



بهینه سازی مصرف انرژی در کوره دوار کارخانه سیمان یاسوج با استفاده از روش تحلیل اکسرژی

حسن فرح بخش^۱، سید علی اشرفی زاده^{۲*}

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
^۲استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

دریافت: مرداد ۹۵، بازنگری: مرداد ۹۵، پذیرش: شهریور ۹۵

چکیده

روش تحلیل اکسرژی یک ابزار مفید بهینه سازی است و راهکاری برای آنالیز ترمودینامیکی فرآیند هاست. یک کاربرد موازنه اکسرژی بیان می دارد که چقدر از پتانسیل کار قابل استفاده (مفید) وارد شده به فرآیند بوسیله فرآیند مصرف شده است. در این پژوهش هدف کاهش تلفات اکسرژی کل برای کوره دوار کارخانه سیمان یاسوج می باشد. لذا موازنه جرم و انرژی بر روی کوره انجام گردید. سپس سه نوع اکسرژی استاندارد، حرارتی و اختلاط برای مواد ورودی و خروجی کوره محاسبه شد. پس از آن با استفاده از روش تحلیل اکسرژی تلفات اکسرژی کل کوره محاسبه گردید. در انتها برای کاهش تلفات اکسرژی کل، تغییراتی در دمای هوای ورودی، دمای خوراک ورودی، و درصد هوای اضافی انجام شد و در مرحله بعد با استفاده از تکرار نرم افزاری مشاهده شد که به یک حالت بهینه برای سه متغیر دمای هوا، دمای خوراک و درصد هوای اضافی که در آن حالت تلفات کمترین مقدار است، می توان رسید. در آخر در نمودارهای مجزا و مقایسه ای برای نتایج به دست آمده ارائه گردید. تمامی محاسبات نرم افزاری در این پژوهش با نرم افزار متلب برنامه ریزی شد.

*عهده دار مکاتبات: aliashrafizadeh@yahoo.com

کلمات کلیدی: اکسرژی، روش تحلیل اکسرژی، کوره سیمان، بهینه سازی

۱- مقدمه

برگشت ناپذیری بود. بعد از آن سزارگوت [۳] و کوتاس [۴] مفهوم تحلیل اکسرژی در فرآیندهای مختلف را بسط داده و به کار بردند. بجان و همکاران [۵،۶،۷] اصول انتقال حرارت در قانون دوم ترمودینامیک و تولید آنتروپی را به آن مرتبط کردند. کانتی و همکاران [۸]، از یک ابزار مدل سازی تجاری به مدل پیش گرمکن چهار مرحله ای سیستم کوره کارخانه سیمان در مقیاس کامل (تولید کلینکر در حدود ۲۹۰۰ تن در روز)، با استفاده از شیر هوا به عنوان سوخت برای انتخاب یک جایگزین مناسب سوخت بهره بردند. چوآت [۹] نشان داد که هر دو فرصت در کوتاه مدت و در بلند مدت برای کاهش مصرف انرژی و کاهش انتشارات وجود دارد. بهبود فوری و کوتاه مدت را می توان با اجرای طرف تقاضا اقدامات مدیریت انرژی برای بهبود بهره وری انرژی و کاهش برق و استفاده از سوخت به دست آورد. کورونوس و همکاران [۱۰] تولید سیمان با استفاده از روش تجزیه و تحلیل اکسرژی را امتحان کردند. تجزیه و تحلیل شامل ارزیابی انرژی و اکسرژی ورودی در هر مرحله از فرایند تولید سیمان بود. اکسرژی شیمیایی واکنش نیز محاسبه و در نظر گرفته شد. مشخص شده است که ۵۰٪ تلفات اکسرژی وجود دارد حتی اگر مقدار زیادی از گرمای تلف شده

صنعت سیمان و به ویژه کوره های دوار آن ها از پرمصرف ترین صنایع در بحث انرژی می باشند. براساس گزارش سازمان زمین شناسی آمریکا ایران با تولید ۷۵ میلیون تن سیمان در سال ۲۰۱۴ میلادی عنوان چهارمین تولیدکننده بزرگ این محصول را در جهان به خود اختصاص داد. رابطه تنگاتنگ انرژی و محیط زیست، توجه به مقوله بهینه سازی مصرف انرژی را عمق بیشتری بخشیده است. در این بین روش تحلیل اکسرژی، انرژی دسترس ناپذیر را برای ما مشخص می کند و از اینرو از اهمیت زیادی برخوردار است. انرژی دسترس ناپذیر قسمتی از انرژی است که حتی توسط ماشین حرارتی برگشت پذیر هم نمی توان آنرا به کار تبدیل کرد. در گذشته، اقدامات اساسی جهت بهبود عملکرد سیستم های حرارتی و رسیدن به یک حالت بهینه به روش های مختلف از جمله تحلیل اکسرژی صورت گرفته است.

اصطلاح "اکسرژی" برای اولین بار توسط رانت معرفی شد [۱]. یونسجاکوویچ [۲] یکی از رهبران اولیه در استفاده از تجزیه و تحلیل اکسرژی در فرآیندها و صنایع شیمیایی در برخورد با

تحلیل اکسرژی تاکنون در این سطح در کارخانه سیمان یاسوج صورت نگرفته است، لذا این پژوهش جدید و بومی برای آن کارخانه خواهد بود.

۲- فرمول بندی مسئله

اکسرژی یا انرژی قابل تبدیل به کار، مجموعه ای از مفاهیم و ابزارهای مفهومی است، که بر مبنای قانون دوم ترمودینامیک بنا نهاده شده است. اکسرژی یک کمیت ترمودینامیکی است که بازگشت ناپذیری را در یک سیستم نشان می دهد. به بیان دیگر اکسرژی حداکثر کار محوری است که از یک مقدار انرژی در حالت ایده آل می توان دریافت کرد. طبق قانون دوم ترمودینامیک مجموع اکسرژی در جریان های خروجی از یک فرایند واقعی حالت پایدار همواره از مجموع اکسرژی در جریان های ورودی کمتر است. به عبارت دیگر در فرایند های واقعی (غیرایده آل) همواره مقداری تلفات پتانسیل و کاهش توانایی انجام کار وجود دارد. ولی تحلیل اکسرژی که خود یک تحلیل ترمودینامیکی می باشد به تنهایی قادر به توضیح نحوه اصلاح و بهینه سازی سیستم نیست، بلکه تنها نشان می دهد که چه میزان از فرآیند فعلی به اتلاف انرژی منتهی شده و امکان بهبود آن وجود دارد [۲۶،۲۷].

