

## اثر توزیع نیروهای محرکه بر اتلافات اکسرژی در سیستم پخت سیمان با استفاده از مشعل ثانویه

سید علی اشرفی زاده<sup>۱</sup>، مجید عمید پور<sup>۲\*</sup>، علی اله وردی<sup>۳</sup>  
<sup>۱</sup>دانشگاه آزاد اسلامی - واحد دزفول (گروه مهندسی شیمی)،  
<sup>۲</sup>دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی - دانشکده مهندسی مکانیک،  
<sup>۳</sup>دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده مهندسی شیمی - مرکز تحقیقات سیمان  
(\*نویسنده مخاطب: amidpour@kntu.ac.ir)

### چکیده

در این مقاله تحلیل اکسرژی سیستم پخت سیمان جهت نصب مشعل ثانویه که نتیجه آن توزیع نیروهای محرکه و کاهش اتلافات اکسرژی است مورد بررسی قرار می گیرد. جهت بررسی اثر مشعل ثانویه در فرایند پخت، منطقه پخت سیمان به چهار ناحیه حرارتی تقسیم بندی شده و شبیه سازی گردیده است. نتایج دلالت بر آن دارد که برای پیش گرمکن های شافتی میتوان یک نقطه بهینه با توجه به درصد کلسیناسیون در پیش گرمکن به دست آورد ولی برای پیش گرمکن های سیکلونی تا حدی که دمای منطقه پخت در کوره از حد مجاز برای تشکیل فاز آلایت کمتر نشود تزریق سوخت به مشعل ثانویه امکان پذیر خواهد بود. در حالت کلی با توجه به ظرفیت واحد تولیدی و نوع پیش گرمکن پیشنهاد میشود که با ترکیب شبیه سازی انجام شده و برنامه ریزی ریاضی تصمیم نهایی اخذ گردد.

واژه های کلیدی: اتلافات اکسرژی، نیروهای محرکه، مشعل ثانویه، سیستم پخت سیمان.

### ۱- مقدمه

امروزه بحران انرژی و مسائل زیست محیطی باعث گردیده که صنایع، به راه کارهایی روی آورند که با استفاده از آنها بتوان مصرف حامل های انرژی را کاهش داده و بهره وری اقتصادی خود را نیز ارتقاء بخشند. قانون دوم ترمودینامیک و تحلیل اکسرژی که یک ابزار مفید در کاربرد این قانون است، امروزه رواج گسترده ای در مباحث بهینه سازی پیدا کرده است. صنعت سیمان به عنوان یک صنعت استراتژیک سهم عمده ای در مصرف حامل های انرژی را به خود اختصاص می دهد. سیستم پخت که قلب کارخانه سیمان است، مصرف کننده اصلی سوخت می باشد. چنانچه بتوان اتلافات اکسرژی در این منطقه را کاهش داد، تا حد زیادی مصرف حامل های انرژی در فرایند، بهبود خواهد یافت. از آنجاییکه اتلافات اکسرژی ارتباط مستقیمی با عوامل برگشت ناپذیری سیستم دارند و با توجه به ارتباط این عوامل با نیروهای محرکه در پدیده های انتقال، می توان یک ارتباط منطقی بین آنها را انتظار داشت. طبعاً نحوه توزیع نیروهای محرکه بدلیل تاثیر آنها در تخریب پتانسیل ها می تواند روی اتلافات اکسرژی اثر گذار باشد.

بعد از اولین باری که Rant [۱] اکسرژی را معرفی کرد غالب کاربردهای این مبحث به تولید کار از گرما اختصاص می یافت. Bosnjakovic [۲] اولین کسی بود که مفهوم اکسرژی را وارد مباحث فرایندی و صنایع شیمیایی نمود. بعدها افرادی همچون Szargut [۳] و Kotas [۴] کاربرد مفهوم اکسرژی را گسترش همه جانبه ای دادند. Bejan [۵,۷,۶] مباحث علم

۱- مربی ( دانشجوی دوره دکتری) دانشگاه آزاد اسلامی - واحد دزفول - گروه مهندسی شیمی

