۹۷٪ آنتالپی ورودی را تشکیل می دهد، بیش از ۹۹٪ انرژی ورودی را نیز تشکیل می دهد. همچنین ۱۴٪ انرژی توسط گازهای دودکش به هدر می روند. ۴۳٪ نیز به همراه گازهای ثانویه وارد کوره می شوند.

۳-۲-۴ تحلیل حساسیت در سیستم کولر

در این قسمت تغییرات در دمای هوای محیط، تغییرات در دمای گازهای خروجی و تغییر در دمای کلینکر خروجی بر روی عملکرد کولر مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۳-۲-۴-۱ تغییر در دمای محیط

کارخانجات سیمان کشور در مناطق آب و هوایی مختلفی ایجاد شده اند. تاثیر هوای محیط بر تغییرات بازگشت ناپذیری، بازده قانون اول و دوم در جداول و زیر نمایش داده شده است.

جدول (۳-۷): تاثیر تغییرات دمای محیط بر بازگشت ناپذیری ها، بازده های اول و دوم

بازده قانون دوم (%)	بازده قانون اول (%)	بازگشت ناپذیری (KJ/Kg-Cl)	دما (K)
۳۹/۷۷	۴۴/۷۵	۳۷۵/۱۵	۲۸۸/۰۰
۴۰/۸۵	۴۴/۸۲	۳۸۱/۴۰	۲۹۳/۰۰
۴۱/۹۲	۴۴/۹۰	۳۸۷/۳۲	۲۹۸/۰۰
۴۲/۹۶	۴۴/۹۸	۳۹۲/۹۲	۳۰۳/۰۰

۳۰۸/۰۰	۳۹۸/۲۱	۴۵/۰۶	۴۳/۹۹
--------	--------	-------	-------

۳-۴-۲-۲ تغییر در دمای هوای خروجی از دودکش

هوا با دمای بالایی از دودکش در کارخانجات سیمان خارج می‌شود. این هوا پتانسیل بالقوه زیادی (بعلت دمای بالای محصولات خروجی) جهت بهبود مصرف انرژی دارد. راهکارهایی همچون استفاده از این حرارت برای گرمایش، تهیه آبگرم مصرفی فرایند و کارخانه، سیستم همزمان برق و حرارت (CHP) و تولید بخار مطرح شده است.

در این قسمت با بررسی تغییرات دمای هوای خروجی بر سیستم کولر، بازگشت‌ناپذیری‌ها، بازده اول و دوم سیستم محاسبه می‌شود. نتایج تغییرات در جدول زیر خلاصه شده‌اند.

جدول (۳-۸): تاثیر تغییرات دمای هوای خروجی از دودکش بر بازگشت‌ناپذیری‌ها، بازده‌های اول و دوم

بازده قانون دوم (%)	بازده قانون اول (%)	بازگشت‌ناپذیری (KJ/Kg-Cl)	دما (K)
۴۲/۸۲	۴۴/۹۰	۳۹۵/۶۶	۴۹۵/۰۰
۴۲/۲۶	۴۴/۹۰	۳۹۰/۴۷	۵۰۰/۰۰
۴۱/۶۹	۴۴/۹۰	۳۸۵/۲۰	۵۰۵/۰۰
۴۱/۱۱	۴۴/۹۰	۳۷۹/۸۵	۵۱۰/۰۰
۴۰/۵۲	۴۴/۹۰	۳۷۴/۴۳	۵۱۵/۰۰

۳-۴-۲-۳ تغییر در دمای کلینکر خروجی

تاثیر دمای کلینکر خروجی بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم در جدول و نمودارهای زیر نمایش داده شده است.

جدول (۳-۹): تاثیر تغییرات دمای کلینکر خروجی بر بازگشت‌ناپذیری‌ها، بازده‌های اول و دوم

بازده قانون دوم (%)	بازده قانون اول (%)	بازگشت‌ناپذیری (KJ/Kg-Cl)	دما (K)
۴۲/۳۴	۴۵/۶۱	۳۹۱/۲۵	۳۵۳

۳۶۳	۳۸۹/۴۱	۴۵/۲۵	۴۲/۱۴
۳۷۳	۳۸۷/۳۲	۴۴/۹۰	۴۱/۹۲
۳۸۳	۳۸۴/۹۹	۴۴/۵۵	۴۱/۶۶
۳۹۳	۳۸۲/۴۴	۴۴/۲۰	۴۱/۳۹

۳-۲-۴- تغییرات بازگشت ناپذیری

همانگونه که مشاهده می شود با افزایش دمای محیط میزان بازگشت ناپذیری ها نیز افزایش می یابد. این امر بعلت کاهش بیشتر اغزرژی جریان های خروجی نسبت به جریان های ورودی می باشد. این امر نشان می دهد در آب و هوای گرم تر، میزان بازگشت ناپذیری ها در سیستم کولر بیشتر است.

برای بدست آوردن نرخ تغییرات بازگشت ناپذیری با دمای محیط داریم:

$$\frac{\Delta I}{\Delta T} = \frac{398.21 - 375.15}{308 - 288} = 1.153$$

یعنی اینکه با افزایش یک درجه در دمای محیط میزان بازگشت ناپذیری در سیستم کولر به اندازه ۱۵۳/۱ افزایش می یابد. افزایش بازگشت ناپذیری هم به معنی هدر رفتن مقدار بیشتری انرژی مفید و بنابراین کاهش بازده قانون دوم.

با افزایش دمای هوای خروجی میزان بازگشت ناپذیری ها کاهش می یابد. این امر بعلت افزایش اغزرژی جریان خروجی بواسطه افزایش دمای گازهای خروجی می باشد.

در تحلیل اغزرژی کلی (دمای گازها ۵۰۳ کلوین) متوجه شدیم که در سیستم کولر ۱۴٪ از کل اغزرژی متعلق به هوای خروجی می باشد و در همین حال بازگشت ناپذیری ها ۴۱/۹۲٪ از اغزرژی کل را تشکیل می دادند. با افزایش دما به ۵۱۵ کلوین اغزرژی هوای خروجی به ۱۵/۴۰٪ و بازگشت ناپذیری ها به ۴۰/۵۲٪ اغزرژی کل رسیدند. این افزایش در اغزرژی گازهای خروجی منجر به کاهش بازگشت ناپذیری ها می گردد.

با افزایش دمای کلینکر خروجی میزان بازگشت‌ناپذیری‌ها کاهش می‌یابد. این امر بعلت افزایش
اگررژی جریان خروجی بواسطه افزایش دمای کلینکر خروجی می‌باشد.

۳-۲-۴ تغییرات بازده قانون اول

با بررسی جداول فوق مشاهده می‌شود با افزایش دمای محیط، بازده قانون اول افزایش می‌یابد.

برای بدست آوردن نرخ تغییرات بازده اول با دمای محیط داریم:

$$\frac{\Delta\eta}{\Delta T} = \frac{45.06 - 44.75}{308 - 288} = 0.015$$

یعنی اینکه با افزایش یک درجه در دمای محیط بازده اول در سیستم کولر به اندازه ۰/۰۱۵
افزایش می‌یابد.

طبق تعریفی که ما از بازده قانون اول ارائه داده‌ایم (که حاصل نسبت تغییر در آنتالپی کلینکر به
کل آنتالپی ورودی بود)، افزایش دمای هوای خروجی تاثیر بر بازده قانون اول ندارد.

حال با بررسی میزان تغییر آنتالپی هوای خروجی به کل آنتالپی ورودی می‌توان پارامتری را
تعریف نمود که بیانگر میزان تاثیر تغییرات آنتالپی بر آنتالپی کل خروجی با توجه به تغییر دمای
هوای خروجی باشد. نتایج در جدول زیر خلاصه شده‌اند:

جدول (۳-۱۰): تاثیر تغییرات دمای هوای خروجی از دودکش بر آنتالپی هوای خروجی و آنتالپی کل

بازده قانون دوم (%)	بازده قانون اول (%)	بازگشت‌ناپذیری (KJ/Kg-Cl)	دما (K)
۱۸/۷۳	۳۰۶۲/۴۵	۳۷۳/۷	۴۹۵
۱۹/۰۸	۳۰۷۵/۴۵	۵۸۶/۷	۵۰۰
۱۹/۴۲	۳۰۸۸/۴۵	۵۹۹/۷	۵۰۵
۱۹/۷۶	۳۱۰۱/۴۵	۶۱۲/۷	۵۱۰
۲۰/۰۹	۳۱۱۴/۴۵	۶۲۵/۷	۵۱۵

با توجه به جدول مشاهده می‌کنیم که با افزایش دمای هوای خروجی نسبت آنتالپی آن به آنتالپی خروجی کل افزایش می‌یابد. با افزایش دمای هوای خروجی میزان انرژی که این هوا از سیستم خارج می‌کند بیشتر شده و کارایی حرارتی سیستم پایین می‌آید. بعلاوه با افزایش دمای کلینکر خروجی میزان بازده قانون اول کاهش می‌یابد.

۳-۲-۴-۶ تغییرات بازده قانون دوم

تاثیر تغییر در دمای محیط، دمای هوای خروجی از دودکش و دمای کلینکر خروجی بر بازده قانون دوم در نمودار نمایش داده شده است.

با بررسی جداول مشاهده می‌شود با افزایش دمای محیط، بازده قانون دوم افزایش می‌یابد. علت این امر کاهش بیشتر انرژی خروجی نسبت به انرژی ورودی می‌باشد. برای بدست آوردن نرخ تغییرات بازده دوم با دمای محیط داریم:

$$\frac{\Delta \psi}{\Delta T} = \frac{43.99 - 39.77}{308 - 288} = 0.211$$

یعنی اینکه با افزایش یک درجه در دمای محیط بازده دوم در سیستم کولر به اندازه ۰.۲۱۱ افزایش می‌یابد.

با افزایش دمای هوای خروجی، بازده قانون دوم کاهش می‌یابد. علت کاهش افزایش انرژی خروجی سیستم می‌باشد.

با افزایش دمای کلینکر خروجی، بازده قانون دوم کاهش می‌یابد. علت کاهش افزایش انرژی خروجی سیستم می‌باشد.

۳-۲-۴-۷ جمع بندی سیستم کولر

با انجام محاسبات و بر طبق جداول پیشین جدول زیر بدست می‌آید:

جدول (۱-۳): جمع بندی سیستم کولر

کولر			
تغییر در دمای محیط			
تغییر در بازگشت ناپذیری، بازده اول و دوم	$\frac{\Delta I}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \eta}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \psi}{\Delta T}$
	۱/۱۵۳	۰/۰۱۵	۰/۲۱۱
تغییر در دمای گازهای خروجی			
تغییر در بازگشت ناپذیری، بازده اول و دوم	$\frac{\Delta I}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \eta}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \psi}{\Delta T}$
	-۱/۰۶۲	۰/۰۰۰-۰/۰۶۸	-۰/۱۱۵
تغییر در دمای کلینکر خروجی			
تغییر در بازگشت ناپذیری، بازده اول و دوم	$\frac{\Delta I}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \eta}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \psi}{\Delta T}$
	-۰/۲۲۰	-۰/۰۳۵	-۰/۰۲۴

$$\left(\Delta \frac{h_{stack}}{h_{tot}} \right) = 0.068$$

همانگونه که از جدول مشخص است، تغییر در دمای محیط باعث ایجاد تغییرات بیشتری در بازده دوم می‌گردد و این پارامتر بعنوان حساس‌ترین پارامتر در مقابل این تغییرات عمل می‌نماید.

با توجه به نکاتی که در متن توضیح داده شد، تغییر در دمای گازهای خروجی از دودکش، با توجه به نوع تعریف بازده قانون اول، تاثیری در آن ندارد اما با در نظر گرفتن نسبت تغییرات آنتالپی گازهای خروجی به کل آنتالپی ورودی داریم:

$$\left(\Delta \frac{h_{stack}}{h_{tot}} \right) = 0.068$$

این تاثیر بشکل منفی بوده و در واقع میزان نسبت خروج گرمای مفید را از سیستم توسط گازهای خروجی نمایش می‌دهد. در کل، تغییر در دمای هوای خروجی دودکش تاثیر بیشتری بر بازده

قانون دوم

تغییر در دمای کلینکر خروجی نسبت به بازده اول حساس‌تر است و تغییرات آن باعث ایجاد تغییرات بیشتری در بازده اول می‌گردد.

موثرترین خاصیت از نظر بازده قانون اول دمای محیط در جهت مثبت و تغییر دمای گازهای خروجی در جهت منفی می‌باشد. افزایش دمای گازهای خروجی بیشترین تاثیر منفی را بر بازده اول و بازده دوم دارد. افزایش دمای محیط بیشترین تاثیر مثبت را بر بازده دوم دارد. افزایش دمای کلینکر خروجی اگر چه بر بازده اول و بازده دوم تاثیر منفی دارد، اما نسبت تاثیر آن به دیگر خواص کمتر است.

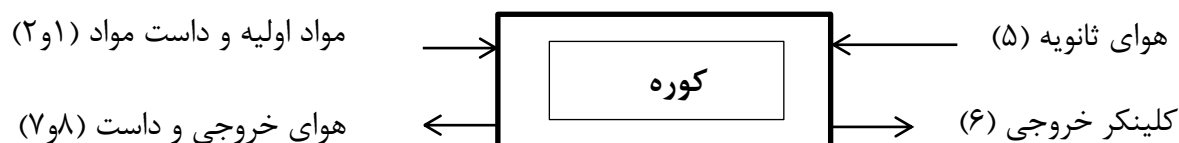
۳-۳ کوره

در این قسمت مجموعه کوره و مشعل و تجهیزات مربوطه را بصورت یک حجم کنترل در نظر گرفته و به تجزیه و تحلیل جریان انرژی و انرژی در آن می‌پردازیم. در ادامه روابط حاکم بر سیستم کوره نوشته شده و نمونه‌ای موردی مطالعه می‌گردد.

در فرایندهای احتراق کامل، برگشت‌ناپذیری شدت بالاست. در این فرایند هیچگونه کار واقعی انجام نمی‌گیرد و بنابراین کار برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیری با هم برابرند.

انرژی سوخت را تقریباً برابر ارزش حرارتی آن در نظر می‌گیرند.

۱-۳-۳ تحلیل انرژی سیستم کوره





شکل (۲-۳): جریان‌های ورودی و خروجی سیستم کوره

فرضیات

- فرایند جریان پایدار.
- از انرژی‌های پتانسیل و جنبشی صرف‌نظر می‌گردد.
- شرایط مرده برای سیستم دمای ۲۵ درجه و فشار ۱ اتمسفر فرض می‌گردد.

۳-۳-۱ قانون بقای جرم

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (۱۳-۳)$$

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_3 + \dot{m}_4 + \dot{m}_5 = \dot{m}_6 + \dot{m}_7 + \dot{m}_8 \quad (۱۴-۳)$$

۳-۳-۲ قانون اول ترمودینامیک

$$\dot{Q}_w = \sum \dot{m}_e(h_e) - \sum \dot{m}_i(h_i) \quad (۱۵-۳)$$

به دلیل اینکه در سیستم کوره کاری انجام نمی‌گیرد بنابراین:

$$\dot{Q} - 0 = (\dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_8 h_8) - (\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_5 h_5) \quad (۱۶-۳)$$

اگر تمامی موارد را بر حسب کیلوگرم کلینکر بنویسیم در آن صورت:

$$Q = (h_6 + h_7 + h_8) - (h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5) \quad (۱۷-۳)$$

مقدار Q منفی می‌گردد چرا که سیستم به محیط گرما می‌دهد.

۳-۱-۳-۳ قانون دوم و تحلیل اگزرژی

برای هر جریان می توان نوشت:

$$X = (h - h_0) - T_0(S - S_0) \quad (۱۸-۳)$$

$$X = \dot{W}_{rev} = \sum \dot{m}_i x_i - \sum \dot{m}_e x_e \rightarrow X = W_{rev} = \sum X_i - \sum X_e \quad (۱۹-۳)$$

چون در سیستم کوره هیچ کاری انجام نمی شود بنابراین:

$$\dot{I} = \dot{W}_{rev} - \dot{W}_u = T_0 \dot{S}_{gen} \rightarrow I = X = W_{rev} = \sum X_i - \sum X_e \quad (۲۰-۳)$$

۳-۱-۳-۴ بازده قانون اول

بازده قانون اول یک کوره، با نسبت تغییرات حرارتی مواد اولیه و کلینکر به کل انرژی که وارد کوره می گردد، تعریف می شود.

بنابراین :

$$\eta = \frac{h_{cli,in} - h_{cli,out}}{q_{in}} * 100 \quad (۲۱-۳)$$

که در آن $h_{cli,in}$ برابر آنتالپی مواد اولیه ورودی به کوره، $h_{cli,out}$ ، آنتالپی کلینکر خروجی از کوره و q_{in} کل انرژی ورودی به کوره

۳-۱-۳-۵ بازده قانون دوم

برای سیستم کوره بازده قانون دوم بصورت زیر تعریف می گردد:

$$\psi = \left(1 - \frac{x_{out}}{x_{in}}\right) * 100 \quad (۲۲-۳)$$

در فرمول (۲۳-۳)، x_{in} بیانگر میزان اگزرژی ورودی به کوره و x_{out} بیانگر میزان اگزرژی خروجی از کوره می باشد.

۲-۳-۳ مطالعه موردی سیستم کوره

مشخصات زیر را داریم:

جدول (۱۲-۳): مشخصات کوره

کوره			
مواد اولیه ورودی	K	دما	۱۰۶۳/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۱/۴۵
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۱۹۴۱/۲۵
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۸۳۲/۰۰
داست ورودی	K	دما	۱۰۶۳/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۰/۱۱
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۲۷۵/۱۵
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۱۹۱/۰۰
انرژی حرارتی [5]	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۳۵۰۱/۰۰
هوای ثانویه	K	دما	۹۷۳/۰۰
	Kpa	فشار	۱۰۸/۱۹
	m ³ /Kg-Cl	دبی	۰/۸۴
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۱/۲۳
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۸۶۰/۲۵
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۳۰/۰۰
کلینکر خروجی	K	دما	۱۶۲۳/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۱/۱۱
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۳۰۱۶/۷۵
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۱۵۴۶/۰۰
داست خروجی	K	دما	۱۶۸۳/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۰/۱۱
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۳۴۳/۳۵
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۱۹۱/۰۰
گاز خروجی	K	دما	۱۶۸۳/۰۰
	Kpa	فشار	۱۰۰/۸۳
	m ³ /Kg-Cl	دبی	۱/۱۶
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۱/۹۷
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۲۹۹۱/۴۵
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۲۶۳/۰۰

محیط	K	دمای محیط	۲۹۸/۰۰
	KPa	فشار محیط	۱۰۱/۳۳

بنابراین و با توجه به مباحث ارائه شده جداول زیر بدست می آیند:

جدول (۳-۱۳): قانون بقای انرژی در سیستم کوره

بقای انرژی	Hi-He-Loss=0	ΣHe	ΣHi
		۶۳۵۱/۵۵	۶۵۷۷/۶۵
اتلافات	Loss (KJ/Kg-Cl)	۲۲۶/۱۰	

جدول (۳-۱۴): تحلیل قانون دوم در سیستم کوره

تحلیل اگرزری		H(T)	H(T ₀)	S-S ₀	X
	واحد	KJ/Kg-Cl	KJ/Kg-Cl	KJ/Kg-Cl.K	KJ/Kg-Cl
	مواد اولیه	۱۹۴۱/۲۵	۸۳۲/۰۰	۱/۸۴	۵۵۹/۷۲
	داست ورودی	۲۷۵/۱۵	۱۹۱/۰۰	۰/۱۴	۴۲/۴۶
	انرژی حرارتی	۳۵۰۱/۰۰	-	-	۳۵۰۱/۰۰
	هوای ثانویه	۸۶۰/۲۵	۳۰/۰۰	۱/۴۵	۳۹۸/۳۶
	جمع ورودی	۶۵۷۷/۶۵	۲۲۱/۰۰	۱/۵۹	۴۵۰۱/۵۴
	کلینکر خروجی	۳۰۱۶/۷۵	۱۵۴۶/۰۰	۱/۸۸	۹۱۰/۱۰
	داست خروجی	۳۴۳/۳۵	۱۹۱/۰۰	۰/۱۹	۹۵/۶۰
	گاز خروجی	۲۹۹۱/۴۵	۲۶۳/۰۰	۳/۴۱	۱۷۱۲/۰۱
	جمع خروجی	۶۳۵۱/۵۵	۲۰۰۰/۰۰	۵/۴۸	۲۷۱۷/۷۱
	کار برگشت پذیر = بازگشت ناپذیری Xi-Xe				۱۷۸۳/۸۴

جدول (۳-۱۵): تحلیل بازده سیستم کوره

تحلیل بازدهی	بازده قانون اول	درصد
	۲۳/۲۰	
	بازده قانون دوم	

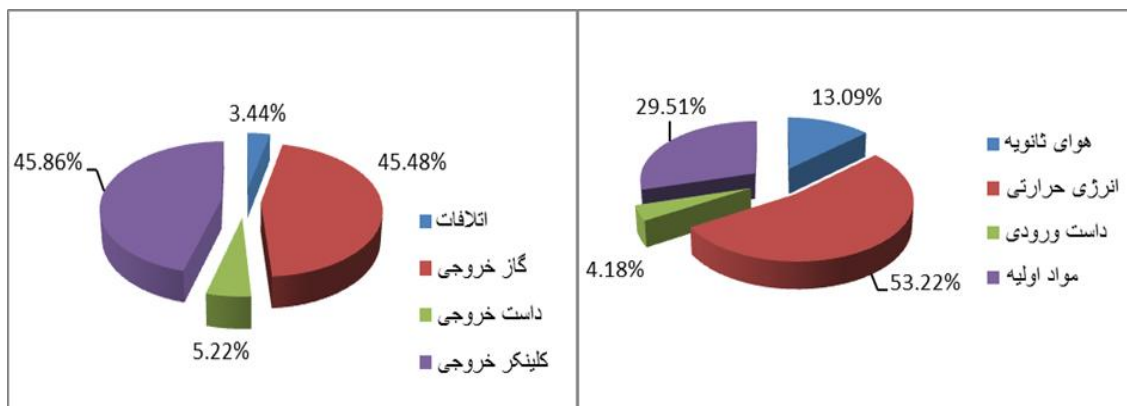
	۳۹/۶۳	
--	-------	--

۳-۳-۳ تحلیل نتایج کوره

۱-۳-۳-۳ تحلیل انرژی

جدول (۱۶-۳): تحلیل انرژی سیستم کوره

تحلیل انرژی			H(T)		آنتالپی کل	درصد نسبت آنتالپی به آنتالپی کل
		واحد	KJ/Kg-Cl		KJ/Kg-Cl	%
	آنتالپی ورودی	مواد اولیه	۱۹۴۱/۲۵		۶۵۷۷/۶۵	۲۹/۵۱
		داست ورودی	۲۷۵/۱۵			۴/۱۸
		انرژی حرارتی	۳۵۰۱/۰۰			۵۳/۲۲
		هوای ثانویه	۸۶۰/۲۵			۱۳/۰۹
	آنتالپی خروجی	کلینکر خروجی	۳۰۱۶/۷۵			۴۵/۸۶
		داست خروجی	۳۴۳/۳۵			۵/۲۲
		گاز خروجی	۲۹۹۱/۴۵			۴۵/۴۸
			اتلافات	۲۲۶/۱۰		۳/۴۴



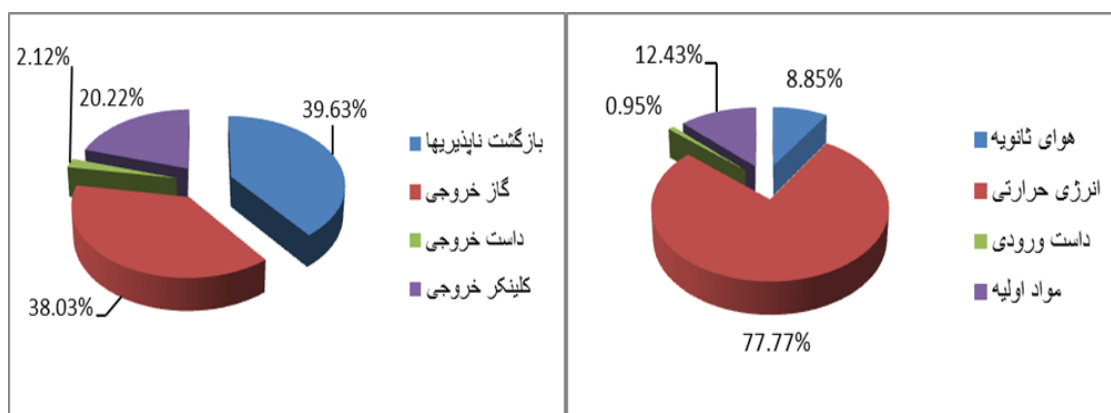
نمودار (۶-۳): درصد آنتالپی خروجی به آنتالپی کل در کوره

نمودار (۵-۳): درصد آنتالپی ورودی به آنتالپی کل در کوره

۲-۳-۳-۲ تحلیل انرژی

جدول (۱۷-۳): تحلیل انرژی سیستم کوره

			X	انرژی کل	درصد نسبت انرژی به انرژی کل
					%
تحلیل انرژی	انرژی ورودی	واحد	KJ/Kg-Cl	KJ/Kg-Cl	
		مواد اولیه	۵۵۹/۷۲	۴۵۰۱/۵۴	۱۲/۴۳
		داست ورودی	۴۲/۴۶		۰/۹۵
		انرژی حرارتی	۳۵۰۱/۰۰		۷۷/۷۷
		هوای ثانویه	۳۹۸/۳۶		۸/۸۵
	انرژی خروجی	کلینکر خروجی	۹۱۰/۱۰		۲۰/۲۲
		داست خروجی	۹۵/۶۰		۲/۱۲
		گاز خروجی	۱۷۱۲/۰۱		۳۸/۰۳
		بازگشت ناپذیریها	۱۷۸۳/۸۴		۳۹/۶۳



نمودار (۷-۳): درصد انرژی ورودی به انرژی کل در کوره

بیشترین درصد را در انرژیهای خروجی دارد. این امر بواسطه وجود فرایند احتراق در این قسمت است.

۴-۳-۳ تحلیل حساسیت در سیستم کوره

در این قسمت تغییرات در هوای محیط، تغییرات در دمای کلینکر خروجی و تغییر در دمای

هوای ثانویه ورودی مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۳-۴-۱ تغییر در دمای محیط

تاثیر هوای محیط بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم در جدول و نمودارهای زیر نمایش داده شده است.

جدول (۳-۱۸): تاثیر تغییرات دمای محیط بر بازگشت‌ناپذیری‌ها، بازده‌های اول و دوم

بازده قانون دوم (%)	بازده قانون اول (%)	بازگشت‌ناپذیری (KJ/Kg-Cl)	دما (K)
۳۸/۸۷	۲۳/۰۶	۱۷۶۳/۲۷	۲۸۸
۳۹/۲۵	۲۳/۱۳	۵۷/۱۷۷۳	۲۹۳
۳۹/۶۳	۲۳/۲۰	۱۷۸۳/۸۴	۲۹۸
۴۰/۰۱	۲۳/۲۷	۱۷۹۴/۰۷	۳۰۳
۴۰/۳۸	۲۳/۳۴	۱۸۰۴/۲۶	۳۰۸

۳-۴-۲ تغییر دمای هوای ثانویه ورودی به کوره

تاثیر هوای ثانویه بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم در جدول و نمودارهای زیر نمایش داده شده است.

جدول (۳-۱۹): تاثیر دمای هوای ثانویه بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم

بازده قانون دوم (%)	بازده قانون اول (%)	بازگشت‌ناپذیری (KJ/Kg-Cl)	دما (K)
۳۹/۴۰	۲۳/۳۲	۱۷۶۶/۸۹	۹۵۳
۳۹/۵۱	۲۳/۲۶	۱۷۷۵/۳۴	۹۶۳
۳۹/۶۳	۲۳/۲۰	۱۷۸۳/۸۴	۹۷۳
۳۹/۷۴	۲۳/۱۴	۱۷۹۲/۳۷	۹۸۳
۳۹/۸۶	۲۳/۰۷	۱۸۰۰/۹۴	۹۹۳

۳-۴-۳-۳ تغییر در دمای مواد اولیه ورودی

تاثیر مواد اولیه ورودی بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم در جدول و نمودارهای زیر نمایش داده شده است.