۲-۱- اکسرژی مواد

اکسرژی مواد بر اساس ترکیبی از اجزاء فیزیکی و شیمیایی مرتب شده اند. بخش شیمیایی اکسرژی به شکل گیری شیمیایی مواد در حالت استاندارد از مواد سطح اکسرژی مرجع در محیط نسبت داده شده است، در حالی که بخش فیزیکی اکسرژی به تغییر در درجه حرارت، فشار و غلظت (مخلوط) از این ماده نسبت داده شده است. اکسرژی کل Ex از رابطه زیر توسط ساتو [۱] به دست می آید:

$$EX = \sum_i n_i ex_i^0 + RT_0 \sum_i n_i \ln \frac{P_i}{P_0} + \sum_i n_i C_{p,i}^{mean} \left(T - T_0 - \ln \frac{T}{T_0} \right) + RT_0 \sum_i n_i \ln \left(\frac{n_i}{\sum_i n_i} \right) \quad (1)$$

که در آن n تعداد اجزاء مولی، ex_i^0 اکسرژی اجزاء مولار $\left(\frac{J}{mol} \right)$ ، T و P برترتیب دما و فشار مطلق می باشند. اندیس صفر نشان دهنده شرایط محیطی، $C_{p,i}^{mean}$ متوسط ظرفیت گرمایی ویژه $(J \cdot gmol^{-1} \cdot K^{-1})$ ، و R ثابت گاز ایده آل $(J \cdot gmol^{-1} \cdot K^{-1})$ می باشد.

در رابطه (۱)، در سمت راست معادله، عبارت اول بیانگر اکسرژی شیمیایی، عبارت دوم اکسرژی فشاری برای مواد گازی، عبارت سوم معرف اکسرژی حرارتی به دلیل تغییرات دمایی، و عبارت چهارم بیانگر اکسرژی اختلاط به دلیل تغییر در غلظت مواد است. برای فازهای مایع و جامد، اکسرژی فشار را می توان با رابطه $V_m(P - P_0)$ بدست آورد، که V_m حجم فاز مترکرم در دمای T است.

بازیابی گردد. اشرفی زاده و همکاران [۱۱]، با به کارگیری روش تحلیل اکسرژی، اثرات توزیع گرادیان دمایی به کمک یک مشعل ثانویه در توابع اگزرجتیک و محیطی فرایند تولید سیمان را مورد بررسی قرار داده اند. سیستم یخت تولید سیمان در چهار حوزه حرارتی شبیه سازی شد و سه خط تولید مورد بررسی قرار گرفت. با مطالعه نسبت پاشش سوخت به مشعل ثانویه، از ۱۰ تا ۴۰ درصد برای هر خط نشان داده شد که مشعل ثانویه می تواند تلفات اکسرژی را تا حدود ۲۵ درصد کاهش دهد، که منجر به کاهش گازهای گلخانه ای تا حدود ۳۵۰۰۰ متر مکعب در سال به ازای هر تن در روز از تولید کلینکر می شود. کاوازی [۱۲] عوامل مؤثر بر مصرف حامل های انرژی در تولید سیمان و روش های مدیریت مصرف انرژی را معرفی کرده است. سوگت و اوکتای [۱۳] تحلیل انرژی و اکسرژی در یک فرایند حرارتی از یک خط تولید برای یک کارخانه سیمان را مطرح کردند. زیمن و لاکتر [۱۴]، به بررسی مصرف اکسیژن و انتشار CO2 در تولید سیمان پرداختند. وورل و همکاران [۱۵] فرصت های بهبود بهره وری انرژی برای صنعت سیمان را بررسی نمودند. سوگت و همکاران [۱۶] بازیابی حرارت از کوره دوار یک کارخانه سیمان در ترکیه مورد بررسی قرار دادند. ابتدا، تجزیه و تحلیل اکسرژی بر روی داده های عملیاتی از کارخانه انجام شد. نتایج نشان داد که حدود ۵۱ درصد از حرارت کلی فرایند (۲۱۷/۳۱ گیگاژول) تلف می شود. در ادامه با ارائه یک مدل ریاضی برای مبدل حرارتی جدید مشخص کردند که ۵ درصد از حرارت اتلافی را می توان بازیافت نمود. و با بازیافت این حرارت، کاهش قابل توجهی در انتشار گازهای گلخانه ای بدست می آید. سوگت و همکاران [۱۷] از اثر درجه حرارت حالت مرده در دماهای مختلف روی تجزیه و تحلیل انرژی و اکسرژی یک آسیاب مواد خام در کارخانه سیمان را مورد بررسی قرار دادند. برخی از محققان روی اثرات بالا آمدن خاکستر و گرد و غبار بر محیط زیست بر اثر تولید سیمان متمرکز شده اند. تحسین و همکاران [۱۸] ممیزی انرژی روی کوره دوار کارخانه سیمانی در ترکیه به ظرفیت تولید ۶۰۰ تن کلینکر در روز انجام شده است. نتایج حاصل از اجرای ممیزی نشان داد که حدود ۱۵ درصد از کل انرژی ورودی (۴ مگاوات) را می توان بازیافت کرد. آن^۱ و همکاران [۱۹] مشخصات فیزیکی، شیمیایی و الکتریکی گرد و غبار تولید شده از سیمان را مورد مطالعه قرار دادند. صنعت سیمان صنعت شناخته شده با بسیاری از مراجع مرتبط ارائه اطلاعات دقیق فرآیند به کاربران است. به عنوان مثال، کورت [۲۰]، کولهاس و لپان [۲۱]، دودا [۲۲]، بواتنگ [۲۳] و آلسوپ [۲۴] منابع مفید در صنعت سیمان می باشد. آنها اطلاعات مفید زیادی را در مورد بهره برداری و طراحی پارامترهای تولید سیمان ارائه دادند.

