

بررسی عددی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در کلساینر تولید سیمان

مرتضی رمضانیان^۱، محسن محمدی^۱، محسن قاضی خانی^۲
^۱کارشناس ارشد مهندسی مکانیک تبدیل انرژی
^۲دانشیار گروه مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

صنعت سیمان یکی از بزرگترین عوامل تولید گازهای گلخانه‌ای به ویژه دی اکسید کربن می‌باشد. در سال‌های اخیر محققین بسیاری در زمینه بهبود مصرف انرژی و کاهش آلاینده‌ها در فرآیند ساخت سیمان مطالعات قابل توجهی انجام داده‌اند. در تکنولوژی‌های جدید ارائه شده ۹۰ تا ۹۵ درصد فرآیند کلسیناسیون در کلساینر انجام می‌پذیرد لذا کلساینرها یکی مهمترین عوامل تولید گاز دی اکسید کربن می باشد، به همین دلیل مطالعه عملکرد کلساینرها جهت کاهش گازهای گلخانه‌ای بسیار لازم و ضروری است. در این مقاله ابتدا به اهمیت دینامیک سیالات محاسباتی به ویژه در صنعت سیمان پرداخته شده است. یک مدل عددی و یک بررسی پارامتری روی فرآیندها و پدیده‌های انتقال رخ داده در کلساینر ارائه شده است. مدل عددی بر پایه ی حل معادلات ناویر-استوکس برای جریان سیال و حل معادلات انتقال برای گونه‌های شیمیایی، می باشد. تمام مدل های ریاضی مورد نیاز توسعه داده شده اند و با لحاظ توربولانسی با یک مدل دو معادله ای (k-ε) شبیه سازی شده و در قالب یک مدل دینامیک محاسباتی سیال در آمده اند. همچنین برای بررسی اثرات تابش از مدل تابشی DO استفاده شده است. توزیع سرعت سیال، دما و غلظت های واکنش گر ها و فرآورده‌ها محاسبه شده است. نتایج این بررسی‌ها ما را قادر می‌سازد که شرایط بهینه را برای کمترین تولید آلاینده‌گی و محصولی با کیفیتی بهتر تخمین بزنیم.

واژه‌های کلیدی: دینامیک سیالات محاسباتی، تشکیل آلاینده‌ها،

تخریب سریع محیط زیست، دولت‌های جهان را مجبور به توجه بیشتر به جنبه‌های زیست محیطی می‌سازد. یکی از مهمترین موضوعات مورد توجه، بحث اثرات گلخانه‌ای ناشی از گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. احتراق سوخت‌های فسیلی بیشتر از ۶ میلیارد تن دی‌اکسید کربن را هر ساله وارد جو زمین می‌سازد. صنعت سیمان یکی از صنایعی است که بیشترین مقدار دی‌اکسید کربن را آزاد می‌سازد. بتن یکی از مهم‌ترین مصالح ساختمانی در جهان به شمار می‌آید و برای هر تن سیمان پرتلند تولیدی، به طور تقریبی یک تن دی‌اکسید کربن به جو آزاد می‌شود. صنعت سیمان در حدود ۵ درصد از انتشارات دی‌اکسید کربن مربوط به بشر را تولید می‌کند. این میزان انتشارات، بیشتر ناشی از احتراق در فرآیند تولید سیمان، انتقال و احتراق سوخت‌های فسیلی در تولید جریان برق را برای مصرف صنایع سیمان می‌باشد. سیاست‌های زیست محیطی مرتبط با انتشارات دی‌اکسید کربن، به طور وسیعی بر صنعت سیمان اثر گذار خواهد بود. امروزه جایگزینی‌های قابل قبولی با صرفه اقتصادی برای تولید سیمان با آلاینده‌گی کم وجود دارد که از آن جمله می‌توان به جایگزینی سوخت‌ها در صنعت سیمان اشاره نمود. میزان استفاده از جایگزین‌ها در صنعت سیمان به درصد عملی بودن این فرآیند بستگی دارد. امکان کاهش در انتشار دی‌اکسید کربن نیز پارامتری است که ممکن است باعث رقابت در صنایع سیمان گردد. [۱]