جدول (۳-۲۰): تاثیر دمای مواد اولیه ورودی بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم

بازده قانون دوم (%)	بازده قانون اول (%)	بازگشت‌ناپذیری (KJ/Kg-Cl)	دما (K)
۳۹/۳۳	۲۳/۸۳	۱۷۶۱/۴۷	۱۰۴۳
۳۹/۴۸	۲۳/۵۲	۱۷۷۲/۶۳	۱۰۵۳
۳۹/۶۳	۲۳/۲۰	۱۷۸۳/۸۴	۱۰۶۳
۳۹/۷۸	۲۲/۸۸	۱۷۹۵/۰۸	۱۰۷۳
۳۹/۹۳	۲۲/۵۶	۱۸۰۶/۳۷	۱۰۸۳

۴-۴-۳-۳ تغییرات بازگشت‌ناپذیری

همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش دمای محیط میزان بازگشت‌ناپذیری‌ها افزایش می‌یابد. افزایش دمای محیط باعث عملکرد حرارتی بهتر کوره شده، باعث کاهش انتقال حرارت از دیواره‌های کوره شده و همچنین عملکرد بهتر احتراق را در بر دارد.

با افزایش دمای هوای ثانویه میزان بازگشت‌ناپذیری‌ها افزایش می‌یابد. این امر بواسطه افزایش اگزرژی جریان‌های ورودی بواسطه افزایش دمای هوای ثانویه می‌باشد.

با افزایش دمای مواد اولیه ورودی، میزان بازگشت‌ناپذیری‌ها افزایش می‌یابد. این امر بواسطه افزایش اگزرژی جریان‌های ورودی بواسطه افزایش دمای مواد اولیه ورودی می‌باشد.

۵-۴-۳-۳ تغییرات بازده قانون اول

همانگونه که در جداول فوق مشاهده می‌شود با افزایش دمای محیط، بازده قانون اول افزایش می‌یابد. این امر بواسطه کاهش اتلافات از دیواره‌ها می‌باشد.

با افزایش دمای هوای ثانویه، بازده قانون اول کاهش می‌یابد و با افزایش دمای مواد اولیه ورودی، بازده قانون اول کاهش می‌یابد.

۶-۴-۳-۳ تغییرات بازده قانون دوم

همانگونه که در جداول فوق مشاهده می‌شود با افزایش دمای هوای محیط، بازده قانون دوم افزایش می‌یابد.

با افزایش دمای هوای ثانویه، بازده قانون دوم افزایش می‌یابد. علت این امر افزایش میزان انرژی ورودی سیستم می‌باشد.

با افزایش دمای مواد اولیه ورودی، بازده قانون دوم افزایش می‌یابد. علت این امر افزایش میزان انرژی ورودی سیستم می‌باشد.

۷-۴-۳-۳ جمع بندی سیستم کوره

با انجام محاسبات و بر طبق نمودارهای پیشین جدول زیر بدست می‌آید:

جدول (۳-۲۱): جمع بندی سیستم کوره

کوره			
تغییر در دمای محیط			
تغییر در بازگشت‌ناپذیری، بازده اول و دوم	$\frac{\Delta I}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \eta}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \psi}{\Delta T}$
	۲/۰۵۰	۰/۰۱۴	۰/۰۷۶
تغییر در دمای گازهای خروجی			
تغییر در بازگشت‌ناپذیری، بازده اول و دوم	$\frac{\Delta I}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \eta}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \psi}{\Delta T}$
	۰/۸۵۱	-۰/۰۰۶	۰/۰۱۱
تغییر در دمای کلینکر خروجی			
تغییر در بازگشت‌ناپذیری، بازده اول و دوم	$\frac{\Delta I}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \eta}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \psi}{\Delta T}$
	۱/۱۲۳	-۰/۰۳۲	۰/۰۱۵

همانگونه که از جدول مشخص است، تغییر در دمای محیط باعث ایجاد تغییرات بیشتری در بازده دوم می‌گردد و این، بعنوان حساس‌ترین پارامتر در مقابل این تغییرات عمل می‌نماید.

تغییر در دمای هوای ثانویه تاثیر بیشتری بر بازده قانون دوم دارد. تغییر در دمای مواد اولیه ورودی نسبت به بازده اول حساس‌تر است و تغییرات آن باعث ایجاد تغییرات بیشتری در بازده اول می‌گردد.

افزایش دمای مواد اولیه ورودی باعث ایجاد تغییراتی منفی در بازده اول می‌گردد. منفی بودن بازده اول بعلت تعریف ما از آن می‌باشد. اگر نسبت افزایش آنتالپی و اگزرژی مواد ورودی را به کل آنتالپی و اگزرژی ورودی محاسبه کنیم، داریم:

جدول (۳-۲۲): نسبت افزایش آنتالپی و اگزرژی مواد ورودی را به کل آنتالپی و اگزرژی ورودی

نسبت مواد اولیه به کل	کل ورودی (KJ/Kg-Cl)		مواد اولیه ورودی (KJ/Kg-Cl)		دما (K)	
	آنتالپی	اگزرژی	آنتالپی	اگزرژی	آنتالپی	اگزرژی
۰/۱۲۰	۰/۴۱۳	۴۴۷۹/۱۷	۴۶۳۴/۲۰	۵۳۸/۹۳	۱۹۱۲/۲۵	۱۰۴۳
۰/۱۲۲	۰/۴۱۶	۴۴۹۰/۳۴	۴۶۳۵/۳۰	۵۴۹/۳۱	۱۹۲۶/۷۵	۱۰۵۳
۰/۱۲۴	۰/۴۱۹	۴۵۰۱/۵۴	۴۶۳۶/۴۰	۵۵۹/۷۲	۱۹۴۱/۲۵	۱۰۶۳
۰/۱۲۶	۰/۴۲۲	۴۵۱۲/۷۹	۴۶۳۷/۵۰	۵۷۰/۱۸	۱۹۵۵/۷۵	۱۰۷۳
۰/۱۲۸	۰/۴۲۵	۴۵۲۴/۰۸	۴۶۳۸/۶۰	۵۸۰/۶۷	۱۹۷۰/۲۵	۱۰۸۳

افزایش در دمای مواد اولیه ورودی باعث افزایش آنتالپی و اگزرژی کل ورودی می‌گردد. با محاسبه نسبت تغییرات به دما داریم:

$۱/۴۵ = \text{تغییرات آنتالپی با دما}$

$۱/۰۴۴ = \text{تغییرات اگزرژی با دما}$

با توجه به تغییرات مثبت آنتالپی، بازده اول کاهش می‌یابد و بهمین ترتیب با افزایش اگزرژی

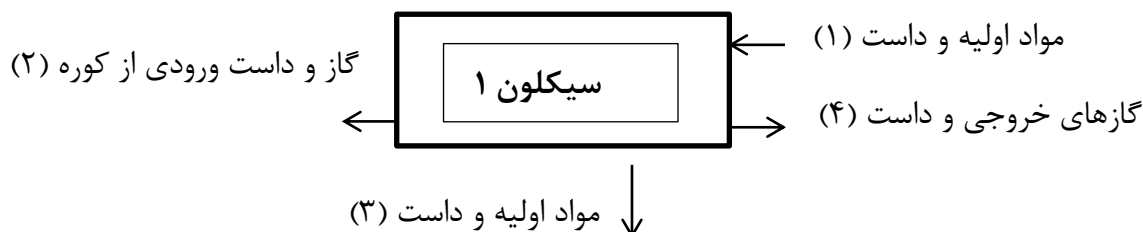
ورودی، بازده دوم افزایش می‌یابد.

موثرترین خاصیت از نظر بازده قانون اول دمای محیط در جهت مثبت و تغییر دمای مواد اولیه ورودی در جهت منفی می‌باشد. افزایش دمای محیط بیشترین تاثیر مثبت را بر بازده دوم دارد. افزایش دمای هوای ثانویه و دمای مواد اولیه باعث ایجاد تغییراتی مثبت در بازده دوم می‌گردند. که بعلاوه افزایش میزان انرژی ورودی می‌باشد.

۳-۴ سیکلون شماره ۱

مبدل‌های حرارتی سیکلونی از ۴ سیکلون تشکیل شده‌اند که در بالای یکدیگر قرار دارند. برای امکان ته نشینی بهتر، سیکلون بالاتر بصورت مضاعف ساخته می‌شود. سیکلون‌ها به لوله‌های بالابرنده گاز که مقطع مربعی دارند، متصل‌اند. بالاترین لوله گاز مقطع دایره دارد. سیکلون و لوله هدایت گاز، یک طبقه از انتقال حرارت را می‌سازند. در مبدل‌های حرارتی سیکلونی، انتقال حرارت در یکایک لوله‌های بالابر گاز و سیکلون‌ها در جریان مستقیم انجام می‌گیرد. زمان ته نشینی دانه‌های پودر خام در سیکلون تبادل حرارتی متناسب با مجذور قطر دانه‌ها کاهش می‌یابد با فرض اینکه دانه‌ها شکل کروی داشته باشند. زمان عبور یک دانه مواد خام از سیکلون ۴ مرحله‌ای، که ارتفاعی حدود ۵۰ متر از دریاچه ورود مواد خام تا ورودی کوره دوار دارد حدود ۲۵ ثانیه است. در این مدت مواد خام از حدود ۵۰ درجه به ۸۰۰ درجه سیلیسیوس گرم می‌شود، در حالی که گازهای کوره از ۱۱۰۰ درجه به ۳۳۰ درجه سرد می‌شوند.

۳-۴-۱ تحلیل انرژی و انرژی



شکل (۳-۳): جریان‌های ورودی و خروجی سیستم سیکلون

فرضیات:

- فرایند جریان پایدار.

- از انرژی‌های پتانسیل و جنبشی صرف نظر می‌شود.

- شرایط مرده سیستم (محیط) برابر ۲۵ درجه سلیسیوس و فشار ۱ اتمسفر است.

۳-۴-۱-۱ بقای جرم

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \rightarrow \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 + \dot{m}_4 \quad (۲۴-۳)$$

۳-۴-۱-۲ بقای انرژی

$$\begin{aligned} \dot{Q} - \dot{W} &= \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e \right) - \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gZ_i \right) \rightarrow \dot{Q} \\ &= (\dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_4 h_4) - (\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2) \end{aligned} \quad (۲۵-۳)$$

چون در سیستم سیکلون کاری انجام نمی‌شود بنابراین عبارت کار برابر صفر می‌باشد. اگر تمامی

موارد را بر حسب کیلوگرم کلینکر بیاوریم در اینصورت :

$$Q = (h_3 + h_4) - (h_1 + h_2) \quad (۲۶-۳)$$

مقدار Q منفی خواهد شد چرا که سیستم به محیط گرما می‌دهد.

۳-۴-۱-۳ قانون دوم ترمودینامیک و تحلیل انرژی

$$\dot{S}_{\text{gen.cv}} = \sum \dot{m}_e \dot{s}_e - \sum \dot{m}_i \dot{s}_i + \sum \frac{\dot{Q}_e}{T_e} \quad (۲۷-۳)$$

$$\dot{S}_{\text{gen.cv}} = (\dot{m}_3 \dot{s}_3 + \dot{m}_4 \dot{s}_4) - (\dot{m}_2 \dot{s}_2 + \dot{m}_1 \dot{s}_1) - \frac{\dot{Q}_e}{T_e} \quad (۲۸-۳)$$

با نوشتن موارد بر حسب کیلوگرم کلینکر داری:

$$\dot{S}_{\text{gen.cv}} = (\dot{s}_3 + \dot{s}_4) - (\dot{s}_2 + \dot{s}_1) - \frac{\dot{Q}_e}{T_e} \quad (۲۹-۳)$$

$$X = (h - h_0) - T_0(S - S_0) \quad (۳۰-۳)$$

$$X = \dot{W}_{\text{rev}} = \sum \dot{m}_i x_i - \sum \dot{m}_e x_e \quad (۳۱-۳)$$

$$X = \dot{W}_{\text{rev}} = \sum \dot{X}_i - \sum \dot{X}_e \quad (۳۲-۳)$$

$$\begin{aligned} \dot{I} = \dot{W}_{\text{rev}} - \dot{W}_u &= T_0 \dot{S}_{\text{gen}} \rightarrow \dot{W}_{\text{rev}} \\ &= T_0 \dot{S}_{\text{gen}} \end{aligned} \quad (۳۳-۳)$$

چون کاری انجام نمی‌شود بنابراین :

$$I = X = \dot{W}_{\text{rev}} = \sum \dot{X}_i - \sum \dot{X}_e \quad (۳۴-۳)$$

۳-۴-۱-۴ بازده قانون اول

بازده قانون اول یک سیکلون برابر است با نسبت تغییرات حرارتی مواد اولیه ورودی و خروجی به

کل انرژی که وارد سیکلون می‌گردد.

بنابراین:

$$\eta = \frac{h_{\text{mat,out}} - h_{\text{mat,in}}}{q_{\text{in}}} \quad (۳۵-۳)$$

که در آن $h_{\text{mat,in}}$ ، آنتالپی مواد اولیه ورودی به سیکلون ، $h_{\text{mat,out}}$ ، آنتالپی مواد اولیه خروجی

از سیکلون و q_{in} ، کل انرژی ورودی به سیکلون می‌باشد.

۳-۴-۵ بازده قانون دوم

برای سیستم کوره بازده قانون دوم بصورت زیر تعریف می گردد:

$$\psi = \frac{X_{in} - X_{out}}{X_{in}} = 1 - \frac{X_{out}}{X_{in}} \quad (3-36)$$

در فرمول (۳-۳۷)، X_{in} بیانگر میزان انرژی ورودی به سیکلون و X_{out} بیانگر میزان انرژی خروجی از سیکلون می باشد.

چون جریان های ورودی و خروجی در تمام سیکلون ها شبیه هم می باشد، بنابراین تمامی روابط این بخش برای تمامی سیکلون ها معتبر بوده و در ادامه به مطالعه موردی در کارخانه سیمان مورد نظر (۴ سیکلون) می پردازیم.

۳-۴-۲ مطالعه موردی سیستم سیکلون

برای مطالعه سیستم سیکلون ۱ اطلاعات زیر در دسترس می باشد

جدول (۳-۲۳): مشخصات سیکلون اول

سیکلون شماره ۱			
گازهای احتراق	K	دما	۱۶۸۳/۰۰
	KPa	فشار	۱۰۰/۸۳
	m ³ /Kg-Cl	دبی	۱/۱۶
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۱/۹۷
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۲۹۹۱/۴۵
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۲۶۳/۰۰
مواد اولیه ورودی	K	دما	۹۳۷/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۱/۶۴
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۱۰۶۲/۹۶
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۱۵/۰۰
داست ورودی با مواد اولیه	K	دما	۹۳۷/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۰/۵۱
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۶۶۶/۸۹
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۳۴۱/۰۰

داست ورودی با گاز	K	دما	۱۶۸۳/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۰/۱۱
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۳۴۳/۳۵
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۱۹۱/۰۰
هوای نشتی	K	دما	۲۹۸/۰۰
	KPa	فشار	۱۰۱/۳۳
	m ³ /Kg-Cl	دبی	۰/۰۵
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۲/۰۰
	KJ/Kg.Cl	آنتالپی اولیه	۲/۰۰
مواد اولیه خروجی	K	دما	۱۰۶۳/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۱/۴۵
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۱۹۴۱/۲۵
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۸۳۲/۰۰
داست خروجی با مواد	K	دما	۱۰۶۳/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۰/۱۱
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۲۷۵/۱۵
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۱۹۱/۰۰
گاز خروجی	K	دما	۱۰۸۳/۰۰
	KPa	فشار	۹۹/۳۷
	m ³ /Kg-Cl	دبی	۱/۳۲
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۲/۳۰
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۲۰۷۰/۵۰
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۲۶۵/۰۰
داست خروجی با گاز	K	دما	۱۰۸۰/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۰/۵۲
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۷۴۷/۶۴
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۳۴۱/۰۰
محیط	K	دمای محیط	۲۹۸/۰۰
	KPa	فشار محیط	۱۰۱/۳۳

جدول ۳-۲۴: بقای انرژی سیکلون اول

بقای انرژی	Hi-He-Loss=0	ΣHe	ΣHi
		۵۰۳۴/۵۴	۵۰۶۶/۶۵
اتلافات	(KJ/Kg-Cl) Loss	۳۲/۱۱	

جدول (۳-۲۵): قانون دوم ترمودینامیک در سیکلون اول

تحلیل اگرژی		H(T)	H(T ₀)	ΔS	X	
	واحد	KJ/Kg-Cl	KJ/Kg-Cl	KJ/Kg-Cl.K	KJ/Kg-Cl	
	گازهای احتراق	۲/۴۵	۲۶۳/۰۰	۳/۴۱	۱۷۱۲/۰۱	
	مواد اولیه ورودی	۱۰۶۲/۹۶	۱۵/۰۰	۱/۸۸	۴۸۸/۰۹	
	داست مواد	۶۶۶/۸۹	۳۴۱/۰۰	۰/۵۸	۱۵۱/۷۸	
	داست گاز	۳۴۳/۳۵	۱۹۱/۰۰	۰/۱۹	۹۵/۶۰	
	نشتی	۲/۰۰	۲/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	
	جمع ورودی	۵۰۶۶/۶۵	۸۱۲/۰۰	۶/۰۶	۲۴۴۷/۴۸	
	مواد اولیه خروجی	۱۹۴۱/۲۵	۸۳۲/۰۰	۱/۸۴	۵۵۹/۷۲	
	داست مواد	۲۷۵/۱۵	۱۹۱/۰۰	۰/۱۴	۴۲/۴۶	
	گاز خروجی	۲۰۷۰/۵۰	۲۶۵/۰۰	۲/۹۷	۹۲۱/۰۶	
	داست گاز	۷۴۷/۶۴	۳۴۱/۰۰	۰/۶۷	۲۰۷/۱۱	
	جمع خروجی	۵۰۳۴/۵۴	۱۶۲۹/۰۰	۵/۶۲	۱۷۳۰/۳۶	
	Xi-Xe					۷۱۷/۱۲
	کار برگشت پذیر = بازگشت ناپذیری					

جدول (۳-۲۶): تحلیل بازده سیکلون اول

تحلیل بازدهی	بازده قانون اول	درصد
	۱۷/۳۳	
	بازده قانون دوم	
	۲۹/۳۰	

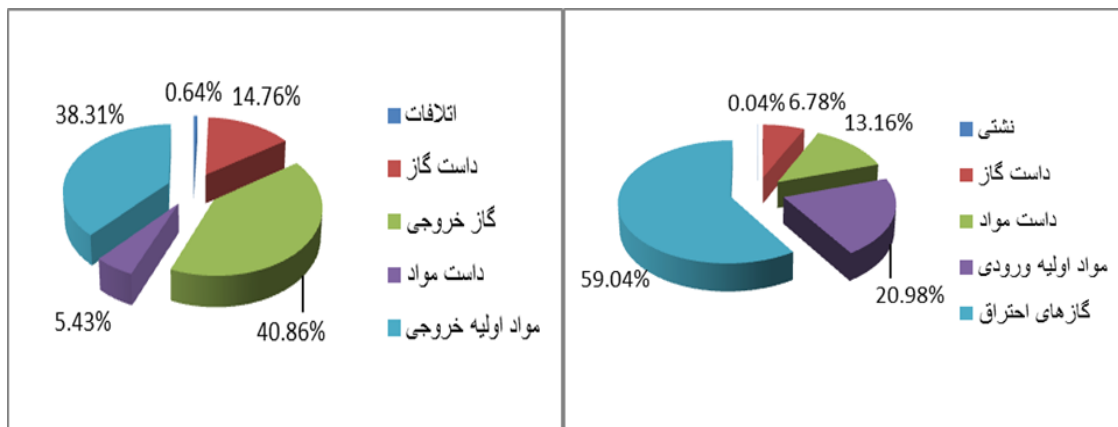
۳-۴-۳ تحلیل سیکلون اول

با تحلیل نتایج به موارد زیر می‌رسیم:

۳-۴-۱ تحلیل انرژی

جدول (۳-۲۷): تحلیل انرژی سیستم سیکلون اول

			H(T)	آنتالپی کل KJ/Kg-Cl	درصد آنتالپی به آنتالپی کل
					%
تحلیل انرژی	آنتالپی ورودی	واحد	KJ/Kg-Cl	۵۰۶۶/۶۵	۵۹/۰۴
		گازهای احتراق	۲۹۹۱/۴۵		۲۰/۹۸
		مواد اولیه ورودی	۱۰۶۲/۹۶		۱۳/۱۶
		داست مواد	۶۶۶/۸۹		۶/۷۸
		داست گاز	۳۴۳/۳۵		۰/۰۴
		نشستی	۲/۰۰		۳۸/۳۱
	آنتالپی خروجی	مواد اولیه خروجی	۱۹۴۱/۲۵		۵/۴۳
		داست مواد	۲۷۵/۱۵		۴۰/۸۶
		گاز خروجی	۲۰۷۰/۵۰		۱۴/۷۶
		داست گاز	۷۴۷/۶۴		۰/۶۴
		اتلافات	۳۲/۱۱		



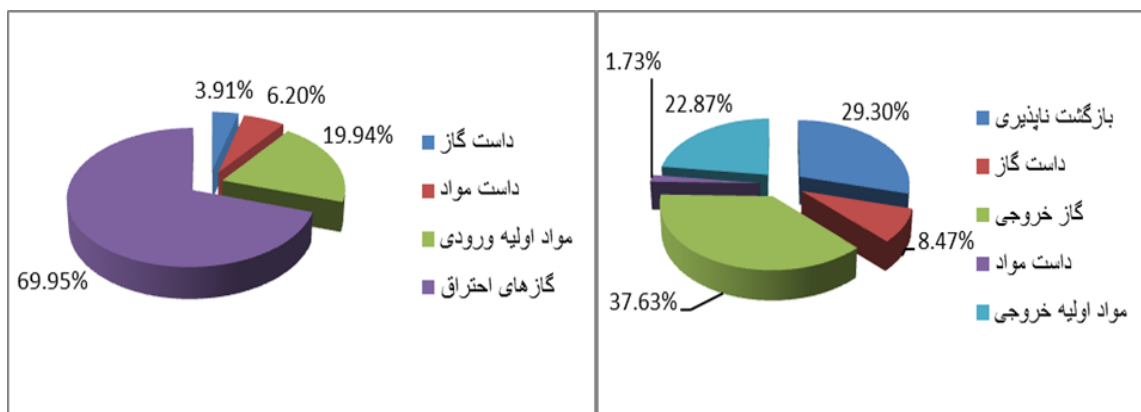
نمودار (۳-۹): درصد آنتالپی خروجی به آنتالپی کل در سیکلون اول

نمودار (۳-۱۰): درصد آنتالپی ورودی به آنتالپی کل در سیکلون اول

۲-۳-۴-۳ تحلیل انرژی

جدول (۲۸-۳): تحلیل انرژی سیستم سیکلون اول

			X	انرژی کل	درصد نسبت انرژی به انرژی کل
			KJ/Kg-Cl	KJ/Kg-Cl	%
تحلیل انرژی	ورودی	گازهای احتراق	۱۷۱۲/۰۱	۲۴۴۷/۴۸	۶۹/۹۵
		مواد اولیه ورودی	۴۸۸/۰۹		۱۹/۹۴
		داست مواد	۱۵۱/۷۸		۶/۲۰
		داست گاز	۹۵/۶۰		۳/۹۱
		نشتی	۰/۰۰		۰
	خروجی	مواد اولیه خروجی	۵۵۹/۷۲		۲۲/۸۷
		داست مواد	۴۲/۴۶		۱/۷۳
		گاز خروجی	۹۲۱/۰۶		۳۷/۶۳
		داست گاز	۷۱۷/۱۲		۸/۴۷
		بازگشت ناپذیری	۷۱۷/۱۲		۲۹/۳۰



نمودار (۳-۱۲): درصد انرژی ورودی به انرژی کل در سیکلون اول

نمودار (۳-۱۱): درصد انرژی خروجی به انرژی کل در سیکلون اول

جریان ورودی مهم در این قسمت گازهای ورودی (خروجی) و مواد اولیه ورودی (خروجی) می باشد. با توجه به دمای بالای گازهای ورودی پیش بینی می شد که بازده قانون دوم در این قسمت بالا باشد. بعلاوه زمان کم، انتقال حرارت در این قسمت به خوبی بین مواد ورودی و خروجی صورت

نمی‌گیرد و بنابراین بازده اول پایین می‌باشد.

۳-۴-۴ تحلیل حساسیت در سیکلون اول

در این قسمت تغییرات در هوای محیط، تغییر در دمای هوای گرم ورودی و تغییر در مواد اولیه خروجی مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۳-۴-۴-۱ تغییر در دمای محیط

تاثیر هوای محیط بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم در جدول و نمودارهای زیر نمایش داده شده است.

جدول (۳-۲۹): تاثیر دمای محیط بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم

بازده قانون دوم (%)	بازده قانون اول (%)	بازگشت‌ناپذیری (KJ/Kg-Cl)	دما (K)
۲۸/۷۶	۱۵.۱۷	۷۲۰/۳۸	۲۸۸
۲۹/۰۳	۱۷/۲۴	۷۱۸/۱۹	۲۹۳
۲۹/۳۰	۱۷/۳۳	۷۱۵/۹۹	۲۹۸
۲۹/۵۷	۱۷/۴۳	۷۱۳/۷۸	۳۰۳
۲۹/۸۵	۱۷/۵۲	۷۱۱/۵۵	۳۰۸

۳-۴-۴-۲ تغییر در دمای هوای گرم ورودی

تاثیر دمای هوای گرم ورودی بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم در جدول زیر نمایش داده شده است.

جدول (۳-۳۰): تاثیر دمای گرم ورودی بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم

بازده قانون دوم (%)	بازده قانون اول (%)	بازگشت‌ناپذیری (KJ/Kg-Cl)	دما (K)
۲۸/۶۹	۱۷/۴۲	۶۹۶/۰۶	۱۶۷۰
۲۸/۹۲	۱۷/۳۹	۷۰۴/۱۶	۱۶۷۵
۲۹/۱۶	۱۷/۳۵	۷۱۲/۲۶	۱۶۸۰
۲۹/۳۹	۱۷/۳۲	۷۲۰/۳۶	۱۶۸۵

۱۶۹۰	۷۲۸/۴۷	۱۷/۲۹	۲۹/۶۳
------	--------	-------	-------

۳-۴-۴-۳ تغییر در دمای مواد اولیه خروجی

تاثیر دمای مواد اولیه خروجی بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم در جدول زیر نمایش داده شده است.

جدول (۳-۳۱): تاثیر دمای مواد اولیه خروجی بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم

بازده قانون دوم (%)	بازده قانون اول (%)	بازگشت‌ناپذیری (KJ/Kg-Cl)	دما (K)
۲۹/۴۴	۱۷/۲۵	۷۲۰/۴۹	۱۰۶۰
۲۹/۲۱	۱۷/۳۹	۷۱۴/۸۷	۱۰۶۵
۲۸/۹۸	۱۷/۵۴	۷۰۹/۲۵	۱۰۷۰
۲۸/۷۵	۱۷/۶۸	۷۰۳/۶۲	۱۰۷۵
۲۸/۵۲	۱۷/۸۲	۶۹۷/۸۹	۱۰۸۰

۳-۴-۴-۴ تغییرات بازگشت‌ناپذیری

همانگونه که از جداول مشخص است با افزایش دمای محیط میزان بازگشت‌ناپذیری‌ها در سیکلون اول کاهش می‌یابد.

با افزایش دمای هوای گرم ورودی میزان بازگشت‌ناپذیری‌ها در سیکلون اول افزایش می‌یابد و با افزایش دمای مواد اولیه خروجی میزان بازگشت‌ناپذیری‌ها در سیکلون اول کاهش می‌یابد.