^۱ Y. C. Ahn

عبارات سمت راست در رابطه (۴) به ترتیب اکسرژی های خوراک، هوا و سوخت هستند که مجموع آن‌ها عامل ورود اکسرژی به سیستم پخت را تشکیل می دهند.

$$EX_{out} = EX_{gases} + EX_{clinker} + EX_{dust} + EX_{losses} \quad (5)$$

عبارات سمت راست در رابطه (۵) به ترتیب اکسرژی های گازهای خروجی حاصل از احتراق، کلینکر تولیدی، غبار و تلفات حرارتی از بدنه کوره هستند که مجموع این عبارات، عوامل خروج اکسرژی را تشکیل می دهند.

برای محاسبه اکسرژی ها در روابط (۴) و (۵) نیازمند داشتن آنالیز جرمی خوراک و کلینکر، آنالیز حجمی سوخت گازی، ظرفیت حرارتی اجزاء، تعداد مول و جزء مولی اجزاء می باشیم. آنالیزها از کارخانه سیمان یاسوج، ظرفیت حرارتی اجزاء از هندبوک پری^۱ و اکسرژی استاندارد مولی از ضمیمه ۳ کتاب گوران وال^۲ استخراج شده و بقیه پارامترها محاسبه شده اند. آنالیزها در جداول (۱) تا (۳) و پارامترهای مورد نیاز برای محاسبات اکسرژی در جداول (۴) تا (۸) نشان داده شده اند.

جدول (۱): آنالیز جرمی کلینکر کارخانه سیمان یاسوج

کلینکر	درصد جرمی
SiO ₂	۲۲/۰۵
Al ₂ O ₃	۵/۳۴
Fe ₂ O ₃	۴/۰۴
CaO	۶۴/۷۶
MgO	۲/۵
SO ₃	۰/۱۸
Na ₂ O	۰/۰۵
K ₂ O	۰/۶۷

جدول (۲): آنالیز جرمی خوراک کارخانه سیمان یاسوج

خوراک	درصد جرمی
SiO ₂	۱۴/۳۵
Al ₂ O ₃	۳/۳۳
Fe ₂ O ₃	۲/۷۶
CaO	۷۴/۵۳
MgO	۴/۰۵
SO ₃	۰/۱۳
Na ₂ O	۰/۲۸
K ₂ O	۰/۵۳

در رابطه (۱) تغییرات فشار در مقایسه با دیگر متغیرها (اختلاط، دما و غلظت) قابل اغماض است و عبارت دوم را می توان حذف نمود [۱۱]. با مرتب سازی معادله فوق، معادله ۴-۴ را می توان به دست آورد:

$$EX_{mix} = \sum_i n_i ex_i^0 + \sum_i n_i C_{p_i} \Delta T_i \left(1 - \frac{T_0}{T_{mix}} \right) + RT_0 \sum_i n_i \ln(X_i) \quad (2)$$

که متغیرهای به کار رفته شده در این رابطه عبارتند از:

EX_{mix}: اکسرژی مخلوط

n_i: تعداد مول جزء i

ex_i⁰: اکسرژی استاندارد مولی جزء i

C_{p_i}: ظرفیت گرمایی ویژه جزء i

ΔT_i: اختلاف دمای جزء i با دمای مبنا

T₀: دمای مرجع ترمودینامیکی (دمای محیط) بر حسب

کلوین

T_{mix}: دمای مخلوط برحسب کلوین

R: ثابت عمومی گازها که مقدار آن برابر ۸/۳۱۴۵ ژول بر

مول-کلوین است.

$$X_i = \frac{n_i}{\sum n_i}$$

جزء مولی ماده i

۳-۲- تلفات اکسرژی

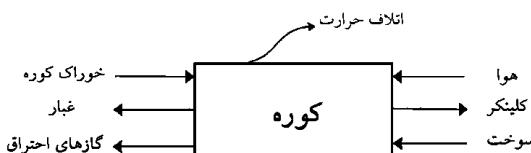
رابطه تلفات اکسرژی به صورت زیر است [۱۱]:

$$EL_{total} = \sum EX_{in} - \sum EX_{out} \quad (3)$$

که در آن EL_{total} تلفات اکسرژی کل، و EX_{in} و EX_{out} به ترتیب اکسرژی های ورودی و اکسرژی های خروجی هستند.

۳-۳- حجم کنترل

در شکل (۱)، کوره، به عنوان حجم کنترل نشان داده شده است:



شکل (۱): عوامل ورود و خروج اکسرژی کوره کارخانه سیمان یاسوج

با توجه به شکل (۱)، مجموع اکسرژی های ورود و خروج به صورت زیر است:

$$EX_{in} = EX_{feed} + EX_{air} + EX_{fuel} \quad (4)$$

¹ perry

² Guran Wall

جدول (۳): آنالیز حجمی سوخت (گاز طبیعی) کارخانه سیمان یاسوج

سوخت	درصد حجمی
CH ₄	۸۸/۲۴
C ₂ H ₆	۳/۳۷
C ₃ H ₈	۱/۲۸
C ₄ H ₁₀	۰/۶۸
C ₅ H ₁₂	۰/۲۶
C ₆ H ₁₄	۰/۱۵
CO ₂	۰/۴۲
N ₂	۵/۶

جدول (۶): اطلاعات هوا برای محاسبه اکسرژی هوا

جزء مولی	تعداد مول	ظرفیت حرارتی [J/mol-K]	اکسرژی استاندارد [J/mol-K]	درصد حجمی	مواد
۰/۷۹	۳۳۴/۸	۳۴	۷۲۰	۷۹	N ₂
۰/۲۱	۸۶/۳۴	۳۶	۳۹۷۰	۲۱	O ₂