فرآیند اصلی تولید سیمان شامل پیش‌گرمایش و کلسیناسیون مواد خام، تشکیل کلینکر و خنک کاری است این امر برای دستیابی به یک ساختار کریستالوگرافی جهت تامین ویژگی‌های سیمان مورد نظر می‌باشد. بعد از خنک شدن کلینکر تولیدی، کلینکر وارد آسیاب سیمان شده و با گچ و اضافه‌کننده‌های دیگر جهت بهبود کیفیت آن ترکیب می‌شود. ترکیبات شیمیایی سیمان تولید شده توسط کارخانجات مختلف سیمان یکسان نبوده و دلیل اصلی آن به خاطر مشخصات متفاوت مواد اولیه قابل دسترس برای هر کارخانه می‌باشد. با توجه به اینکه بخش اعظمی از مواد خام متشکل از کربنات کلسیم است لذا حرارت دادن آن در کوره باعث ۳۵ درصد کاهش وزن ناشی از متصاعد شدن CO_2 خواهد شد. مواد اولیه اصلی مورد مصرف در صنعت سیمان شامل مخلوطی از سنگ آهک و مواد رسی است. خوراک کوره‌های سیمان بطور رایج حاوی ۷۸ تا ۸۰ درصد کربنات کلسیم (CaCO_3) و سیلیکون دی‌اکسید (SiO_2) است. در حین فرآیند حرارت‌دهی و خشک کردن در دمای بین ۱۰۰-۵۰۰°C رطوبت تبخیر شده و در دمای بین ۸۹۰-۸۵۰°C واکنش گرماگیر کلسیناسیون شروع می‌شود و کلسیم کربنات به کلسیم‌اکسید و دی‌اکسید کربن تبدیل می‌شود. انرژی اکتیواسیون برای کلسیناسیون به وسیله حرارت احتراق ناشی از سوخت تامین می‌گردد. [۲]

پیش‌گرم‌کن وظیفه گرم کردن خوراک (خشک کردن و تکلیس مواد) قبل از ورود به کوره را دارد و مجموعه‌ای از سیکلون‌ها و داکت‌های انتقال گاز (گازهای ناشی از احتراق سوخت و عمل کلسیناسیون که ذرات جامد خوراک کوره نیز در آن معلق است) می‌باشد. متناسب با ظرفیت کوره، تکنولوژی به کار رفته در دیپارتمان پخت و با توجه به بالا بودن حجم گازهای خروجی از کوره و جهت افزایش راندمان حرارتی، پیش‌گرم‌کن‌ها در چندین طبقه ساخته می‌شوند. یک پیش‌گرم‌کن به طور ساده از دو قسمت استوانه‌ای و قسمت سیکلونی تشکیل شده است به طوریکه وظیفه اصلی داکت انتقال گاز یا قسمت استوانه‌ای تبادل حرارت بین گاز داغ و ذرات خوراک معلق در آن، و وظیفه سیکلون‌ها غبارگیری و جداکردن ذرات معلق خوراک از گاز می‌باشد. در مجموعه پری‌هیتر خوراک از بالا و گاز کوره از پایین وارد شده و در جهت مخالف حرکت می‌کنند. مواد با درجه حرارت 500°C وارد پیش‌گرم‌کن شده و پس از طی مسیر سیکلون‌ها کلساینر کوره و خنک‌کن به صورت کلینکر خارج می‌گردد. مواد از طریق رایزر سیکلون ۲ به ۱، ابتدا به سیکلون شماره ۱ وارد شده و پس از طی ۴ مرحله به سیکلون ۴ وارد می‌شود. سپس به نقطه‌ای می‌رسد که دارای دو شاخه است. مواد از یک شاخه به بخش زیرین کلساینر و از شاخه‌ای دیگر به بخش رایزر کوره وارد می‌شود. حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد سوخت مصرفی در سیستم پخت در کلساینر مصرف می‌شود. در این قسمت مواد در مدت زمان ۳ ثانیه توقف تا ۹۰-۹۵٪ کلسینه می‌شوند. معمولاً مقدار هوای اضافی در کلساینر ۱۰٪ در نظر گرفته می‌شود. گاز جاری در کلساینر متشکل از هوای داغ مکیده شده از خنک‌کن از طریق کانال هوای سوم (۹۰۰- 1100°C) و گازهای خروجی از کوره 1100°C می‌باشد. [۳]

