

## بررسی تأثیر موقعیت مشعل‌های کلساینر بر کاهش نشر آلاینده‌های زیست‌محیطی

### کارخانه‌ی سیمان (مطالعه موردی: شهر قائن)

قدرت قصابی<sup>\*</sup>، مهدی بقراطی<sup>۲</sup>، ابوالفضل معصومی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه بزرگمهر قاننات

<sup>۲</sup>- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه بزرگمهر قاننات

<sup>۳</sup>- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

\* ایمیل نویسنده مسئول: Ghodrat.ghassabi@buqaen.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۲/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۳/۱۰

#### چکیده

صنعت سیمان علی‌رغم تأثیر زیادی که در پیشرفت اقتصادی دارد، موجب تولید انواع آلاینده‌های زیست‌محیطی از جمله NOx، دی‌اکسید کربن و مونوکسید کربن می‌شود که انتشار آن می‌تواند منجر به آسیب‌های جدی بر محیط‌زیست گردد. در این بین، بیشترین تأثیر ناشی از این صنعت بر محیط‌زیست مربوط به مشعل‌های آن بوده و تحقیق حاضر با هدف بررسی تأثیر موقعیت مشعل‌های کلساینر بر کاهش نشر آلاینده‌های زیست‌محیطی کارخانه‌ی سیمان شهر قائن نگارش شده است. روش تحقیق در پژوهش حاضر کمی است و به منظور بررسی عددی تأثیر دو موقعیت برای مشعل‌های کلساینر در قسمت تحتانی (موقعیت اصلی) و در قسمت فوقانی بر نشر آلاینده‌ها از نرم‌افزار Ansys Fluent 2022 استفاده شده است. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد کارخانه‌ی سیمان قائن در بخش کلساینر با مشکل احتراق ناقص روبه‌رو بوده که منجر به تولید مونوکسید کربن زیاد به جای دی‌اکسید کربن در آن شده است. این احتراق ناقص علاوه بر کاهش دما و افزایش مصرف سوخت سبب تولید مونوکسید کربن قابل توجه می‌شود که موجب تخریب محیط‌زیست می‌گردد. همچنین نتایج حاکی از آن است که در حالت مشعل فوقانی به دلیل کاهش فرصت اختلاط سوخت و هوا، احتراق ناقص می‌گردد و انتشار مونو کسید کربن افزایش می‌یابد، اما به دلیل کاهش دمای احتراق تولید NOx کاهش می‌یابد.

#### کلمات کلیدی

"صنعت سیمان"، "آلاینده‌ها"، "محیط‌زیست"، "شهر قائن"

#### ۱- مقدمه

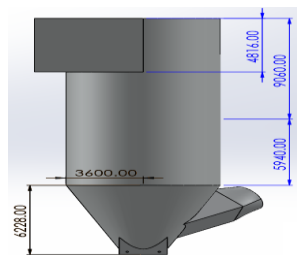
دی‌اکسید کربن و مونوکسید کربن نیز مورد توجه جدی قرار گرفته است و از این گازها به‌عنوان گازهای آلاینده‌ی هوا در این صنعت نام‌برده می‌شود که در صورت عدم کاهش انتشار آنها صدمات جبران‌ناپذیری به محیط‌زیست وارد می‌شود (Kriegler et al, 2014:403). بنابراین کارخانجات سیمان با توجه به مراحل تولید سیمان که شامل پیش‌گرمکن، کلینک‌سازی، خنک‌کردن کلینکر، عملیات آسیاب کردن و انبار کردن است، با ایجاد گردوغبار، تولید گازهای آلاینده و گلخانه‌ای از قبیل CO<sub>2</sub>، NO<sub>x</sub>، SO<sub>2</sub>، CO و ... در این پروسه پیچیده، به‌عنوان یکی از منابع آلوده‌کننده‌ی محیط‌زیست شناخته شده است (Chunark et al, 2021:2; Zhang et al, 2019:201). در این بین بیش از ۴۰ درصد حجم دی‌اکسید کربن و مونوکسید کربن فرآیند تولید سیمان، ناشی از فرآیند کلسینه کردن می‌باشد (Stefanović et al, 2010:2). این مهم Cement Technology Roadmap, 2011:1. ایجاد می‌کند که تحقیقاتی در راستای کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی در این فرآیند صورت پذیرد. بدین منظور، هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر موقعیت مشعل‌های

امروزه آلودگی هوا به‌عنوان یکی از معضلات مهم شهرنشینی و زندگی صنعتی مطرح بوده و زندگی تمام افراد جامعه تحت تأثیر این مسئله قرار گرفته است (Kahawalage et al, 2023:2). در این بین یکی از مهم‌ترین عوامل آلوده‌کننده‌ی هوا کارخانه‌های سیمان می‌باشد. صنعت سیمان یکی از صنایع کلیدی در کشورهای درحال توسعه می‌باشد که در اجرای پروژه‌های مختلف کاربرد زیادی دارد. سیمان به‌عنوان یکی از مهم‌ترین فرآورده‌های ساختمانی نقش اساسی در پیشبرد برنامه‌های عمرانی کشورها دارد و در بخش‌های اساسی ساخت‌وساز چه به‌عنوان بتن و چه به‌عنوان فرآورده‌های بتنی و کارهای بنایی مصرف می‌شود (Ahmad et al, 2022:2). با این وجود این صنعت یکی از صنایع آلوده‌کننده‌ی محیط‌زیست محسوب می‌گردد. صنعت سیمان از زمان‌های خیلی دور با مشکلات آلاینده‌ی محیط‌زیست مرتبط بوده است. این مشکلات برای یک دوره‌ی طولانی فقط به انتشار گردوغبار و اثرات آن محدود بود، ولی از حدود نیم‌قرن پیش انتشار گازهای خاص مانند دی‌اکسید گوگرد، اکسیدهای نیتروژن،

دادند. اطلاعات مورد نظر از داده ای تجربی و موجود جمع آوری شده است. مدل بهینه‌ی مستخرج از تحقیق تا ۶۰٪ تولید محصولات احتراق ناقص را کاهش می‌دهد. لی ۷ و همکاران (۲۰۱۸)، در مقیاس آزمایشگاهی کلساینر را مورد آزمایش قرار دادند. تمرکز این پژوهش برای به دست آوردن حالت بهینه‌ی تولید NO قرار گرفت. همچنین در این پژوهش تأثیر وجود CO<sub>2</sub> بر تولید NO نیز بررسی گردید. ژانگ<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، در تحقیق خود یک مدل بر اساس داده‌های تجربی ارائه نمودند تا با توجه به نتایج آن تولید NO<sub>x</sub> را کمینه نمایند.