جدول (۷): اطلاعات گازهای خروجی برای محاسبه اکسرژی گازها

جزء مولی	تعداد مول	ظرفیت حرارتی [J/mol-K]	اکسرژی استاندارد [J/mol-K]	درصد جرمی	مواد
۰/۰۱۴	۷/۴	۳۵/۸	۳۹۷۰	۱/۴	O ₂
۰/۲۸۵	۱۵۰/۵	۵۴/۳	۱۹۸۷۰	۲۸/۵	CO ₂
۰/۵۶	۲۹۵/۷	۲۹/۱۲	۷۲۰	۵۶	N ₂
۰/۱۴	۷۴	۴۳/۷۵	۹۵۰۰	۱۴	H ₂ O

جدول (۴): اطلاعات کلینکر برای محاسبه اکسرژی کلینکر

جزء مولی	تعداد مول	ظرفیت حرارتی [J/mol-K]	اکسرژی استاندارد [J/mol-K]	درصد جرمی	مواد
۰/۲۱۷۷۵	۲۹/۷۲	۷۹/۱۴	۱۹۰۰	۲۲/۰۵	SiO ₂
۰/۰۳۰۲	۴/۲۴	۱۴۵/۷	۲۰۰۴۰۰	۵/۳۴	Al ₂ O ₃
۰/۰۲۴۲	۳/۲۷	۱۹۹/۷	۱۶۵۰۰	۴/۰۴	Fe ₂ O ₃
۰/۶۸۵۳	۹۳/۵۴	۷۰/۹۵	۱۱۰۲۰۰	۶۴/۷۶	CaO
۰/۰۳۷	۵/۰۵	۵۲/۲۶	۶۶۸۰۰	۲/۵	MgO
۰/۰۰۱۲	۰/۱۸	۵۱/۸	۲۴۹۱۰۰	۰/۱۸	SO ₃
۰/۰۰۰۵	۰/۰۶۵	۱۰۰/۲	۲۹۶۲۰۰	۰/۰۵	Na ₂ O
۰/۰۰۴	۰/۵۸	۱۳۱/۱	۴۱۳۱۰۰	۰/۶۷	K ₂ O

جدول (۸): اطلاعات سوخت برای محاسبه اکسرژی سوخت

جزء مولی	تعداد مول	ظرفیت حرارتی [J/mol-K]	اکسرژی استاندارد [J/mol-K]	درصد جرمی	مواد
۰/۸۸۲۴	۳۰/۱۴	۳۵/۶	۸۳۱۶۵۰	۸۸/۲۴	CH ₄
۰/۰۳۳۷	۱/۱۵	۵۱/۹	۱۴۹۵۸۴۰	۳/۳۷	C ₂ H ₆
۰/۰۱۲۸	۰/۴۴	۷۱	۲۱۵۴۰۰۰	۱/۲۸	C ₃ H ₈
۰/۰۰۶۸	۰/۲۳	۹۶/۲	۲۸۰۵۸۰۰	۰/۶۸	C ₄ H ₁₀
۰/۰۰۲۶	۰/۰۹	۱۱۷	۳۴۶۳۳۰۰	۰/۲۶	C ₅ H ₁₂
۰/۰۰۱۵	۰/۰۵	۱۳۸	۴۱۱۸۵۰۰	۰/۱۵	C ₆ H ₁₄
۰/۰۰۴۲	۰/۱۴	۳۷	۱۹۸۷۰	۰/۴۲	CO ₂
۰/۰۰۵۶	۱/۹۱	۲۹/۱۲	۷۲۰	۵/۶	N ₂

جدول (۵): اطلاعات خوراک برای محاسبه اکسرژی خوراک

جزء مولی	تعداد مول	ظرفیت حرارتی [J/mol-K]	اکسرژی استاندارد [J/mol-K]	درصد جرمی	مواد
۰/۱۳۷۲	۳۳/۱	۷۱/۵	۱۹۰۰	۱۴/۳۵	SiO ₂
۰/۰۱۸۵	۴/۵۲	۱۳۵/۸	۲۰۰۴۰۰	۳/۳۳	Al ₂ O ₃
۰/۰۱۵۹	۳/۸۲	۱۸۲/۶	۱۶۵۰۰	۲/۷۶	Fe ₂ O ₃
۰/۷۶۳۸	۱۸۴	۶۵/۷۸	۱۱۰۲۰۰	۷۴/۵۳	CaO
۰/۰۵۷۷	۱۳/۹۲	۵۰/۸۳	۶۶۸۰۰	۴/۰۵	MgO
۰/۰۰۰۹	۰/۲۲۵	۴۹/۵	۲۴۹۱۰۰	۰/۱۳	SO ₃
۰/۰۰۲۶	۰/۶۲۵	۹۷/۴	۲۹۶۲۰۰	۰/۲۸	Na ₂ O
۰/۰۰۳۳	۰/۷۸	۱۲۲/۲	۴۱۳۱۰۰	۰/۵۳	K ₂ O

طبق اطلاعات جداول فوق، موازنه جرم و انرژی حول سیستم انجام شد و نتیجه آن در جداول (۹) و (۱۰) نشان داده شده است.

جدول (۹): نتیجه موازنه جرم روی سیستم کوره سیمان یاسوج

مجموع جرم های ورودی	$2153.57 \frac{ton}{day}$
مجموع جرم های خروجی	$2156.8 \frac{ton}{day}$
درصد خطا	٪ ۰/۱۴

$$EX_{loss} = 4.28 \text{ MW}$$

سایر مقادیر اکسرژی ها برای مواد طبق اطلاعات جداول (۴) تا (۸)، در زیر آورده شده اند.