جابجایی گاز توسط فن و تزریق مواد به داخل پیش گرم کن توسط ایرلیفت صورت می گیرد. مدت زمان اقامت مواد در مجموعه سیکلون ها، در حدود ۵۰ ثانیه می باشد. دمای گاز خروجی از کوره (ورودی به پیش گرم کن) ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد است و به دنبال تبادل حرارت بین خوراک و گاز داغ، دمای گاز در طبقات بالایی پری هیتر کمتر می شود. حرارت آزاد شده احتراق به وسیله سوخت سبب کلسیناسیون مواد خام با توجه به واکنش زیر می شود:



هر چقدر درصد کلسیناسیون در در پیش گرم کن بیشتر باشد طول منطقه کلسیناسیون در کوره کاهش می یابد. واکنش های جانبی دیگری نیز در پری هیتر رخ می دهد که مضر بوده و منجر به ایجاد پدیده های سیکلی می گردد. کنترل کلسیناسیون با توجه به تاثیر آن بر مصرف سوخت، انتشار آلاینده ها و کیفیت سیمان نهایی از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین درک مکانسیم های فرآیند و پدیده های انتقال در کلساینر می تواند در تولید موثرتر و با کیفیت بیشتر سیمان به ما کمک کند.

با هدف درک تمام واکنش های شیمیایی، فرآیندهای تبادل حرارت و جریان سیال در کلساینرهای مختلف سیمان مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. فیداروس [۲] و همکاران با ارائه یک مدل ریاضی و حل عددی آن و بررسی پارامترهای فرآیندی جریان و پدیده های انتقال در کلساینر اقدام به بهینه سازی آن کردند. نتایج آن ها پیش بینی خوبی از توزیع سرعت، دما و ذرات را در بر داشت. ایلویوتا [۳] و همکاران اثر شرایط عملکردی مختلف بر کلسیناسیون، احتراق و انتشار ناکس در یک کلساینر با ناکس پایین بررسی کرده اند. هانینگ [۴،۵] و همکاران اثر پارامترهای فیزیکی مختلف را با استفاده تئوری انرژی جنبشی جریان گرانولار بر دینامیک جریان دوفازی در کلساینر را بررسی کردند. هو و همکاران نیز یک مدل سه بعدی از کلساینر را تحلیل کردند. آن ها از دیدگاه اولرین برای فاز پیوسته و از دیدگاه لاگرانژی برای فاز جامد استفاده کردند. هدف از انجام این پروژه ارائه توانایی شبیه سازی های کامپیوتری در صنعت به ویژه صنعت سیمان می باشد. همچنین در این پروژه به بررسی دینامیک جریان و پدیده های انتقالی در یک کلساینر پرداخته می شود. اثرات ناشی از تابش بر دمای محفظه کلساینر و همچنین تولید آلاینده ها در آن نیز بررسی شده است.