## ۲- روش انجام تحقیق

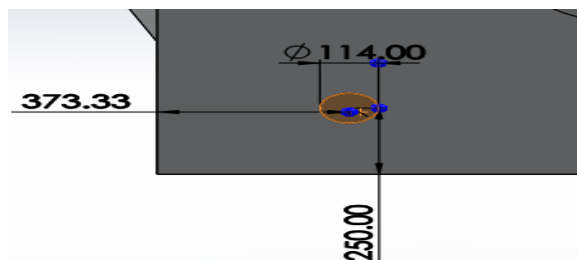
روش تحقیق در مطالعه‌ی حاضر از نظر نوع کمی و از نظر هدف کاربردی می‌باشد. در این پژوهش به بررسی عددی تأثیر دو موقعیت برای مشعل‌های کلساینر در قسمت تحتانی (موقعیت اصلی) و در قسمت فوقانی بر نشر آلاینده‌ها از کارخانه‌ی سیمان شهر قائن با استفاده از نرم‌افزار Fluent 2022 پرداخته می‌شود. در شکل (1) کلساینر با مشعل تحتانی کارخانه‌ی سیمان قائن نشان داده شده است.



مشعل تحتانی

شکل ۱- نمایی از کلساینر شبیه‌سازی‌شده‌ی کارخانه‌ی سیمان قائن

در شکل (۲) موقعیت مشعل‌ها نشان داده شده است. این مشعل‌ها به فاصله‌ی ۳۷۳/۳۳ میلی‌متر از کنار و در فاصله‌ی ۲۵۰ میلی‌متر از کف کلساینر قرار دارند. هر یک از مشعل‌ها به قطر ۱۱۴ میلی‌متر می‌باشند.

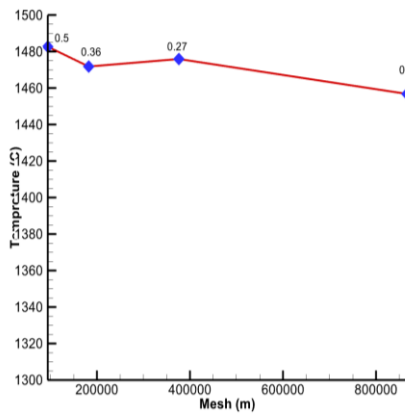


شکل ۲- ابعاد ورودی مشعل کلساینر با مشعل تحتانی

مشعل‌ها در حالت فوقانی، روی سطح مقطع دایره‌ای فوقانی کلساینر به فاصله‌ی ۱۲۰۰ میلی‌متر از مرکز این دایره لحاظ شده است. در پژوهش حاضر برای حل

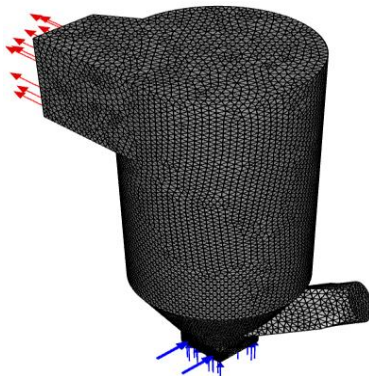
کلساینر بر کاهش نشر آلاینده‌های زیست‌محیطی کارخانه‌ی سیمان در شهر قائن می‌باشد. در راستای موضوع مورد مطالعه با تأکید بر آلاینده‌های ناشی از کلساینر پژوهش‌های متعددی انجام گرفته که می‌توان به موارد زیر اشاره داشت. فیدارس<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۷)، در تحقیقی به مدل‌سازی جریان سیال و مواد داخل کلساینر پرداخته‌اند. این مدل‌سازی دربرگیرنده‌ی واکنش‌های احتراقی نیز می‌شد. نتایج مدل‌سازی نشان‌دهنده‌ی کاهش فرایندهای موردنظر در کلساینر به علت تولید بیش از حد CO<sub>2</sub> بود. رودریگوئز<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۹)، در پژوهش خود به مطالعه میزان CO<sub>2</sub> تولیدی در کلساینر پرداخته‌اند. در این پژوهش CO<sub>2</sub> به میزان 103 t/h برای تولید 125 t/h سیمان گزارش شد. ژانگ<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۱)، در پژوهشی به مدل‌سازی احتراق چندمرحله‌ای در یک کلساینر پرداخته‌اند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که با انتخاب احتراق چندمرحله‌ای و رساندن میزان هوای ورودی بین ۵۷ تا ۶۲/۲ درصد، میزان انتشار آلاینده‌ها در گستره‌ی استاندارد قرار گرفت. همچنین سوخت مورد استفاده در این واحد صنعتی، ذغال سنگ بوده است. میکولسیچ<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۲)، در پژوهشی به مدل‌سازی پارامترهای تأثیرگذار همراه با هندسه‌ی کلساینر پرداخته‌اند. در این مدل‌سازی عواملی نظیر CO، CO<sub>2</sub> و زمان ماندگاری ذرات در کلساینر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مدل‌سازی قابلیت مطالعه‌ی اثرات تغییر پارامترهای ورودی برای رسیدن به یک الگوی بهینه را داشته است. میکولسیچ و همکاران (۲۰۱۴)، در مطالعه‌ای به صورت عددی (CFD)، احتراق سوخت‌های زیستی و ذغال‌سنگ را داخل یک کلساینر مورد شبیه‌سازی قرار دادند. نتایج در ۴ حالت شامل استفاده از ۱۰۰٪، ۹۰٪، ۸۰٪ و ۷۰٪ ذغال سنگ مقایسه شد. نکته‌ی مهم در این شبیه‌سازی ذرات خاکستر به‌جامانده از سوختن چوب در فرایند احتراق است که ناپایداری شعله را به همراه دارد. کاهوالاج<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۷)، در پژوهشی به‌منظور شبیه‌سازی عددی کلساینر، اثرات جایگزینی سوخت‌های مشتق‌شده از پسماند (RFD) را به جای ذغال‌سنگ در فرایند احتراق بررسی نمودند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از سوخت جایگزین دمای کلساینر را کاهش داد که دلیل این پدیده احتراق ناقص به علت وجود رطوبت موجود در سوخت و ذرات بزرگتر آن می‌باشد. فلانوا<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۸)، در تحقیقی یک مدل آماری برای بهینه‌سازی کلساینر ارائه