$$EX_{clinker} = 21.45 \text{ MW}$$

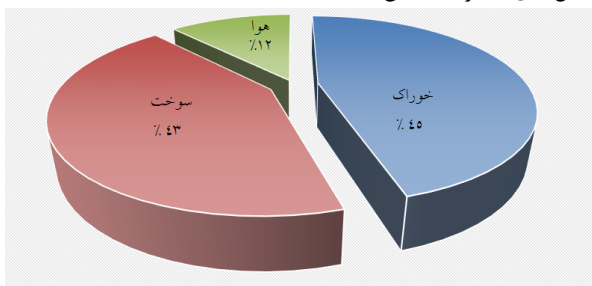
$$EX_{feed} = 33 \text{ MW}$$

$$EX_{Gases} = 14.36 \text{ MW}$$

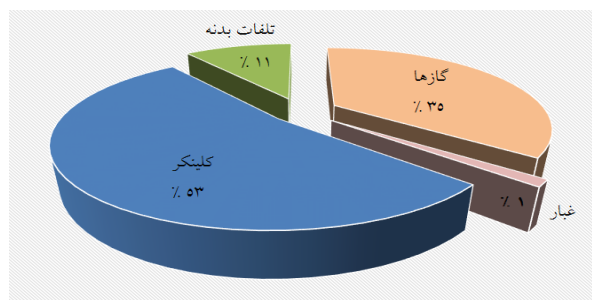
$$EX_{fuel} = 30.86 \text{ MW}$$

$$EX_{Air} = 8.64 \text{ MW}$$

اکسرژی های ورود و خروج به صورت نمودار تفکیکی به ترتیب در شکل های (۲) و (۳) نشان داده شده است.



شکل (۲): تفکیک اکسرژی های ورودی کوره کارخانه سیمان یاسوج



شکل (۳): تفکیک اکسرژی های خروجی کوره کارخانه سیمان یاسوج

طبق روابط (۴)، (۵) و (۳) تلفات کل برابر است با:

$$EX_{in} = 72.5 \text{ MW}$$

$$EX_{out} = 40.5 \text{ MW}$$

$$EL_{total} = EX_{in} - EX_{out} = 72.5 - 40.5 = 32 \text{ MW}$$

لازم به ذکر است تلفات اکسرژی کل برای ۱۰ درصد هوای اضافی محاسبه شده است. همان گونه که ملاحظه می شود تلفات اکسرژی برای کوره ۳۲ مگاوات است. در واقع در سیستم کوره کارخانه سیمان یاسوج حدود ۴۵ درصد از اکسرژی (قابلیت انجام کار مفید) از دست می رود. هر اندازه میزان این تلفات را بتوان کاهش داد، به کارایی مطلوب نزدیکتر می شویم.

۴- مدل سازی

کوره مورد مطالعه، کوره کارخانه سیمان یاسوج می باشد که دارای مشخصات زیر است:

طول کوره ۴۶ متر، قطر داخلی ۳/۲ متر، قطر خارجی ۳/۶ متر، متوسط ضخامت پوشش نسوز ۱۵ سانتی متر و شیب کوره ۴٪ است.

جدول (۱۰): نتیجه موازنه انرژی روی سیستم کوره سیمان یاسوج

مجموع انرژی های ورودی	$11.03 \frac{kcal}{day}$
مجموع انرژی های خروجی	$10.7 \frac{kcal}{day}$
درصد خطا	۲/۹٪

اکسرژی غبار طبق رابطه زیر به دست می آید [۱۷]:

$$EX_{Dust} = m \times C_p \times (T_{Dust} - T_0) \times \left(1 - \frac{T_0}{T_{Dust}}\right) \quad (۶)$$

بر اساس موازنه جرم، دبی جرمی غبار برابر با $\dot{m}_{Dust} = 0.83 \text{ kg/s}$ است. ظرفیت حرارتی غبار برابر 0.23 kcal/kg بر کیلوگرم-درجه سانتی گراد است [۱۷]. از آنجا که هر کالری برابر $4/18$ ژول است، ظرفیت حرارتی غبار برابر است با:

$$C_{pDust} = \sum X_i C_{pi} \quad (۷)$$

لذا این مقدار برابر $C_{pDust} = 962 \text{ J/kg} - k$ می باشد. دمای محیط برابر $288/45$ کلوین و دمای غبار برابر 1148 کلوین می باشد. طبق اطلاعات فوق مقدار اکسرژی غبار برابر است با: $EX_{Dust} = 0.514 \text{ MW}$. برای محاسبه تلفات بدنه کوره ابتدا دمای 38 نقطه از کوره را با دماسنج لیزری اندازه گرفته و متوسط گیری کرده و طبق رابطه زیر محاسبه گردید [۱۱]:

$$EX_{loss} = Q \times \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (۸)$$

که در رابطه بالا Q انتقال حرارت جابجایی بر حسب ژول و T متوسط دمای بدنه کوره (530 کلوین) می باشد. T_0 نیز دمای محیط بر حسب کلوین است. مقدار انتقال حرارت از رابطه زیر به دست می آید:

$$Q = h \times A \times (T - T_0) \quad (۹)$$

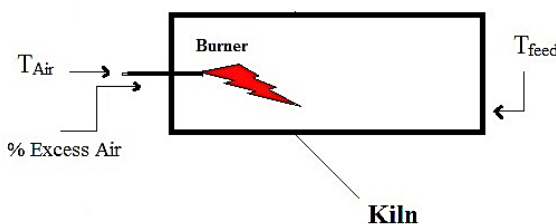
که h ضریب انتقال حرارت جابجایی، A سطح مقطع بدنه کوره، T متوسط دمای بدنه کوره بر حسب کلوین و T_0 دمای محیط بر حسب کلوین است. طول و قطر کوره به ترتیب 46 و $3/2$ متر است، سطح مقطع آن برابر است با:

$$A = \pi \times D \times L \quad (۱۰)$$

پس مساحت سطح مقطع برابر $A = 462.44 \text{ m}^2$ است. طبق اطلاعات فوق مقدار اکسرژی تلفات برابر است با:

۴-۱- مدل سیستم

شکل (۴) به عنوان مدل سیستم کوره انتخاب شده است. همان طور که ملاحظه می شود در این مدل با تغییراتی که در دمای هوای ورودی، دمای خوراک ورودی، و درصد هوای اضافی داده شد، مدل به دنبال کاهش تلفات و رسیدن به یک حالت بهینه می باشد.



شکل (۴): مدل ارائه شده سیستم کوره

۴-۲- فرضیات مدل سازی

بخش اصلی مصرف انرژی کارخانه سیمان در کوره آن می باشد.