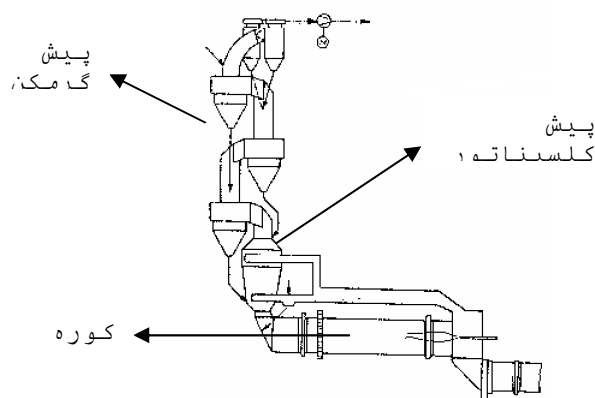
۲- دانشیار، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی - دانشکده مهندسی مکانیک

۳- دانشیار، دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده مهندسی شیمی - مرکز تحقیقات سیمان

انتقال حرارت را به قانون دوم ترمودینامیک و تولید آنتروپی مربوط کرد، همچنین او در فرایندهایی که شامل انتقال حرارت، جرم و سیال هستند نیز قانون دوم ترمودینامیک و تحلیل اکسرژی را دخالت داد. امروزه کاربرد تحلیل اکسرژی در صنایع گوناگون توسعه یافته است. از جمله در صنعت سیمان توسط افرادی همچون C. Koroneos, G. Roumbas, N. Moussiopoulos [۸] و Ziya Sogut, Zuhul Oktay [۹] خط تولید را به لحاظ اکسرژی مورد تجزیه و تحلیل قرار داده اند. صنعت سیمان یک صنعت شناخته شده است و کتب مرجع فراوانی در مورد آن وجود دارد که اطلاعات دقیق فرایندی را در اختیار کاربران قرار میدهند. [۱۰، ۱۱]. تلفیق مباحث فرایندی سیمان با مبحث اکسرژی میتواند نتایج مفیدی را به دنبال داشته باشد. از جمله این مباحث استفاده از مشعل ثانویه جهت افزایش ظرفیت و یا بهبود شرایط عملیاتی است.

## ۲- سیستم پخت سیمان

سیستم پخت سیمان در پنجاه سال اخیر تغییر و تحولات عمده ای داشته است. امروزه در سیستم های پیشرفته پخت سیمان از شماتیک کلی نشان داده شده در شکل (۱) استفاده می شود.

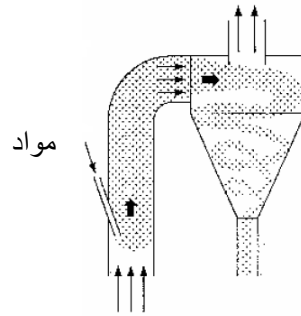


شکل ۱: سیستم های پیشرفته پخت سیمان

همانگونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، مواد اولیه که عمدتاً شامل خاک رس و سنگ آهک آسیاب شده هستند، وارد پیش گرمکن شده و ضمن حرکت به سمت پایین با گازهای داغ خروجی از بخش های قبل، تبادل حرارت کرده و فرایند های گرمایش، آب زدایی و پیش کلسیناسیون جزئی انجام می شوند. قبل از ورود به کوره، مواد اولیه وارد پیش کلسیناتور شده و در آن با استفاده از مشعل یا مشعل های بکار رفته عمل کلسیناسیون تا حد زیادی تکمیل میگردد. در حقیقت تفاوت اساسی سیستم های قدیمی تر با سیستم های پیشرفته در کاربرد پیش کلسیناتور است. از آنجاییکه با نصب پیش کلسیناتور بخش عمده ای از وظیفه کوره به این بخش منتقل گردید، بار حرارتی کوره کاهش یافت و ضمن صرفه جویی فراوان در مصرف سوخت، مشکلات عدیده دیگری از جمله گرفتگی های کوره، عمر آجرهای نسوز و... نیز بهبود یافت. یکی از دلایل عمده این ارتقاء، راندمان بالای انتقال حرارت در پیش کلسیناتور نسبت به کوره است. (در پیش کلسیناتور انتقال حرارت در یک بستر سیالی شده انجام می شود و مکانیزم تشعشع نقش عمده ای ندارد.) [۱۲]