1 - Fidaros  
2 - Rodriguez  
3 - Zhang  
4 - Mikulčić  
5 - Kahawalage  
6 - Fellaou



شکل ۳- دمای خروجی برای چهار شبکه‌ی مختلف

در شکل ۴، شبکه‌ی بهینه برای کلساینر با محل ورودی و خروجی جریان نشان داده شده است. جریان هوا از سطح مقطع پایینی کلساینر با فشار ۵۰۰ پاسکال و دبی ۱۹۵ تن بر ساعت وارد می‌شود و با فشار ۸۰۰ پاسکال از سطح مقطع بالایی مطابق شکل خارج می‌شود. در ورودی مشعل، سوخت متان با دبی جرمی کل ۱/۲ کیلوگرم بر ثانیه و دبی جرمی هر مشعل برابر با ۰/۳ کیلوگرم بر ثانیه به کلساینر وارد می‌شود.



شکل ۴- شبکه‌بندی کلساینر با مشعل تحتانی

### ۳- نتایج

در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر موقعیت مشعل‌های کلساینر (مشعل تحتانی و فوقانی) بر کاهش نشر آلاینده‌های کارخانه‌ی سیمان در شهر قائن پرداخته شده است که نتایج به‌دست آمده بدین شرح می‌باشد. در شکل ۵ کانتور اکسیژن برای دو حالت با مشعل تحتانی و فوقانی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود در ورود جریان کسر جرمی اکسیژن در حالت با مشعل تحتانی به دلیل اختلاط سوخت و هوا کمتر از حالت فوقانی می‌باشد و در قسمت خروج جریان کسر جرمی اکسیژن با مشعل فوقانی به دلیل اختلاط با سوخت کاهش می‌یابد. با مقایسه‌ی میزان مصرف اکسیژن در ناحیه‌ی اختلاط سوخت و هوا دو حالت مشاهده می‌شود؛ در مشعل فوقانی کسر جرمی اکسیژن کاهش بیشتری پیدا کرده است، با این وجود در کل نواحی کلساینر کسر جرمی اکسیژن در حالت با مشعل

معادلات ممتوم الگوریتم SIPMLE1 به‌کاربرده شده است. جریان احتراقی آشفته می‌باشد و برای مدل‌سازی جریان آشفته از مدل k-e استاندارد استفاده شده است. برای این مدل دو معادله انتقال برای محاسبه انرژی جنبشی (k) و اتلاف آشفته‌گی (e) به‌صورت زیر حل می‌شوند (Pope, 2007:49):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m$$

رابطه (۱):

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{K} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{K}$$

رابطه (۲):

برای محاسبه‌ی نرخ واکنش احتراقی که به‌صورت جمله‌ی چشمه در معادله‌ی انرژی و بقای کسر جرمی گونه‌ها ظاهر می‌شود، از مدل اتلاف گردابه‌ای مگنسن مطابق معادله‌ی زیر استفاده شده است (Magnussen and Hjertager, 1977:64):

رابطه (۳):

$$R.R = A \rho \frac{\varepsilon}{K} \min(Y_f, \frac{Y_{O_2}}{S})$$

نرخ تشکیل NO حرارتی توسط رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید (ANSYS, 2020):

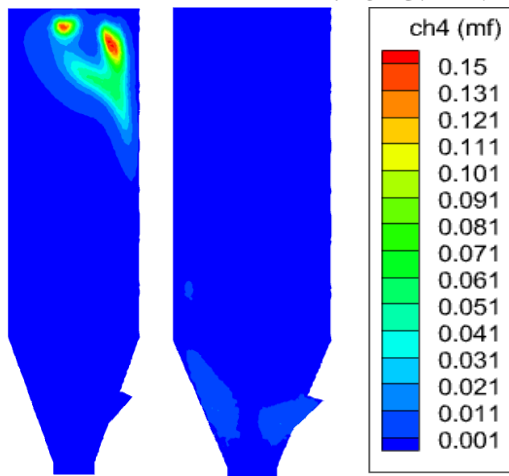
رابطه (۴):

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_{+1}[O][N_2] + k_{+2}[N][O_2] + k_{+3}[N][OH] - k_{-1}[NO][N] - k_{-2}[NO][O] - k_{-3}[NO][H]$$

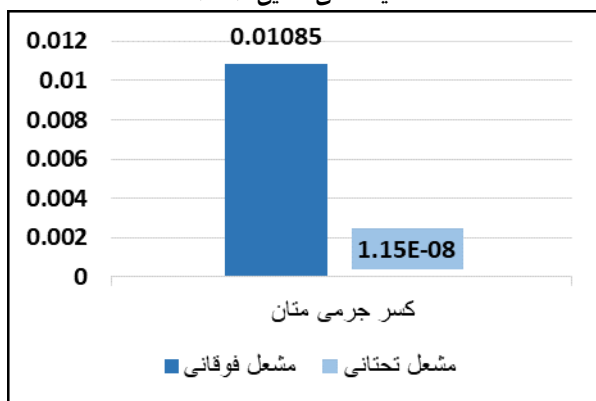
مدل (DO) نیز برای مدل‌سازی تابش در نظر گرفته شده است. این مدل برای شبیه‌سازی احتراق و تقریب دمای شعله مناسب می‌باشد. در شکل ۳ نیز نمودار دمای خروجی کلساینر برای چهار شبکه‌ی مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش تعداد شبکه دمای خروجی تغییر قابل ملاحظه ندارد و تعداد شبکه ۳۷۵۷۸۳ به عنوان شبکه بهینه انتخاب شده است.