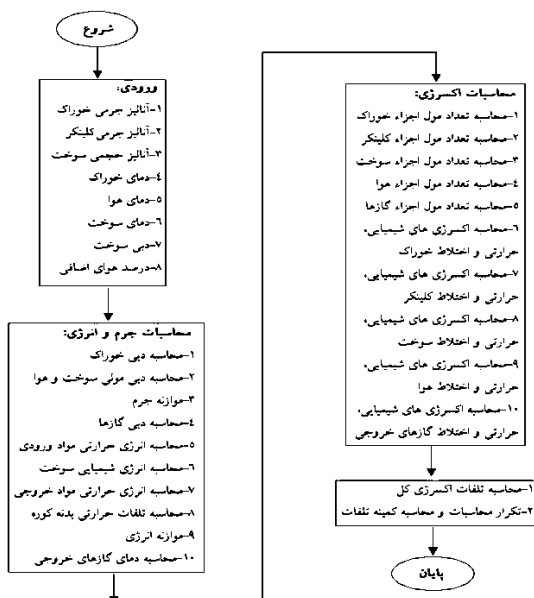
- قطر داخلی و خارجی کوره ثابت فرض شده است.
- احتراق کامل فرض می شود.
- گازها ایده آل فرض می شوند.
- گرماهای ویژه و واکنش مستقل از دما و آنها در امتداد جهت محوری ثابت بودند.
- ضرایب جابجایی و انتشار مستقل از دما و موقعیت هستند.
- هدایت در گازها و مواد جامد در جهت محوری از دیواره نادیده گرفته شد.
- مواد جامد منتقل شده توسط گازهای جریان گاز در مدل گنجانده نشده اند.
- تولید No_x در گازهای خروجی نداریم.

۴-۳- الگوریتم مدل

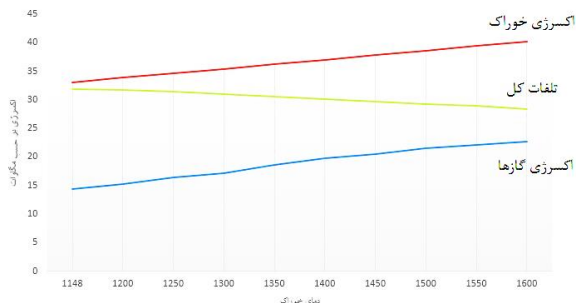
بر اساس الگوریتم شکل (۵) با در اختیار دادن مجموعه ای از اطلاعات به نرم افزار به عنوان داده های اولیه ورودی از جمله آنالیزهای جرمی و حجمی و برخی نقاط دمایی، نرم افزار محاسبات مربوط به موازنه جرم را انجام داده و سپس جرم گازها را محاسبه کرده و از طریق موازنه انرژی دمای گازها و دبی سوخت مورد نیاز را به دست می آورد. پس از آن وارد مرحله اصلی یعنی موازنه اکسرژی می شود، لذا پارامترهای لازم برای محاسبه سه نوع اکسرژی شیمیایی، حرارتی و اختلاط (هر کدام را برای تک تک اجزاء محاسبه می کند) مواد را محاسبه کرده (مقادیر ثابت در خود نرم افزار وارد شده اند) و در نهایت تلفات کل و سپس تلفات حرارتی بهینه را محاسبه می نماید.

۵- نتایج مدل سازی

نتایج به صورت نمودار ارائه می گردد. در نمودارهای شکل های (۵) الی (۹) دماها بر حسب کلویین و اکسرژی گازها، هوای ورودی، خوراک و تلفات اکسرژی کل بر حسب مگاوات می باشند.



شکل (۵): الگوریتم مدل



شکل (۶): تأثیر تغییرات دمای خوراک بر اکسرژی گاز، هوا، و تلفات اکسرژی کل

همان طور که در شکل (۶) مشخص است، با افزایش دمای خوراک ورودی، اکسرژی خوراک که از نوع اکسرژی ورودی می باشد افزایش می یابد و متعاقباً در آن سوی موازنه انرژی، طبق افزایش دمای گازها، اکسرژی گازها (از نوع اکسرژی خروجی) نیز افزایش می یابد. لذا در موازنه اکسرژی مشاهده می شود که تلفات اکسرژی کل کاهش می یابد.

همچنین با توجه به شکل (۷)، با افزایش دمای هوای ورودی، در ورودی ها اکسرژی هوا افزایش، اکسرژی سوخت اندکی کاهش می یابد (چون اگر ما بتوان از طریق حرارت گازهای خروجی و روش های دیگر هوا را پیش گرم کرد، مصرف سوخت کمتر خواهد شد و در نتیجه اکسرژی سوخت نیز کاهش می یابد)، و اکسرژی

۵-۱- بازده اکسرژی

بازده اکسرژی را می‌توان خارج قسمت اکسرژی مفید به کل اکسرژی تعریف کرد. در تعریفی دیگر می‌توان این بازده را خارج قسمت مجموع اکسرژی های ورودی به مجموع اکسرژی های خروجی بیان نمود:

$$(11) \quad \text{بازده اکسرژی} = \frac{\text{اکسرژی خروجی}}{\text{اکسرژی ورودی}}$$

طبق رابطه (۱۱)، بازده اکسرژی سیستم کوره کارخانه سیمان یاسوج برابر ۰/۵۶ می باشد که این عدد هر چه به عدد واحد نزدیکتر باشد به معنی این است که برگشت ناپذیری ها کمتر بوده و برعکس.

۶- بحث و نتایج

طبق مشاهدات بهینه ترین حالت که در آن تلفات اکسرژی کمترین مقدار را دارد، در دمای خوراک ۱۳۴۰ کلوین (۱۰۶۷ درجه سانتی گراد)، دمای هوای ۱۴۷۰ کلوین (تقریباً ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد) و درصد هوای اضافی ۱۵ درصد به وقوع می پیوندد و تلفات اکسرژی کل تا حدود ۵ مگاوات کاهش می یابد.