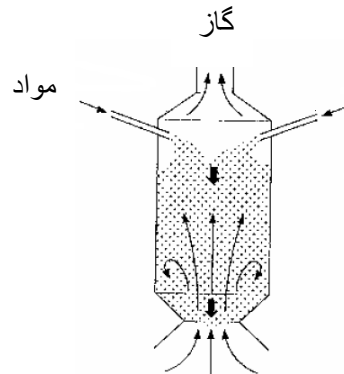
ورود پیش کلسیناتور به سیستم پخت سیمان صاحبان خطوط تولید قدیمی تر را بر آن داشت که با اقتباس از فلسفه وجودی پیش کلسیناتور بدنبال راه حل های ساده ای برای کار آمد تر کردن خطوط خود باشند. نصب مشعل ثانویه و تزریق درصدی از سوخت کوره به آن مشعل از جمله راه حل های رایج بوده است. تعیین شرایط عملیاتی در کاربرد مشعل ثانویه

اهمیت بسزایی دارد. پیش گرمکن های رایج که امروزه بکار میروند، از نوع سیکلونی هستند که در طبقات مختلف به کار گرفته می شوند. این نوع پیش گرمکن علاوه بر انتقال حرارت بین فاز گاز و جامد، عمل جدا سازی این دو فاز از یکدیگر را نیز بر عهده دارد. شماتیک کلی این نوع پیش گرمکن در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: عملکرد پیش گرمکن سیکلونی

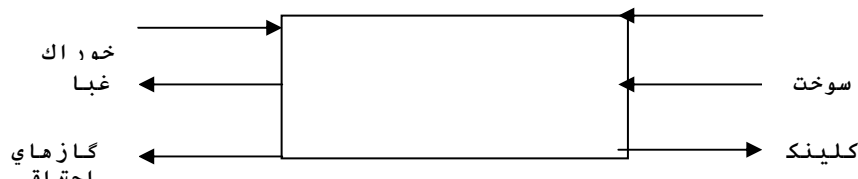
نوع دیگری از پیش گرمکن که البته کاربرد کمتری دارند پیش گرمکن های شافتی هستند. شکل (۳) عملکرد این نوع پیش گرمکن را نمایش می دهد.



شکل ۳: عملکرد پیش گرمکن شافتی

### ۳- تحلیل اکسرژی سیستم پخت

چنانچه کوره و پیش گرمکن را به عنوان سیستم مورد مطالعه در نظر بگیریم، آنگاه می توان عوامل ورود و خروج اکسرژی را مطابق شکل (۴) نمایش داد.



شکل ۴. عوامل ورود و خروج اکسرژی در منطقه پخت

اتلافات اکسرژی در سیستم فوق را می توان از رابطه (۱) بدست آورد:

$$EL = EX_{in} - EX_{out} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، عبارات بکار رفته از چپ به راست به ترتیب، اتلافات اکسرژی، مجموع اکسرژی های ورودی و مجموع اکسرژی های خروجی می باشند. با توجه به شکل (۴) می توان نوشت:

$$EX_{in} = EX_{feed} + EX_{air} + EX_{fuel} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، پارامترهای سمت راست به ترتیب، اکسرژی های خوراک، هوا و سوخت ورودی به سیستم پخت هستند، برای اکسرژی های خروجی نیز می توان نوشت:

(۳)

$$EX_{out} = EX_{gases} + EX_{clinker} + EX_{losses}$$

در رابطه (۳) پارامترهای سمت راست به ترتیب، اکسرژی های گازهای حاصل از احتراق، کلینکر تولیدی و افت های حرارتی از بدنه کوره و پیش گرمکن هستند. آنالیز مواد خام و سوخت مورد استفاده در هر کارخانه با دیگری متفاوت است. جداول (۱) و (۲) مقادیر متوسط آنالیز مواد خام و سوخت گازی رایج در کشور را نشان می دهد. [۱۳]

جدول ۱. آنالیز متوسط مواد خام صنعت سیمان در کشور

نام ماده	درصد جرمی	اکسرژی مولی kJ/mol
CaCO <sub>3</sub>	۷۵/۵۴	۱
SiO <sub>2</sub>	۱۴/۴۱	۱/۹
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۶۳	۲۰۰/۴
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲/۴۲	۱۶/۵
H <sub>2</sub> O	۰/۵	۰/۹
MgCO <sub>3</sub>	۲	۳۷/۹
K <sub>2</sub> O	۰/۵	-۱۹/۴
SO <sub>3</sub>	۱	۵۵۳/۷۸

جدول ۲. آنالیز متوسط سوخت های گازی در کشور

نام گاز	درصد حجمی	اکسرژی مولی kJ/mol

CH <sub>4</sub>	۷۷/۷۳	۸۳۱/۶۳
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	۵/۵۶	۱۴۹۵/۸۴
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	۲/۴	۲۱۵۴
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	۱/۱۸	۲۸۰۵/۸
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	۰/۶۳	۳۴۵۰
CO <sub>2</sub>	۵/۵	۱۹/۸۷
N <sub>2</sub>	۷	۰/۷۲