۱ - الگوریتمی است که به‌طور گسترده‌ای با استفاده از روش عددی حل معادلات نویر استوکس استفاده می‌شود.

جرمی متان در خروجی کلساینر برای دو حالت مقایسه شده است. مشاهده می‌شود در حالت با مشعل تحتانی، کسر جرمی در خروجی بسیار ناچیز و تقریباً صفر است در حالیکه با مشعل فوقانی، بخش قابل توجهی از سوخت بدون مصرف خارج می‌شود.



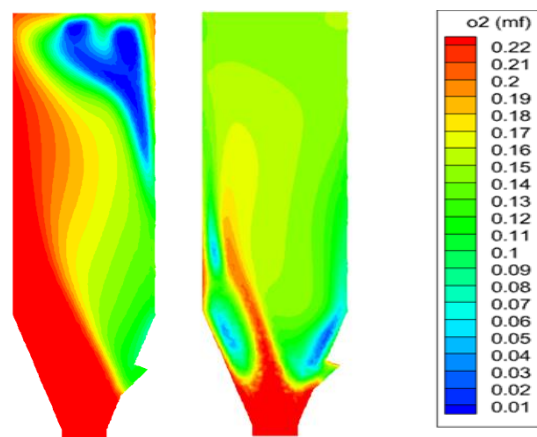
مشعل فوقانی      مشعل تحتانی  
شکل ۷- توزیع کسر جرمی متان کلساینر  
مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲



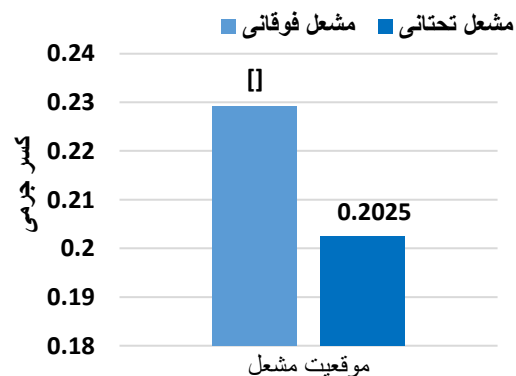
شکل ۸- مقایسه‌ی میانگین کسر جرمی متان در خروجی کلساینر برای دو حالت با مشعل فوقانی و با مشعل تحتانی  
مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲

در شکل ۹، توزیع دمای کلساینر برای دو حالت با مشعل فوقانی و تحتانی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود در حالت با مشعل تحتانی توزیع دما یکنواخت‌تر است و شعله در همان ناحیه‌ی تحتانی کلساینر ایجاد شده است، درحالی‌که برای کلساینر با مشعل فوقانی، بخشی از جریان هوا بدون تغییر دمای محسوس از کلساینر خارج شده و شعله در بخش فوقانی ایجاد شده است، زیرا فرصت تشکیل شعله و انتقال حرارت برای کلساینر با مشعل فوقانی بسیار کم بوده است. در شکل ۱۰، توزیع دمای میانگین در خروجی کلساینر برای دو حالت مقایسه شده است. مشاهده می‌شود دمای خروجی برای کلساینر با مشعل فوقانی به‌طور قابل توجهی کمتر از کلساینر با مشعل تحتانی است. این امر ناشی از عدم فرصت مناسب برای

فوقانی بیشتر است که بدلیل فرصت کم اختلاط سوخت و هوا در حالت با مشعل فوقانی است. در شکل ۶، میانگین کسر جرمی اکسیژن در خروجی کلساینر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود کسر جرمی اکسیژن خروجی برای حالت با مشعل فوقانی بیشتر است. زیرا همانطور که در شکل ۵ در کانتور اکسیژن اشاره شد، در کلساینر با مشعل تحتانی به دلیل موقعیت مشعل‌ها، فرصت اختلاط سوخت و هوا بیشتر از حالت با مشعل فوقانی است و احتراق کامل‌تر صورت می‌گیرد، و در نتیجه اکسیژن بیشتری مصرف می‌شود.



مشعل تحتانی      مشعل فوقانی  
شکل ۵- توزیع اکسیژن کلساینر با مشعل تحتانی و کانتور اکسیژن کلساینر با مشعل فوقانی  
مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲

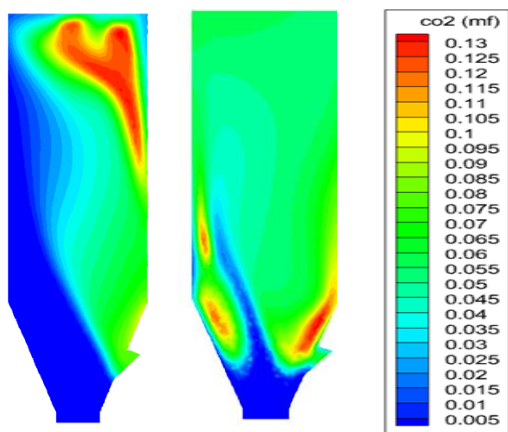


شکل ۶- مقایسه‌ی میانگین کسر جرمی اکسیژن در خروجی کلساینر برای دو حالت با مشعل فوقانی و با مشعل تحتانی  
مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲

در شکل ۷، کسر جرمی متان در کلساینر با مشعل تحتانی و فوقانی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود در حالت با مشعل تحتانی سوخت به محض ورود به کلساینر به‌طور کامل در همان ناحیه‌ی تحتانی مصرف می‌شود، درحالی‌که با مشعل فوقانی به‌دلیل عدم فرصت اختلاط مناسب با اکسیژن در ناحیه‌ی فوقانی، بخش زیادی از سوخت بدون مصرف باقی می‌ماند. در شکل ۸، مقادیر میانگین کسر

نیز تولید خواهد شد. در نتیجه در نشر آلاینده‌ی دی اکسیدکربن عملکرد کلساینر با وجود مشعل فوقانی به لحاظ محیط زیستی بهتر بوده است.