۳-۴-۴-۵ تغییرات بازده قانون اول

همانگونه که از جداول مشخص است با افزایش دمای محیط، بازده قانون اول افزایش می‌یابد.

با افزایش دمای هوای گرم ورودی، بازده قانون اول کاهش می‌یابد و با افزایش دمای مواد اولیه خروجی، بازده قانون اول افزایش می‌یابد.

۳-۴-۴-۶ تغییرات بازده قانون دوم

همانگونه که از جداول مشخص است با افزایش دمای محیط، بازده قانون دوم افزایش می‌یابد.

با افزایش دمای هوای گرم ورودی، بازده قانون دوم افزایش می‌یابد و با افزایش دمای مواد اولیه خروجی، بازده قانون دوم کاهش می‌یابد.

۳-۴-۴-۷ جمع بندی سیکلون اول

با انجام محاسبات و بر طبق نمودارهای پیشین جدول زیر بدست می‌آید:

جدول (۳-۳): جمع بندی سیکلون اول

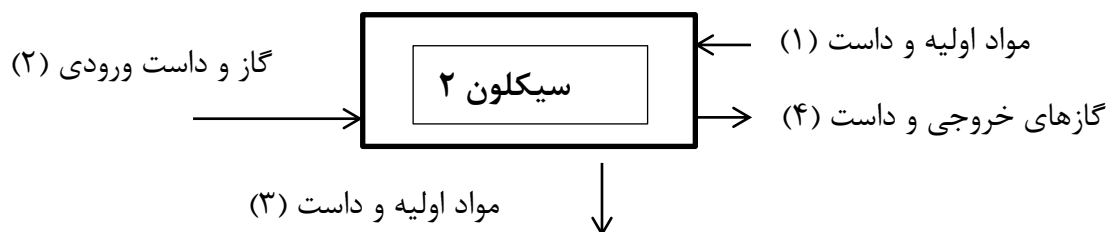
سیکلون اول			
تغییر در دمای محیط			
تغییر در بازگشت‌ناپذیری، بازده اول و دوم	$\frac{\Delta I}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \eta}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \psi}{\Delta T}$
	-۰/۴۴۱	۰/۰۱۸	۰/۰۵۴
تغییر در دمای هوای گرم ورودی			
تغییر در بازگشت‌ناپذیری، بازده اول و دوم	$\frac{\Delta I}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \eta}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \psi}{\Delta T}$
	۱/۶۲۱	-۰/۰۰۷	۰/۰۴۷
تغییر در دمای مواد اولیه خروجی			
تغییر در بازگشت‌ناپذیری، بازده اول و دوم	$\frac{\Delta I}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \eta}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \psi}{\Delta T}$
	-۱/۱۲۶	۰/۰۲۹	-۰/۰۴۶

همانگونه که از جدول مشخص است، تغییر در دمای محیط باعث ایجاد تغییرات بیشتری در بازده دوم می‌گردد و این، بعنوان حساس‌ترین پارامتر در مقابل این تغییرات عمل می‌نماید.

تغییر در دمای هوای گرم ورودی تاثیر منفی بر بازده اول دارد. تغییر در دمای مواد اولیه خروجی نسبت به بازده دوم حساس‌تر است و تغییرات آن باعث ایجاد تغییرات منفی در بازده دوم می‌گردد.

موثرترین خاصیت از نظر بازده قانون اول دمای مواد اولیه خروجی در جهت مثبت و تغییر دمای هوای گرم ورودی در جهت منفی می‌باشد. افزایش دمای محیط بیشترین تاثیر مثبت را بر بازده دوم دارد.

۳-۵ سیکلون شماره ۲:



شکل (۳-۴): جریان‌های ورودی و خروجی سیستم سیکلون ۲

۳-۵-۱ مطالعه موردی

برای مطالعه سیستم سیکلون ۲ اطلاعات زیر در دسترس می‌باشد:

جدول (۳-۳۳): مشخصات سیکلون دوم

سیکلون شماره ۲			
گازهای احتراق	K	دما	۱۰۸۳/۰۰
	Kpa	فشار	۹۹/۳۷
	m ³ /Kg-Cl	دبی	۱/۳۲
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۲/۳۰
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۲۰۷۰/۱۹
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۲۶۴/۶۹
مواد اولیه ورودی	K	دما	۷۸۰/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۱/۷۱
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۸۲۴/۲۲
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۰/۰۰

داست ورودی با مواد اولیه	K	دما	۷۸۰/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۰/۳۹
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۲۶۳/۸۴
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۷۵/۸۶
داست ورودی با گاز	K	دما	۱۰۸۳/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۰/۵۲
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۷۴۹/۰۹
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۳۴۰/۸۹
هوای نشتی	K	دما	۲۹۸/۰۰
	Kpa	فشار	۱۰۱/۳۳
	m ³ /Kg-Cl	دبی	۰/۰۵
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۱/۳۰
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۱/۳۰
مواد اولیه خروجی	K	دما	۹۳۷/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۱/۶۴
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۱۰۶۳/۳۷
	KJ/Kg.Cl	آنتالپی اولیه	۱۵/۴۱
داست خروجی با مواد	K	دما	۹۳۷/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۰/۵۱
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۶۶۶/۷۸
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۳۴۰/۸۹
گاز خروجی	K	دما	۹۳۷/۰۰
	Kpa	فشار	۹۷/۸۰
	m ³ /Kg-Cl	دبی	۱/۳۸
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۲/۴۰
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۱۸۴۶/۱۰
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۳۱۲/۵۰
داست خروجی با گاز	K	دما	۹۳۷/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۰/۳۹
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۳۲۵/۰۷
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۷۵/۸۶
محیط	K	دمای محیط	۲۹۸/۰۰
	KPa	فشار محیط	۱۰۱/۳۳

نتایج بصورت زیر بدست می آیند:

جدول (۳-۳۴): بقای انرژی سیکلون دوم

بقای انرژی	Hi-He-Loss=0	ΣHe	ΣHi
		۳۹۰۱/۳۲	۳۹۰۸/۶۴
اتلافات	(KJ/Kg-Cl) Loss	۷/۳۲	

جدول (۳-۳۵): تحلیل قانون دوم ترمودینامیک در سیکلون دوم

تحلیل انرژی		H(T)	H(T0)	ΔS	X
	واحد	KJ/Kg-Cl	KJ/Kg-Cl	KJ/Kg-Cl.K	KJ/Kg-Cl
	گازهای احتراق	۲۰۷۰/۱۹	۲۶۴/۶۹	۲/۹۷	۹۲۰/۳۶
	مواد اولیه ورودی	۸۲۴/۲۲	۰/۰۰	۱/۶۵	۳۳۳/۹۰
	داست مواد	۲۶۳/۸۴	۷۵/۸۶	۰/۳۸	۷۶/۱۵
	داست گاز	۷۴۹/۰۹	۳۴۰/۸۹	۰/۶۷	۲۰۸/۲۴
	نشتی	۱/۳۰	۱/۳۰	۰۰/۰	۰۰/۰
	جمع ورودی	۳۹۰۸/۶۴	۶۸۲/۷۴	۵/۶۶	۱۵۳۸/۶۵
	مواد اولیه خروجی	۱۰۶۳/۳۷	۱۵/۴۱	۱/۸۸	۴۸۸/۰۹
	داست مواد	۶۶۶/۷۸	۳۴۰/۸۹	۰/۵۸	۱۵۱/۷۸
	گاز خروجی	۱۸۴۶/۱۰	۳۱۲/۵۰	۲/۷۵	۷۱۴/۲۷
	داست گاز	۳۲۵/۰۷	۷۵/۸۶	۰/۴۵	۱۱۶/۰۷
	جمع خروجی	۳۹۰۱/۳۲	۷۴۴/۶۶	۵/۶۶	۱۴۷۰/۲۱
	Xi-Xe				۶۸/۴۴
	کار برگشت پذیر - بازگشت ناپذیری				

در نتیجه داریم:

جدول (۳-۳۶): تحلیل بازده سیکلون دوم

تحلیل بازدهی	بازده قانون اول	درصد
	۶/۱۲	

	بازده قانون دوم	
	۴/۴۵	

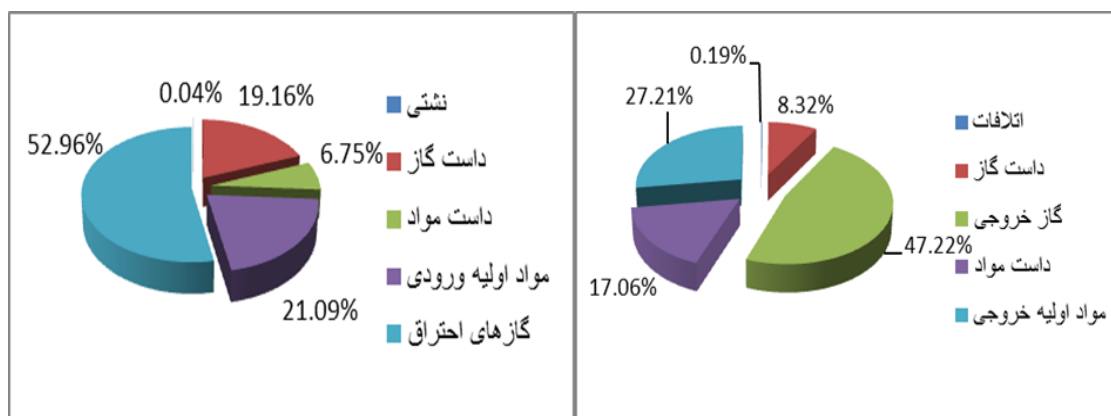
۳-۵-۲ تحلیل سیکلون دوم

با تحلیل نتایج به موارد زیر می‌رسیم:

۳-۵-۲-۱ تحلیل انرژی

جدول (۳-۳۷): تحلیل انرژی سیستم سیکلون دوم

			H(T)	آنتالپی کل	درصد آنتالپی به آنتالپی کل
				KJ/Kg-Cl	%
تحلیل انرژی	آنتالپی ورودی	واحد	KJ/Kg-Cl	۳۹۰۸/۶۴	۵۲/۹۶
		گازهای احتراق	۲۰۷۰/۱۹		۲۱/۰۹
		مواد اولیه ورودی	۸۲۴/۲۲		۶/۷۵
		داست مواد	۲۶۳/۸۴		۱۹/۱۶
		داست گاز	۷۴۹/۰۹		۰/۰۴
		نشئی	۱/۳۰		۲۷/۲۱
	آنتالپی خروجی	مواد اولیه	۱۰۶۳/۳۷		۱۷/۰۶
		خروجی	۶۶۶/۷۸		۴۷/۲۲
		داست مواد	۱۸۴۶/۱۰		۸/۳۲
		گاز خروجی	۳۲۵/۰۷		۰/۱۹
		داست گاز	۷/۳۲		
		اتلافات			



نمودار (۳-۱۳): درصد آنتالپی ورودی به آنتالپی کل در سیکلون دوم

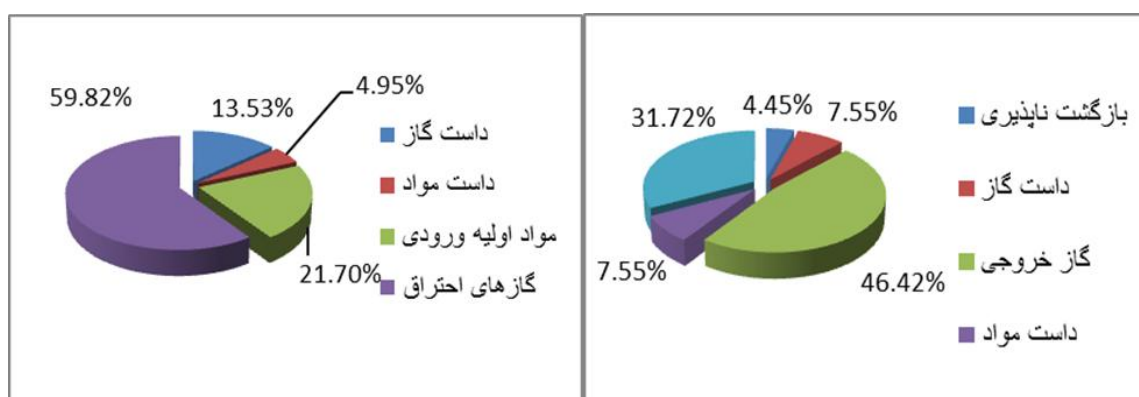
نمودار (۳-۱۴): درصد آنتالپی خروجی به آنتالپی کل در سیکلون دوم

۱.

۳-۵-۲-۲ تحلیل انرژی

جدول (۳۸-۳): تحلیل انرژی سیستم سیکلون دوم

انرژی تحلیل		واحد	X	انرژی کل	درصد نسبت انرژی به انرژی کل
			KJ/Kg-Cl	KJ/Kg-Cl	%
انرژی تحلیل	انرژی ورودی	گازهای احتراق	۹۲۰/۳۶	۲۴۴۷/۴۸	۵۹/۸۲
		مواد اولیه ورودی	۳۳۳/۹۰		۲۱/۷۰
		داست مواد	۷۶/۱۵		۴/۹۵
		داست گاز	۲۰۸/۲۴		۱۳/۵۳
		نشتی	۰۰/۰		۰۰/۰
	انرژی خروجی	مواد اولیه خروجی	۴۸۸/۰۹		۳۱/۷۲
		داست مواد	۱۵۱/۷۸		۹/۸۶
		گاز خروجی	۷۱۴/۲۷		۴۶/۴۲
		داست گاز	۷۱۱/۰۷		۷/۵۵
		بازگشت ناپذیری	۶۸/۴۴		۴/۴۵



نمودار (۳-۱۵): درصد انرژی ورودی به انرژی کل در سیکلون دوم
نمودار (۳-۱۶): درصد انرژی خروجی به انرژی کل در سیکلون دوم

۳-۵-۳ تحلیل حساسیت در سیکلون دوم

در سیکلون دوم دمای گازهای ورودی نسبت به سیکلون اول و بنابراین کیفیت انرژی آن کاهش یافته است. این عامل، در کنار دمای پایین مواد اولیه ورودی موجب می‌شود بازده اول از بازده دوم بیشتر گردد. با مقایسه‌ای بین سیکلون اول و دوم ملاحظه می‌شود بازده قانون اول از ۱۷٪ به ۶٪ و بازده قانون دوم از ۲۹٪ به ۴٪ کاهش یافته است.

در این قسمت تغییرات در هوای محیط، تغییر در دمای هوای گرم ورودی و تغییر در مواد اولیه خروجی مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۳-۵-۳-۱ تغییر در دمای محیط

تاثیر هوای محیط بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم در جدول زیر نمایش داده شده است.

جدول (۳۹-۳): تاثیر دمای محیط بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم

بازده قانون دوم (%)	بازده قانون اول (%)	بازگشت‌ناپذیری (KJ/Kg-Cl)	دما (K)
۴/۲۹	۶/۰۲	۶۸/۴۶	۲۸۸
۴/۳۷	۶/۰۷	۶۸/۴۵	۲۹۳
۴/۴۵	۶/۱۲	۶۸/۴۴	۲۹۸
۴/۵۳	۶/۱۷	۶۸/۴۲	۳۰۳
۴/۶۱	۶/۲۱	۶۸/۴۱	۳۰۸

۳-۵-۳-۲ تغییر در دمای هوای گرم ورودی

تاثیر هوای گرم ورودی بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم در جدول زیر نمایش داده شده است.

جدول (۳-۴۰): تاثیر دمای هوای گرم ورودی بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم

بازده قانون دوم (%)	بازده قانون اول (%)	بازگشت‌ناپذیری (KJ/Kg-Cl)	دما (K)
۴/۱۴	۶/۱۳	۶۳/۴۴	۱۰۸۰
۴/۶۵	۶/۱۱	۷۱/۷۷	۱۰۸۵
۵/۱۷	۶/۰۹	۸۰/۱۳	۱۰۹۰
۵/۶۸	۶/۰۸	۸۸/۴۹	۱۰۹۵
۶/۱۸	۶/۰۶	۹۶/۸۷	۱۱۰۰

۳-۳-۵-۳ تغییر در دمای مواد اولیه خروجی

تاثیر مواد اولیه خروجی بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم در جدول زیر نمایش داده شده است.

جدول (۳-۴۱): تاثیر دمای مواد اولیه خروجی بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم

بازده قانون دوم (%)	بازده قانون اول (%)	بازگشت‌ناپذیری (KJ/Kg-Cl)	دما (K)
۷/۲۸	۴/۸۶	۱۱۲/۰۹	۹۰۷
۶/۳۴	۵/۲۸	۹۷/۶۱	۹۱۷
۵/۴۰	۵/۷۰	۸۳/۰۶	۹۲۷
۴/۴۵	۶/۱۲	۶۸/۴۴	۹۳۷
۴/۱۶	۶/۲۴	۶۴/۰۴	۹۴۰

۴-۳-۵-۳ تغییرات بازگشت‌ناپذیری

همانگونه که از جداول مشخص می‌باشد، با افزایش دمای محیط میزان بازگشت‌ناپذیری‌ها در سیکلون دوم کاهش می‌یابد

با افزایش دمای هوای گرم ورودی، میزان بازگشت‌ناپذیری‌ها در سیکلون دوم افزایش می‌یابد و با افزایش دمای مواد اولیه خروجی، میزان بازگشت‌ناپذیری‌ها در سیکلون دوم کاهش می‌یابد.

۵-۳-۵ تغییرات بازده قانون اول

همانگونه که از جداول مشخص می‌باشد، با افزایش دمای محیط، بازده قانون اول افزایش می‌یابد. با افزایش دمای هوای گرم ورودی، بازده قانون اول کاهش می‌یابد و با افزایش دمای مواد اولیه خروجی، بازده قانون اول افزایش می‌یابد.

۶-۳-۵ تغییرات بازده قانون دوم

همانگونه که از جداول مشخص می‌باشد، با افزایش دمای محیط، بازده قانون دوم افزایش می‌یابد. با افزایش دمای هوای گرم ورودی، بازده قانون دوم افزایش می‌یابد و با افزایش دمای مواد اولیه خروجی، بازده قانون دوم کاهش می‌یابد.

۷-۳-۵ جمع بندی سیکلون دوم

با انجام محاسبات و بر طبق جداول پیشین جدول زیر بدست می‌آید:

جدول (۴۲-۳): جمع بندی سیکلون دوم

کوره			
تغییر در دمای محیط			
	$\frac{\Delta I}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \eta}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \psi}{\Delta T}$
تغییر در بازگشت‌ناپذیری، بازده اول و دوم	-۰/۰۰۳	۰/۰۰۹	۰/۰۱۶
تغییر در دمای هوای گرم ورودی			
	$\frac{\Delta I}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \eta}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \psi}{\Delta T}$
تغییر در بازگشت‌ناپذیری، بازده اول و دوم	۱/۶۷۲	-۰/۰۰۴	۰/۱۰۲
تغییر در دمای مواد اولیه خروجی			
	$\frac{\Delta I}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \eta}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \psi}{\Delta T}$
تغییر در بازگشت‌ناپذیری، بازده اول و دوم	-۱/۴۵۶	۰/۰۴۲	-۰/۰۹۵

همانگونه که از جدول مشخص است، تغییر در دمای محیط باعث ایجاد تغییرات بیشتری در بازده دوم می‌گردد و این، بعنوان حساس‌ترین پارامتر در مقابل این تغییرات عمل می‌نماید.

تغییر در دمای هوای گرم ورودی تاثیر منفی بر بازده اول دارد و تاثیر آن بر بازده دوم مثبت و قابل توجه است.

موثرترین خاصیت از نظر بازده قانون اول دمای مواد اولیه خروجی در جهت مثبت و تغییر دمای هوای گرم ورودی در جهت منفی می‌باشد. افزایش دمای هوای گرم ورودی بیشترین تاثیر مثبت را بر بازده دوم دارد.

۳-۶ سیکلون شماره ۳:

۳-۶-۱ مطالعه موردی

برای مطالعه سیستم سیکلون ۳ طلاعات زیر در دسترس می‌باشد:

جدول (۳-۴۳): مشخصات سیکلون سوم

سیکلون شماره ۲			
گازهای احتراق	K	دما	۹۳۷/۵۰
	Kpa	فشار	۹۷/۶۹
	m ³ /Kg-Cl	دبی	۱/۳۶
	KJ/KgCl.K	گرمای ویژه	۲/۴۰
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۱۸۴۳/۳۲
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۲۸۰/۵۹
مواد اولیه ورودی	K	دما	۶۰۵/۵۲
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۱/۴۰
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۴۵۶/۴۵
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۰۰/۰
داست ورودی با مواد اولیه	K	دما	۶۰۵/۵۲
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۰/۲۳
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۳۵۲/۴۸

	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۰/۰۰
داست ورودی با گاز	K	دما	۹۳۷/۵۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۰/۳۰
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۳۰۰/۵۰
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۷۸/۱۰
هوای نشتی	K	دما	۲۹۸/۰۰
	Kpa	فشار	۱۰۱/۳۳
	m ³ /Kg-Cl	دبی	۰/۰۵
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۱/۰۰
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۱/۰۰
مواد اولیه خروجی	K	دما	۷۸۰/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۱/۷۱
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۸۲۴/۲۲
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۰۰/۰
داست خروجی با مواد	K	دما	۷۸۰/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۰/۳۹
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۲۶۳/۹۸
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۷۶/۰۰
گاز خروجی	K	دما	۸۰۰/۰۰
	Kpa	فشار	۹۶/۲۳
	m ³ /Kg-Cl	دبی	۱/۳۸
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۲/۴۵
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۱۵۴۳/۹۰
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۳۱۴/۰۰
داست خروجی با گاز	K	دما	۸۰۰/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۰/۲۳
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۱۲۳/۴۶
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۸/۰۰
محیط	K	دمای محیط	۲۹۸/۰۰
	KPa	فشار محیط	۱۰۱/۳۳

در نتیجه داریم:

جدول (۳-۴): بقای انرژی در سیکلون سوم

بقای انرژی	Hi-He-Loss=0	ΣHe	ΣHi
		۲۷۵۵/۵۶	۲۷۷۹/۴۶
اتلافات	(KJ/Kg-Cl) Loss	۲۳/۹۰	

جدول (۳-۴): تحلیل قانون دوم در سیکلون سوم

تحلیل اگرزری		H(T)	H(T ₀)	ΔS	X	
	واحد	KJ/Kg-Cl	KJ/Kg-Cl	KJ/Kg-Cl.K	KJ/Kg-Cl	
	گازهای احتراق	۱۸۴۶/۶۰	۳۱۳/۰۰	۲/۷۵	۷۱۲/۷۵	
	مواد اولیه ورودی	۵۲۴/۹۷	۰/۰۰	۱/۲۱	۱۶۴/۱۲	
	داست مواد	۸۱/۶۸	۸/۰۰	۰.۱۷	۲۳/۰.۳	
	داست گاز	۳۲۵/۲۱	۷۶/۰۰	۰.۴۵	۱۱۶/۰.۷	
	نشتی	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	
	جمع ورودی	۲۷۷۹/۴۶	۳۹۸/۰۰	۴/۵۸	۱۰۱۵/۹۸	
	مواد اولیه خروجی	۸۲۴/۲۲	۰/۰۰	۱/۶۵	۳۳۳/۹۰	
	داست مواد	۲۶۳/۹۸	۷۶/۰۰	۰/۳۸	۷۶/۱۵	
	گاز خروجی	۲۶۳/۹۰	۳۱۴/۰۰	۲/۴۳	۵۰۶/۳۶	
	داست گاز	۱۲۳/۴۶	۸/۰۰	۰/۲۳	۴۷/۷۸	
	جمع خروجی	۲۷۵۵/۵۶	۳۹۸/۰۰	۴/۶۸	۹۶۴/۱۹	
	Xi-Xe					۵۱/۷۸۸
	کار برگشت پذیر = بازگشت ناپذیری					

جدول (۳-۴): تحلیل بازده در سیکلون سوم

تحلیل بازدهی	بازده قانون اول	درصد
	۱۰/۷۷	
	بازده قانون دوم	
	۵/۱۰	

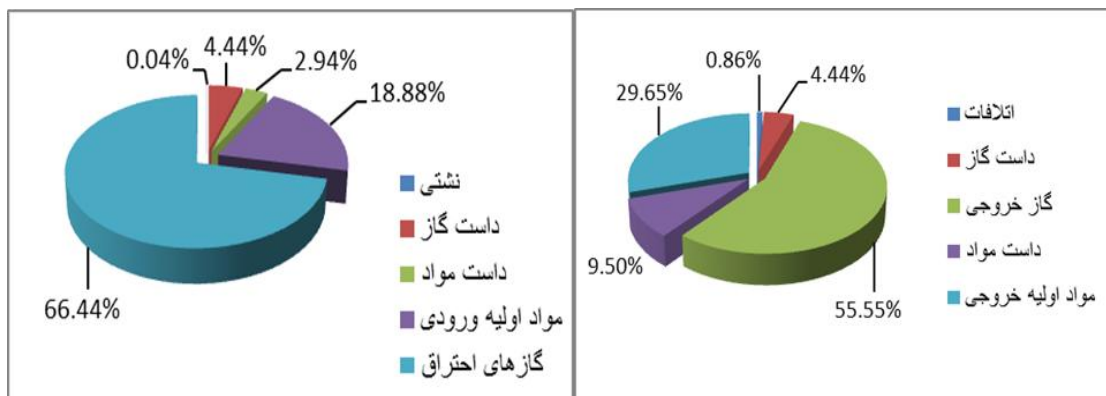
۳-۶-۲ تحلیل سیکلون سوم

با تحلیل نتایج به موارد زیر می‌رسیم:

۳-۶-۲-۱ تحلیل انرژی

جدول (۳-۴۷): تحلیل انرژی سیستم سیکلون سوم

تحلیل انرژی		واحد	H(T)	آنتالپی کل	درصد نسبت آنتالپی به آنتالپی کل
			KJ/Kg-Cl	KJ/Kg-Cl	%
تحلیل انرژی	آنتالپی ورودی	گازهای احتراق	۱۸۴۶/۶۰	۲۷۷۹.۴۶	۶۶/۴۴
		مواد اولیه ورودی	۵۲۴/۹۷		۱۸/۸۸
		داست مواد	۸۱/۶۸		۲/۹۴
		داست گاز	۳۲۵/۲۱		۱۱/۷۰
		نشستی	۱/۰۰		۰/۰۴
		مواد اولیه خروجی	۸۲۴/۲۲		۲۹/۶۵
	آنتالپی خروجی	داست مواد	۲۶۳/۹۸		۹/۵۰
		گاز خروجی	۱۵۴۳/۹۰		۵۵/۵۶
		داست گاز	۱۲۳/۴۶		۴/۴۴
		اتلافات	۲۳/۹۰		۰/۸۶



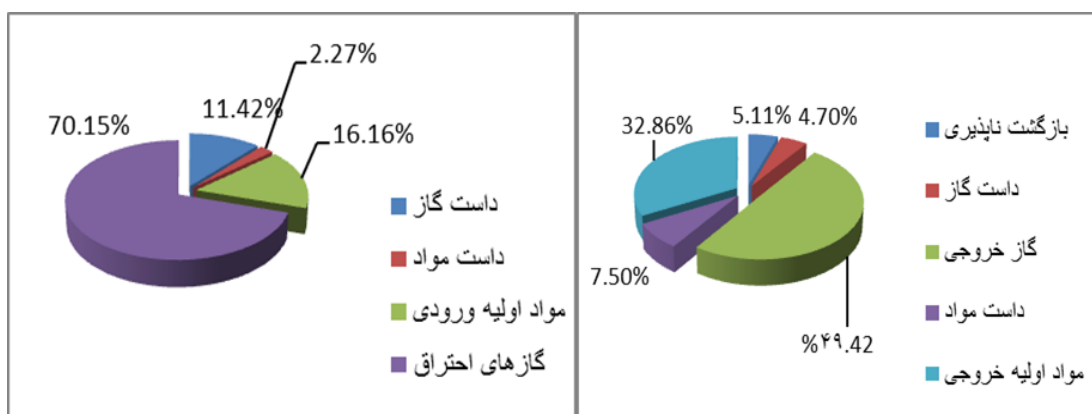
نمودار (۳-۱۷): درصد آنتالپی خروجی به آنتالپی کل
در سیکلون سوم

نمودار (۳-۱۸): درصد آنتالپی ورودی به آنتالپی کل در سیکلون سوم

جدول (۳-۴۸): تحلیل انرژی سیستم سیکلون سوم

تحلیل انرژی		واحد	H(T)	انرژی کل	درصد انرژی به انرژی کل
			KJ/Kg-Cl	KJ/Kg-Cl	%
انرژی	آنتالپی	گازهای احتراق	۷۱۲/۷۵	۱۰۱۵.۹۸	۷۰/۱۵

	ورودی	مواد اولیه ورودی	۱۶۴/۱۲		۱۶/۱۶
		داست مواد	۲۳/۰۳		۲/۲۷
		داست گاز	۱۱۶/۰۷		۱۱/۴۲
		نشتی	۰/۰۰		۰/۰۰
	آنتالپی خروجی	مواد اولیه خروجی	۳۳۳/۹۰		۳۲/۸۶
		داست مواد	۷۶/۱۵		۷/۵۰
		گاز خروجی	۵۰۶/۳۶		۴۹/۸۳
		داست گاز	۴۷/۷۸		۴/۷۰
		بازگشت ناپذیری	۵۱/۷۸		۵/۱۱



نمودار (۳-۱۹): درصد انرژی ورودی به انرژی کل در سیکلون سوم
نمودار (۳-۲۰): درصد انرژی خروجی به انرژی کل در سیکلون سوم

در سیکلون سوم بواسطه دمای پایین تر گازها و مواد نسبت به دو سیکلون اول و دوم، بازده اول افزایش می یابد.