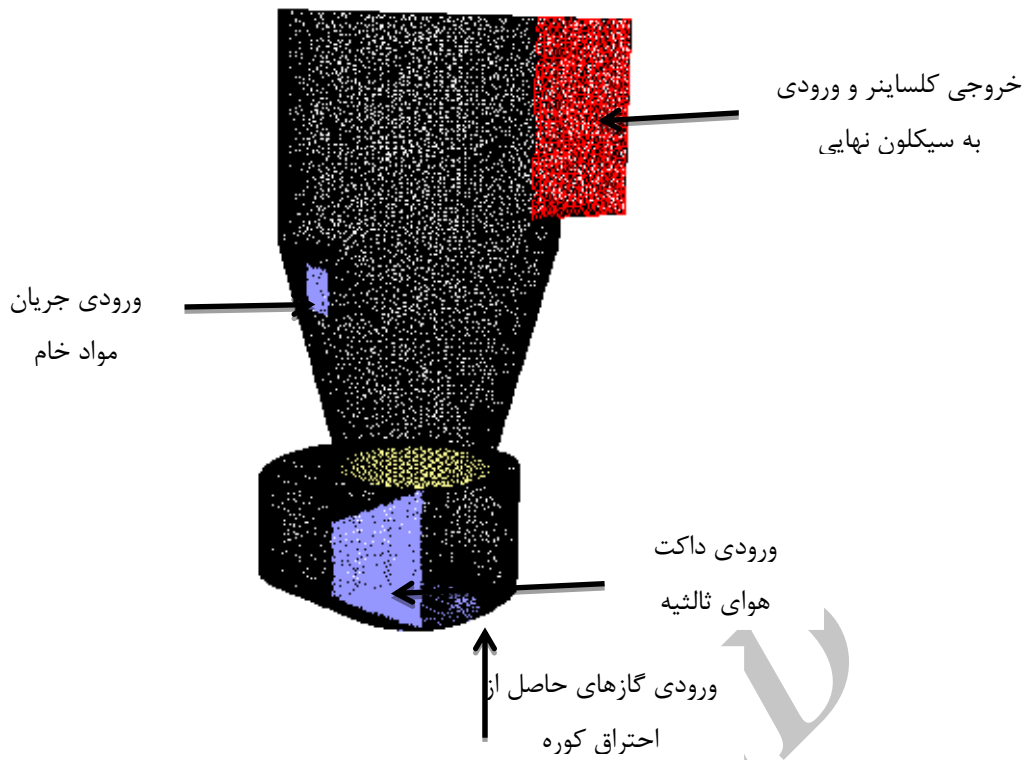
۲- مدل سازی

۲-۱- مدل سازی فیزیکی

هندسه کلساینر در شکل ۱، به کمک نرم افزار سالیدورک شبیه سازی گردیده است. ورودی های هندسه عبارتند از داکت هوای ثالثیه و ورودی گازهای خروجی از کوره می باشد. برای شبکه بندی با در نظر گرفتن زمان اجرا، هزینه های محاسباتی و پراکندگی عددی از نوع شبکه تتراهدرال استفاده شده است. شبکه تتراهدرال بیش از یک دهه است که برای بیشتر مسائل کاربردی از جمله شبیه سازی جریان های داخلی و خارجی در صنعت به کار می رود. این نوع شبکه بندی به سلول های شبکه اجازه می دهد که در نواحی متخرب از دامنه سیال به صورت خوشه ای در بیایند و در نتیجه باعث بالا رفتن سرعت محاسبات و کاهش پراکندگی عددی می گردد. تعداد کل سلول ها برابر با ۳۹۲۹۵۳ و اعتبار سنجی اندازه شبکه بندی هندسه طوری صورت گرفته است که به ازای کوچک تر نمودن شبکه تغییری در نتایج حاصل نگردد.

۲-۲- مدل سازی ریاضی

مدل مورد استفاده در این تحقیق مدل $k-\epsilon RNG$ است که از مفهوم ویسکوزیته گردابه ای جهت محاسبات خود استفاده می کند و معادلات آن به شرح زیر است:



شکل ۱- هندسه کلساینر و شرایط مرزی آن

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2)$$

برای فرآیند تابش از مدل DO استفاده گردیده است. این مدل معادله انتقال تابشی را برای یک تعداد محدود از زوایای سه‌بعدی گسسته حل می‌کند. هرکدام از این زوایا با یک جهت بردار (S) که در سیستم جهانی کارترین ثابت شده است نمایش داده می‌شوند. معادله این مدل به شرح زیر است:

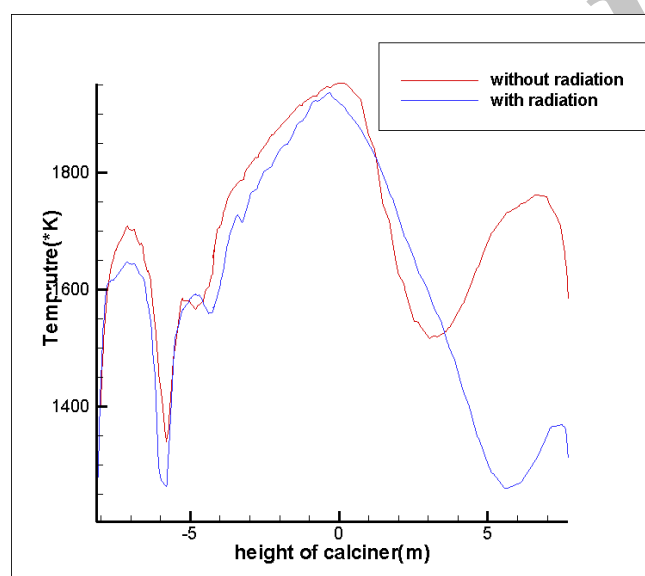
$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (3)$$

انتشار NO_x اغلب شامل مونوکسید نیتروژن (NO) و مقادیر کمتری دی اکسید نیتروژن (NO_2) و اکسید نیتروس (N_2O) می باشد. NO_x ماده ی اولیه ی مه دود فوتوشیمیایی ، تشکیل دهنده ی باران اسیدی ، یکی از عوامل تجزیه ی اوزون و به طور کلی یک آلاینده است. معادلات انتقال جرم برای گونه های NO را با احتساب جابه جایی، نفوذ، تولید و مصرف NO و گونه های وابسته، حل می کند. این روش کاملاً عمومی است و از اصول بنیادی بقای جرم حاصل گردیده است. [۶]

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_{NO}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} Y_{NO}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{NO}) + S_{NO} \quad (۴)$$

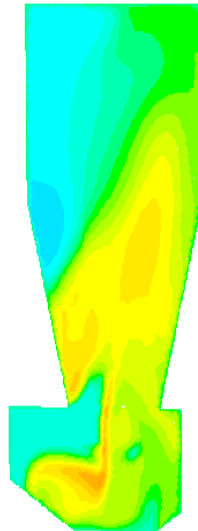
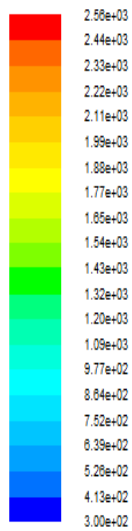
۳- نتایج

در شکل شماره ۲ مقایسه ای بر روی توزیع دما بر روی خط محوری کوره در حالت فعال بودن تابش و غیر فعال بودن آن انجام گرفته است. با در نظر گرفتن اثر تشعشع در بیشتر نواحی با دمای بالا، دما نسبت به حالت بدون تابش کاهش پیدا کرده و در نواحی با دمای پایین، مثل دیواره ها، دما افزایش می یابد. این پدیده نیز به دلیل از دست دادن انرژی ذرات با دمای بالا از طریق تابش به ذرات با دمای پایین تر رخ میدهد.