در جداول (۱) و (۲) ستون سوم اکسرژی استاندارد مولی مواد را نشان می دهد. [۳] علاوه بر در نظر گرفتن اکسرژی استاندارد هر ماده، بدلیل وجود عواملی همچون اختلاط و دمای بالاتر از محیط، اثرات اکسرژتیک آنها نیز می بایست لحاظ گردند. در حالت کلی می توان نوشت:

$$EX_{mix} = \sum_{i=1}^m n_i ex_i^o + \sum_{i=1}^m n_i c_{p_i} \Delta T_i \left(1 - \frac{T_0}{T_{mix}}\right) + RT_0 \sum_{i=1}^m n_i \ln(x_i) \quad (4)$$

پارامترهای بکار گرفته شده در رابطه (۴) عبارتند از:

$EX_{mix}$ : اکسرژی مخلوط

$n_i$ : تعداد مول جزء  $i$

$ex_i^o$ : اکسرژی مولی استاندارد جزء  $i$

$c_{p_i}$ : ظرفیت حرارتی ویژه جزء  $i$

$\Delta T_i$ : اختلاف دمای جزء  $i$  با دمای مبنا

$T_0$ : دمای مرجع ترمودینامیکی

$T_{mix}$ : دمای مخلوط

$R$ : ثابت عمومی گازها

$x_i$ : جزء مولی ماده  $i$

لازم به ذکر است که جملات سمت راست رابطه (۴) به ترتیب اکسرژی های استاندارد، حرارتی و اختلاط هستند. در سمت راست روابط (۲) و (۳) جملات اول و دوم دارای هر سه نوع اکسرژی هستند. جمله آخر رابطه (۲) را می توان فاقد اکسرژی حرارتی دانست. (در صورت استفاده از سوخت مایع، بدلیل پیش گرمایش سوخت، هر سه نوع اکسرژی وجود خواهد داشت.) و بالاخره جمله آخر رابطه (۳) فقط دارای اکسرژی از نوع حرارتی خواهد بود. جدول (۳) آنالیز متوسط کلینکر خروجی و اکسرژی مولی هر ترکیب را برای سیمان پر تلند که متداولترین نوع سیمان تولیدی است نشان میدهد.

جدول ۳. آنالیز متوسط کلینکر سیمان پر تلند

نام ترکیب	درصد جرمی	اکسرژی استاندارد مولی kJ/mol
CaO	۵۸	۱۱۰/۲

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۸	۲۰۰/۴
SiO <sub>2</sub>	۱۰	۱/۹
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۴	۱۶/۵

#### ۴- مدل سازی سیستم پخت سیمان در کاربرد مشعل ثانویه

توزیع درصدی از کل سوخت به پیش گرمکن اثرات همه جانبه ای روی بخش های مختلف منطقه پخت دارد که مهمترین آنها عبارتند از:

۱- تغییر پروفیل دمایی در سیستم پخت.

۲- تغییر سرعت گازها در کوره و بخش هایی از پیش گرمکن.

۳- تغییر زمان اقامت مواد و گازها در پیش گرمکن.

۴- تغییر درصد کلسیناسیون قبل از کوره.

۵- تغییر بیلان جرم و انرژی در منطقه پخت.

اینکه موارد فوق چگونه تغییر می کنند وابسته به چهار متغیر اساسی کیفیت احتراق در مشعل ثانویه، درصد سوخت تزریقی به مشعل ثانویه، درصد هوای اضافی و محل نصب مشعل ثانویه میباشند. به تجربه ثابت شده که بهترین محل برای نصب مشعل ثانویه، مجرای بالا بر گاز بین کوره و پیش گرمکن می باشد، چرا که تنها در اینصورت است که کمترین آسیب به پروفیل سرعت گازها وارد شده و ضمناً نیازی به تغییر در ساختمان پیش گرمکن ندارد. علاوه بر این موارد، نصب مشعل در آن محل زمان تماس بیشتری برای مواد خام و گازهای داغ فراهم کرده تا بتوان به درصد کلسیناسیون بالاتری در پیش گرمکن دست یافت که این امر به خودی خود می تواند دمای گازهای خروجی از بالای پیش گرمکن را کاهش دهد. کیفیت احتراق وابسته به شرایط عملیاتی متعددی است که نوع مشعل بکار رفته، چگونگی ترکیب هوا و سوخت و درصد هوای اضافه مهمترین آنها به شمار میروند. معمولاً بدلیل اینکه هوای مورد نیاز برای مشعل ثانویه می بایست از طریق کوره تامین گردد، و حجم زیاد گازهای حاصل از احتراق در مشعل اصلی مانع تماس مناسب هوا و سوخت در مشعل ثانویه میگردند، استفاده از مشعل های اتمسفری می تواند مفید تر واقع گردد.