بعلت دمای بالای گاز در سیکلون اول بازدهها بالا هستند. پس از آن در سیکلون دوم بازدهها کاهش دارند و به پایین ترین حد خود می رسند که آن بعلت دمای بالای مواد اولیه ورودی و دمای پایین گازهای ورودی می باشد. در سیکلون سوم بازدهها بعلت کاهش اختلاف دمای گازها و مواد اولیه افزایش می یابد و پیش بینی می شود در سیکلون چهارم نسبت به سیکلون سوم افزایش در بازدهها را شاهد باشیم.

۳-۶-۳ تحلیل حساسیت در سیکلون شماره ۳

در این قسمت تغییرات در هوای محیط، تغییر در دمای هوای گرم ورودی و تغییر در مواد اولیه خروجی مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۳-۶-۳-۱ تغییر در دمای محیط

تاثیر هوای محیط بر تغییرات بازگشتناپذیری، بازده قانون اول و دوم در جدول زیر نمایش داده شده است.

جدول (۳-۴۹): تاثیر دمای محیط بر تغییرات بازگشتناپذیری، بازده قانون اول و دوم

بازده قانون دوم (%)	بازده قانون اول (%)	بازگشتناپذیری (KJ/Kg-Cl)	دما (K)
۴/۷۸	۱۰/۵۹	۵۰/۸۴	۲۸۸
۴/۹۴	۱۰/۶۸	۵۱/۳۲	۲۹۳
۵/۱۰	۱۰/۷۷	۵۱/۷۸	۲۹۸
۵/۲۶	۱۰/۸۶	۵۲/۲۵	۳۰۳
۵/۴۳	۱۰/۹۵	۵۲/۷۱	۳۰۸

۳-۶-۳-۲ تغییر در دمای هوای گرم ورودی

تاثیر هوای گرم ورودی بر تغییرات بازگشتناپذیری، بازده قانون اول و دوم در جدول زیر نمایش داده شده است.

جدول (۳-۵۰): تاثیر دمای هوای گرم ورودی بر تغییرات بازگشتناپذیری، بازده قانون اول و دوم

بازده قانون دوم (%)	بازده قانون اول (%)	بازگشتناپذیری (KJ/Kg-Cl)	دما (K)
۳/۸۴	۱۰/۸۴	۳۸/۴۸	۹۳۰
۴/۷۴	۱۰/۷۹	۴۷/۹۸	۹۳۵
۵/۶۳	۱۰/۷۳	۵۷/۵۰	۹۴۰
۶/۵۰	۱۰/۶۸	۶۷/۰۵	۹۴۵
۷/۳۶	۱۰/۶۳	۷۶/۶۲	۹۵۰

۳-۳-۶-۳ تغییر در دمای مواد اولیه خروجی

تاثیر مواد اولیه خروجی بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم در جدول زیر نمایش داده شده است.

جدول (۵۱-۳): تاثیر دمای مواد اولیه خروجی بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم

بازده قانون دوم (%)	بازده قانون اول (%)	بازگشت‌ناپذیری (KJ/Kg-Cl)	دما (K)
۶/۳۷	۱۰/۱۵	۶۴/۷۱	۷۷۰
۵/۷۳	۱۰/۴۶	۵۸/۲۶	۷۷۵
۵/۱۰	۱۰/۷۷	۵۱/۷۸	۷۸۰
۴/۴۶	۱۱/۰۷	۴۵/۲۸	۷۸۵
۳/۸۱	۱۱/۳۸	۳۸/۷۶	۷۹۰

۴-۳-۶-۳ تغییرات بازگشت‌ناپذیری

همانگونه که از جداول مشخص می‌باشد، با افزایش دمای محیط، میزان بازگشت‌ناپذیری‌ها در سیکلون سوم افزایش می‌یابد.

با افزایش دمای هوای گرم ورودی، میزان بازگشت‌ناپذیری‌ها در سیکلون سوم افزایش می‌یابد و با افزایش دمای مواد اولیه خروجی، میزان بازگشت‌ناپذیری‌ها در سیکلون سوم کاهش می‌یابد.

۵-۳-۶-۳ تغییرات بازده قانون اول

همانگونه که از جداول مشخص می‌باشد، با افزایش دمای محیط، بازده قانون اول افزایش می‌یابد. با افزایش دمای هوای گرم ورودی، بازده قانون اول افزایش می‌یابد و با افزایش دمای مواد اولیه خروجی، بازده قانون اول افزایش می‌یابد.

۶-۳-۶-۳ تغییرات بازده قانون دوم

همانگونه که از جداول مشخص می‌باشد، با افزایش دمای هوای گرم ورودی، بازده قانون دوم

افزایش می‌یابد. این امر بواسطه افزایش در میزان انرژی ورودی سیستم می‌باشد.

با افزایش دمای محیط، بازده قانون دوم افزایش می‌یابد و با افزایش دمای مواد اولیه خروجی، بازده

قانون دوم کاهش می‌یابد. این امر بواسطه افزایش انرژی خروجی می‌باشد

۷-۳-۶-۳ جمع بندی سیکلون سوم

با انجام محاسبات و بر طبق جداول پیشین جدول زیر بدست می‌آید:

جدول (۳-۵۲): جمع بندی سیکلون سوم

سیکلون سوم			
تغییر در دمای محیط			
تغییر در بازگشت‌ناپذیری، بازده اول و دوم	$\frac{\Delta I}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \eta}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \psi}{\Delta T}$
	۰/۰۹۴	۰/۰۱۸	۰/۰۳۲
تغییر در دمای هوای گرم ورودی			
تغییر در بازگشت‌ناپذیری، بازده اول و دوم	$\frac{\Delta I}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \eta}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \psi}{\Delta T}$
	۱/۹۰۷	-۰/۰۱۱	۰/۱۷۶
تغییر در دمای مواد اولیه خروجی			
تغییر در بازگشت‌ناپذیری، بازده اول و دوم	$\frac{\Delta I}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \eta}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \psi}{\Delta T}$
	-۱/۲۹۸	۰/۰۶۲	-۰/۱۲۸

همانگونه که از جدول مشخص است، تغییر در دمای محیط باعث ایجاد تغییرات بیشتری در بازده

دوم می‌گردد و این، بعنوان حساس‌ترین پارامتر در مقابل این تغییرات عمل می‌نماید.

تغییر در دمای هوای گرم ورودی تاثیر منفی بر بازده اول دارد و تاثیر آن بر بازده دوم مثبت و قابل

توجه است.

تغییر در دمای مواد اولیه خروجی نسبت به بازده دوم حساس‌تر است و تغییرات آن باعث ایجاد

تغییرات منفی در آن می‌گردد.

۷-۳ سیکلون شماره ۴

۱-۷-۳ مطالعه موردی

برای مطالعه سیستم سیکلون ۴ اطلاعات زیر در دسترس می‌باشد

جدول (۳-۵۳): مشخصات سیکلون چهارم

سیکلون شماره ۴			
گازهای ورودی	K	دما	۸۰۰/۰۰
	Kpa	فشار	۹۶/۲۳
	m ³ /Kg-Cl	دبی	۱/۳۸
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۲/۵۰
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۱۵۶۹/۰۰
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۳۱۴/۰۰
مواد اولیه ورودی	K	دما	۳۵۳/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۱/۱۹
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۶۵/۴۵
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۰/۰۰
داست ورودی با مواد اولیه	K	دما	۳۵۳/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۰/۰۸
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۴/۴۰
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۰/۰۰
داست ورودی با گاز	K	دما	۸۰۰/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۰/۲۲
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۱۱۸/۴۴
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۸/۰۰
هوای نشتی	K	دما	۲۹۸/۰۰
	Kpa	فشار	۱۰۱/۳۳
	m ³ /Kg-Cl	دبی	۰/۰۴
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۱/۳۰
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۱/۰۰
مواد اولیه خروجی	K	دما	۶۰۵/۰۰

	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۱/۷۲
	KJ/Kg.Cl	آنتالپی	۵۲۸/۰۴
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۰/۰۰
داست خروجی با مواد	K	دما	۶۰۵/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۰/۲۳
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۷۵/۶۱
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۵/۰۰
گاز خروجی	K	دما	۶۱۸/۰۰
	Kpa	فشار	۹۳/۰۹
	m ³ /Kg-Cl	دبی	۱/۴۶
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۲/۵۳
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۱۱۱۵/۶۰
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۳۰۶/۰۰
داست خروجی با گاز	K	دما	۶۱۸/۰۰
	KJ/Kg-Cl.K	گرمای ویژه	۰/۱۰
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی	۳۲/۰۰
	KJ/Kg-Cl	آنتالپی اولیه	۰/۰۰
محیط	K	دمای محیط	۲۹۸/۰۰
	KPa	فشار محیط	۱۰۱/۳۳

در نتیجه داریم:

جدول (۳-۵۴): بقای انرژی در سیکلون چهارم

بقای انرژی	Hi-He-Loss=0	ΣHe	ΣHi
		۱۷۵۱/۲۵	۱۷۵۸/۲۹
اتلافات	(KJ/Kg-Cl) Loss	۷/۰۴	

جدول (۳-۵۵): تحلیل قانون دوم در سیستم سیکلون چهارم

تحلیل انرژی		H(T)	H(T ₀)	ΔS	X
	واحد	KJ/Kg-Cl	KJ/Kg-Cl	KJ/Kg-Cl.K	KJ/Kg-Cl
	گازهای احتراق	۱۵۶۹/۰۰	۳۱۴/۰۰	۲/۴۸	۵۱۶/۷۵
	مواد اولیه ورودی	۶۵/۴۵	۰/۰۰	۰/۲۰	۵/۳۹
	داست مواد	۴/۴۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۳۶

	داست گاز	۱۱۸/۴۴	۸/۰۰	۰/۲۲	۴۵/۷۰	
	نشتی	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	
	جمع ورودی	۱۷۵۸/۲۹	۳۲۳/۰۰	۲/۹۱	۵۶۸/۱۹	
	مواد اولیه خروجی	۵۲۸/۰۴	۰/۰۰	۱/۲۲	۱۶۵/۰۸	
	داست مواد	۷۵/۶۱	۵/۰۰	۰/۱۶	۲۲/۰۷	
	گاز خروجی	۱۱۱۵/۶۰	۳۰۶/۰۰	۱/۸۵	۲۵۹/۶۸	
	داست گاز	۳۲/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۷	۱۰/۲۶	
	جمع خروجی	۱۷۵۱/۲۵	۳۱۱/۰۰	۳/۳۰	۴۵۷/۱۰	
	Xi-Xe					۱۱۱/۱۰
	کار برگشت پذیر = بازگشت ناپذیری					

جدول (۳-۵۶): تحلیل بازده سیکلون چهارم

تحلیل بازدهی	بازده قانون اول	درصد
	۲۶/۳۱	
	بازده قانون دوم	
	۱۹/۵۵	

با تحلیل نتایج به موارد زیر می‌رسیم:

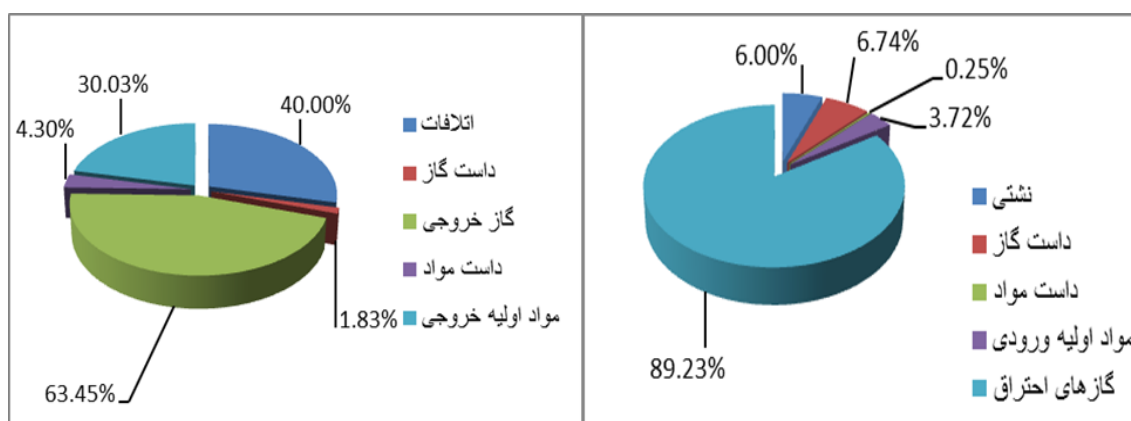
۲-۷-۳ تحلیل سیکلون چهارم

۱-۲-۷-۳ تحلیل انرژی

جدول (۳-۵۷): تحلیل انرژی سیستم سیکلون چهارم

تحلیل انرژی			H(T)	آنتالپی کل	درصد نسبت آنتالپی به آنتالپی کل
		واحد	KJ/Kg-Cl	KJ/Kg-Cl	%
	آنتالپی ورودی	گازهای احتراق	۱۵۶۹/۰۰	۱۷۵۸/۲۹	۸۹/۲۳
		مواد اولیه ورودی	۶۵/۴۵		۳/۷۲
		داست مواد	۴/۴۰		۰/۲۵
		داست گاز	۱۱۸/۴۴		۶/۷۴
		نشتی	۱/۰۰		۰/۰۶

	آنتالپی خروجی	مواد اولیه خروجی	۰/۰۶		۳۰/۰۳
		داست مواد	۷۵/۶۱		۴/۳۰
		گاز خروجی	۱۱۱۵/۶۰		۶۳/۴۵
		داست گاز	۳۲/۰۰		۱/۸۲
		اتلافات	۷/۰۴		۰/۴۰



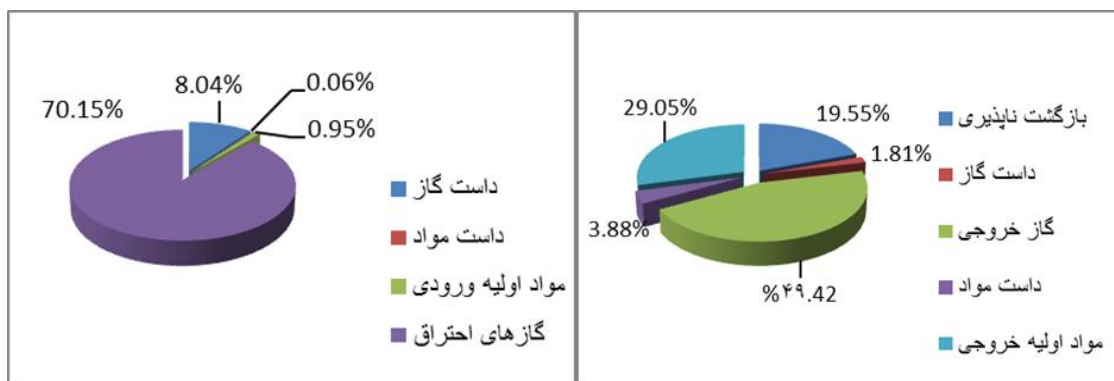
نمودار (۳-۲۱): درصد آنتالپی ورودی به آنتالپی کل در سیکلون چهارم
نمودار (۳-۲۲): درصد آنتالپی خروجی به آنتالپی کل در سیکلون چهارم

۳-۲-۲-۲ تحلیل انرژی

جدول (۳-۵۸): تحلیل انرژی سیستم سیکلون چهارم

			H(T)	انرژی کل	درصد انرژی به انرژی کل
					%
تحلیل انرژی	آنتالپی ورودی	واحد	KJ/Kg-Cl	KJ/Kg-Cl	
		گازهای احتراق	۵۱۶/۷۵	۵۶۸/۱۹	۹۰/۹۵
		مواد اولیه ورودی	۵/۳۹		۰/۹۵
		داست مواد	۰/۳۶		۰/۰۶
		داست گاز	۴۵/۷۰		۸/۰۴
		نشتی	۰/۰۰		۰/۰۰
	آنتالپی خروجی	مواد اولیه	۱۶۵/۰۸	۵۶۸/۱۹	۲۹/۰۵
		خروجی	۲۲/۰۷		۳/۸۸
		گاز خروجی	۲۵۹/۶۸		۴۵/۷۱
		داست گاز	۱۰/۲۶		۱/۸۱

۱۹/۵۵	۱۱۱/۱۰	بازگشت ناپذیری	
-------	--------	----------------	--



نمودار (۳-۲۴): درصد انرژی خروجی به انرژی کل در سیکلون چهارم
نمودار (۳-۲۳): درصد انرژی ورودی به انرژی کل در سیکلون چهارم

همانگونه که پیش بینی می شد بازده اول و دوم در سیکلون چهارم افزایش یافتند. برای جمع بندی رفتار سیکلون ها جدول زیر را می آوریم.

۳-۷-۳ تحلیل حساسیت در سیکلون شماره ۴

در این قسمت تغییرات در هوای محیط، تغییر در دمای هوای گرم ورودی و تغییر در مواد اولیه خروجی مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۳-۷-۳-۱ تغییر در دمای محیط

تاثیر هوای محیط بر تغییرات بازگشت ناپذیری، بازده قانون اول و دوم در جدول زیر نمایش داده شده است.

جدول (۳-۵۹): تاثیر دمای محیط بر تغییرات بازگشت ناپذیری، بازده قانون اول و دوم

بازده قانون دوم (%)	بازده قانون اول (%)	بازگشت ناپذیری (KJ/Kg-Cl)	دما (K)
۱۷/۹۱	۲۶/۰۲	۱۰۷/۱۰	۲۸۸
۱۸/۷۲	۲۶/۱۶	۱۰۹/۱۲	۲۹۳
۱۹/۵۵	۲۶/۳۱	۱۱۱/۱۰	۲۹۸
۲۰/۴۱	۲۶/۴۶	۱۱۳/۰۲	۳۰۳

۳۰۸	۱۱۴/۸۹	۲۶/۶۱	۲۱/۲۹
-----	--------	-------	-------

۲-۳-۷-۳ تغییر در دمای هوای گرم ورودی

تاثیر هوای گرم ورودی بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم در جدول زیر نمایش داده شده است.

جدول (۳-۶۰): تاثیر دمای هوای گرم ورودی بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم

بازده قانون دوم (%)	بازده قانون اول (%)	بازگشت‌ناپذیری (KJ/Kg-Cl)	دما (K)
۱۹/۵۵	۲۶/۳۱	۱۱۱/۱۰	۸۰۰
۲۰/۷۵	۲۶/۱۱	۱۱۹/۶۶	۸۰۵
۲۱/۹۱	۲۵/۹۱	۱۲۸/۲۶	۸۱۰
۲۳/۰۵	۲۵/۷۱	۱۳۶/۸۹	۸۱۵
۲۴/۱۵	۲۵/۵۲	۱۴۵/۵۴	۸۲۰

۳-۳-۷-۳ تغییر در دمای هوای مواد اولیه خروجی

تاثیر مواد اولیه خروجی بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم در جدول زیر نمایش داده شده است.

جدول (۳-۶۱): تاثیر دمای مواد اولیه خروجی بر تغییرات بازگشت‌ناپذیری، بازده قانون اول و دوم

بازده قانون دوم (%)	بازده قانون اول (%)	بازگشت‌ناپذیری (KJ/Kg-Cl)	دما (K)
۲۲/۹۸	۲۴/۳۵	۱۳۰/۵۶	۵۸۵
۲۲/۱۳	۲۴/۸۴	۱۲۵/۷۶	۵۹۰
۲۱/۲۸	۲۵/۳۳	۱۲۰/۹۱	۵۹۵
۲۰/۴۲	۲۵/۸۲	۱۱۶/۰۲	۶۰۰
۱۹/۵۵	۲۶/۳۱	۱۱۱/۱۰	۶۰۵

۴-۳-۷-۳ تغییرات بازگشت ناپذیری

همانگونه که از جداول مشخص می‌باشد، با افزایش دمای محیط، میزان بازگشت ناپذیری‌ها در سیکلون چهارم افزایش می‌یابد.

با افزایش دمای هوای گرم ورودی، میزان بازگشت ناپذیری‌ها در سیکلون چهارم افزایش می‌یابد و با افزایش دمای مواد اولیه خروجی، میزان بازگشت ناپذیری‌ها در سیکلون چهارم کاهش می‌یابد.

۵-۳-۷-۳ تغییرات بازده قانون اول

همانگونه که از جداول مشخص می‌باشد، با افزایش دمای محیط، بازده قانون اول افزایش می‌یابد. با افزایش دمای هوای گرم ورودی، بازده قانون اول کاهش می‌یابد و با افزایش دمای مواد اولیه خروجی، بازده قانون اول افزایش می‌یابد.

۶-۳-۷-۳ تغییرات بازده قانون دوم

همانگونه که از جداول مشخص می‌باشد، با افزایش دمای محیط، بازده قانون دوم افزایش می‌یابد. با افزایش دمای هوای گرم ورودی، بازده قانون دوم افزایش می‌یابد. این امر بواسطه افزایش اگزرژی ورودی می‌باشد و با افزایش دمای مواد اولیه خروجی، بازده قانون دوم کاهش می‌یابد. این امر بواسطه افزایش اگزرژی خروجی می‌باشد.

۷-۳-۷-۳ جمع بندی سیکلون چهارم

با انجام محاسبات و بر طبق جداول پیشین جدول زیر بدست می‌آید:

جدول (۶۲-۳): جمع بندی سیکلون چهارم

کوره			
تغییر در دمای محیط			
	$\frac{\Delta I}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \eta}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \psi}{\Delta T}$

تغییر در بازگشت‌ناپذیری، بازده اول و دوم	۰/۳۹۰	۰/۰۳۰	۰/۱۶۹
تغییر در دمای هوای گرم ورودی			
تغییر در بازگشت‌ناپذیری، بازده اول و دوم	$\frac{\Delta I}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \eta}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \psi}{\Delta T}$
	۱/۷۲۲	-۰/۰۳۹	۰/۲۳۰
تغییر در دمای مواد اولیه خروجی			
تغییر در بازگشت‌ناپذیری، بازده اول و دوم	$\frac{\Delta I}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \eta}{\Delta T}$	$\frac{\Delta \psi}{\Delta T}$
	-۰/۹۷۳	۰/۰۹۸	-۰/۱۷۱

همانگونه که از جدول مشخص است، تغییر در دمای محیط باعث ایجاد تغییرات بیشتری در بازده دوم می‌گردد و این، بعنوان حساس‌ترین پارامتر در مقابل این تغییرات عمل می‌نماید.

تغییر در دمای هوای گرم ورودی تاثیر منفی بر بازده اول دارد و تاثیر آن بر بازده دوم بیشتر و قابل توجه تر است. موثرترین خاصیت از نظر بازده قانون اول دمای مواد اولیه خروجی در جهت مثبت و تغییر دمای هوای گرم ورودی در جهت منفی می‌باشد. افزایش دمای هوای گرم ورودی بیشترین تاثیر مثبت را بر بازده دوم دارد.

۳-۷-۴ جمع بندی رفتار سیکلون‌ها

جدول (۳-۶۳): جمع بندی رفتار سیکلون‌ها

نام تجهیزات	انتالپی مواد ورودی	انتالپی گازهای ورودی	اختلاف انتالپی ها	بازده اول	اگرژی مواد ورودی	اگرژی گازهای ورودی	اختلاف اگرژی ها	بازده دوم
سیکلون اول	۱۰۶۲/۹۶	۲۹۹۱/۴۵	۱۹۲۸/۴۹	۱۷/۳۳	۴۸۸/۰۹	۱۷۱۲/۰۱	۱۲۲۳/۹۲	۲۹/۳۰
سیکلون دوم	۸۲۴/۲۲	۲۰۷۰/۱۹	۱۲۴۵/۹۷	۶/۱۲	۳۳۳/۹۰	۹۲۰/۳۶	۵۸۶/۴۶	۴/۴۵
سیکلون سوم	۵۲۴/۹۷	۱۸۴۶/۶۰	۱۳۲۱/۶۳	۱۰/۷۷	۱۶۴/۱۲	۷۱۲/۷۵	۵۴۸/۶۳	۵/۱۰
سیکلون	۶۵/۴۵	۱۵۶۹/۰۰	۱۵۰۳/۵۵	۲۶/۳۱	۵/۳۹	۵۱۶/۷۵	۵۱۱/۳۶	۱۹/۵۵

چهارم								
-------	--	--	--	--	--	--	--	--

جدول اختلاف دمایی در سیکلونها بصورت زیر خواهد بود:

جدول (۳-۶۴): اختلاف دماها در سیکلون‌ها

نام تجهیزات	دمای مواد ورودی (K)	دمای گازهای ورودی (K)	اختلاف دماها
سیکلون اول	۹۳۷	۱۶۸۳	۷۴۶
سیکلون دوم	۷۸۰	۱۰۸۳	۳۰۳
سیکلون سوم	۶۰۵	۹۳۷	۳۳۲
سیکلون چهارم	۳۵۳	۸۰۰	۴۴۷

با توجه به دو جدول بالا براحتی می توان رفتار سیکلون‌ها را تفسیر نمود. بخاطر تاثیر نسبتا زیاد داست‌ها در سیکلون اول بازده قانون اول آن علیرغم اختلاف دمایی و اختلاف آنتالپی بالا، نسبت به سیکلون چهارم کمتر است.