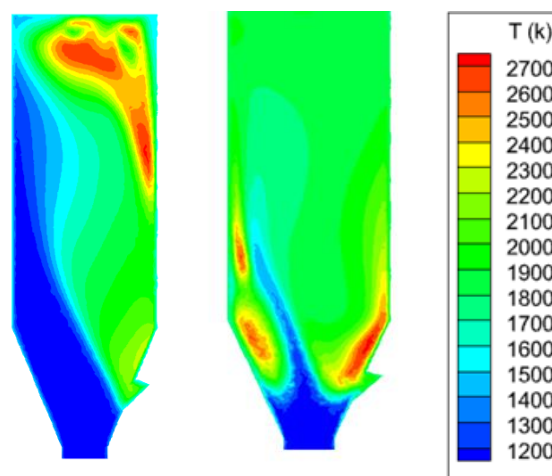
اختلاط سوخت و هوا و احتراق ناقص و در نتیجه آزادسازی انرژی کمتر و دمای پایین‌تر برای کلساینر با مشعل فوقانی است.



با مشعل فوقانی با مشعل تحتانی

شکل ۱۱- توزیع کسر جرمی دی اکسید کربن کلساینر

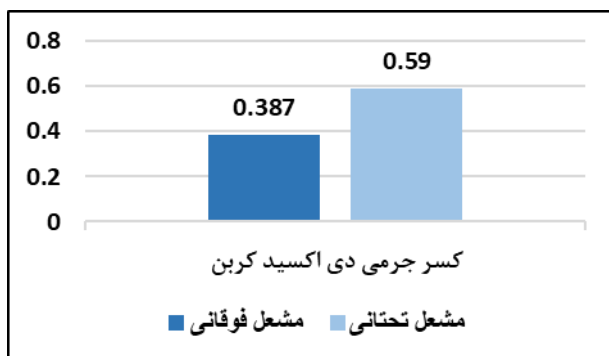
مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲



با مشعل فوقانی با مشعل تحتانی

شکل ۹- توزیع دمای کلساینر

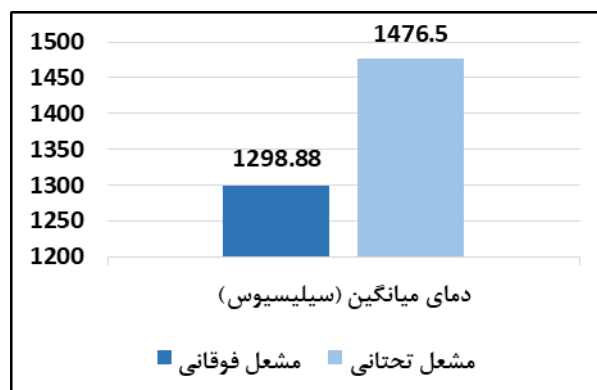
مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲



شکل ۱۲- مقایسه‌ی میانگین کسر جرمی دی اکسید کربن در خروجی

کلساینر برای دو حالت با مشعل فوقانی و با مشعل تحتانی

مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲



شکل ۱۰- مقایسه‌ی دمای میانگین خروجی کلساینر برای دو حالت با

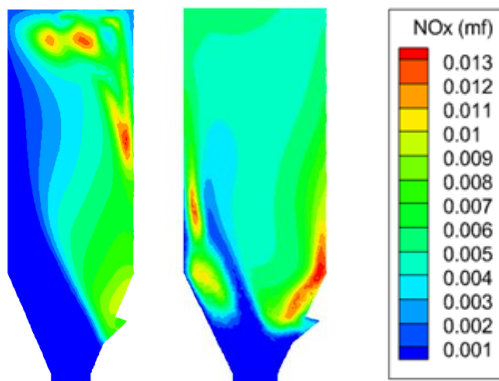
مشعل فوقانی و با مشعل تحتانی

مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲

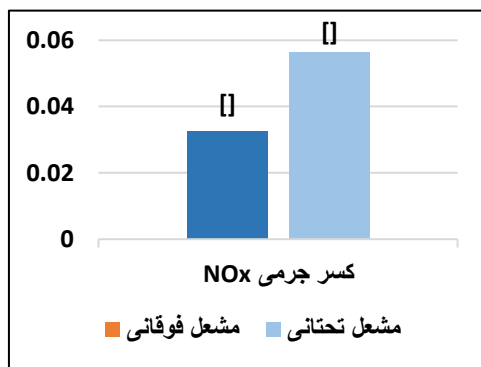
در شکل ۱۳، توزیع کسر جرمی مونوکسید کربن برای دو حالت نشان داده شده است. مشاهده می‌شود برای کلساینر با مشعل تحتانی، مونو کسیدکربن در ناحیه‌ی شعله ایجاد شده است و سپس مجدد با اکسیژن ترکیب شده و در مونوکسیدکربن می‌سوزد و کسر جرمی آن کاهش یافته و در ناحیه‌ی فوقانی تقریباً به صفر می‌رسد. اما برای کلساینر با مشعل فوقانی، کسر جرمی مونوکسیدکربن در ناحیه‌ی فوقانی که احتراق صورت می‌گیرد تولید می‌شود و به دلیل عدم فرصت مناسب اختلاط و احتراق ناقص مصرف نمی‌شود و حجم زیادی از مونوکسیدکربن در محیط انتشار می‌دهد. در شکل ۱۴، کسر جرمی مونوکسیدکربن برای دو حالت کلساینر با مشعل فوقانی و تحتانی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود برای حالت کلساینر با مشعل فوقانی، مقدار قابل توجهی مونوکسید کربن از کلساینر خارج می‌شود در حالیکه برای کلساینر با مشعل تحتانی