شکل ۲- تاثیر تابش بر توزیع دما در راستای عمودی کلساینر

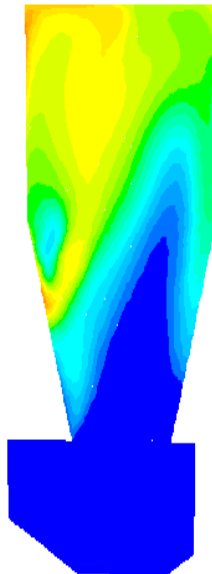
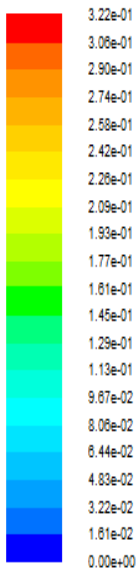
در شکل ۳ توزیع دما در کلساینر نشان داده شده است. قسمت عمده ی کلساینر (قسمت استوانه ای) در دماهای کمی بیشتر از دمای کلسیناسیون قرار دارد و به همین علت در کل کلساینر واکنش انجام می شود. در نقاطی که کلسیناسیون به علت جذب حرارتی بالا بیشتر رخ می دهد، نقاطی با دمای پایین مشاهده می شود. در این نمودار مشاهده می شود که شعله کمی به دیواره مقابل ورودی جریان مواد خام کشیده می شود این امر به علت وجود جریان مکشی از طریق ورودی جریان مواد خام به داخل کلساینر می باشد. در شکل ۴ توزیع غلظت کلسیم کربنات نشان داده شده است. کانتور این غلظت نیز موید کانتور توزیع دما می باشد.



Contours of Static Temperature (k)

Nov 02, 2013
ANSYS Fluent 14.5 (3d, dp, pbns, spe, ske)

شکل ۳- توزیع دما در راستای کلساینر (صفحه مرکزی)

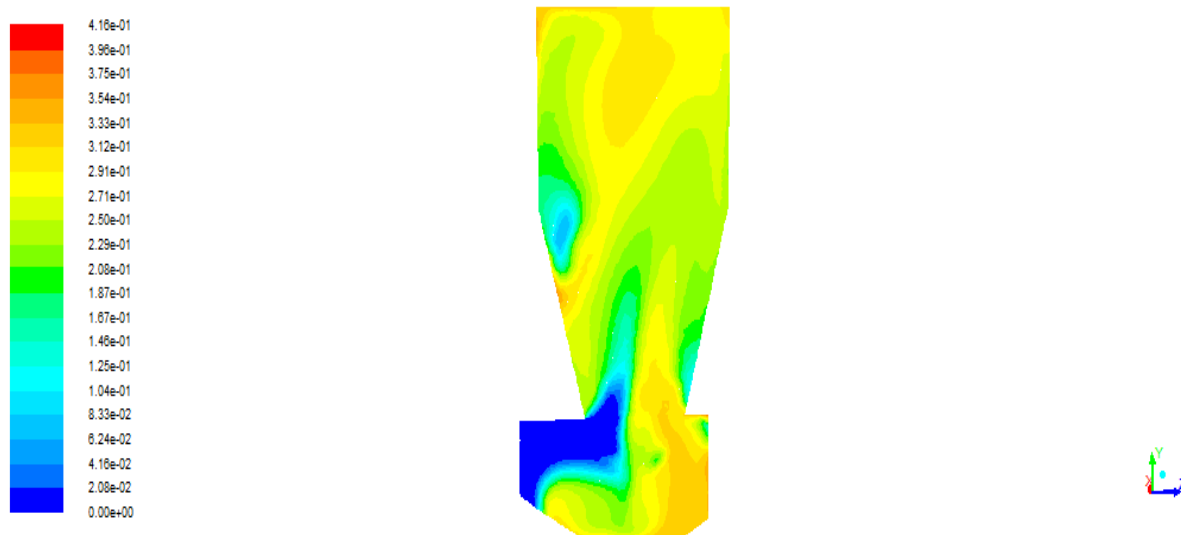


Contours of Mass fraction of cao

Nov 02, 2013
ANSYS Fluent 14.5 (3d, dp, pbns, spe, ske)

شکل ۴- توزیع غلظت کلسیم اکسید (صفحه مرکزی)