۳-۸ بازده کلی انرژی و انرژی

بازده انرژی و انرژی در هر یک از تجهیزات محاسبه شد. حال برای محاسبه بازده کلی انرژی و انرژی بترتیب زیر عمل می‌نماییم:

جدول (۳-۶۵): بازده کلی قانون اول در کارخانه

نام تجهیزات	بازده قانون اول	آنتالپی کل ورودی	حاصلضرب آنتالپی در بازده
کولر	۴۴/۹۰	۳۱۲۱/۳۱	۱۴۰۱۴۶/۸۲
کوره و متعلقات	۱۶/۳۵	۶۵۷۷/۶۵	۱۰۷۵۴۴/۵۸
سیکلون اول	۱۷/۳۳	۵۰۶۶/۶۵	۸۷۸۰۵/۰۴
سیکلون دوم	۶/۱۲	۳۹۰۸/۶۴	۲۳۹۲۰/۸۸
سیکلون سوم	۱۰/۷۷	۲۷۷۹/۴۶	۲۹۹۳۴/۷۸
سیکلون چهارم	۲۶/۳۱	۱۷۵۸/۲۹	۴۶۲۶۰/۶۱
مجموع		۲۳۲۱۲/۰۰	۴۳۵۶۱۲/۷۱

بنابراین بازده قانون اول بصورت زیر بدست می آید:

$$\eta_{\text{tot}} = \frac{435612.71}{23212} = \%18.77$$

برای بدست آوردن بازده دوم داریم:

جدول (۳-۶۶): بازده کلی قانون دوم در کارخانه

نام تجهیزات	بازده قانون دوم	اگزرژی کل ورودی	حاصلضرب اگزرژی در بازده
کولر	۴۱/۹۲	۹۲۴/۰۲	۳۸۷۳۴/۹۲
کوره و متعلقات	۳۹/۶۳	۴۵۰۱/۵۴	۱۷۸۳۹۶/۰۳
سیکلون اول	۲۹/۳۰	۲۴۴۷/۴۸	۷۱۷۱۱/۱۶
سیکلون دوم	۴/۴۵	۱۵۳۸/۶۵	۶۸۴۶/۹۹
سیکلون سوم	۵/۱۰	۱۰۱۵/۹۸	۵۱۸۱/۵۰
سیکلون چهارم	۱۹/۵۵	۵۶۸/۱۹	۱۱۱۰۸/۱۱
مجموع		۱۰۹۹۵/۸۶	۳۱۱۹۷۸/۷۲

بنابراین بازده قانون دوم بصورت زیر بدست می آید:

$$\psi_{\text{tot}} = \frac{311978.72}{10995.86} = \%28.37$$

فصل چهارم: بررسی فرایندهای بازیافت

۴-۱ مقدمه:

در فصول قبل متوجه شدیم مهم‌ترین منابع اتلاف حرارتی برای بازیافت در صنعت سیمان عبارتند از:

(۱) هوای داغ خروجی از خنک کن کوره

(۲) گرمای جداره کوره

(۳) گازهای داغ خروجی از پیش‌گرمکن

هر چند این منابع کاربردهای دیگری نیز در واحد تولید سیمان دارند چنانکه گازهای داغ خروجی از پیش‌گرمکن برای خشک کردن مواد اولیه، پس از خردایش در آسیاب مواد اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرد (این کاربرد در واحدهای تولید سیمان متداول بوده و در واحد سیمان شاهرود نیز به همین ترتیب می‌باشد).

۴-۱-۱ بررسی مطالعات گذشته

مطالعات متعددی در رابطه با بازیابی انرژی از حرارت اتلافی در صنعت سیمان و تولید الکتریسته صورت گرفته است به عنوان مثال آقایان انگین و آری میزان توان تولیدی خالص را در یک واحد ۶۰۰ تنی در روز را یک مگاوات گزارش کرده‌اند [14]. بنا به مطالعات آقای خورانا و همکاران نیز میزان توان تولیدی برای یک واحد تولید سیمان ۳۸۰۰ تنی در روز ۶/۴ مگاوات است [13]. وجه مشترک این مطالعات و مطالعات مشابه دیگر عدم بررسی دقیق چرخه تولید توان و میزان اتلافات انرژی و انرژی در فرایند تولید الکتریسته است.

اما آقای وانگ و همکاران چرخه های توانی را با تفصیل بیش تری بررسی کرده اند. نتایج این مطالعه در مورد چرخه‌های مختلف بازیافت حرارت و تولید توان در یک واحد تولید سیمان ۵۰۰۰ تنی

در روز که مجهز به کوره و پیش گرمکن ۴ مرحله ای است نشان می دهد که چرخه بخار با تبخیر ناگهانی با بازده حرارتی یا انرژی ۲۵/۷٪ بهترین عملکرد را از نقطه نظر انرژی دارد [22]. وجه مشترک این مطالعه و برخی مطالعات پیشین نیز عدم در نظر گرفتن حرارتی اتلافی از جداره کوره دوار که حجم قابل توجهی از اتلافات را در بر می گیرد، می باشد.

۲-۴ محاسبه میزان گرمای اتلافی

۱-۲-۴ گرمای اتلافی از جداره کوره

توزیع دما در نقاط مختلف کوره مطالعه در جدول (۱-۴) آورده شده است.

جدول (۱-۴): توزیع دما در نقاط مختلف کوره

۲۷۰-۲۸۰-۲۹۰-۲۷۰	از ابتدای کوره تا رینگ اول	دمای بدنه کوره T (°C)
۲۸۰-۲۹۰-۳۰۰-۳۳۰-۳۲۰	از رینگ اول تا رینگ دوم	
۳۳۰-۳۴۰-۳۲۰-۳۴۰-۳۱۰	از رینگ دوم تا انتها	

نحوه ی محاسبه و میزان گرمای اتلافی کوره در جدول (۲-۴) بیان گردیده است.

جدول (۲-۴): میزان گرمای اتلافی از کوره

میزان اتلافات KJ/Kg-Cl	داده ها	روابط استفاده شده	منبع
۳۸۶	$\sigma = 5 / 67 \times 10^{-8} W / m^2 K^4$ $A_{ki \ln} = 565 / 48 m^2, T_s = 581 K$ $T = 288 K, m_{clin \ker} = 6 / 944 \text{ kg} / s$ $\varepsilon = 0 / 78 (oxidized \text{ suracean} [27]),$	$Q_{12} = \sigma A_{ki \ln} (T_s^4 - T_\infty^4) / 1000 \dot{m}_{clin \ker}$	تشنشع از سطح کوره
۱۷۱	$Re = 373,110 (V_{air} = 3 m / s)$ $Nu = 773 (Hilbert, s \text{ equation}, an),$ $at T_f = 280^\circ C (film \text{ temp.}) [27]$	$Q_{13} = h_{con} A_{ki \ln} (T_s - T_\infty),$ $h_{con} = \frac{k_{air}}{D_{i \ln}} Nu$	همرفتی از سطح کوره

طبق نتایج به دست آمده از جدول تلفات حرارتی ناشی از تشعشع و جابجایی برابر ۵۵۷ KJ/Kg-Cl می باشد که با توجه به میزان کلینکر تولیدی برابر با ۲۱/۲۷۴ مگاوات در نظر گرفته می شود.

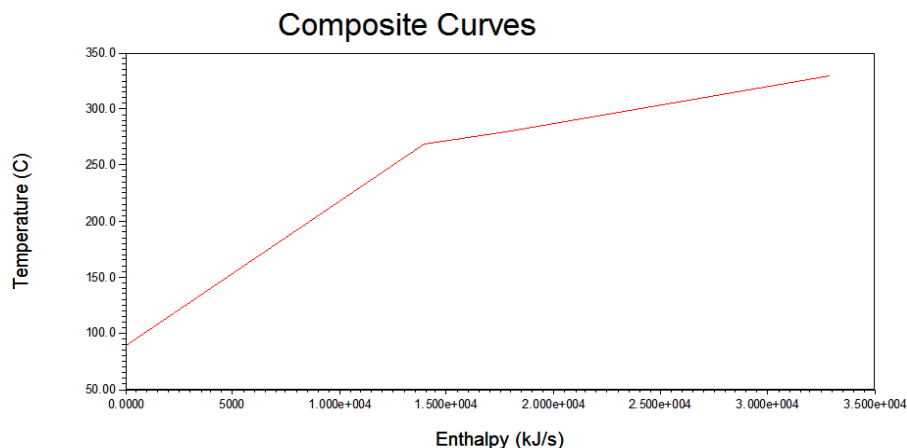
۲-۲-۴ گرمای اتلافی از کولر

نحوه‌ی محاسبه و میزان گرمای اتلافی از خنک کن در فصل چهار بیان گردیده است با توجه به اطلاعات به دست آمده در این فصل میزان گرمای قابل بازیافت که از گازهای اضافی خنک کن که با دمای 280°C بدون استفاده وارد اتمسفر می گردد، برابر با ۴۵۳ KJ/Kg-Cl می باشد که با توجه به میزان کلینکر تولیدی برابر با ۱۷/۳۳۲ مگاوات در نظر گرفته می شود.

۳-۴ بررسی سیستم های بازیافت

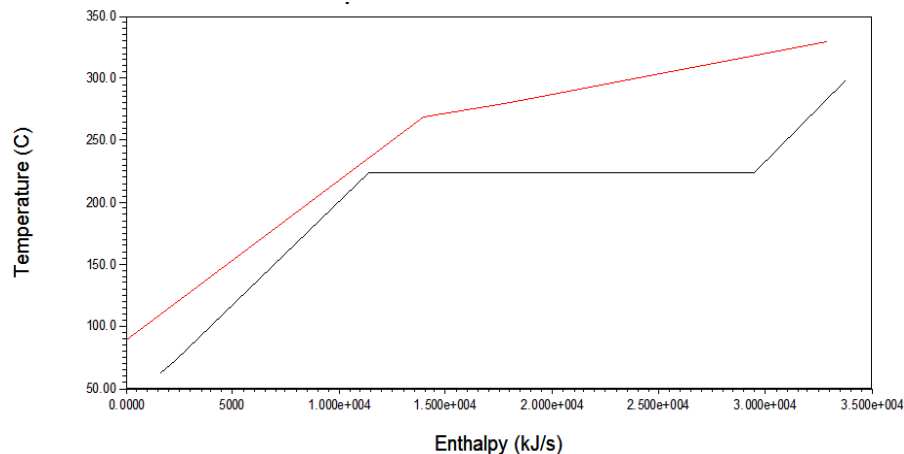
دو منبع اصلی بازیابی حرارتی در واحدهای تولید سیمان شرایط ترمودینامیکی متفاوتی دارند به همین دلیل، دو مبدل حرارتی متفاوت در چرخه های بازیابی حرارتی به کار می رود.

یکی دیگر از محدودیت های عملیاتی به منظور به کارگیری منابع اتلاف حرارتی در چرخه های تولید توان آستانه، محدودیت پایین آوردن دمای گازهای خروجی این منابع (نقطه شبنم این جریان ها) است این محدودیت در مورد گازهای داغ خروجی از کولر که عاری از گازهای حاصل از احتراق و مواد خورنده هستند به طور جدی مطرح نمی گردد و گاز های خروجی از کولر را می توان تا دمای ۹۰ درجه سانتیگراد کاهش داد.



شکل (۱-۴): منحنی جریان‌های گرم حاصل از بازیافت

شکل (۱-۴) تصویری از منحنی جریان‌های گرم حاصل از بازیافت را نشان می‌دهد. با توجه به مطالب ذکر شده در فصل دوم می‌توان فهمید در مبدل‌های حرارتی، هر اندازه اختلاف دمای جریان‌های گرم و سرم بیشتر باشد، میزان تخریب اگزورژی در مبدل نیز افزایش می‌یابد. بعلاوه می‌دانیم، در سیکل‌های توان، با افزایش دمای سیال ورودی به توربین، راندمان سیکل نیز افزایش می‌یابد. این مهم، در تولید الکتریسیته از منابع حرارتی دما پایین تنها زمانی اتفاق می‌افتد که انتقال حرارت از نوع پینچ آستانه (در محل منبع گرم) باشد. به عنوان مثال همانطور که در شکل (۲-۴) مشاهده می‌شود در صورت استفاده از سیکل رانکین ساده به عنوان سیکل بازیاب، علاوه بر اینکه در بخش‌هایی از نمودار، اختلاف دمای بالایی بین جریان‌های سرد و گرم وجود دارد، دمای خروجی سیال سرد نیز پایین‌تر از حد مطلوب می‌باشد.



شکل (۴-۲): نمونه‌ای از منحنی ترکیبی برای سیکل رانکین ساده

برای برطرف کردن این مشکل روش‌های مختلفی که برای بازیابی حرارتی و تولید الکتریسیته از منابع اتلاف حرارتی (دما پایین) پیشنهاد می‌گردد عبارتند از: الف) چرخه بخار همراه با تبخیر ناگهانی^۱ ب) چرخه بخار دو فشاری^۲ ج) چرخه کالینا^۳ د) چرخه رانکین با سیال عامل آلی^۴

جدول (۴-۳) ثابت‌های عملیاتی برای سیکل‌های پیشنهادی را نشان می‌دهد

جدول (۴-۳): ثابت‌های عملیاتی برای سیکل‌های مختلف

۸۸	حداقل کیفیت (x) مجاز برای توربین (%)
۸۵	راندمان ایزنتروپیک توربین (%)
۷۰	راندمان آیزنتروپیک پمپ (%)
۱۰	دمای نقطه‌ی پینچ (°C)

۱-۳-۴ چرخه بخار همراه با تبخیر ناگهانی

ساختار سیکل بخار تک مرحله با تبخیر ناگهانی پیشنهادی در شکل (۴-۳) نشان داده شده

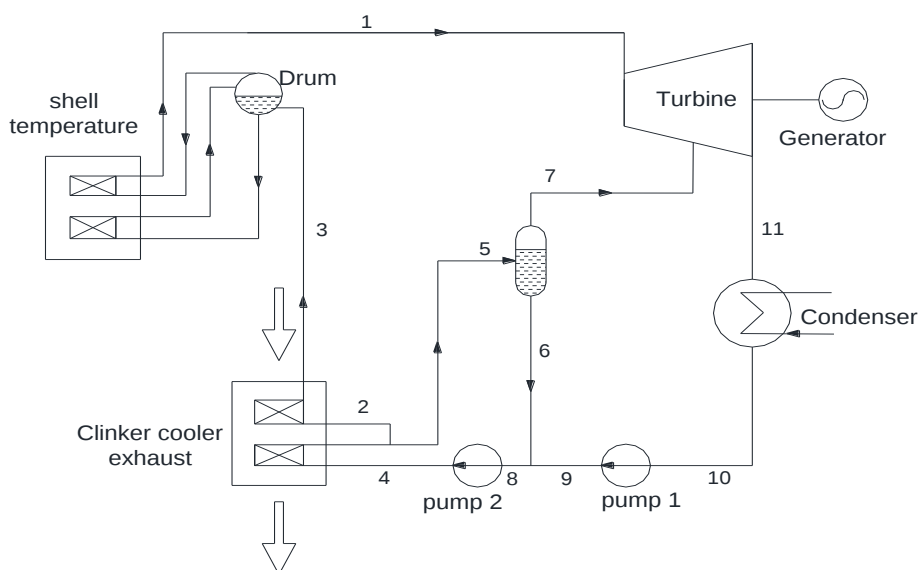
^۱ Single flash steam cycle

^۲ Dual –pressure steam cycle

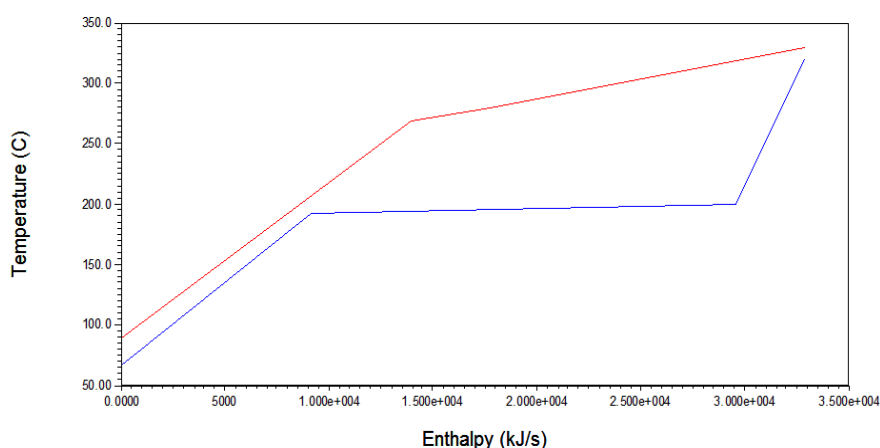
^۳ Kalina cycle

^۴ Organic Rankine cycle

است.



شکل (۳-۴): ساختار سیکل بخار تک مرحله با تبخیر ناگهانی پیشنهاد



شکل (۴-۴): منحنی‌های ترکیبی سیکل تبخیر ناگهانی

در این چرخه با اضافه کردن تانک تبخیر ناگهانی و جدا کردن بخشی از سیال سرد در فشاری پایین‌تر منحنی ترکیبی پینچ را به پینچ آستانه (در محل یوتیلیتی گرم) تبدیل می‌گردد (شکل (۴-۴)). در این چرخه سیال میعان یافته در کندانسور به کمک پمپ وارد مبدل حرارتی هوای داغ خنک‌کن می‌شود، بخشی از سیال در این مبدل پیش گرم شده و در مبدل کوره فوق داغ می‌گردد.

مابقی سیال پیش گرم شده نیز وارد تانک تبخیر ناگهانی و بخار اشباع تولید می‌گردد. در تبخیر ناگهانی حجم مشخصی از بخار بواسطه کاهش فشار از آب جدا می‌گردد البته با افت بیش‌تر فشار حجم بخار افزایش یافته اما توان تولیدی بخار با فشار پایین‌تر کاهش می‌یابد، با انبساط جریان‌های بخار فوق داغ و بخار اشباع تانک تبخیر ناگهانی در توربین، الکتریسیته تولید می‌گردد.

شرایط عملیاتی در بخش‌های مختلف سیکل در جدول (۴-۴)،

جدول (۴-۵) و جدول (۴-۶) آورده شده است.

جدول (۴-۴): شرایط عملیاتی در بخش‌های مختلف سیکل بخار همراه با تبخیر ناگهانی

شماره جریان	T (°C)	p (MPa)	x	h (KJ/Kg)	s (KJ/Kg K)	$\dot{m}$ (Kg/s)
۱	۳۲۰/۰۰	۱/۷	۱/۰۰۰	۳۰۷۶	۶/۹۲۹	۱۰/۶۴
۲	۱۹۹/۳	۱/۷	۰/۰۰۰	۸۴۹/۴	۲/۳۲	۱۰/۶۴
۳	۲۰۴/۳	۱/۷	۰/۲۶۲	۱۳۷۷	۲/۳۷۲	۱۰/۶۴
۴	۶۳/۵	۱/۷	۰/۰۰۰	۲۶۷/۵	۰/۸۷۴۹	۱۵/۶۷
۵	۱۹۹/۳	۱/۷	۰/۰۰۰	۸۴۹/۳۷	۲/۳۲۴۱	۵/۰۳۵
۶	۱۴۰/۸	۰/۳۷	۰/۰۰۰	۵۹۲/۸	۱/۷۴۸	۴/۴۳۴
۷	۱۴۰/۸	۰/۳۷	۱/۰۰۰	۲۷۳۴	۶/۹۲۲	۰/۶۰۱۶
۸	۶۳/۱۷	۰/۳۷	۰/۰۰۰	۲۶۴/۷	۰/۸۷۰۵	۱۵/۶۷
۹	۳۲/۲۲	۰/۳۷	۰/۰۰۰	۱۳۵/۳	۰/۴۶۷۲	۱۱/۲۴
۱۰	۳۲/۱۶	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰	۱۳۴/۷	۰/۴۶۶۵	۱۱/۲۴
۱۱	۳۶/۱۶	۰/۰۰۶	۰/۹۰۰	۲۳۲۵	۷/۴۹۲۷	۱۱/۲۴

جدول (۴-۵): جزئیات عملکرد سیکل بخار همراه با تبخیر ناگهانی

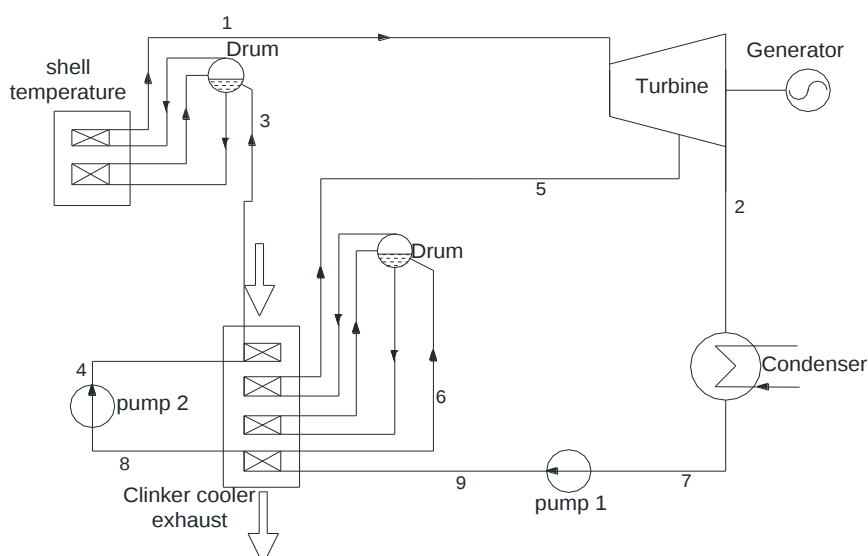
توان تولیدی توربین	۷۰۰۵
توان مورد نیاز پمپ ۱	۶/۵۲
توان مورد نیاز پمپ ۲	۴۳/۵۶
توان خروجی مفید	۶۹۵۵
بازده انرژی سیکل (%)	۲۱/۱۹
بازده اگزرژی سیکل (%)	۴۹/۶۶

جدول (۴-۶): میزان انرژی ورودی و خروجی و تخریب انرژی در اجزای مختلف سیکل بخار همراه با تبخیر ناگهانی

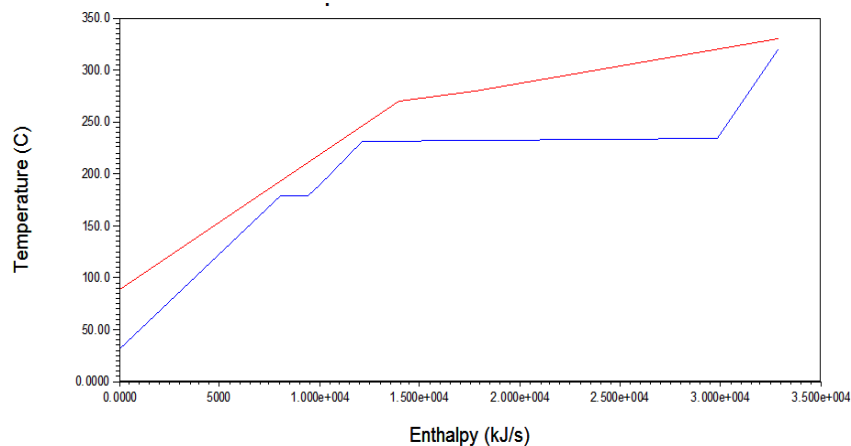
	تجهیزات	مقدار (KW)	(%)
انرژی ورودی	جداره کوره	۸۷۵۷	۶۲/۶
	خنک کن	۵۲۴۷	۳۷/۴
	مجموع	۱۴۰۰۴	۱۰۰/۰
انرژی خروجی	توان خروجی	۶۹۵۵	۴۹/۶۶
تخریب انرژی	مبدل کوره	۱۳۵۸/۳۸	۹/۷
	مبدل خنک کن	۱۱۲۸/۷	۸/۰۶
	توربین	۲۳۳۳/۰۶	۱۶/۶۶
	کندانسور	۱۹۸۱/۵	۱۴/۱۵
	پمپ ۱	۲/۹	۰/۰
	پمپ ۲	۲۳/۸	۰/۱۷
	فلاشر	۷۴/۲۲	۰/۵۳
	تداخل جریان ۶ و ۹	۲۲۵/۴۶	۱/۶۱

۲-۳-۴ چرخه بخار دو فشاری

ساختار سیکل بخار دو فشاری پیشنهادی در شکل (۴-۵) نشان داده شده است.



شکل (۴-۵): ساختار سیکل بخار دو فشاره پیشنهادی



شکل (۴-۶): منحنی‌های ترکیبی سیکل بخار دو فشاری پیشنهادی

در چرخه دو فشاری با جدا کردن بخشی از سیال سرد در فشاری پایین‌تر و ما فوق گرم کردن و فرستادن آن به توربین در این فشار، منحنی ترکیبی پینچ را به پینچ آستانه (در محل منبع حرارتی گرم) تبدیل می‌گردد (شکل (۴-۶)). جریان بخار ورودی به توربین در دو سطح فشاری تولید می‌گردد. در این چرخه نیز سیال میعان یافته با عبور از پمپ فشار پایین‌تر وارد مبدل هوای داغ خنک‌کن شده و پیش گرم می‌شود. بخشی از سیال پیش گرم شده در همین مبدل و همان فشار اولیه فوق داغ شده و به عنوان بخار با فشار پایین‌تر وارد توربین می‌گردد بخشی دیگر از سیال پیش گرم شده نیز با عبور از پمپ فشار بالا در مبدل هوای داغ خنک‌کن و البته فشاری بالاتر فوق داغ می‌گردد. در نهایت انبساط مخلوط بخارهای فوق داغ شده در توربین منجر به تولید توان می‌گردد.

شرایط عملیاتی در بخش‌های مختلف سیکل بخار دو فشاری در جدول (۴-۷)، جدول (۴-۸) و جدول (۴-۹) آورده شده است.

جدول (۴-۷): شرایط عملیاتی در بخش‌های مختلف سیکل بخار دو فشاری

شماره جریان	T (°C)	p (MPa)	x	h (KJ/Kg)	s (KJ/Kg.K)	m (Kg/s)
۱	۳۲۰	۴/۵۰۰	۱/۰	۳۰۰۰	۶/۳۸	۱۰/۸۴

۲	۳۶/۱۷	۰/۰۰۶	۰/۹	۲۳۲۵	۷/۵۴۸	۱۱/۵
۳	۲۵۷/۵	۴/۵	۰/۱۲۴۸	۱۳۳۱	۲/۸۶۱	۱۰/۸۴
۴	۱۶۶/۹	۴/۵	۱/۰	۷۰۷/۹	۲/۰۰۷	۱۰/۸۴
۵	۱۸۹	۰/۸۱۲	۱/۰	۲۸۱۳	۶/۷۵۳	۰/۶۶۶
۶	۱۶۶	۰/۸۱۲	۰/۰۰۰	۷۰۲	۲/۰۰۳	۰/۶۶۶
۷	۳۲/۱۶	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰	۱۳۴/۷	۰/۴۶۶۲	۱۱/۵
۸	۱۶۶	۰/۸۱۲	۰/۰۰۰	۷۰۲	۲/۰۰۳	۱۰/۸۴
۹	۳۲/۲۸	۰/۸۱۲	۰/۰۰۰	۱۳۵/۹	۰/۴۶۷۶	۱۱/۵

جدول (۴-۸): جزئیات عملکرد سیکل بخار دو فشاری

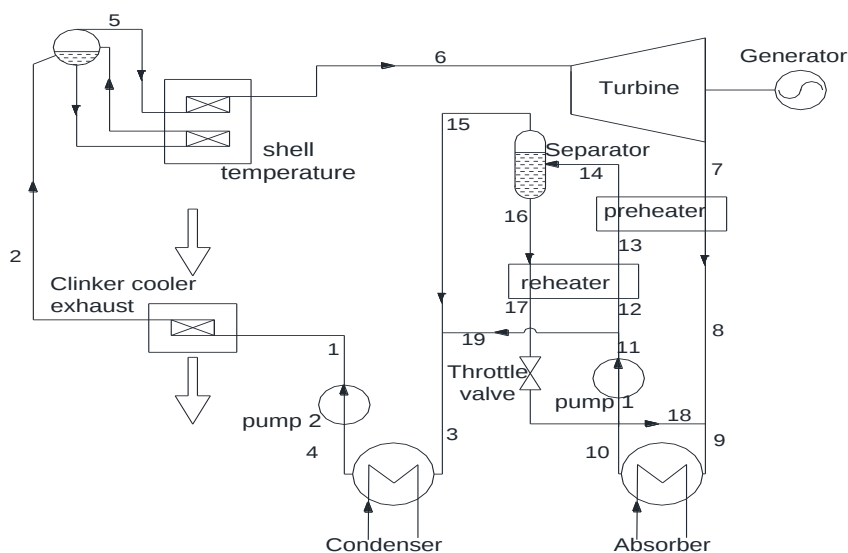
توان تولیدی توربین	۶۴۹۱
توان مورد نیاز پمپ ۱	۱۴/۱۷
توان مورد نیاز پمپ ۲	۶۴/۴۴
توان خروجی مفید	۶۴۱۲
بازده انرژی سیکل	۱۹/۵۴
بازده انرژی سیکل	۴۵/۷۹

جدول (۴-۹): میزان انرژی ورودی و تخریب انرژی در اجزای مختلف سیکل بخار دو فشاری

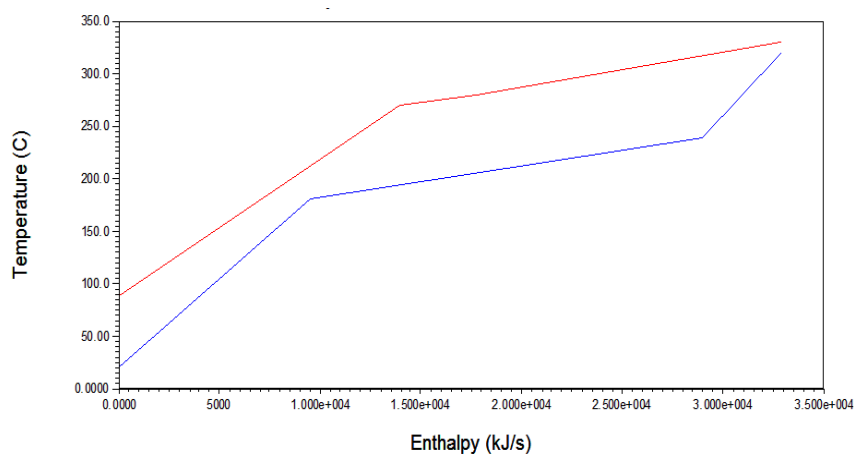
	تجهیزات	مقدار (KW)	(%)
انرژی ورودی	جداره کوره	۸۷۵۷	۶۲/۵۳
	خنک کن	۵۲۴۷	۳۷/۴۶
	مجموع	۱۴۰۰۴	۱۰۰/۰
انرژی خروجی	توان خروجی	۶۴۱۲	۴۵/۷۹
تخریب انرژی	مبدل کوره	۴۴۰/۹۱	۳/۱۴
	مبدل خنک کن	۷۸۲/۰۶	۵/۵
	توربین	۴۱۹۱/۱۹	۲۹/۹۲
	کندانسور	۲۱۶۰/۶۵	۱۵/۴۲
	پمپ ۱	۵/۶	۰/۰
	پمپ ۲	۱۰/۲۱	۰/۱

۳-۳-۴ چرخه کالینا

ساختار سیکل کالینا پیشنهادی در شکل (۷-۴) نشان داده شده است.