جهت تعیین درصد سوخت تزریقی به پیش گرمکن می بایست به دو نکته ذیل توجه نمود:

-مقدار انرژی مورد نیاز و دمای کافی جهت تکمیل فرایند پخت در کوره فراهم شود.

-سرعت گازهای حاصل از احتراق در کوره و پیش گرمکن به حد تشکیل سیکل های مخرب در سیستم پخت نرسد.

با توجه به ارتباط تنگاتنگ موارد فوق الذکر، و پیچیدگی های فوق العاده فرایند، می توان کل منطقه پخت را به چهار

ناحیه حرارتی تقسیم بندی کرد:

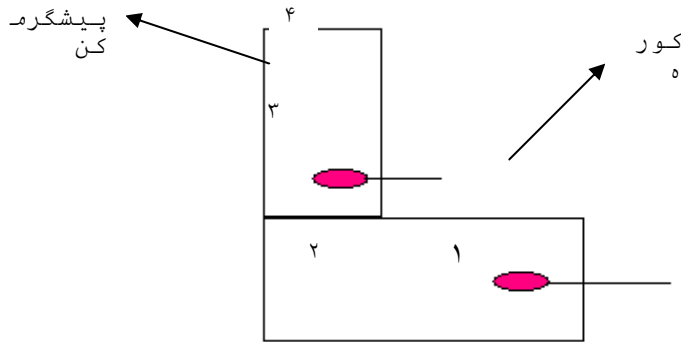
ناحیه اول: منطقه مشعل اصلی تا انتهای کوره.

ناحیه دوم: منطقه فی ما بین انتهای کوره تا محل نصب مشعل ثانویه.

ناحیه سوم: محل نصب مشعل ثانویه تا انتهای منطقه کلسیناسیون.

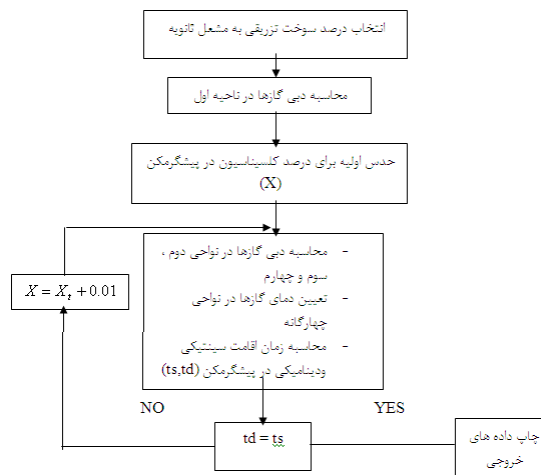
ناحیه چهارم: از انتهای منطقه کلسیناسیون تا محل خروج گاز های احتراقی از پیش گرمکن.

شکل (۴) شماتیک کلی تقسیم بندی حرارتی سیستم پخت سیمان را در حالت نصب مشعل ثانویه نمایش میدهد.



شکل ۴. مدل تقسیم بندی حرارتی منطقه پخت

از آنجاییکه مقدار درصد سوخت تزریقی به مشعل ثانویه روی کلیه عوامل بخصوص درصد کلسیناسیون در پیش گرمکن تاثیر گذار است، لذا برای هر مقدار معینی از تزریق سوخت به مشعل ثانویه ابتدا مقداری به عنوان حدس اولیه درصد کلسیناسیون در پیش گرمکن در نظر گرفته می شود. لازم به ذکر است، در صورتیکه سایر عوامل ثابت فرض شوند، مقدار کلسیناسیون در پیش گرمکن برای هر مقدار معینی از تزریق سوخت به مشعل ثانویه منحصر به فرد است و آن مقداری است که منجر به تطابق معادلات دینامیکی و سینتیکی گردد. با توجه به توضیحات داده شده الگوریتم مورد استفاده برای مدل، مطابق شکل (۵) خواهد بود:



شکل ۵. الگوریتم مورد استفاده برای مدل

توضیح اینکه، هر گاه زمان اقامت بدست آمده از معادلات دینامیکی حرکت ذرات و گازها، با زمان محاسبه شده از روابط سینتیکی جهت دستیابی به درصد کلسیناسیون حدس زده شده، مطابقت داشته باشد، مدل، درصد کلسیناسیون را پذیرفته و محاسبات بعدی را انجام خواهد داد. محاسبات اکسرژتیک از این دسته خواهند بود.