طبق نمودار شکل (۷)، مشاهده شد هرچه دمای خوراک ورودی را بتوان افزایش داد، قاعدتاً تلفات اکسرژی کل کمتر می شود، اما تا چه حد می توان این افزایش را ادامه داد. تا زمانی که مواد مذاب در یک سوم ابتدایی کوره تشکیل نشوند، می توان دمای خوراک را افزایش داد. طبق گزارش سیستم کنترل کارخانه سیمان یاسوج، در دمای بالای ۱۰۶۷ درجه سانتی گراد فاز مذاب تشکیل می شود و این برای کوره مضر خواهد بود.

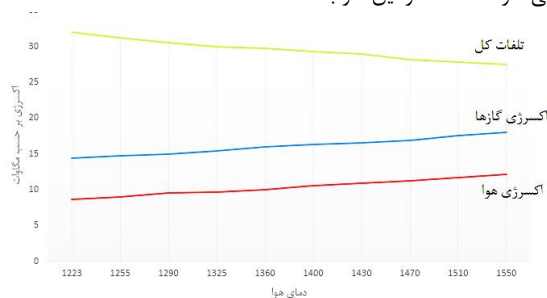
بر اساس نمودار شکل (۸)، ملاحظه شد که با افزایش دمای هوای ورودی نیز تلفات اکسرژی کل کاهش می یابد. اما طبق گزارش کارخانه، امکان پیش گرمایش هوای ورودی بیشتر از ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد برای کارخانه وجود ندارد.

و اما طبق نمودار شکل (۹)، هرچه درصد هوای اضافی کاهش داده شد، تلفات اکسرژی کل با کاهش مواجه می شد. با توجه به مشاهدات سیستم کنترل کارخانه، با داشتن دماهای خوراک و هوای مذکور، در درصدهای زیر ۱۵ درصد، در عمل احتراق ناقص صورت می گیرد و غلظت مونوکسید کربن در گازهای خروجی از حد مجاز بیشتر می شود.

فرآیند تولید سیمان دارای مصرف انرژی زیادی است و اصولاً در واکنش های جامد-جامد، به دلیل بالا بودن دما، تلفات حرارتی زیادی وجود دارد. در این جا بازده اکسرژی ۰/۵۶ است که هرچه به واحد نزدیکتر باشد به این معنی است که برگشت ناپذیری ها کمتر خواهد بود.

۷- نتیجه گیری

گازها در خروجی ها افزایش می یابند. در نهایت تلفات کل کاهش نسبی خواهد داشت و این خوب است.



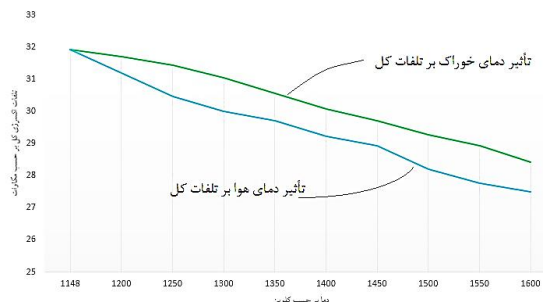
شکل (۷): تأثیر تغییرات دمای هوا بر اکسرژی گاز، هوا و تلفات اکسرژی کل

در شکل (۸)، با افزایش درصد هوای اضافی مجدداً تغییراتی در اکسرژی های ورودی و خروجی به وجود می آید. همان طور که در شکل نشان داده شده، این تغییرات در نهایت منجر به کاهش اندکی در تلفات کل می شود.

در آخر در شکل (۹)، طی یک نمودار مقایسه ای تأثیر افزایش دماهای خوراک و هوا نسبت به کاهش تلفات اکسرژی کل نشان داده شده است. همان طور که اشاره شد در هر دو مورد با افزایش دما، تلفات کاهش می یابند. البته افزایش دما در هوای ورودی به نسبت افزایش دما در خوراک ورودی تأثیر بیشتری در کاهش تلفات کل دارد.



شکل (۸): تأثیر تغییرات درصد هوای اضافی بر اکسرژی گاز، هوا و تلفات اکسرژی کل



شکل (۹): تأثیر تغییرات دمایی خوراک و هوا بر تلفات اکسرژی کل

EX_{fuel}	اکسرژی سوخت، Mw
$EX_{clinker}$	اکسرژی کلینکر، Mw
EX_{gases}	اکسرژی گازها، Mw
EX_{losses}	اکسرژی تلفات بدنه، Mw
EX_{dust}	اکسرژی غبار [Mw]
A	سطح مقطع کوره، m^2
Q	انتقال حرارت جابجایی، J

مراجع

- [1] Z. Rant, Exergie, ein neues Wort für 'Technische Arbeitsfähigkeit' (Exergy, a new word for technical availability). *Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A*, 22(1) (1956) 36-37.
- [2] F. Bosnjakovic, *Technical thermodynamics*, Holt, Rinehart & Winston, New York (1965).
- [3] J. Szargut, D.R. Morris, F. R. Steward, *Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes*, Hemisphere Publishing Corporation, New York, London (1988).
- [4] T. J. Kotas, *The exergy method of thermal plant analysis*. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida (1995).
- [5] A. Bejan, *Entropy generation through heat & fluid flow*, Wiley, New York (1982).
- [6] A. Bejan, *Advanced engineering thermodynamics*, Wiley, New York (2006).
- [7] A. Bejan, G. Tsatsaronis, M. Moran, *Thermal design & optimization*, Wiley, New York (1996).
- [8] U. Kaantee, R. Zevenhoven, R. Backman, M. Hupa, *Cement manufacturing using alternative fuels and the advantages of process modeling, Recovery, Recycling, Re-integration*, Feb. 12-15, Geneva, Switzerland (2002).
- [9] W. T. Choate, *Energy and emission reduction opportunities for the cement industry*, U.S. Department of Energy, *Energy Efficiency and Renewable Energy* (2003).
- [10] C. Koroneos, G. Roumbas, N. Moussiopoulos, *Exergy analysis of cement production*, *International Journal of Exergy*, 2(1) (2005) 55-68.
- [11] S. A. Ashrafizadeh, M. Amidpour, A. Allahverdi, *Exergetic and environmental performance improvement in cement production process by driving force distribution*, *Korean J. Chem. Eng.*, 29(5) (2012) 606-613.
- [12] T. Kawaes, *Cement process and energy saving, the energy conservation center*, Japan (2006).
- [13] Z. Sogut, Z. Oktay, *Energy and exergy analyses in a thermal process of a production line for a cement factory and applications*, *International Journal of Exergy*, 5(2) (2008) 218-240.
- [14] F. Zeman, K. Lakner, *The reduced emission oxygen Kiln, A White Paper Report for the Cement*