شکل (۷-۴): ساختار سیکل کالینا پیشنهادی



شکل (۸-۴): منحنی‌های ترکیبی سیکل کالینا پیشنهادی

در چرخه کالینا مخلوط آب و آمونیاک به عنوان سیال عامل مورد استفاده قرار می‌گیرد در این

سیکل با تغییر درصد آب و آمونیاک منحنی ترکیبی پینچ را به پینچ آستانه (در محل یوتیلیتی گرم)

تبدیل می‌گردد (شکل (۴-۸)). در این سیکل تبخیر یا میعان مخلوط در یک بازه دمایی صورت می‌گیرد و از این جهت است که طی فرایند تبادل حرارتی میزان بازگشت ناپذیری‌ها و تخریب اگزرژی بواسطه کاهش اختلاف دمای منبع گرم و منبع سرد کاهش می‌یابد.

در این چرخه مخلوط آب و آمونیاک به کمک مبدل هوای داغ خنک‌کن پیش‌گرم شده و در مبدل جداره کوره به بخار و بخار فوق داغ تبدیل می‌گردند و بخار فوق داغ در توربین منبسط می‌شود جریان خروجی از توربین در مبدل‌ها خنک شده و بعد از اختلاط با مخلوط غلیظ آب در یک جاذب و به کمک آب خنک‌کن چگالیده می‌شود.

فشار مایع اشباع خروجی از جاذب به کمک یک پمپ (تا یک سطح فشار میانی) افزایش یافته و در دو مرحله این مایع پیش‌گرم می‌شود این جریان اشباع با ورود به تانک تبخیر ناگهانی به یک جریان مایع با غلظت پایین آمونیاک تبدیل شده و سپس دما و فشار آن پایین آورده می‌شود (جریان رقیق کننده خروجی توربین) بخار با غلظت بالا از آمونیاک نیز بعد از اختلاط با بخشی از مایع اشباع پمپ شده از جاذب مخلوط گشته و در کندانسور چگالیده می‌شود. این مخلوط سیال عامل اصلی چرخه به شمار رفته و پس از افزایش فشار وارد مبدل هوای داغ خنک‌کن می‌گردد [33].

شرایط عملیاتی در بخش‌های مختلف سیکل در جداول جدول (۴-۱۰)، جدول (۴-۱۱) و جدول (۴-۱۲) آورده شده است.

جدول (۴-۱۰): شرایط عملیاتی در بخش‌های مختلف سیکل کالینا

شماره جریان	T (°C)	p (MPa)	x	h (KJ/Kg)	s (KJ/Kg.k)	m (Kg/s)	AM/WA
۱	۳۲/۱۹	۸/۶۸۰	۰/۰	-۱۳۰/۵	۰/۱۷۳۶	۱۲/۴۹	۰/۴۳
۲	۲۱۸	۸/۶۸۰	۰/۲۰۵۵	۱۰۴۹	۳/۰۹۴	۱۲/۴۹	۰/۴۳
۳	۴۳/۹۴	۱/۸۰۴	۰/۱۸۸۵	۲۶۵/۸	۱/۴۹۹	۱۲/۴۹	۰/۴۳
۴	۳۲/۱۶	۱/۸۰۴	۰/۰	-۱۴۵/۵	۰/۱۵۶	۱۲/۴۹	۰/۴۳
۵	۲۶۳	۸/۶۸۰	۱/۰	۲۳۰۴	۵/۵	۱۲/۴۹	۰/۴۳

۶	۳۲۰/۰	۸/۶۸۰	۱/۰	۲۴۹۶	۵/۸۴	۱۲/۴۹	۰/۴۳
۷	۹۰	۰/۱۳۰	۰/۹	۱۸۹۴	۶/۲۵	۱۲/۴۹	۰/۴۳
۸	۸۳/۱۴	۰/۱۳۰	۰/۶۵۹۹	۱۳۷۳	۴/۸	۱۲/۴۹	۰/۴۳
۹	۷۰	۰/۱۳۰	۰/۲۸۹۴	۶۳۳.۵	۲/۵۲۲	۲۶/۵۲	۰/۳۲۴۸
۱۰	۳۲/۱۶	۰/۱۳۰	۰/۰	-۶۵/۵	۰/۳۷۲۳	۲۶/۵۲	۰/۳۲۴۸
۱۱	۳۲/۱۹	۰/۱۸۰	۰/۰	-۴۴/۹	۰/۲۰۷۱	۲۶/۵۲	۰/۳۲۴۸
۱۲	۳۲/۱۹	۰/۱۸۰	۰/۰	-۱۱۴/۹	۰/۲۰۷۱	۱۶/۶۸	۰/۳۲۴۸
۱۳	۵۹/۶۲	۰/۱۸۰	۰/۱۴۱۲	۳۰۲	۱/۵۱۲	۱۶/۶۸	۰/۳۲۴۸
۱۴	۸۰/۵۰	۰/۱۸۰	۰/۳	۶۹۲/۳	۲/۶۵۴	۱۶/۶۸	۰/۳۲۴۸
۱۵	۸۰/۵۰	۰/۱۸۰	۱/۰	۱۶۷۶/۱	۶/۱۳۹	۲/۶۵۵	۰/۸۲
۱۶	۸۰	۰/۱۸۰	۰/۰	۴۷۰	۱/۸۸۱	۱۴/۰۲	۰/۲۳۱
۱۷	۳۰/۰۳	۰/۱۸۰	۰/۰	-۲۵/۷۸	۰/۴۰۹۸	۱۴/۰۲	۰/۲۳۱
۱۸	۳۰۳	۰/۱۳۰	۰/۰	-۲۵/۷۸	۰/۴۱	۱۴/۰۲	۰/۲۳۱
۱۹	۳۲/۱۹	۰/۱۸۰	۰/۰	-۱۱۴/۹	۰/۲۰۷۱	۹/۸۴	۰/۳۲۴۸

جدول (۴-۱۱): جزئیات عملکرد سیکل کالینا

توان تولیدی توربین	۶۳۹۰
توان مورد نیاز پمپ	۹/۷
توان مورد نیاز پمپ	۷۱/۹
توان خروجی مفید	۶۳۰۸.۴
بازده انرژی سیکل	۲۳/۴۶
بازده انرژی سیکل	۵۴/۹۷

جدول (۴-۱۲): میزان انرژی ورودی و تخریب انرژی در اجزای مختلف سیکل کالینا

	تجهیزات	مقدار (KW)	(%)
انرژی ورودی	جداره کوره	۸۷۵۷	۶۲/۵۳
	خنک کن	۵۲۴۷	۳۷/۴۶
	مجموع	۱۴۰۰۴	۱۰۰/۰
انرژی خروجی	توان خروجی	۶۳۰۸.۴	۵۴/۹۷
تخریب انرژی	مبدل کوره	۱۶۷۱/۹	۱۱/۹۳
	مبدل خنک کن	۱۰۳۲/۰۴	۷/۳۶
	توربین	۱۴۸۷/۷۷	۱۰/۶۲
	جاذب	۱۸۶۸/۶	۱۳/۳۴

	کندانسور	۷۲۱/۱	۵/۱۴
	پیش گرمایش	۳۱۶/۰۸	۲/۲
	گرمایش مجدد	۱۴۰/۹	۱/۰
	شیر اختناق	۱/۰۵	۰/۰
	پمپ ۱	۳/۹	۰/۰
	پمپ ۲	۷۵/۸	۰/۵۴
	تداخل جریان ۱ و ۳	۲۲۳/۴	۱/۵۹
	تداخل جریان ۱۹ و ۱۵	۱۵۴/۲۳	۱/۱

۴-۳-۴ چرخه رانکین با سیال عامل آلی

به منظور استحصال توان بیشتر از منابع اتلاف حرارتی واحد تولید سیمان در این چرخه از سیال آلی به عنوان سیال عامل استفاده می‌گردد. در واقع چرخه رانکین با سیال عامل آلی بر مبنای همان اصول چرخه رانکین ساده عمل می‌کند اما به منظور بازیابی حرارتی از منابع دما پایین از یک سیال با دمای تبخیر پایین‌تر بهره می‌گیرد در مقایسه با سه چرخه قبلی بخار تولیدی در چرخه رانکین با سیال عامل آلی در یک سطح فشار تولید می‌گردد و از این جهت طراحی توربین در چرخه رانکین با سیال عامل آلی آسان‌تر خواهد بود [28].

از طرفی در چرخه رانکین با سیال عامل آلی فرایند کندانس به طور معمول توسط هوا انجام می‌شود زیرا حرارت نهان سیال‌های آلی عامل این چرخه‌ها بسیار کمتر از آب است بنابراین از سیستم مذکور می‌توان در مناطقی که دسترسی به آب وجود ندارد استفاده کرد [29].

۴-۳-۴ مطالعات پیشین در زمینه سیکل رانکین آلی

در زمینه بهینه‌سازی این چرخه مقالات زیادی به چاپ رسیده است. تعدادی از این مطالعات معطوف به بهینه‌سازی بازده چرخه، با انتخاب سیال عامل مناسب می‌باشد. انتخاب سیال تنها به خواص ترمودینامیکی و فیزیکی سیال وابسته نبوده، بلکه ایمنی، در دسترس بودن، هزینه، بازده

گرمای بالا، اثرات زیست محیطی و سازگاری با مواد تشکیل دهنده سیستم معیارهای اساسی برای انتخاب سیال مناسب می‌باشد. مشخصات سیال عامل مناسب عبارتند از: حجم مخصوص پایین، فشار مناسب در مبدل گرمایی، پایداری گرمایی، هزینه پایین، گرمای نهان و چگالی بالا، گرمای مخصوص پایین و همچنین حداقل اثرات زیست محیطی از جمله ظرفیت پایین تخریب آزون، ظرفیت پایین گلخانه‌ای (گرمایش کره زمین) و عمر کوتاه مدت در اتمسفر می‌باشد. در این بین Dai و همکاران [30] آقای Tchanche و همکاران [31]. در نهایت آقای آبتین عطایی و همکاران [32] در زمان‌های مختلف با بررسی چندین سیال عامل به بهینه‌سازی چرخه رانکین آلی پرداخته‌اند. بررسی آن‌ها نشان داد R113, R123 و ایزوپنتان، مناسب‌ترین سیالات برای این چرخه می‌باشد، با این تفاوت که R113 بالاترین بازده و بیشترین اثرات مخرب را بر محیط زیست دارد، ولی سیال مناسبی از نظر ایمنی می‌باشد. ایزوپنتان کمترین بازده را دارد و بالاترین حجم مخصوص بخار، اما سیالی با فشار بالاتر از فشار جو و اشتعال پذیری بالا می‌باشد. R123 سیالی با بازده گرمایی بالا و اثرات مخرب زیست محیطی پایین می‌باشد.

در مطالعات انجام گرفته توسط آقای وانگ [22] از سیکل رانکین آلی با سیال R123 مورد مطالعه قرار گرفت که در کمال تعجب از این سیال در دمایی (330°C) بالاتر از نقطه بحرانی استفاده شده است که نقاط ضعف این پژوهش به حساب می‌آید.

لذا با توجه به محدودیت دمایی برای استفاده از سیال R123، و خواص ترمودینامیکی پایین و اثرات زیست محیطی سایر سیالات آلی، از بررسی سیکل رانکین آلی به منظور تولید الکتریسیته از اتلافات فرایند تولید سیمان چشم پوشی می‌کنیم.

۴-۴ نتیجه‌گیری و انتخاب سیکل مناسب

علاوه بر مطالب ذکر شده به منظور انتخاب مناسب‌ترین سیکل، هزینه سرمایه‌گذاری سیستم

نیز معیاری اساسی برای انتخاب سیکل مناسب می‌باشد.

هزینه سرمایه گذاری اولیه سیستم‌های بازیافت حرارت در جدول (۴-۱۳) آورده شده است.

جدول (۴-۱۳): هزینه سرمایه گذاری اولیه سیستم‌های بازیافت حرارت [34]

چرخه بازیافت	بخار با تبخیر ناگهانی	بخار دو فشاری	رانکین آلی	کالینا
هزینه سرمایه‌گذاری (ریال بر وات)	۱۰۸۳	۱۰۸۸	۱۷۶۵	۲۱۹۶

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که راندمان حرارتی و برق تولیدی چرخه کالینا از راندمان حرارتی و برق تولیدی سایر چرخه‌های پیشنهادی بیش‌تر است این در حالی است که هزینه سرمایه گذاری اولیه چرخه کالینا نیز نسبت به چرخه‌های بخاری بالاتر است. با توجه به راندمان حرارتی بالای چرخه کالینا و البته در نظر گرفتن ملاحظات هزینه‌ای فناورانه و زیست محیطی، انتخاب چرخه مناسب برای شبیه سازی فرایند بازیافت حرارتی از جداره کوره و هوای داغ خروجی از خنک کن کلینکر نیازمند بررسی‌های اقتصادی می‌باشد.

فصل پنجم: جمع بندی و نتیجه گیری

۵-۱ جمع‌بندی

می‌توان تاثیر مطالب عنوان شده را بر حسب بازده های اول و دوم در تجهیزات مختلف را به صورت زیر نوشته و از آن‌ها برای یافتن راهکارهای بهبود انرژی در هر یک از تجهیزات استفاده نمود.

در سیستم کولر و کوره و با توجه به نتایج قبلی در می‌یابیم احداث کارخانجات سیمان در نقاط آب و هوایی گرم از راندمان بهتری برخوردار بوده و اینکه در فصول گرم کارخانه با راندمان بهتری کار می‌کند. تاثیر دمای محیط بر سیستم کوره قابل ملاحظه بوده و این تاثیر در بازده دوم بیشتر است. علت این امر کاهش بیشتر انرژی خروجی نسبت به انرژی ورودی با تغییرات دمای محیط (سیستم مرده) می‌باشد. افزایش دمای گازهای خروجی در سیستم کولر باعث کاهش در بازده‌های اول و دوم می‌گردد. این امر بواسطه خروج مقادیر قابل توجه انرژی و انرژی از سیستم می‌باشد. بنابراین هر گونه کاهش در دمای گاز یا استفاده از انرژی و انرژی آن به راندمان سیستم کمک می‌نماید. این قسمت پتانسیل بالقوه زیادی جهت اعمال راهکارهای بهبود انرژی همچون سیستم‌های CHP را دارا می‌باشد.

در قسمت کوره دمای محیط تاثیر مطلوبی بر بازده‌ها دارد و سیستم کوره در هوای گرم از راندمان بهتری برخوردار است. در سیستم کوره پارامترهای قابل تغییر به هوای ثانویه و مواد اولیه خروجی محدود می‌شوند. افزایش دمای مواد اولیه تاثیر منفی بر بازده اول داشته اما تاثیر منفی بر بازده دوم ندارد و تاثیر تغییر در تمامی پارامترهای بخش کوره باعث افزایش بازده دوم می‌گردد. با تغییر دمای مواد اولیه ورودی بازده اول به میزان ۰/۰۳۲ کاهش می‌یابد، در حالی که بازده دوم بمیزان ۰/۰۱۵ افزایش می‌یابد. افزایش دمای هوای ثانویه نیز تاثیر بهتری بر بازده دوم نسبت به بازده اول دارد.

در سیستم سیکلون‌ها بطور کلی مواد خروجی و هوای گرم ورودی موثرترین پارامترها هستند. افزایش دمای مواد اولیه خروجی از یک سو باعث افزایش بازده اول شده و از سوی دیگر باعث کاهش بازده دوم با ضریب ۱/۶ برابر می‌گردد. افزایش دمای هوای گرم ورودی باعث افزایش بازده دوم و

کاهش بازده اول با ضریب $7/7$ برابر می‌گردد. بنابراین تاثیر پارامتر هوای گرم ورودی بسیار بیشتر از مواد اولیه خروجی در این سیستم‌ها می‌باشد.

همانطور که مطالب فصول قبل مشهود است استفاده از گازهای خروجی از دودکش و گرمای اتلافی از جداره کوره باعث تغییرات زیادی در بازده قانون اول و دوم داشته و برای این منظور با توجه به راندمان حرارتی بالای چرخه بخار با تبخیر ناگهانی و البته در نظر گرفتن ملاحظات هزینه‌ای فناوری و زیست محیطی، چرخه بخار با تبخیر ناگهانی برای شبیه سازی بازیافت حرارتی از جداره کوره و هوای داغ خروجی از خنک کن کلینکر در طرح مذکور انتخاب شده است. از محاسبات مربوط به این فصل مشاهده می‌گردد چرخه مذکور قادر است به میزان 6955 kW از برق مورد نیاز کارخانه را تامین نماید.

در پایان می‌توان گفت بر مبنای تحلیل های انرژی و انرژی راهکارها و تاثیر هر یک بر بازده های اول و دوم در یک کارخانه سیمان مشخص شده است. اجرای این راهکارها و اعمال آنها در هر کارخانه با توجه به شرایط هر کارخانه متفاوت می‌باشد و برای اجرای هریک بایستی تحلیل های هزینه و فایده صورت گیرد

۵-۲ پیشنهادها

با عنایت به فرض هایی که برای توسعه پایان نامه حاضر در نظر گرفته شد، موارد زیر به عنوان مسئله های تحقیق ها و مطالعات آتی در کنار توسعه مدل جریان بهینه انرژی و انرژی صنعت سیمان پیشنهاد می‌شود.

۱. تحلیل هزینه و فایده در اجرای هر یک از پروژه های ذکر شده.
۲. برآورد جزئی هزینه های فنی و اقتصادی استفاده از سوخت های جایگزین.

۳. بررسی و به‌سازی رانده‌مان قوانین اول و دوم ترمودینامیک در سیستم کولر به همراه سیستم‌های بازیاب به عنوان یک حجم کنترل.

پیوست‌ها

پیوست الف: شناسایی و بررسی فرآیندهای مختلف

در تولید سیمان

الف-۱ شرح فرآیند تولید سیمان

مواد اصلی جهت ساخت و تولید سیمان عبارتند از:

الف) سنگ آهک که معمولاً از معادن، نزدیک به محل کارخانه استخراج می‌شود.

ب) سیلیکا و آلومینا که از خاک رس و ماسه حاصل می‌شوند.

ج) آهن که از سنگ آهن یا سرباره‌های کارخانه‌های فولاد سازی. تأمین می‌شود.

فرآیندهای اصلی تولید شامل موارد زیر می‌باشند:

۱. استخراج سنگ آهک
۲. خرد کردن سنگ آهک
۳. آماده سازی دیگر مواد خام
۴. نرم کردن مواد خام در آسیاب‌های مواد خام
۵. ذخیره سازی خوراک خام در سیلوهای ذخیره
۶. مخلوط کردن سنگ آهک پودر شده جهت کنترل درصد کربنات کلسیم (CaCO_3)
۷. پختن مواد خام جهت بدست آوردن کلینکر

۸. پودر کردن کلینکر همراه با گچ در آسیاب سیمان

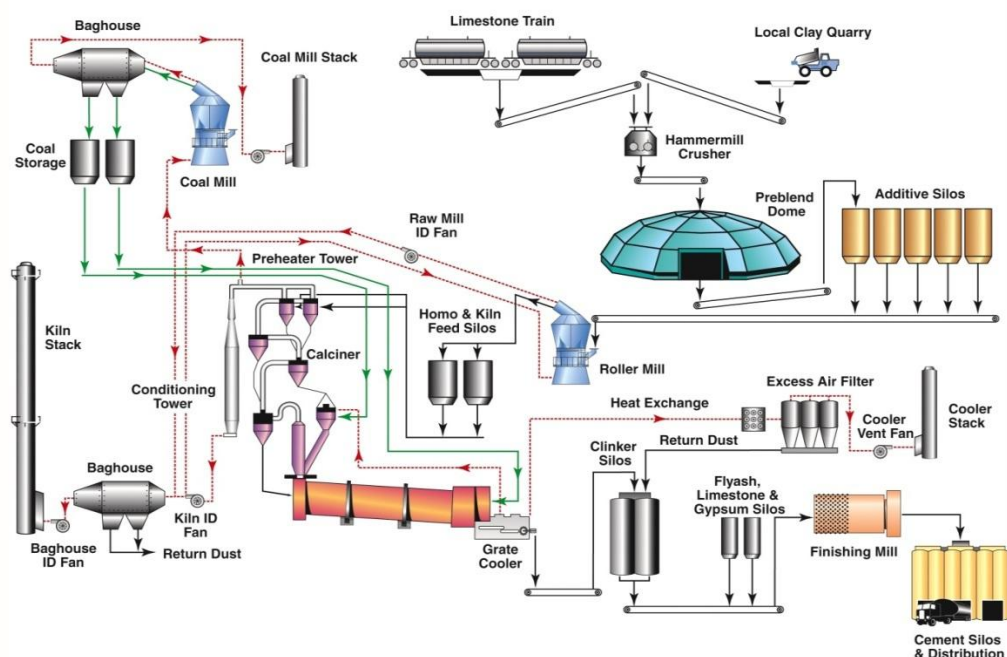
۹. ذخیره سازی سیمان در سیلوی ذخیره

۱۰. بسته بندی و حمل سیمان از کارخانه به نقاط مصرف

خوراک کوره با خرد کردن، پودر کردن و اختلاط مواد خام بصورت مخلوطی با ترکیب همگن آماده می شود به طوری که پس از گرمایش اولیه که جهت خروج آب و گاز کربنیک انجام می گیرد. عمده مواد خام ، شامل ۶۴ درصد اکسید کلسیم (CaO)، ۲۲ درصد اکسید سیلیسیم (SiO_2)، ۵/۳ درصد اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) و ۳ درصد اکسید آهن (بصورت Fe_2O_3) می باشد. این مواد سپس در دمای بسیار بالا قرار می گیرند تا توسط انجام واکنش های شیمیایی کلینکری تولید نمایند که دارای چهار جزء اصلی آلیت، بلیت، سلیت و آهن مطابق با جدول باشد [23].

جدول (۶-۱): ترکیبات کلینکر سیمان پرتلند

نام شیمیایی	نام فاز معدنی	فرمول شیمیایی	علامت اختصاری شمیست های سیمان	درصد در سیمان های معمولی
تری کلسیم سیلیکات	آلیت	$3 CaO \cdot SiO_2$	C 3S	۴۵
دی کلسیم سیلیکات	بلیت	$4CaO \cdot SiO_2$	C2S	۲۵
تری کلسیم آلومینات	سلیت	$3 CaO \cdot Al_2O_3$	C 3A	۱۲
تترا کلسیم آلومنیو فریت	آهن	$4CaO \cdot Al_2O_3Fe_2O_3$	C 4AF	۸



شکل (الف-۱): مراحل مختلف تولید سیمان پرتلند (فرایند خشک)

مراحل اصلی فرایند تولید سیمان شکل (الف-۱) در بطور شماتیک نشان داده شده است.

حجم اعظم مواد خام ، کربنات کلسیم (CaCO_3) یا مواد مشابه می باشد، سنگ آهک از معدن در ابعادی به قطر تقریبی ۷۵۰ میلی متر استخراج می گردد این سنگ ها می بایست تا قطر تقریبی ۱۰ میلی متر خرد شوند و سپس با سنگ سیلیس و سایر اضافات برای آسیاب شدن و رسیدن به قطری در حدود ۶۰ میکرومتر ترکیب شوند. گاهی عمل خرد کردن اولیه در محل معدن و قبل از حمل مواد به کارخانه سیمان انجام می شود . پس از آسیاب کردن بسته به نوع دقیق فرآیند ممکن است به مواد مقداری آب افزوده گردد، سپس مخلوط در کوره دوار جهت تبدیل به کلینکر در معرض دمای بالا قرار می گیرد. کلینکر حاصل از فرآیند انجام شده در کوره دوار قبل از انجام فرآیندهای بعدی می بایست خنک شود که این فرآیند در یک مبدل حرارتی بنام کولر کلینکر انجام می گیرد.

پس از خنک کردن ، کلینکر تولیدی ذخیره و یا فروخته شده و سپس جهت آسیاب کردن بعدی حمل می شود و یا در محل کارخانه با افزودن گچ و دیگر اضافات آسیاب شده به سیمان تبدیل می گردد. سیمان تولیدی سپس بسته بندی شده و یا بصورت فله ای به توزیع کنندگان ارائه می شود.

الف-۱-۱ بررسی فعل و انفعالات شیمیایی در کوره سیمان

کوره های سیمان ، کوره هایی با طولی تا ۲۳۰ متر و قطر تا ۸ متر و زاویه شیب ۳ تا ۶ درجه بوده و با آجرهای مقاوم و نسوز با دمای بالا پوشیده شده اند . این کوره ها در حدود ۵۰ تا ۷۰ دور در ساعت در کارخانجات قدیمی تر سیمان دوران داشته و در کارخانه های جدیدتر بین ۱۷۰ تا ۱۸۰ دور بر ساعت می چرخند. خوراک کوره در قسمت بالاتر انتهای آن وارد شده و با چرخش آهسته کوره به آهستگی به سمت ابتدای کوره جایی که مشعل در آن قرار دارد حرکت می کند سوخت مصرفی کوره زغال سنگ، گاز طبیعی، سوخت مایع نفتی (مازوت و گازوئیل) یا ترکیبی از سوخت های ذکر شده می باشد.