## ۵- نتایج

جدول ۴ نتیجه بررسی تزریق درصدهای معینی از سوخت به مشعل ثانویه در پیش گرمکن های شافتی و سیکلونی در سه مقدار از ظرفیت واحد و دو مقدار درصد هوای اضافه را نمایش میدهد.

جدول ۴: اثر درصدهای مختلف تزریق سوخت به مشعل ثانویه بر پارامترهای سیستم پخت

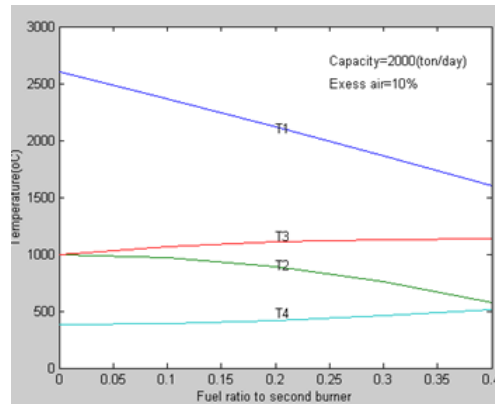
$\alpha$	درصد هوای اضافه: ۸٪							درصد هوای اضافه: ۱۲٪						
	T1	T2	T3	T4	X <sub>cy</sub>	X <sub>sh</sub>	EL	T1	T2	T3	T4	X <sub>cy</sub>	X <sub>sh</sub>	EL
ظرفیت: ۲۰۰۰ تن در روز														
۰	۲۶۴۰	۹۴۵	۹۴۵	۳۹۰	۱۳	۲۴	۱۲۸	۲۵۶۰	۱۰۳۶	۱۰۶۲	۳۷۶	۲۲	۲۵۳	۱۲۹
۰/۱	۲۴۰۰	۹۳۹	۱۰۲۸	۳۹۴	۲۳	۲۶۳	۱۳۰	۲۳۳۰	۱۰۱۳	۱۱۵۲	۳۸۷	۳۰	۲۶۶	۱۳۱
۰/۲	۲۱۵۲	۸۵۹	۱۰۸۲	۴۱۴	۲۹	۲۶۱۵	۱۱۲	۲۰۸۵	۹۳۵	۱۱۹۶	۴۲۰	۳۵	۲۵۹	۱۱۳
۰/۳	۱۸۹۰	۷۲۰	۱۱۰۰	۴۵۱	۳۳	۲۶۱۱	۱۰۲۴	۱۸۲۵	۷۹۴	۱۲۱۴	۴۶۷	۳۹	۲۳۶	۱۰۳
۰/۴	۱۶۳۰	۵۳۴	۱۱۰۵	۴۹۷	۳۶	۲۰۵۵	۹۶۵	۱۵۸۰	۵۹۹	۱۲۰۳	۵۱۷	۴۱	۲۰۲	۹۶
ظرفیت: ۲۳۰۰ تن در روز														
۰	۲۶۴۵	۹۶۰	۹۶۰	۴۰۹	۱۱	۲۲۸	۱۴۹	۲۵۶۵	۱۰۶۲	۱۰۶۲	۳۹۷	۲۱	۲۵۴	۱۵۰
۰/۱	۲۴۰۵	۹۵۰	۱۰۵۸	۴۱۷	۲۳	۲۶۵	۱۳۹	۲۳۲۷	۱۰۴۴	۱۱۵۲	۴۰۷	۳۲	۲۶۲	۱۴۰
۰/۲	۲۱۵۵	۸۹۴	۱۱۱۴	۴۳۳	۳۰	۲۶۱	۱۳۹	۲۰۸۵	۹۹۰	۱۱۹۶	۴۴۴	۳۸	۲۶۷	۱۳۰
۰/۳	۱۹۰۰	۷۷۱	۱۱۴۴	۴۷۴	۳۵	۲۲۸	۱۱۹	۱۸۲۵	۸۶۰	۱۲۱۴	۴۹۵	۴۲	۲۳۳	۱۱۹
۰/۴	۱۶۳۵	۶۰۰	۱۱۶۱	۵۲۸	۳۹	۲۰	۱۰۱	۱۵۸۰	۶۶۵	۱۲۰۳	۵۴۸	۴۴	۱۹۲	۱۰۹
ظرفیت: ۲۶۰۰ تن در روز														
۰	۲۶۵۰	۹۶۵	۹۶۵	۴۲۴	۱۱	۲۲۴	۱۶۹	۲۵۷۰	۱۱۵۱	۱۱۵۱	۴۱۱	۲۲	۲۵۶	۱۷۰
۰/۱	۲۴۱۰	۱۰۸۶	۱۰۸۶	۴۳۳	۲۴	۲۶۷	۱۶۰	۲۳۳۰	۱۰۷۴	۱۲۳۶	۴۲۴	۳۷	۲۲۹	۱۵۹
۰/۲	۲۱۵۵	۱۱۶۹	۱۱۶۹	۴۵۳	۳۳	۲۵۳	۱۴۸	۲۰۸۶	۱۰۶۴	۱۲۸۱	۴۶۹	۴۳	۲۱۵	۱۴۷
۰/۳	۱۹۰۵	۱۲۱۳	۱۲۱۳	۵۰۳	۳۹	۲۲۳	۱۳۶	۱۸۳۷	۹۵۶	۱۲۹۸	۵۳۷	۴۷	۱۸۹	۱۳۶
۰/۴	۱۶۷۰	۱۲۱۵	۱۲۱۵	۵۵۶	۴۱	۱۸۹	۱۳۴	۱۵۸۴	۷۴۵	۱۳۰۰	۵۸۱	۴۸	۱۷۲	۱۲۳