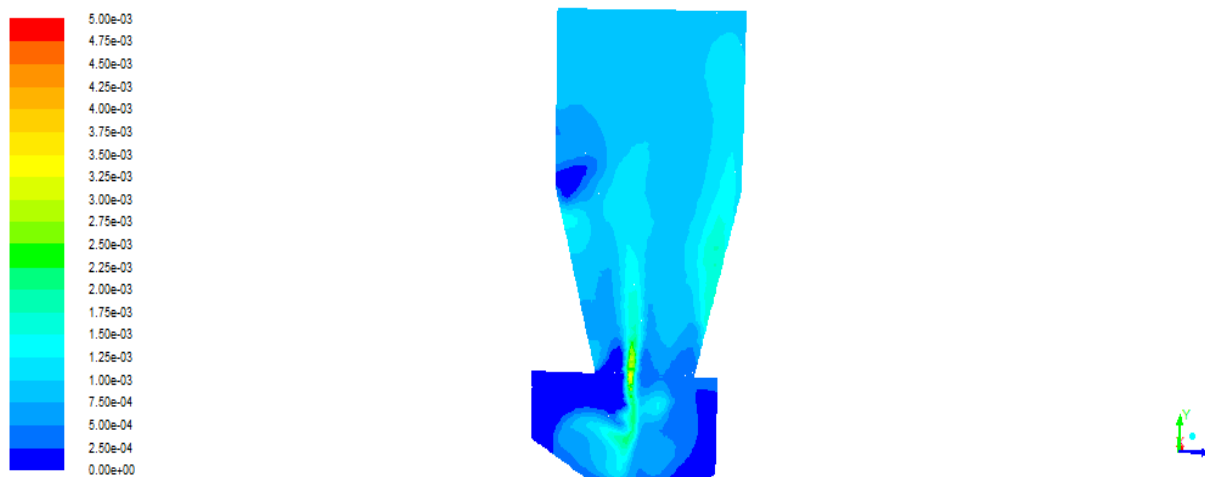
در شکل ۵ توزیع آلاینده دی‌اکسید کربن را نشان می‌دهد. بیشترین غلظت‌ها کمی بعد از ورود مواد خام، مشاهده می‌شود. این منطقه همان منطقه‌ای است که تجزیه کلسیم کربنات اتفاق می‌افتد. همچنین مشاهده می‌گردد که غلظت دی‌اکسید کربن به سمت خروجی کلساینر کاهش می‌یابد.



Contours of Mass fraction of co2

Nov 02, 2013
ANSYS Fluent 14.5 (3d, dp, pbns, spe, ske)

شکل ۵- توزیع غلظت دی‌اکسید کربن (صفحه مرکزی)



Contours of Mass fraction of Pollutant no

Nov 02, 2013
ANSYS Fluent 14.5 (3d, dp, pbns, spe, ske)

شکل ۶- توزیع غلظت NO_x (صفحه مرکزی)

در شکل ۶ توزیع ناکس را در کلساینر نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد بیشترین ناکس تولیدی در محدوده ورود جریان

سوخت و هوا و اختلاط این دو می‌باشد. با توجه به شکل ۶ به نظر می‌رشد با انجام بهینه‌سازی روی نحوه ورود جریان هوا و سوخت میزان ناکس تولیدی در کلساینر را کاهش داد.

۴- نتیجه‌گیری کلی

انتشار CO_2 به وسیله تجهیزات تولید سیمان توجهات زیست محیطی به این صنعت را بیشتر کرده است. در نتیجه تلاش‌های زیادی جهت کاهش انتشار الاینده‌ها در این صنعت صورت گرفته است. در مقاله حاضر توانایی دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان یک ابزار قدرتمند جهت تحلیل و بهبود فهم تمام واکنش‌های ترمو-شیمیایی در هندسه‌های صنعتی نشان داده شده است. درک بیشتر فرآیند می‌تواند به بهینه سازی هندسه کلساینر و شرایط عملکردی کمک کند. بهینه سازی در شرایط عملکردی منجر به کاهش مصرف سوخت و در نتیجه کاهش انتشار CO_2 می‌شود. یک مدل عددی برای پیش بینی توزیع سرعت، دما و غلظت گازها در یک کلساینر صنعتی ارائه شده است. با بررسی پارمتری انجام گرفته نتایج اصلی زیر حاصل شده است: ۱- در محل ورودی جریان هوا و سوخت بیشترین میزان ناکس تولید می‌شود. ۲- کلسیناسیون سریع در نزدیکی ورودی مخلوط مواد، غلظت CO_2 را افزایش داده این امر سبب می‌شود که میزان کلسیناسیون محدود شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بابت حمایت‌های مالی و علمی از مرکز مهندسی و تحقیقات غدیر به ویژه جناب آقای دکتر یآوری صمیمانه تشکر می‌نمایند.