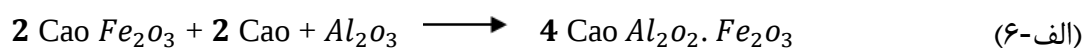
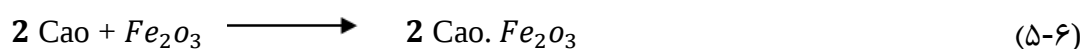
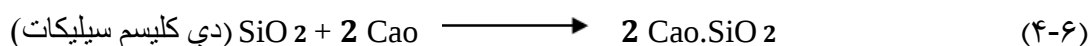
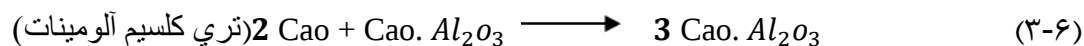
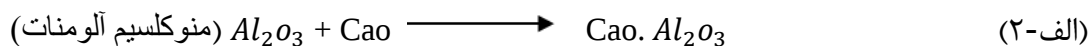
نواحی حرارتی مختلفی در کوره سیمان موجود است. در انتهای کوره که در ارتفاع بالاتری نسبت به ابتدای آن قرار دارد و خوراک کوره از آنجا به کوره وارد می شود ناحیه خشک کردن و پیش گرمایش کوره قرار گرفته که در آن، مواد به دمایی در حدود ۸۰۰ درجه سانتی گراد می رسند سپس این ناحیه، با ناحیه کلسینه کردن که در واقع محل خارج شدن گاز کربنیک (CO_2) از سنگ آهک است دنبال می شود . در این ناحیه مواد در دمایی نزدیک به ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد به آهک آزاد^۱ تبدیل می شود. واکنش شیمیایی که در این ناحیه رخ می دهد عبارت است از:



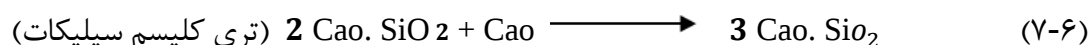
با گذشت زمان واکنش کلسیناسیون کامل می گردد . آهک آزاد وارد ناحیه بینابینی شده و

¹ Free Lime

اکسید پایه (CaO) با سیلیکا (SiO₂) و آلومینا (Al₂O₃) وارد واکنش می‌گردد. دمای این ناحیه در محدوده ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد حفظ می‌شود. واکنش‌هایی که در این ناحیه رخ می‌دهند عبارتند از:



ناحیه بعدی ناحیه سینترینگ است که در آن در دمای حدود ۱۳۰۰ °C، سینترینگ مواد آغاز می‌گردد. در هنگام سینتر شدن مواد، ماده دی‌کلسیم سیلیکات با آهک آزاد باقیمانده به حالت اشباع رسیده و تشکیل تری کلسیم سیلیکات می‌دهد.



سر انجام مواد به ناحیه شعله می‌رسند. که دما در آن ناحیه که اصطلاحاً به داغی سفید^۱ معروف است در حدود ۱۴۲۵ تا ۱۵۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد [23].

در حالت شبه مایعی که در این مرحله وجود دارد. مواد به رنگ سیاه در آمده و گرده‌هایی با قطر تقریبی ۲۵ میلی‌متر را تشکیل می‌دهند که پس از سرد شدن کلینکر^۲ نامیده می‌شود.

پس از این ناحیه بسیار گرم دما کاهش می‌یابد و کلینکر شروع به سرد شدن می‌کند. و سرانجام

¹ white hot

² Clinker

مواد از کوره به خنک کننده (کولر) می‌ریزد که از میان آن حجم زیادی از هوای نسبتاً خنک عبور می‌نماید.

به جهت جلوگیری از اتلافات حرارتی هوا از خنک کننده به کمک کانالی به کوره انتقال یافته و بعنوان هوای احتراق مورد استفاده قرار می‌گیرد. هوای خروجی از کولر بصورت عرضی وارد کوره شده و متلاطم می‌گردد که اغلب برخی از ذرات ریز مواد خام را نیز با خود به سمت انتهای کوره می‌برد.

کلینکرتولیدی سپس به مرحله آسیاب نهایی هدایت شده و در آنجا قبل از آسیاب در حدود ۵ درصد گچ به آن اضافه می‌گردد.

پس از آن مخلوط در آسیاب‌های گلوله‌ای یا استوانه‌ای پودر شده و معمولاً توسط نقاله‌های پنوماتیکی به سیلوهای ذخیره انتقال می‌یابد.

الف-۱-۲ روش‌های پخت سیمان

چهار نوع اصلی از فرآیندهای پخت سیمان که در حال حاضر از آنها در خطوط تولید سیمان استفاده می‌شود عبارتند از [23]:

- فرآیند مرطوب (تر)

- فرآیند نیمه مرطوب

- فرآیند نیمه خشک

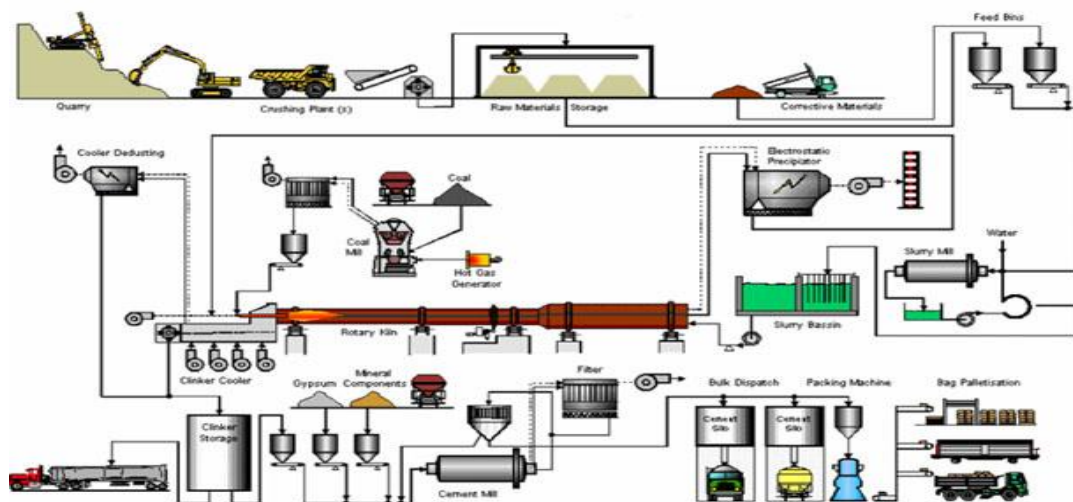
- فرآیند خشک

که از میان فرآیندهای فوق بهترین فرآیند از نقطه نظر کارایی انرژی و همچنین معمول‌ترین فناوری بکار گرفته شده امروزی، فرآیند خشک می‌باشد.

الف-۱-۲-۱ فرآیند مرطوب

در حال حاضر بخش قابل توجهی از سیمان در جهان هنوز به شیوه فرآیند مرطوب تولید می‌شود. در فرآیند مرطوب مواد خام به کمک ۳۰ تا ۴۰ درصد افزودن آب مخلوط آماده می‌شوند و در قسمت انتهایی بالایی کوره بصورت دوغاب وارد می‌شود.

فرآیند مرطوب مخصوصاً هنگامی مفید است که مواد خام حاوی مقدار زیادی رطوبت در هنگام استخراج از معدن باشند. این فرایند همچنین دارای این مزیت است که خوراک کوره بصورت یکنواخت می‌باشد اما نیازمند به صرف مقدار انرژی بیشتری نسبت به سایر کوره هاست زیرا آب باید در طول فرآیند تبخیر شود. در این حالت نیز واکنش‌هایی که قبلاً ذکر شده‌اند روی می‌دهد.

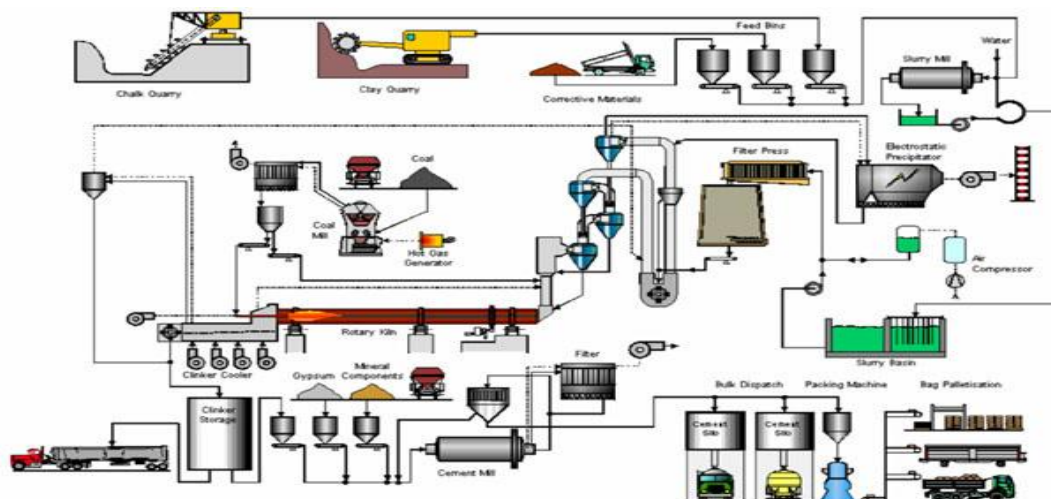


شکل (۲-۶): تولید سیمان به روش فرایند مرطوب

الف-۲-۱-۲ روش نیمه مرطوب

در فرآیند تولید سیمان به روش نیمه مرطوب مواد خام آماده شده توسط فرآیند مرطوب ابتدا بصورت مکانیکی (عموماً با استفاده از فیلتر پرس) آب‌گیری شده و سپس به شکل گرده‌هایی به واحد خشک‌کن وارد می‌شوند. این واحد خشک‌کننده ممکن است سومین قسمت از یک پیش گرم‌کن

متحرک مشبک^۱ باشد. امروزه یک خشک کن پخش یا پراکنشی یا خشک کن ضربه‌ای قبل از پیش گرم کن (پری هیتتر) یا پری کلسانیر کوره نصب می‌شود. در شکل (الف-۳) نمونه‌ای از یک سیستم نیمه مرطوب با پیش گرم کن نشان داده شده است.



شکل (الف-۳): فرایند تولید سیمان (فرایند نیمه مرطوب)

الف - ۱-۲-۳ روش نیمه خشک

در سیستم نیمه خشک گرده‌های تشکیل شده از مواد خام حاوی تقریباً ۱۲٪ آب می‌باشند. پیش گرمکن متحرک کوره تا جایی که از نظر فنی بصورت یک واحد پیش فرایندی باشد، ادامه می‌یابد. کوره‌های از این نوع دارای برخی معایب ذاتی در سیستم به شرح زیر می‌باشند:

- هزینه اولیه نسبتاً بالا و همچنین عملکرد پر هزینه در قبال خروجی از کوره
- کیفیت خاص مورد نیاز مواد خام
- مصرف گرمای کلی نسبتاً بالا

¹ Traveling Grate Preheated

- محدودیت در استفاده از سوخت‌های با کیفیت پایین

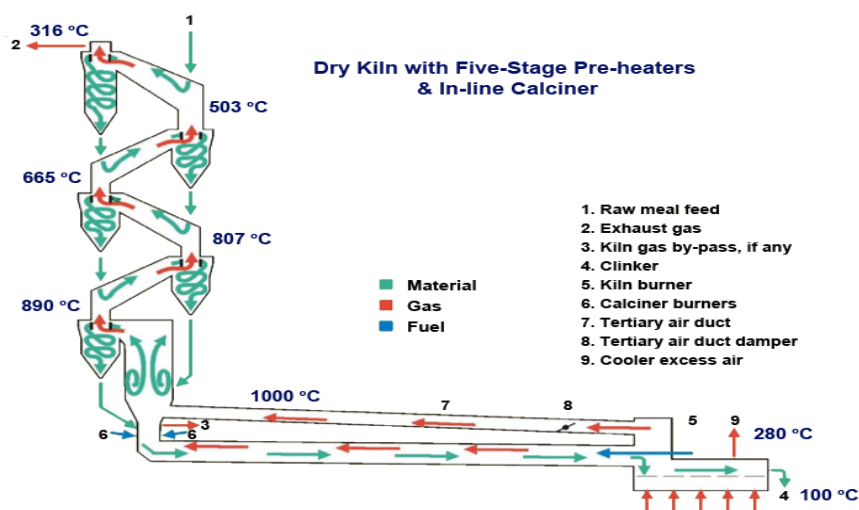
- عدم توانایی در کاربرد پیش‌کلسیناسیون

به دلایل ذکر شده فوق، این سیستم اهمیت خود را از دست داده است. بسته به شرایط محلی در موقعیت‌های مشخص استفاده از سیستم پیش‌گرمایش مطلوب به نظر می‌رسد.

الف-۱-۲-۴ روش خشک

در فرآیند خشک از کوره‌های بلندی که در فرآیند مرطوب نیز از آن استفاده می‌شود بهره‌برداری می‌گردد در فرآیند خشک مقدار قابل توجهی از مصرف انرژی کاسته می‌شود و این فرآیند می‌تواند اغلب مشکلات ناشی از انتشار آلاینده‌های محیط زیست را کاهش دهد. بعلاوه تکنیک‌های فرآیندی خشک جدیدتری پدید آمده‌اند که نسبت به فرایندهای خشک قبلی که در مقایسه با روش مرطوب از مصرف انرژی کمتری برخوردار بوده‌اند، انرژی کمتری مصرف می‌نمایند.

کارخانجات سیمان جدیدتر از فرآیند خشکی استفاده می‌کنند که در آن مواد خام به صورت پودر خشک به کوره تغذیه می‌شوند. در کارخانه‌هایی که در سال‌های اخیر نصب شده‌اند، از واحدهای پیش‌گرمایش و پیش‌کلسیناسیون به جهت بهبود راندمان حرارتی فرآیند با استفاده از عبور گازهای داغ کوره از میان آن‌ها و قبل از ورود خوراک به کوره، استفاده به عمل آمده است.



شکل (الف-۴): دیارتمان پخت در فرآیند خشک شامل یک سیستم پیش گرمایش معلق

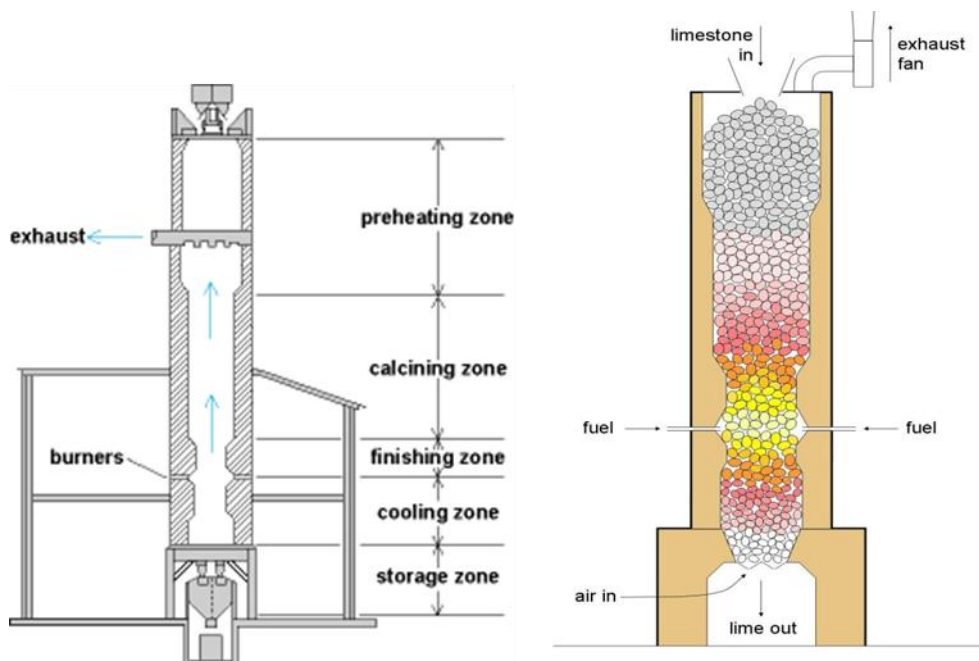
چنانچه در شکل (الف-۴) نشان داده شده است، مواد خام پودر شده در بالاترین نقطه به پیش گرم کن و در جهت خلاف با جریان هوا وارد می شوند این جریان هوا از کولر (خنک کن کلینکر) جریان یافته و بنابراین بدلیل عبور از عرض کولر گرم می شود. همچنین مقطعی از یک کوره دوار کوتاه قبل از هدایت آن به پیش گرم کن وجود دارد بنابراین جریان مذکور نه تنها برای پیش گرمایش به اندازه کافی داغ است بلکه تا حدی مواد ورودی را نیز پیش کلسینه می نماید [23].

ترتیب فیزیکی از مجموعه ای سیکلون ها بر روی پیش گرم کننده بطوری که هوای داغ و خوراک بتوانند تماس مناسبی برای بیشینه انتقال حرارت و راندمان بهینه داشته باشند امکان پذیر است.

اضافه کردن یک کلساینر که در واقع یک کوره ساکن مستقر در بین کوره دوار و پیش گرم کن معلق می باشد، مقدار پیش کلسینه شدن را که در پیش گرم کن اتفاق می افتد افزایش می دهد. و بدین ترتیب پتانسیل ظرفیت کوره دوار افزایش می یابد هنگامی که مواد خام تمامی مراحل را طی نمود سپس تا دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد گرم شده و قبل از ورود به کوره بصورت گسترده تری کلسینه می شود. دمای گازهای داغ در این از مرحله از ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد به ۳۰۰ درجه

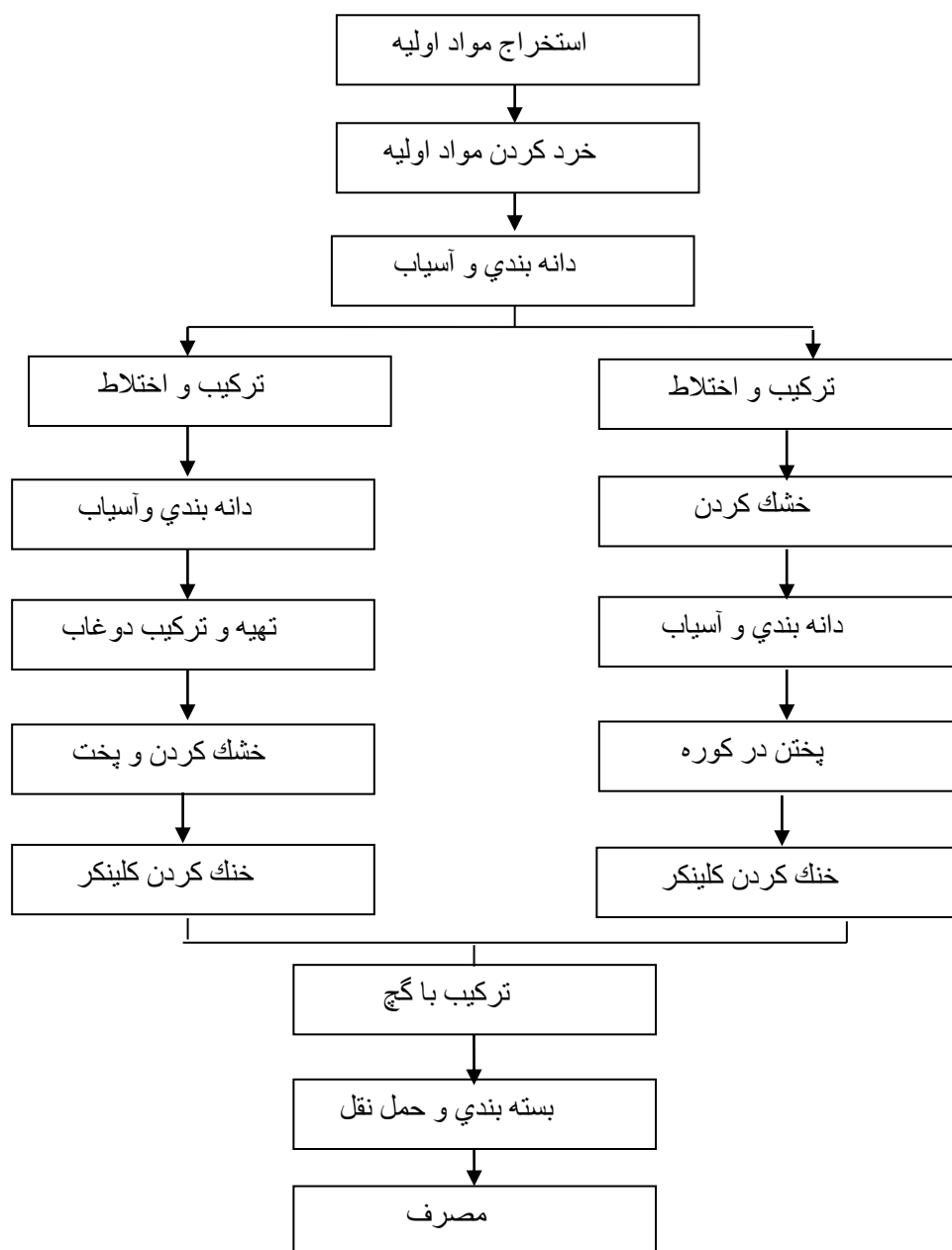
سانتی گراد کاهش می یابد. خوراک داغ پس از عبور از پیش گرم کننده و کلساینر سریع به یک کوره دوار کوتاه جهت تبدیل به کلینکر وارد می شود [23].

در کوره های شفتی (قائم) نوع دیگری از فرآیند تولید خشک بکار گرفته می شود. کوره های شفتی در مقایسه با کوره های دوار به قدرت و گرمای کمتری به ازای هر تن کلینکر تولیدی نیازمندند. و قابل مقایسه با سیستم های دارای پیش گرمایش هستند اما عیب اصل آنها ظرفیت پایین و یکنواختی کمتر محصول می باشد. شکل (الف-۵) طرحی از یک کوره شفتی ارائه شده است [۲۳]



شکل (۵-۶): کوره قائم

طرح کلی فرآیندهای مرطوب و خشک بصورت نمودار جریانی در شکل مشاهده می گردد.



نمودار (۶-۱): نمودار جریان کلی فرآیندهای مختلف تولید سیمان

الف-۱-۳ شرح تجهیزات مورد استفاده در خط تولید سیمان [23]

چنانچه قبلاً نیز ذکر گردید مواد اولیه تولید سیمان پرتلند اساساً شامل مواد آهکی و رسی می‌باشد و سنگ آهک (کربنات کلسیم) بخش عمده مواد خام را تشکیل می‌دهد. پس از سنگ آهک خاک رس دومین بخش تشکیل دهنده مواد خام سیمان است که در واقع تعیین کننده آلومین، سیلیس و دیگر اکسیدهای مورد نیاز در ترکیب سیمان می‌باشد. لازم به ذکر است که مخلوط طبیعی سنگ آهک و خاک رس اصطلاحاً، مارل^۱ نامیده می‌شود. این مواد حاصل استخراج و بهره برداری از معادن مواد اولیه سیمان است. سپس با انجام مراحل فرآیندی دیگر شامل خردایش، آسیاب کردن و سرانجام پخت و آسیاب و افزودن مواد افزودنی، سیمان تولید می‌گردد. در زیر به روند تولید سیمان در مراحل فرایندی و نیز تجهیزات بکار برده شده در هر فرایند پرداخته می‌شود:

الف-۱-۳-۱ استخراج مواد اولیه^۲

معادن مواد اولیه سیمان بخصوص سنگ آهک، خاک رس، مارل، سنگ گچ و بصورت روباز هستند. در استخراج موادی مانند سنگ آهک، سنگ آهن و سنگ گچ به چاله زنی و آتشباری می‌باشد که عمل چاله زنی توسط وسایلی مانند دریل واگنی یا چکش دستی انجام می‌شود. پس از آتشباری، با استفاده از وسایلی چون بولدوزر و اکسکواتور جابجایی و ذخیره کردن مواد استخراج شده انجام می‌شود.

مواد اولیه دیگر مانند خاک رس و مارل نیاز به عملیات آتشباری و چاله زنی نداشته و عمل جابجایی و ذخیره سازی آن‌ها به کمک بولدوزر و دستگاه‌های مشابه انجام می‌گردد. البته با پیشرفت فناوری ماشین آلات معدنی استخراج سنگ آهک نیز به تدریج بدون نیاز به عملیات آتشباری امکان پذیر شده است.

^۱ marl

^۲ Quarrying

بارگیری مواد اولیه سیمان بوسیله لودر یا بیل مکانیکی صورت گرفته و حمل این مواد بوسیله کامیون ، نوار نقاله ، واگن های زمینی یا هوایی انجام می شود. البته استفاده از روشهای مختلف استخراج، بارگیری و حمل مواد اولیه به کارخانه بستگی به عواملی چون فاصله معدن تا کارخانه، نوع معدن و ملاحظات اقتصادی و سرمایه گذاری دارد. مواد اولیه استخراج شده از معادن مختلف ابعاد متفاوتی را دارا بوده و لذا به صورتی که استخراج شده اند قابل استفاد از مستقیم در کوره نمی باشند بنابراین لازم است تا فرآیند دیگری بنام خرد کردن مواد اولیه یا خردایش بر آنها انجام گیرد.

الف-۱-۲-۳ خرد کردن مواد اولیه یا خردایش

در این قسمت مواد اولیه استخراج شده خرد شده و به ابعادی در حدود کمتر از ۱۰ سانتی متر می رسند برای خرد کردن سنگ آهک و یا مواد اولیه با ابعاد بالا، از دستگاه های خرد کن با طرح های مختلف استفاده می شود که در زیر به بعضی از آنها اشاره می شود.

الف - سنگ شکن متحرک^۱

در مواردی که سنگ شکن در معدن واقع شده است بدلیل عقب نشینی تدریجی معدن در طول استخراج از آن و برای صرفه جویی در حمل و نقل ماشین آلات از این نوع سنگ شکن استفاده می شود. این سنگ شکن مجموعه متحرکی است که بر روی چرخ زنجیر یا تایر قرار داشته و قادر است تا همزمان با تغییر محل سکوی استخراج و بارگیری مواد اولیه، تغییر مکان دهد. مواد خرد شده توسط این سیستم، به وسیله نوار نقاله یا کامیون به کارخانه ارسال می شود. معمولاً استفاده از نوار نقاله یا واگن هوایی هنگامی مقرون ب صرفه است که فاصله کارخانه تا معدن کمتر از ۵ کیلومتر باشد.

ب- سنگ شکن های ثابت^۱

¹ Mobile Crusher

انتخاب نوع سنگ شکن بستگی به نوع و جنس سنگ مصرفی و ابعاد مورد نیاز سنگ خرد شده دارد. لذا گاهی اوقات با یکبار خرد کردن و در مواقعی نیز دو یا سه مرحله عمل خرد کردن، ابعاد مورد نیاز سنگ را تأمین خواهد نمود. مواد خروجی از سنگ شکن ها باید دارای ابعاد محدودی باشند، تا در کار آسیاب‌های مواد که جهت پودر کردن مواد اولیه بکار برده می‌شوند اشکالی ایجاد نشود.

از جمله انواع مختلف سنگ شکن‌های ثابت که در صنعت سیمان بکار برده می‌شوند می‌توان به سنگ‌شکن فکی، مخروطی، ضربه‌ای، چکشی و استوانه‌ای اشاره کرد که نوع کاربرد هر یک بستگی به جنس مواد دارد. سنگ شکن‌های ثابت در ابتدای خط تولید سیمان قرار دارند. مواد اولیه بوسیله کامیون در داخل قیف این سنگ شکن‌ها تخلیه می‌شوند و پس از خردایش از طریق نوار نقاله راهی سالن ذخیره می‌شوند.

ظرفیت سنگ شکن و ماشین آلات معدنی چنان انتخاب می‌شوند که با پنج روز کار در نقطه و یک نوبت کار در هر روز نیاز کارخانه به مواد اولیه تأمین شود.

الف-۱-۳-۳ مخلوط کردن اولیه و ذخیره سازی

قبل از انتقال مواد خرد شده از سنگ شکن به آسیاب مواد جهت پودر شدن، مواد خرد شده بداخل سالن ریخته و انباشته می‌شوند تا به این ترتیب در ابتدا مواد اولیه با یکدیگر مخلوط شوند و در عین حال ذخیره‌ای از مواد نیز حاصل شود.

نقش سالن مواد در خط تولید علاوه بر اختلاط اولیه و ذخیره سازی، کار پیوسته آسیاب مواد را نیز تضمین می‌نماید.

در بعضی از کارخانجات انواع مواد خام بصورت جداگانه ذخیره می‌شوند و در برخی دیگر، تعدادی

¹ stationary crusher

از مواد اولیه نظیر سنگ آهک و خاک رس ضمن ذخیره شدن در سالن با یکدیگر نیز مخلوط می‌شوند. اختلاط اولیه مذکور نیازمند به استفاده از تجهیزاتی چون ریزنده و خراشنده است.