در جدول فوق  $\alpha$  جزء سوخت تزریقی به مشعل ثانویه، T دمای مناطق چهارگانه بر حسب درجه سانتیگراد، X<sub>cy</sub> درصد کلسیناسیون در پیش گرمکن سیکلونی، X<sub>sh</sub> درصد کلسیناسیون در پیش گرمکن شافتی و EL اتلافات اکسرژی بر حسب مگاوات می باشد.

با مطالعه این جدول نتایج مهم ذیل حاصل میشود:

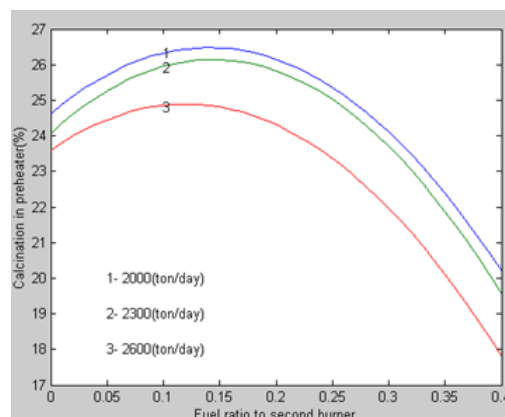
- ۱- در تمام موارد با افزایش درصد تزریق به مشعل ثانویه، اتلافات اکسرژی کاهش می یابد که علت آن عدم تمرکز نیروهای محرکه در انتقال حرارت و کاهش برگشت ناپذیری ها در سیستم می باشد.
- ۲- افزایش درصد هوای اضافه اندک افزایشی در اتلافات اکسرژی را به دنبال دارد.
- ۳- در ظرفیت های بالاتر با ثابت بودن شرایط مقدار اتلافات اکسرژی افزایش می یابد.
- ۴- همانگونه که در شکل (۶) مشاهده میشود دمای مناطق ۱ و ۲ در اثر افزایش تزریق سوخت به مشعل ثانویه، کاهش و مناطق ۳ و ۴ افزایش می یابد.