در شکل ۱۱، توزیع کسر جرمی دی اکسید کربن برای دو حالت نشان داده شده است. مشاهده می‌شود دی اکسید کربن برای کلساینر با مشعل تحتانی در ورود به کلساینر با ایجاد شعله تشکیل شده است و تا انتها تقریباً شرایط یکنواختی دارد. درحالی‌که برای کلساینر با مشعل فوقانی، توزیع کسر جرمی دی اکسید کربن یکنواخت نیست و کسر جرمی دی اکسید کربن در ناحیه‌ی فوقانی در ناحیه‌ی تشکیل شعله به ماکزیمم مقدار خود رسیده است. در شکل ۱۲، کسر جرمی خروجی دی اکسید کربن برای دو حالت مقایسه شده است. مشاهده می‌شود کسر جرمی دی اکسید کربن خروجی برای کلساینر با مشعل تحتانی بیشتر از مقدار آن برای کلساینر با مشعل فوقانی است، زیرا احتراق برای کلساینر با مشعل فوقانی ناقص است و تمام سوخت مصرف نشده و در نتیجه دی اکسید کربن کمتری





با مشعل فوقانی  
با مشعل تحتانی  
شکل ۱۵- توزیع کسر جرمی NOx کلساینر  
مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲

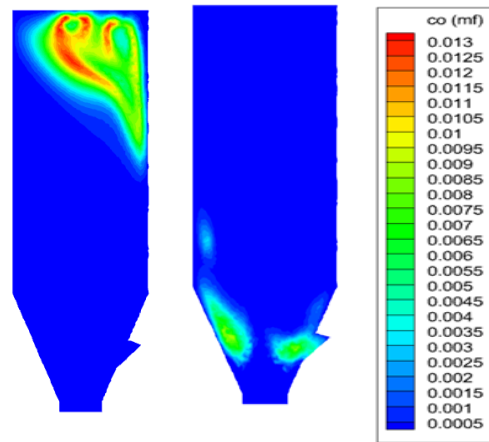


شکل ۱۶- مقایسه‌ی کسر جرمی NOx برای دو حالت با مشعل فوقانی و با مشعل تحتانی  
مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲

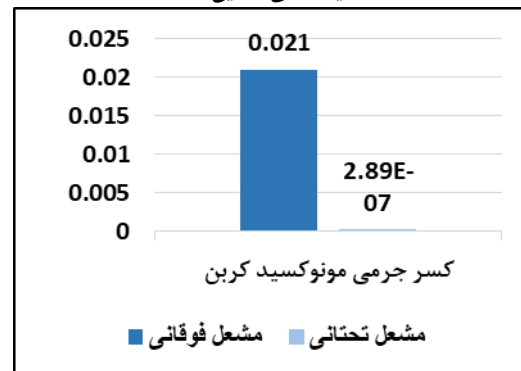
#### ۴- نتیجه‌گیری

توجه به کنترل اثرات آلودگی هوا، آب‌و‌خاک در مراحل مختلف تولید سیمان اعم از استخراج سنگ معدن، بارگیری، فرایند خردایش مواد اولیه، پروسه پخت مواد خام، استخراج و کارایی حرارتی کارخانه‌ی سیمان، نه تنها موجب حفظ محیط‌زیست خواهد شد، بلکه به تعالی و بهینه بودن عملکرد کارخانه‌های سیمان کمک بسزایی خواهد نمود. از آنجاکه امروزه در کشور ما (ایران) تأسیس کارخانه‌های سیمان که با بهره‌گیری از سرمایه‌گذاری‌های کلان انجام می‌گیرد، معمولاً با اشتغال‌زایی و جوانب اقتصادی دیگر همراه است، توسعه‌ی صنعت سیمان روندی روبه‌رشد را طی می‌کند. اما در راستای این منافع اقتصادی آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از کارخانه‌های سیمان اجتناب‌ناپذیر است. درواقع این صنعت مسئول ۵ درصد از کل آلودگی زیست‌محیطی در جهان می‌باشد، به‌طوری‌که نادیده‌گرفتن اثرات زیست‌محیطی آن در دهه‌های اخیر و توجه صرف به درآمدهای ناشی از این صنعت، خسارات جبران‌ناپذیر اقتصادی و اجتماعی را متوجه انسان و محیط‌زیست کرده است. بنابراین شناسایی عناصر تأثیرگذار این صنعت بر آلودگی هوا و محیط‌زیست و بهبود آنها ضرورتی

کسر جرم خروجی مونوکسید کربن تقریباً صفر است در نتیجه در نشر آلاینده‌ی مونو کسید کربن عملکرد کلساینر با وجود مشعل تحتانی به لحاظ محیط زیستی بهتر بوده است.



شکل ۱۳- توزیع کسر جرمی مونو کسید کربن کلساینر  
مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲



شکل ۱۴- مقایسه‌ی میانگین کسر جرمی مونوکسید کربن در خروجی کلساینر برای دو حالت با مشعل فوقانی و با مشعل تحتانی  
مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲

در شکل ۱۵، توزیع کسر جرمی NOx1 در کلساینر برای دو حالت نشان داده شده است. مشاهده می‌شود برای هر دو حالت در ناحیه‌ی تشکیل شعله که دما ماکزیمم است مقدار تولید NOx افزایش می‌یابد. همچنین برای حالت کلساینر با مشعل تحتانی به دلیل فرصت بیشتر برای احتراق و در نتیجه توزیع دمای یکنواخت‌تر، توزیع کسر جرمی NOx نیز یکنواخت‌تر است. در نتیجه در نشر آلاینده NOx، عملکرد کلساینر با وجود مشعل تحتانی به لحاظ محیط زیستی بهتر بوده است. در شکل ۱۶، کسر جرمی NOx در خروجی کلساینر برای دو حالت مقایسه شده است. مشاهده می‌شود برای کلساینر با مشعل تحتانی به دلیل فرصت بیشتر برای احتراق و افزایش بیشتر دما، میزان تولید NOx و انتشار آن از کلساینر بیشتر می‌باشد.

- اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. بدین منظور، در پژوهش حاضر، شبیه‌سازی عددی کلساینر کارخانه‌ی سیمان قائن با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت ۲۰۲۲ صورت گرفت. در این مطالعه، تأثیر موقعیت مشعل‌های کلساینر بر توزیع دما و انتشار آلاینده‌ها برای دو حالت تحتانی و فوقانی بررسی گردیده و نتایج این بررسی به‌صورت خلاصه به شرح زیر است:
- میزان اختلاط سوخت و هوا و مصرف آنها در کلساینر با مشعل تحتانی به دلیل فرصت بیشتر، با نرخ بیشتری صورت گرفت. توزیع دما در کلساینر با مشعل تحتانی یکنواخت‌تر و به دلیل احتراق کامل‌تر، دمای خروجی بیشتر است. کسر جرمی دی‌اکسید کربن و  $\text{NO}_x$  برای کلساینر با مشعل تحتانی به دلیل احتراق کامل‌تر و دمای خروجی بالاتر، بیشتر است. میزان انتشار مونوکسید کربن در کلساینر با مشعل فوقانی به دلیل عدم فرصت مناسب اختلاط سوخت و هوا و احتراق ناقص، بیشتر است. با توجه به آلاینده‌های ناشی از کارخانه‌ی سیمان قائن و سایر کارخانه‌های سیمان ایران، لازم است راهکارهای زیر در
- خصوص کاهش آلودگی‌های ناشی از این صنعت مورد استفاده قرار گیرد:
- تشویق به استفاده از فناوری‌های نوین در این صنعت؛
  - جایابی مناسب کارخانه‌ها از لحاظ زیست‌محیطی؛
  - استفاده از انرژی‌های پاک‌تر به‌جای سوخت‌های فسیلی و قدیمی مثل مازوت؛
  - بهینه‌سازی تجهیزات و سیستم‌های کنترلی؛
  - بهینه‌سازی تجهیزات خط تولید به‌منظور بالابردن راندمان تولید و کاهش انتشار آلاینده‌ها؛
  - ایجاد و توسعه‌ی فضای سبز داخل و خارج کارخانه؛
  - تشکیل و اجرای سیستم یکپارچه مدیریت زیست‌محیطی و ایمنی در کارخانه (HSE)؛
  - ارائه‌ی آموزش عمومی و تخصصی برای مدیران، پرسنل و جوامع بومی؛
  - انجام تحقیقات کاربردی جهت بهینه‌سازی مصرف سوخت و کاهش هدررفت انرژی؛
  - ارائه و بروزرسانی استانداردهای لازم

این مقاله در قالب طرح پژوهشی به شماره ۳۹۲۴۴ دانشگاه بزرگمهر قاینات

انجام شده است

#### منابع

- Ahmad, S.I., Ahmed, Z.B., Ahmed, T. (2022). Feasibility of sludge generated in water-based paint industries as cement replacement material, *Case Studies in Construction Materials*, 16, 1-14.
- ANSYS. (2020). *Ansys Fluent 16 User's Guid*. [https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main\\_pre.htm](https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main_pre.htm).
- Cement Technology Roadmap. (2011). Carbon emission reduction up to 2050. Available at: International Energy Agency.
- Chunark, P., Hanaoka, T., & Limmeechokchai, B. (2021). Shared socioeconomic pathways and long-term GHG mitigation towards 2050 in Thailand cement industry. *Cleaner and Responsible Consumption*, 2, 1-13.
- Fellaou, S., Harnoune, A., Seghra, M.A., Bounahmidi, T. (2018). Statistical Modeling and Optimization of the Combustion Efficiency in Cement Kiln Precalciner, *Energy*, 155, 351-359.
- Fidaros, D.K., Baxevanou, C.A., Dritselis, C.D., & Vlachos, N.S. (2007). Numerical modelling of flow and transport processes in a calciner for cement production. *Powder Technology*, 171(2), 81-95.
- Kahawalage, A., Melaen, M., & Tokheim, L.A. (2017). Numerical modeling of the calcination process in a cement kiln system. *Proceedings of the 58th Conference on Simulation and Modelling (SIMS 58) Reykjavik, Iceland, September 25th–27th, 2017, Linköping Electronic Conference Proceedings* 138:11, p. 83-89.
- Kahawalage, A.C., Melaen, M.C., & Tokheim, L.A. (2023). Opportunities and challenges of using SRF as an alternative fuel in the cement industry. *Cleaner Waste Systems*, 4, 1-16.
- Kriegler, E., Edmonds, J., Hallegatte, S., Ebi, K.L., Kram, T., Riahi, K., & Van Vuuren, D.P. (2014). A new scenario framework for climate change research: the concept of shared climate policy assumptions. *Climatic Change*, 122 (3), 401-414.
- Li, S., Ge, Y., & Wei, X. (2018). Experiment on  $\text{NO}_x$  reduction by advanced reburning in cement precalciner. *Fuel*, 224, 235-240.

- Magnussen, F.F., & Hjertager, B.H. (1977). On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. *Symposium (International) on Combustion*, 16, 719-729.
- Mikulčić, H., Von Berg, E., Vujanovic, M., & Duic, N. (2014). Numerical study of co-firing pulverized coal and biomass inside a cement calciner. *Waste Management & Research*, 32(7), 661–669.
- Mikulčić, H., Vujanović, M., Fidaros, D.K., Priesching, P., Minić, I., Tatschl, R., Duić, N., & Stefanović, G. (2012). The application of CFD modelling to support the reduction of CO2 emissions in cement industry. *Energy*, 45(1), 464-473.
- Pope, S.B. (2007). *Turbulence Flows*. Cambridge University Press, New York.
- Rodriguez, N., Alonso, M., Abanades, J.C., Grasa, G., & Murillo, R. (2009). Analysis of a process to capture the CO2 resulting from the pre-calcination of the limestone feed to a cement plant. *Energy Procedia*, 1(1), 141-148.
- Stefanović, G., Goran, V., Stojiljkovic, M.M., & Trifunovic, M. CO2 reduction options in cement industry: The Novi Popovac case. *Thermal Science*, 14, 1-10.
- Zhang, T., Wu, C., Li, B., Wang, J., Ravat, R., Chen, X., & Yu, Q. (2019). Linking the SO2 emission of cement plants to the sulfur characteristics of their limestones: a study of 80 NSP cement lines in China. *Journal of Cleaner Production*, 220, 200–211.
- Zhang, Y., Cao, S.X., Shao, S., Chen, Y., Liu, S.L., & Zhang, S.S. (2011). Aspen Plus-based simulation of a cement calciner and optimization analysis of air pollutants emission. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13, 459-468.
- Zheng, J., Du, W., Lang, Z., & Qian, F. (2020). Modeling and Optimization of the Cement Calcination Process for Reducing NOx Emission Using an Improved Just-In-Time Gaussian Mixture Regression. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59, 4987-4999.