در این پژوهش مشاهده شد تلفات اکسرژی کل برای سیستم برابر ۳۰ مگاوات است. با ارائه مدل پیشنهادی و تغییراتی که در درصد هوای اضافی، دمای خوراک و دمای هوا انجام شد نتایج را به صورت نمودار ارائه کرده و ملاحظه شد که اگر شرایطی فراهم گردد تا دمای خوراک، دمای هوا و درصد هوای اضافی پیشنهادی فراهم شوند (دمای خوراک ۱۳۴۰ کلوین معادل ۱۰۶۷ درجه سانتی گراد، دمای هوای ۱۴۷۰ کلوین تقریباً ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد و درصد هوای اضافی ۱۵ درصد)، تلفات سیستم را تا ۵ مگاوات می توان کاهش داد.

در راستای ادامه پژوهش پیشنهادهای زیر توصیه می گردد:

- ترتیبی اتخاذ گردد تا رسیدن به کمترین تلفات ممکن محاسبه شده، و در دماها و درصد هوای اضافی مذکور فراهم گردد.
- یکی از مشکلات اساسی کارخانه های سیمان کشور از جمله کارخانه سیمان یاسوج، نوسانات خوراک کوره و عدم تنظیم درجه حرارت آن می باشد. یک پیشنهاد می تواند وجود مجموعه ای با تفکر مهندسی جهت طراحی، برنامه ریزی و نظارت بر اجرای عملیات معدن کاری باشد.
- ترمیم عایق نسوز جداره داخلی کوره (متوسط دمای بدنه کوره در دوره اندازه گیری، ۵۳۰ کلوین (۲۵۷ درجه سانتی گراد) بوده است که این میزان تقریباً زیاد می باشد. اشکال کار عمدتاً در عایق جداره ی داخلی آن است).
- پیشنهاد می شود با ایجاد تغییرات در دبی اولیه سوخت، تغییرات در تلفات اکسرژی کل بررسی گردد.
- پیشنهاد می شود با ایجاد تغییرات در دمای سوخت، تغییرات در تلفات اکسرژی کل بررسی گردد.
- تحلیل اکسرژی با توجه به افت فشار و تولید NO_x و احتراق ناقص نیز می تواند مورد بررسی قرار گیرد.

فهرست علامتها

EX_{mix}	اکسرژی مخلوط، Mw
ex_i^0	اکسرژی استاندارد مولی جزء i ، J/mol-K
n_i	تعداد مول جزء i ، mol
C_{p_i}	ظرفیت حرارتی ویژه جزء i ، J/mol-K
ΔT_i	اختلاف دمای جزء i با دمای مبنا
T_0	دمای محیط، k
T_{mix}	دمای مخلوط، k
R	ثابت عمومی گازها، J/mol-K
X_i	جزء مولی
EL_{total}	تلفات اکسرژی کل، Mw
EX_{in}	اکسرژی ورودی، Mw
EX_{out}	اکسرژی خروجی، Mw
EX_{feed}	اکسرژی خوراک، Mw
EX_{air}	اکسرژی هوا، Mw

- electrostatic precipitator, Korean J. Chem. Eng., 21(1) (2004) 182.
- [20] E. P. Kurt, Cement manufacturers' handbook, Chemical Publishing Co. Inc. New York (1979).
- [21] B. Kohlhaas and O. Labahn, Cement engineers' handbook, 4th Ed. Int. Public Service (1982).
- [22] W. H. Duda, Cement data book (1), Bauverlag GmbH (1985).
- [23] A. A. Boateng, Rotary Kilns: Transport Phenomena and transport Processes, Elsevier (2008).
- [24] P. A. Alsop, The cement plant operation handbook, International Cement Review (2010).
- [25] N. Sato, Chemical energy and exergy an introduction to chemical thermodynamics for engineering, Elsevier, First Ed., 112 (2004).
- [26] A. Ataei, M.H. Panjeshahi, M. Gharaie, Performance evaluation of counter-flow wet cooling towers using exergetic analysis, Transaction of Canadian Society for Mechanical Engineering, 32 (2008) 499-511.
- [27] H. Taniguchi, K. Mouri, Exergy analysis on combustion and energy conversion processes, Energy, 30, (2005) 111-117
- Sustainability Initiative of the World Business Council on Sustainable Development, Lenfest Center for Sustainable Energy Columbia University in New York Report No. 2008.01. (2008).
- [15] E. Worrell, C. Galitsky, L. Price, Energy efficiency improvement opportunities for the cement industry, Environmental Energy Technologies Division Lawrence Berkeley National Laboratory (2008).
- [16] Z. Sogut, Z. Oktay, H. Karakoc, Mathematical modeling of heat recovery from a rotary kiln, Appl. Therm. Eng., 30(8-9), 817 (2010).
- [17] Z. Sogut, Z. Oktay, A. Hepbasli, Investigation of effect of varying dead-state temperatures on energy and exergy efficiencies of a Raw Mill process in a cement plant, International Journal of Exergy, 6(5) (2009) 655-670.
- [18] E. Tahsin, A. Vedat,, Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems— A case study, Energy Conversion and Management, 46 (2005) 551-562.
- [19] Y.C. Ahn, J.M. Cho, G.T. Kim, S.R. Cha, J.K. Lee, Y.O. Park, S. D. Kim, S. H. Lee, Physical, chemical and electrical analysis of dust generated from cement plants for dust removal with an