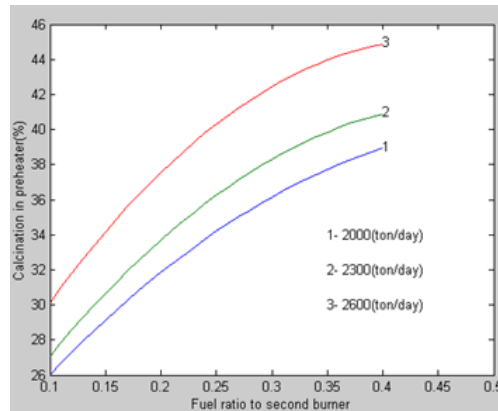
شکل ۶: تغییرات دمای مناطق چهارگانه در اثر تغییر درصد سوخت در مشعل ثانویه

از آنجائیکه دمای گازها در منطقه پخت نباید از مقدار ۲۲۰۰ درجه سانتیگراد کمتر شود لذا کاهش دمای این منطقه میتواند یک عامل محدود کننده در تزریق سوخت به مشعل ثانویه قلمداد شود.  
۵- همانگونه که در شکل ۷ نشان داده شده است درصد کلسیناسیون در پیش گرمکن های شافتی نسبت به درصد تزریق سوخت به مشعل ثانویه دارای یک نقطه ماکزیمم است.



شکل ۷: تغییرات درصد کلسیناسیون در پیشگرمکن های شافتی نسبت به درصد تزریق سوخت به مشعل ثانویه

شکل ۸ نشان دهنده این موضوع است که در پیش گرمکن های سیکلونی با افزایش درصد تزریق سوخت به مشعل ثانویه درصد کلسیناسیون در پیش گرمکن هم افزایش خواهد داشت، چرا که به دلیل تفاوت ساختاری موجود در پیش گرمکن های سیکلونی زمان اقامت گازها در این نوع گرمکن ها تابعیت کمتری از دما دارد.



شکل ۸: تغییرات درصد کلسیناسیون در پیش گرمکن های سیکلونی نسبت به درصد تزریق سوخت به مشعل ثانویه

با توجه به کلیه موارد فوق الذکر میتوان گفت تصمیم گیری در مورد تزریق سوخت به مشعل ثانویه از دیدگاه اکسرژتیک میتواند به شکل مساله زیر بیان شود:

Min (Exergy losses)

$$S.t. \begin{cases} X_{at\alpha \neq 0} \geq X_{at\alpha = 0} \\ T_1 \geq 2200^{\circ}C \end{cases}$$

در مساله فوق مینیمم کردن اتلافات اکسرژی تابع هدف بوده و محدودیت های اعمال شده نشان از افزایش درصد کلسیناسیون در پیش گرمکن بعد از نصب مشعل ثانویه و تأمین حداقل دمای لازم برای فرایند پخت دارند. محدودیت اول به این دلیل ضرورت دارد که چنانچه برآورده نشود منجر به افزایش بار کوره و کاهش ظرفیت واحد میشود و محدودیت دوم جهت تأمین دمای لازم برای تشکیل فاز آلیت و تکمیل مراحل پخت در کوره لازم و ضروری است.

تشکر و قدردانی

از خانم فرناز سیادت که در شبیه سازی عددی و تایپ این مقاله مساعدت نمودند تشکر و قدردانی میگردد.

مراجع

- 1- Z. Rant, Forsch. Ing. Wes. Vol. 22, pp. 36-37, 1956.
- 2- F. Bosnjakovic, Technical Thermodynamics, Holt, Rinehart & Winston, New York, 1965.
- 3- J.Szargut, D.R. Morris, and 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, G. Tsatsaronis, M. Moran, Thermal Design & Optimization, Wiley, New York, 1996.
- 7- A. Bejan, Advanced Engineering Thermodynamics, Wiley, New York, 2006.
- 8- C. Koroneos, G. Roubas, N. Moussiopoulos, Exergy analysis of cement production, International Journal of Exergy 2005 - Vol. 2, No.1 pp. 55 -68.
- 9- Ziya Sogut, Zuhul Oktay, Energy and exergy analyses in a thermal process of a production line for a cement factory and applications, International Journal of Exergy 2008 - Vol. 5, No.5 pp. 218 -240.
- 10- Walter H. Duda, Cement Data Book (1), Bauverlag GmbH, 1985.



انجمن احتراق ایران

## سومین کنفرانس سوخت و احتراق ایران تهران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - اسفند ماه ۱۳۸۸

FCCI2010-2134



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
دانشکده مهندسی هوافضا

- 11- B. Kohlhaas, Otto Labahn, Cement Engineers Handbook, Intl Public Service; 4th edition (June 1982).  
۱۲- سید علی اشرفی زاده، طراحی و اثر پیش کلسیناتور بر مصرف انرژی در تولید سیمان، صنعت سیمان شماره ۹۰، صفحه ۸، ۱۳۸۴.
- ۱۳- سید علی اشرفی زاده، عباس طائب، سیستم پخت کلینکر، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه مهندسی شیمی دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۷۶.