# Investigating the effect of the position of the calciner burners on reducing the emission of environmental pollutants in the cement factory (Case study: Qaen city)

Ghodrat ghassabi<sup>1\*</sup>; Mehdi Boghrati<sup>2</sup>, Abolfazl Masoomi<sup>3</sup>

\*1- Associate Professor, Faculty of Engineering, Bozorgmehr University of Qaenat, Qaen, Iran

2-Associate Professor, Faculty of Engineering, Bozorgmehr University of Qaenat, Qaen, Iran

3- MSc., Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

\*Email Address: Ghodrat.ghassabi@buqaen.ac.ir

## Abstract

Despite its great impact on economic progress, the cement industry produces a variety of environmental pollutants, including NO<sub>x</sub>, carbon dioxide, and carbon monoxide, the release of which can cause serious damage to the environment. In the meantime, the biggest impact of this industry on the environment is related to its burners, and the present research was written with the aim of investigating the effect of the location of calciner burners on reducing the emission of environmental pollutants in Qaen Cement Factory. The research method in the current research is quantitative, and in order to numerically investigate the effect of two positions for calciner burners in the lower part (main position) and in the upper part on the emission of pollutants, was used Ansys Fluent 2022 software. The findings of the research show that the Qaen cement factory in the calciner section is facing the problem of incomplete combustion, which has led to the production of carbon monoxide instead of carbon dioxide. In addition to reducing temperature and increasing fuel consumption, this incomplete combustion causes the production of significant carbon monoxide, which destroys the environment. Also, the results indicate that in the upper burner mode, due to the reduction in the chance of fuel and air mixing, the combustion becomes incomplete and the emission of carbon monoxide increases, but the production of No<sub>x</sub> decreases due to the decrease in the combustion temperature.

## Introduction

Nowadays, air pollution is considered as one of the important problems of urbanization and industrial life, and the life of all people in the society is affected by this issue. Meanwhile, one of the most important air polluting factors is cement factories. The cement industry is one of the key industries in developing countries, which is widely used in the implementation of various projects. As one of the most important construction products, cement plays an essential role in advancing the construction plans of countries, and it is used in the basic parts of construction, both as concrete and as concrete products and masonry works. However, this industry is considered one of the polluting industries. Considering the stages of cement production, which include preheating, clinker making, clinker cooling, grinding and storage operations, cement factories create dust, produce polluting and greenhouse gases such as NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, etc. in this complex process, as It is one of the known sources of environmental pollution. Meanwhile, more than 40% of the volume of carbon dioxide and carbon monoxide in the cement production process is caused by the calcination process. This importance requires that research be done in order to reduce environmental pollutants in this process. For this purpose, the purpose of this research is to investigate the effect of the location of calciner burners on reducing the emission of environmental pollutants in the cement factory in Qaen city.

## Methodology

The research method in the present study is quantitative in terms of type and practical in terms of purpose. In this research, the influence of two positions for calciner burners in the lower part (main position) and in the upper part on the emission of pollutants from Qaen city cement factory is investigated numerically using Fluent 2022 software. In this research, SIPMLE algorithm is used to solve the momentum equations. Combustion flow is turbulent and the standard k-e model was used to model the turbulent flow. The combustion reaction rate, which appears as a source term in the energy equation and mass fraction survival of species, has been calculated by Magnussen's eddy dissipation model.

## Results

The findings of the research show that the Qaen cement factory in the calciner section is facing the problem of incomplete combustion, which has led to the production of carbon monoxide instead of

carbon dioxide. In addition to reducing temperature and increasing fuel consumption, this incomplete combustion causes the production of significant carbon monoxide, which destroys the environment. Also, the results indicate that in the upper burner mode, due to the reduction in the chance of fuel and air mixing, the combustion becomes incomplete and the emission of carbon monoxide increases, but the production of Nox decreases due to the decrease in the combustion temperature.

### **Conclusion**

Paying attention to controlling the effects of air, water and soil pollution in different stages of cement production, including ore extraction, loading, raw material crushing process, raw material baking process, extraction and thermal efficiency of the cement factory, will not only preserve the environment, but also improve and optimize The performance of cement factories will help a lot. Since today in our country (Iran) the establishment of cement factories, which is carried out with the use of large investments, is usually associated with job creation and other economic aspects, the development of the cement industry is going through a growing trend. But in line with these economic benefits, environmental damage caused by cement factories is inevitable. In fact, this industry is responsible for 5% of the total environmental pollution in the world, so that ignoring its environmental effects in recent decades and paying only attention to the income from this industry has caused irreparable economic and social damage to humans and the environment. Therefore, identifying the influencing elements of this industry on air pollution and environment and improving them is an inevitable necessity. For this purpose, in the present research, a numerical simulation of the calciner of Qaen cement factory was carried out. In this study, the influence of the position of the calciner burners on the temperature distribution and emission of pollutants for two lower and upper cases was investigated, and the results of this investigation are summarized as follows: The mixing rate of fuel and air and their consumption in the calciner with the lower burner was done at a higher rate due to more opportunity. The temperature distribution in the calciner with the lower burner is more uniform and due to more complete combustion, the output temperature is higher. The mass fraction of carbon dioxide and Nox is higher for lower burner calciner due to more complete combustion and higher combustion temperature. The amount of carbon monoxide emission in the calciner with the upper burner is higher due to the lack of proper opportunity to mix fuel and air and incomplete combustion.

### **Keywords**

Cement Industry; Pollutions; Environment; Qaen city.