مراجع

- [۱] E. Kolyfetis, C.G. Vagenas, Mathematical modeling of separate line precalciner, ZKG International ۲ (۱۹۸۸) ۵۵۹-۵۶۳.
- [۲] Fidaros DK, Baxevanou CA, Dritselis CD, Vlachos NS. Numerical modeling of flow and transport processes in a calciner for cement production. Powder Technology ۲۰۰۷; ۱۷۱: ۸۱-۹۵
- [۳] I. Iliuta, K. Dam-Johansen, A. Jensen, L.S. Jensen, Modelling of in-line low NO_x calciners — a parametric study, Chemical Engineering Science ۵۷ (۲۰۰۲) ۷۸۹-۹۰۳.
- [۴] L. Huanpeng, L. Wentie, Z. Jianxiang, J. Ding, Z. Xiujian, L. Huilin, Numerical study of gas-solid flow in a precalciner using kinetic theory of granular flow, Chemical Engineering Journal ۱۰۲ (۲۰۰۴) ۱۵۱-۱۶۰.
- [۵] Z. Hu, J. Lu, L. Huang, S. Wang, Numerical simulation study on gas-solid two-phase flow in pre-calciner, Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation ۱۱ (۳) (۲۰۰۶) ۴۴۰-۴۵۱.
- [۶] Booklet, Choosing the Appropriate Grid Type., ۲۰۰۶. Fluent ۶.۳ Theory's Guide. On the WWW, at <http://my.fit.edu/>, September. HTML file.
- [۷] S.A. Morsi, A.J. Alexander, An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems, Journal of Fluid Mechanics ۵۵ (۱۹۷۲) ۱۹۳-۲۰۸.
- [۸] H. Kobayashi, J.B. Howard, A.F. Sarofim, Coal devolatilization at high temperatures, Proc. ۱۶th Intl Symposium on Combustion, The Combustion Institute, ۱۹۷۶, pp. ۴۱۱-۴۲۵.
- [۹] M.M. Baum, P.J. Street, Predicting the combustion behavior of coal particles, Combustion Science and Technology ۳ (۱۹۷۱) ۲۳۱-۲۴۳.
- [۱۰] M.A. Field, Rate of combustion of size-graded fractions of char from a low rank coal between ۱۲۰۰K-۲۰۰۰K, Combustion and Flame ۱۲ (۱۹۶۹) ۲۳۷-۲۵۲.
- [۱۱] S.S. Sazhin, E.M. Sazhina, O. Faltsi-Saravelou, P. Wild, The $P-1$ model for thermal radiation transfer advantages and limitations, Fuel ۷۵ (۳) (۱۹۹۶) ۲۸۹-۲۹۴.
- [۱۲] M.Q. Brewster, T. Kunitomo, The optical constants of coal, char and limestone, ASME Journal of Heat Transfer ۱۰۶ (۱۹۸۴) ۶۷۸-۶۸۳.
- [۱۳] Y.R. Shivatahnu, G.M. Faeth, Generalized state relationships for scalar properties in non-premixed hydrocarbon/air flames, Combustion and Flame ۸۲ (۱۹۹۰) ۲۱۱-۲۳۰.
- [۱۴] W.P. Jones, J.H. Whitelaw, Calculations methods for reacting turbulent flows: a review, Combustion and Flame ۴۸ (۱۹۸۲) ۱-۲۶.