الف-۱-۳-۴ خشک کردن مواد اولیه^۱

در برخی از کارخانجات سیمان، بدلیل موقعیت جغرافیایی خاص برخی از مواد اولیه (مخصوصاً خاک رس) دارای میزان رطوبت بالایی هستند که عملاً از آنها نمی‌توان در فرآیند تولیدی استفاده نمود. لذا لازم است تا قبل از ذخیره سازی مواد مذکور خشک شوند. بدین منظور ممکن است تا از خشک کن‌های مختلفی استفاده بعمل آید که از جمله آن‌ها می‌توان به خشک کن دوار اشاره نمود که شباهت زیادی به کوره سیمان دارد. خشک کن‌ها عملاً می‌توانند رطوبت مواد را از ۲۵ درصد به ۳ درصد کاهش دهند.

الف-۱-۳-۵ پودر کردن مخلوط مواد خام^۲

در فرآیند خشک تولید سیمان لازم است تا مواد خام قبل از ورود به کوره بصورت پودر درآیند. در ضمن جهت جلوگیری از کلوخه‌ای شدن و کاهش چسبندگی مواد، حتی الامکان قبل از فرستاد مواد خام به سیلوهای ذخیره می‌بایست خشک و رطوبت گیری شود. به این منظور از سیستم‌های مختلفی که بطور همزمان خشک و پودر می‌کنند استفاده می‌گردد از جمله معروفترین سیستم پودر کردن که در صنعت سیمان کاربرد زیادی دارد، آسیاب مواد گلوله‌ای (شبکه ای) و آسیاب مواد غلطکی می‌باشد.

الف- آسیاب مواد خام گلوله‌ای^۳

این نوع آسیاب متشکل از یک بشکه استوانه‌ای شکل، حاوی گلوله‌های فولادی است که سطح داخلی

¹ Drying

² Raw Material Grinding

³ Ball Mill

آن توسط زره‌های شکل دار پوشیده است. استوانه دارای حرکت دورانی است و زره‌ها نقش حفاظت از بدنه و جهت دادن به حرکت مواد و گلوله‌های فولادی در داخل آسیاب را بر عهده دارند. داخل آسیاب به چند قسمت تقسیم شده که هر قسمت توسط صفحات مشبک به نام دیافراگم از یکدیگر جدا شده که به آن‌ها خانه گفته می‌شود.

در خانه‌های آسیاب گلوله‌های فولادی به قطر ۲۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر به نسبت معین و وزن مشخص ریخته می‌شود از یک طرف آسیاب، موادی که می‌بایست پودر شوند وارد شده و در آن حرکت دورانی و وجود گلوله‌ها ترکیبی از فشار، سایش، ضربه و برخورد سبب می‌شود تا مواد ورودی ضمن طی مسیر آسیاب، پودر شوند.

با جریان دادن گاز گرم خروجی از کوره در آسیاب مواد خام عمل خشک کردن مواد نیز انجام می‌گردد. سپس مواد پودر شده توسط الواتور به دستگاه جدا کننده^۱ فرستاده می‌شود و در این دستگاه مواد ریز و درشت جدا و به آسیاب برگشت داده می‌شود، مواد نرم شده نیز به سیلوهای ذخیره مواد ارسال می‌گردد.

این نوع آسیاب‌ها با طرح‌های گوناگون برای پودر کردن مواد خام و همچنین کلینکر مورد استفاده می‌باشند.

ب- آسیاب‌های غلطکی^۲

این نوع آسیاب‌ها نیز دارای طرح‌های گوناگون می‌باشند. بدلیل سادگی سیستم، پایین بودن مصرف انرژی و قیمت این آسیاب‌ها، استفاده از این نوع آسیاب‌ها جهت پودر کردن مواد خام گسترش یافته

^۱ Separator

^۲ Roller Mill

است. این نوع آسیاب‌ها به طور کلی متشکل از یک صفحه گردان است که در روی آن تعدادی غلطک قرار دارد. مواد ورودی به آسیاب در فاصله بین غلطک‌ها و صفحه گردان قرار گرفته و بدلیل فشار هیدرولیک یا مکانیکی و وزن غلطک‌ها ذرات خرد و پودر می‌شوند. گازهای گرم خروجی از کوره در داخل آسیاب جریان می‌یابند و هم سبب خشک شدن مواد و هم وسیله‌ای برای انتقال و جابجایی ذرات نرم به خارج از آسیاب شده و آن را به سمت سیلوهای مواد خام هدایت می‌کند.

الف ۱-۳-۶ تنظیم مواد خام^۱

پس از پودر شدن مواد خام، پودر حاصله در سیلوهای مواد خام ذخیره می‌گردد. پس از نمونه برداری از پودر حاصله و انجام آزمایشات فیزیکی بر آن و انجام تنظیم‌های لازم، مواد حاصل بنام خوراک کوره^۲ نامیده می‌شوند. در این مرحله عمده ترین عواملی که مورد سنجش قرار می‌گیرند شامل مواردی چون درصد کربنات، درصد اشباع آهک (استاندارد آهک) مدول‌های مختلف، نرمی و رطوبت مواد خام می‌باشند.

برای دستیابی به سیمان با ترکیب مطلوب باید مخلوط مواد خام چنان ترکیبی داشته باشد که پس از پخت کلینکر با ترکیب لازم بدست آید. در عمل ترکیبات مواد خام را بصورت نسبت‌هایی از درصد اکسیدهای عناصر موجود در مواد خام بیان می‌نماید.

الف ۱-۳-۷ سیلوهای مواد خام^۳

عامل اصلی در یکنواخت بودن کار کوره و همچنین افزایش کیفیت کلینکر و در نتیجه سیمان، یکنواختی ترکیب خوراک کوره، خوب مخلوط شدن و همگن بودن آن است.

¹ Raw Meal Correction

² Kiln feed

³ Raw Meal Silo

به منظور همگن کردن یا هموژنیزه نمودن^۱ مطلوب مواد خام از سیلوهای ذخیره مجهز به سیستم‌های پنوماتیک^۲ استفاده می‌شود.

در هر کارخانه چندین سیلوی تنظیم و ذخیره مواد خام وجود دارد که در طرح‌ها و انواع مختلفی می‌باشند. مواد خام از بالای سیلو وارد می‌شود و پس از تنظیمات لازم از پایین سیلو تخلیه و به کوره تغذیه می‌گردد. ظرفیت سیلوها معمولاً معادل ۵ روز مصرف کوره است.

الف-۱-۳-۸ پیش گرمکن^۲

پس از تهیه و تنظیم مواد خام، مواد آماده فرآیند پخت در کوره می‌باشند. سیستم‌های مختلفی برای پخت سیمان وجود دارد که در اینجا به آخرین نوع این سیستم که استفاده از سیستم پیش گرمکن و پیش کلسیناتور می‌باشد اشاره می‌گردد:

در کوره مواد خام که متشکل از کربنات‌ها و سیلیکات‌ها می‌باشد پخته شده و بصورت اکسیدهای عناصر تشکیل دهنده مواد خام و (همچنین فازها و کریستال‌های) متشکل از این اکسیدها در می‌آیند. عمل پختن و تشکیل فازها در سه قسمت پیش گرمکن، کوره و خنک کن که تحت عنوان سیستم کوره نامیده می‌شوند، انجام می‌گیرد.

وظیفه پیش گرمکن اخذ رطوبت سطحی باقیمانده در مواد خام، آب تبلور، تجزیه مقدماتی سیلیکات‌ها و همچنین کلسینه کردن (آهکی کردن) بخشی از کربنات‌های موجود در مواد خام می‌باشد.

پیش گرمکن‌های سیکلونی معمولاً متشکل از چهار طبقه سیکلون^۳ هستند که مواد خام از طبقه

¹ Blending

² Preheater

³ Cyclone

سوم وارد آنها می‌شود. از پائین ترین قسمت پیش گرمکن، گازهای گرم خروجی از کوره وارد پائین ترین سیکلون می‌شوند. طرح سیکلون‌ها و نحوه جریان گاز و پودر مواد طوری است که ایجاد محیط گردبادی و شناور می‌شود و به دلیل ایجاد چنین محیطی تبادل گرما بین گاز و مواد به شدت صورت می‌گیرد بدلیل قیفی شکل بودن سیکلون‌ها ذرات جامد داغ شده از فاز گازی جدا می‌شوند.

در حال حاضر در برخی از کارخانه‌های سیمان در پائین ترین قسمت پیش گرمکن محفظه‌ای بنام تکلیس یا دستگاه پری کلسیناسیون^۱ قرار داده شده است این محفظه که معمولاً به شکل سیکلونی است مجهز به چند شکل بوده و سبب می‌شود، درصد بیشتری از گاز دی‌اکسیدکربن از کربنات‌ها آزاد شود. در نتیجه مواد پخته تر وارد کوره شده و بار حرارتی کوره کاهش می‌یابد. این امر سبب افزایش تداوم کار کوره و نیز افزایش ظرفیت آن خواهد شد.

الف-۱-۳-۹ کوره دوار^۲

بخش اصلی فرآیند پختن کلینکر در کوره دوار صورت می‌گیرد. کوره سیمان استوانه‌ای فلزی است که طول و قطر آن متناسب با ظرفیت کارخانه می‌باشد. این استوانه با شیب حدود ۳ تا ۴ درصد روی چند پایه مجهز به چند غلطک قرار گرفته و دارای حرکت دورانی می‌باشد. خوراک کوره پس از طی مسیر پیش گرمکن از انتهای کوره وارد کوره می‌شود بدلیل وجود شیب و حرکت دورانی مواد به سمت خروجی کوره و منطقه پخت سرازیر می‌شود.

در انتهای دیگر کوره مشعلی نصب شده است که با استفاده از سوخت‌های مختلف محیط حرارتی با دمای بالاتر از ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد را ایجاد می‌نماید. بعلاوه مکش قوی موجود در کوره جهت شعله و مسیر حرکت گازهای حاصل از احتراق سوخت به سمت خروج از کوره و پیش گرم کن

^۱ Precalculator

^۲ Rotary Kiln

می‌باشد. بنابراین جریان گاز و مواد در داخل کوره در خلاف جهت یکدیگر می‌باشند.

خوراک کوره در ضمن طی مسیر کوره در ابتدا تکلیس می‌شود سپس با تکمیل عمل تجزیه سیلیکات‌ها در قسمت‌های بعدی ترکیب اکسیدها با یکدیگر به مرور شروع می‌گردد. دمای منطقه پخت چنان انتخاب می‌شود که خوراک کوره تا حد ذوب ناقص^۱ شده و مقداری فاز مایع بوجود آید. در محیط فاز مایع، فازها یا کریستال‌های کلینکر تشکیل می‌شود.

مقدار کلینکر خروجی از کوره حدوداً ۶۰٪ مقدار مواد خام ورودی به پیش‌گرمکن است ۴۰ درصد باقیمانده شامل رطوبت و گازهایی نظیر دی‌اکسید کربن می‌باشد که از تکلیس کربنات‌ها جدا شده و به‌مراه گازهای کوره از سیستم خارج می‌شود.

الف-۱-۳-۱۰ خنک کننده^۲

کلینکر خروجی از کوره دارای دمایی حدود ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد است بازیابی گرمایی و نیز مشکل بودن جابجایی کلینکر داغ ضرورت سرد کردن آن را در پی دارد بعلاوه مزیت اساسی دیگری که از سرد کردن کلینکر حاصل می‌شود تکمیل تشکیل کریستال‌های کلینکر و افزایش کیفیت آن می‌باشد.

سیستم‌های خنک کننده مختلفی وجود دارد که در تمامی انواع مختلف آن هوای سرد محیط به داخل دمیده یا مکیده می‌شود. در اثر تماس هوای سرد محیط با کلینکر داغ، کلینکر سرد شده و دمای آن تا حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد کاهش می‌یابد. هوای ورودی به خنک کن نیز پس از گرم شدن با دمای حدود ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد وارد کوره می‌شود و بدین ترتیب بازیابی گرمایی نیز حاصل می‌شود.

^۱ Sinter

^۲ Cooler

انواع معروف خنک کن‌ها خنک کن گریت یا مشبک^۱، خنک کن سیاره‌ای^۲، خنک کن دوار^۳ و خنک کن شفتی یا عمودی^۴ را می‌توان خاطر نشان ساخت.

الف-۱-۳-۱۱ سیلو (انبار) کلینکر^۵

کلینکر خروجی از خنک کن قبل از ورود به آسیاب سیمان در سیلو یا سالن ذخیره می‌شود زیرا این ذخیره سازی سبب می‌شود تا توقف آسیاب سیمان باعث توقف کوره نشده و نیز در فاصله ذخیره سازی کلینکر و ورود آن به آسیاب دمای کلینکر کمتر شده و همچنین کار آسیاب سیمان از نوسانات تولید کوره مستقل باشد. معمولاً ظرفیت انبار کلینکر معادل تولید یک ماه کوره در نظر گرفته می‌شود.

الف-۱-۳-۱۲ آسیاب سیمان^۶

برای پودر شدن کلینکر حاصل از پخت مواد نیز از آسیاب‌های گلوله ای استفاده می‌شود در این قسمت از خط تولید به‌مراه کلینکر ورودی به آسیاب سیمان، مقداری گچ خام یا مواد افزاینده نظیر پوزولان‌ها و یا روباره نیز به آسیاب سیمان اضافه می‌شود که پودر حاصل همان محصول نهایی یعنی سیمان است.

جزء اساسی برخی آسیاب‌های گلوله‌ای دستگاه سپراتور (جدا کننده) می‌باشد که سیمان خروجی از آسیاب قبل از ورود به سیلوهای ذخیره سیمان وارد این دستگاه می‌شود. سپراتور نقش جدا کننده ذرات درشت سیمان از ذرات نرم و برگرداندن ذرات درشت به داخل آسیاب جهت پودر شدن کامل تر

¹ Great

² Sattelite

³ Rotary

⁴ Shaft

⁵ Clinker Storage

⁶ Cement Mill

را دارد. بعضی از آسیاب‌های گلوله‌ای فاقد سپراتور هستند که این آسیاب‌ها به آسیاب‌های مدار باز^۱ موسوم می‌باشند.

الف-۱-۳-۱۳ سیلوهای سیمان^۲

سیلوهای سیمان، به منظور ذخیره سازی سیمان تولیدی توسط آسیاب سیمان ساخته می‌شوند معمولاً ظرفیت تولید آسیاب سیمان آنچنان در نظر گرفته می‌شود که با کار شبانه روزی جوابگوی تولید کوره باشد.

سیلوهای سیمان بتونی می‌باشد و همانند سیلوهای مواد خام کف آن‌ها توسط هوابر^۳ مفردش است و متناوباً از طریق این هوابرها، هوای محیط به داخل سیمان دمیده می‌شود. هدف از این کار خنک تر کردن سیمان و پیشگیری از فشرده و کلوخ شدن سیمان در سیلوها می‌باشد.

انتقال سیمان از آسیاب سیمان به سیلوها بوسیله هوا صورت می‌گیرد. ظرفیت سیلوهای سیمان مجموعاً معادل دو هفته تولید کارخانه انتخاب می‌شود.

الف-۱-۳-۱۴ بارگیر خانه^۴

بارگیری سیمان به دو صورت کیسه‌ای و فله‌ای انجام می‌گیرد. بارگیرخانه در انتهای خط تولید قرار دارد. سیمان بوسیله هوابر از سیلوها خارج می‌گردد سپس توسط بالابر کاسه‌ای به قسمت بالای بارگیرخانه و بداخل مخازن (قیف‌های) دستگاه بارگیری هدایت می‌شود. بارگیری فله‌ای بسیار ساده و ارزان آن انجام می‌شود برای این منظور سیمان به کمک هوا جابجا شد و وارد وسیله حمل می‌شود.

¹ open circuit

² Cement Silo

³ Air slide

⁴ Packing

برای بارگیری کیسه‌ای ابتدا سیمان وارد مخزن دستگاه بسته بندی^۱ می‌شود و سپس بعد از کیسه بندی شدن توسط نوار نقاله جهت حمل ارسال می‌شود.

الف-۲ بررسی صنعت سیمان از نقطه نظر مصرف انرژی

الف-۲-۱ الگوهای نمونه مصرف انرژی

فرآورده‌های تولید سیمان چنانکه قبلاً نیز ذکر شده از دو نوع انرژی اولیه استفاده می‌کنند، انرژی حرارتی که از احتراق سوخت‌های فسیلی مانند ذغال سنگ، گاز طبیعی و فرآورده‌های نفتی حاصل می‌گردد و انرژی مکانیکی که از تبدیل انرژی الکتریکی در دسترس قرار می‌گیرد. انرژی حرارتی در حدود ۹۰ درصد از کل انرژی اولیه مصرفی در کارخانجات سیمان را در بر می‌گیرد که اساساً در کوره پخت جهت تولید کلینکر به مصرف می‌رسد نمونه‌ای از مصارف ویژه انرژی حرارتی و الکتریکی در فرآورده‌های تولید سیمان در جدول (الف-۳) ارائه شده است [24].

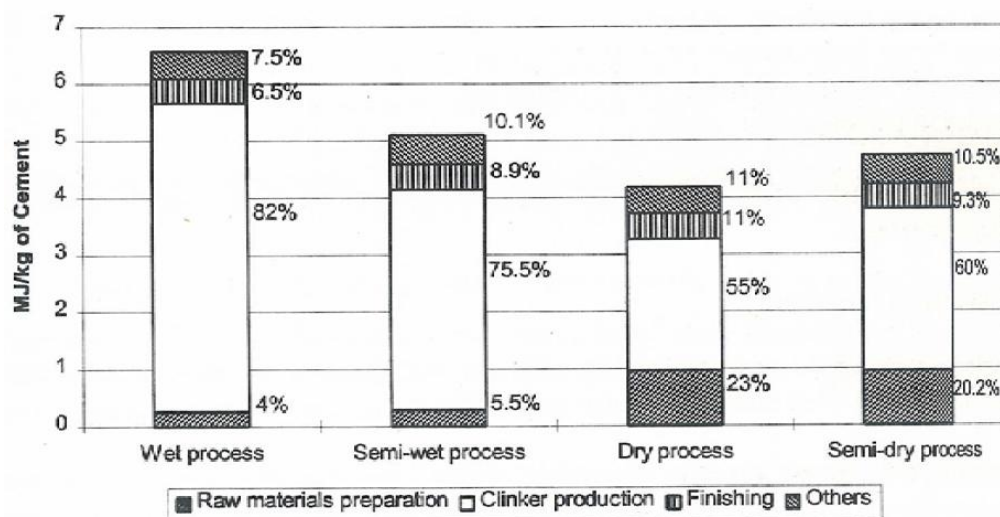
جدول (۶-۲): مصرف ویژه انرژی مخصوص حرارتی و الکتریکی برای تولید سیمان

فرآیند	انرژی حرارتی (گیگاژول بر تن کلینکر)	برق (کیلووات ساعت بر تن سیمان)
فرآیند مرطوب	۵/۴۳-۵/۰۲	۱۲۵-۷۰
فرآیند نیمه مرطوب	۳/۸۶-۳/۱۵	۱۲۵-۷۰
فرآیند خشک	۳/۴۰-۲/۸۸	۱۲۵-۱۱۰
فرآیند نیمه خشک	۳/۵-۳/۱	۱۲۵-۱۱۰

منابع انرژی ثانویه مورد استفاده در تولید سیمان گاز خروجی از کوره و گرمای حاصل از هوای داغ خروجی از خنک کننده کلینکر است.

¹ packer

گرمای ثانویه موجود در گازهای خروجی از کوره ابتدا در پیش گرمکن (پری هیتر) و برای پیش گرم کردن مواد خام قبل از ورود آنها به کوره و آسیاب مواد خام مورد استفاده قرار می گیرد. همچنین از گرمای اتلافی موجود در هوای داغ خروجی از خنک کننده کلینکر برای پیش گرمایش هوای احتراق و نیز برای خشک کردن و پیش گرم کردن مواد خام قبل از ورود به آسیاب مواد و کوره بهره برداری می شود. مقادیر مصرف ویژه انرژی برای فرآیندهای مختلف تولید سیمان در شکل نشان داده شده است.



شکل (۶-۶): مقادیر مصرف ویژه انرژی برای تولید سیمان [24].

برای بهترین فن آوری تولید به روش خشک که در آن از پیش گرمکن های سیلکونی و پیش کلسیناتور استفاده می شود. مصرف ویژه انرژی 3.05 MJ/Kg-Cl (حدود KCal/Kg clinker) 700 می باشد. اما بهر حال برخی از کارخانجات سیمان در کشورهای در حال توسعه که هنوز از فرآیند مرطوب و فن آوری های قدیمی استفاده می کنند دارای مصرف ویژه انرژی تا 8 MJ/ Kg-Cl هستند [12].

فهرست مراجع:

- 1 صفارزاده ج، (۱۳۹۱) "صنعت سیمان در گذر زمان (۱۳۹۰-۱۳۱۲)" جلد اول، چاپ اول، مرکز آموزش نیروی انسانی شرکت سیمان آبیک، تهران.
- 2 چهرگانی ح، (۱۳۹۱) "گزارشی از صنعت سیمان به مناسبت پایان سال ۱۳۹۰" ماهنامه علمی - تخصصی فن آوری سیمان، شماره ۴۹، ص ۵۱.
- 3 International Cement Review. (2011). "The Global Cement Report" **International Cement Review**, USA, 1th edition, pp 83.
- 4 امینی ی، (۱۳۹۰) "هزینه های انرژی و راه های برون رفت از آن" فناوری سیمان، ۴۸، ص ۳۳.
- 5 کریمی نیا غ، امینی ف، (۱۳۹۲) "ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۰" جلد اول، چاپ اول، وزارت نیرو معاونت امور برق و انرژی، تهران، ص ۴۶.
- 6 European Commission. (2010). "Reference document on best available techniques in the: cement and lime manufacturing industries". **Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC)**, pp 44.
- 7 IEA. (2009). "Energy Technology Transitions for Industry". **Strategies for the Next Industrial Revolution**. Paris. pp 77.
- 8 World Business Council for Sustainable Development. (2009). "Cement Technology Roadmap 2009". **International Energy Agency**. Paris. pp 26.
- 9 Rasul M. G. Widiyanto W. & Mohanty B. (2005). "Assessment of the thermal performance and energy conservation opportunities of a cement industry in Indonesia". **Applied thermal engineering**. 25, 17, 2950-2965.
- 10 Schneider M. Romer M. Tschudin M. & Bolio H. (2011). "Sustainable cement production-present and future" **Cement and Concrete Research**, 41,7, pp 642-650.

- 11 Utlu Z. Sogut Z. Hepbasli A. & Oktay Z. (2006). "Energy and exergy analyses of a raw mill in a cement production". **Applied Thermal Engineering**, 26, 17, 2479-2489.
- 12 شفیعی م ، سبوحی ی، (۱۳۸۱) "مطالعات جامع انرژی در صنایع بشدت انرژی بر " پژوهشکده علوم و فناوری انرژی دانشگاه صنعتی شریف، تهران.
- 13 Khurana S. Banerjee R. & Gaitonde U. (2002). "Energy balance and cogeneration for a cement plant". **Applied Thermal Engineering**, 22, 5, 485-494.
- 14 Engin, T. & Ari V. (2005). "Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems—A case study". **Energy Conversion and Management**, 46, 4, 551-562.
- 15 Madloul N. A. Saidur R. Hossain M. S. & Rahim N. A. (2011). "A critical review on energy use and savings in the cement industries". **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 15, 4, 2042-2060.
- 16 Ziya SÖĞÜT M. (2012). "A research on exergy consumption and potential of total CO_2 emission in the Turkish cement sector". **Energy Conversion and Management**, 56, 37-45.
- 17 عرب ق، کاظم زاده حنانی س، (۱۳۸۴) "تحلیل انرژی یک کارخانه سیمان" پنجمین همایش ملی انرژی، ۵.
- 18 Avami A. & Sattari S. (2007). "Energy conservation opportunities: cement industry in Iran". **International journal of Energy**, 1, 3, 65-71.
- 19 Worrell E. Martin N. & Price L. (2000). "Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry". **Energy**. 25, 12, 1189-1214.
- 20 Hasanbeigi A. Menke C. & Therdyothin, A. (2010). "The use of conservation supply curves in energy policy and economic analysis: the case study of Thai cement industry". **Energy Policy**, 38, 1, 392-405.
- 21 Legmann H. (2002). "Recovery of industrial heat in the cement industry by means of the ORC process". **Cement Industry Technical Conference**. IEEE-IAS/PCA 44, pp 29-35.

- 22 Wang J. Dai Y. & Gao L. (2009). "Exergy analyses and parametric optimizations for different cogeneration power plants in cement industry". **Applied Energy**, 86, 6, 941-948.
- 23 طائب ع، کوهی ف، (۱۳۷۷) "کتاب سیمان" جلد اول، چاپ دوم، انتشارات مرکز تحقیقات سیمان - دانشگاه علم و صنعت، تهران.
- 24 پایدار اردکانی ا، (۱۳۷۲) "سوخت در صنعت سیمان" جلد اول، چاپ اول، بخش آموزش مجتمع صنعتی سیمان آبیک، تهران، ص ۴۹.
- 25 Moran M. J. Shapiro H. N. Boettner D. D. & Bailey M. (2010), "**Fundamentals of engineering thermodynamics**", 7th edition, Wiley, UK. pp 300.
- 26 Peray, K. E. (1979). "**Cement manufacturer's handbook**" 1th edition, Chemical Pub, USA.
- 27 Cengel, Y. A. (2007). "**Heat & mass transfer: a practical approach**". 2th edition, Tata McGraw-Hill Education, USA.
- 28 Chen H. Goswami D. Y. & Stefanakos E. K. (2010). "A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat". **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 14, 9, 3059-3067.
- 29 صفریان بنا س، (۱۳۹۰)، پایان نامه ارشد: "ارزیابی بازیافت انرژی با استفاده از توسعه مدل سیستم انتقال گاز طبیعی"، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف.
- 30 Dai Y. Wang J. & Gao L. (2009). "Parametric optimization and comparative study of organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery". **Energy Conversion and Management**, 50, 3, 576-582.
- 31 Tchanche B. F. Papadakis G. Lambrinos G. & Frangoudakis A. (2009). "Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle". **Applied Thermal Engineering**, 29, 11, 2468-2476.
- 32 بهرامی م، اصغر حمیدی ع، عطایی آ، قدسی ر، (۱۳۹۲) "بررسی انرژی چرخه رانکین آلی برای تولید توان از حرارت‌های بازیافتی دما پایین کلکتور سهموی خطی خورشیدی با در نظر گرفتن

ملاحظات زیست محیطی "نشریه انرژی ایران، شماره ۱، دوره ۱۶.

- 33 Zhang X. He M. & Zhang Y. (2012). "A review of research on the Kalina cycle". **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 16, 7, 5309-5318.
- 34 پژوهشکده علوم و فناوری انرژی شریف، (۱۳۹۰) "طرح بازیافت انرژی در کارخانه سیمان فراز فیروزکوه" پژوهشکده علوم و فناوری انرژی شریف، تهران.
- 35 Linnhoff B. & Hindmarsh E. (1983). "The pinch design method for heat exchanger networks". **Chemical Engineering Science**, 38, 5, 745-763.

Abstract

Nowadays, the use of cement in construction industry has increased significantly, in different areas such as construction of roads, buildings, bridges, harbors, silos, etc. Thus, currently cement consumption rate is known as one of the worldwide development indicators of societies especially amongst developing countries.

The aim of this project is to introduce a methodology for application of first and second laws of thermodynamics in analysis of a cement factory. In this thesis, after initial presentation of basics and underlying principles of the proposed methodology, a scheme of production of clinker in a cement factory will be introduced, and based on the aforementioned underlying principles we will analyze energy and exergy factors of each and every equipment in that factory. Using this analysis, efficiency of first and second laws of thermodynamics in every equipment will be obtained which will lead to calculation of cumulative energy and exergy efficiency of the factory. Next, a sensitivity analysis in equipments of the factory will be conducted and sensitive energy and exergy parameters of each equipment will be obtained. In the end, we have tried to evaluate the evolution and improvement rate of technologies related to cement use in construction industry using energy and exergy analysis with a focus on heat recovery systems.

Keywords: Cement Industry, WHRPG, Efficiency, Exergy